

UNIVERSIDAD DE GRANADA
E.T.S. DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE
INGENIERÍA
ÁREA DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN



DISEÑO DE UN MÉTODO DE ENSAYO DE LABORATORIO PARA EL
ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A FISURACIÓN DE MEZCLAS
BITUMINOSAS

DESIGN OF A LABORATORY TEST METHOD FOR THE ANALYSIS OF
ASPHALT MIX RESPONSE TO FATIGUE CRACKING

TESIS DOCTORAL

FERNANDO M. MORENO NAVARRO

Para la obtención del

GRADO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE GRANADA CON MENCIÓN DE DOCTORADO
INTERNACIONAL

Granada, enero 2013

Editor: Editorial de la Universidad de Granada
Autor: Fernando M. Moreno Navarro
D.L.: GR 1683-2013
ISBN: 978-84-9028-559-6

UNIVERSIDAD DE GRANADA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE
INGENIERÍA**



**DISEÑO DE UN MÉTODO DE ENSAYO DE LABORATORIO PARA EL
ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A FISURACIÓN DE MEZCLAS
BITUMINOSAS**

**DESIGN OF A LABORATORY TEST METHOD FOR THE ANALYSIS OF
ASPHALT MIX RESPONSE TO FATIGUE CRACKING**

TESIS DOCTORAL

Por

D. Fernando M. Moreno Navarro

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Directora de Tesis:

Dña. M^a Carmen Rubio Gámez

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Granada, enero de 2013

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de estos últimos años han sido muchos los que han contribuido, en mayor o menor medida, con la realización de este trabajo. Así, en primer lugar me gustaría agradecer de forma genérica a todas aquellas personas que no han sido nombrados en estos agradecimientos, pero que de alguna u otra forma hacen que mi vida sea tan buena que me sienta con ganas de cumplir este tipo de objetivos.

A mi directora de tesis Mayca Rubio. Son tantas cosas las que tengo que agradecerle que la dirección de esta tesis se queda en un segundo plano. No obstante, como tendría que dedicarle unos agradecimientos casi tan largos como este documento... aquí me limito a darle las gracias por tener la paciencia necesaria (que a veces no es poca) y por saberme guiar para sacar lo mejor de mi trabajo, pero sobre todo... por confiar en mí día a día y darme la oportunidad de trabajar en esto que tanto me gusta.

A todos mis compañeros del Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, por crear este ambiente tan bueno que tenemos y hacerme disfrutar de mi rutina diaria, da gusto trabajar a vuestro lado. Agradecer especialmente a aquellos que han colaborado de forma más activa en los trabajos de laboratorio (Gema García y Jaime García), así como en la elaboración de este documento (Ana Jiménez del Barco, Miguel del Sol, Jesús Martín y Miguel Pérez). No puedo pasar sin nombrar a Antonio Menéndez, por sus innumerables consejos y por tener la gran idea de crear esto en lo que trabajamos.

A la Universidad de Nottingham, y en especial a los profesores Andrew Collop y Gordon Airey, y a todos mis compañeros del NTEC, por haber contribuido en mi formación durante mi estancia y haberme hecho sentir como en casa.

A mi compañero del departamento de matemática aplicada Pedro González por su inestimable ayuda en la programación con Mathematica, y a todas las empresas y compañeros del sector con los que comparto trabajo porque hacen que no deje de aprender y se me ocurran cosas como “esta”.

A toda mi gente de “arriba” porque no dejan de cuidar de mí y de marcarme el camino para que me equivoque lo menos posible aquí “abajo”, seguro que algo de culpa habéis tenido en todo esto.

A toda mi familia, y en especial a mi hermana, porque si desde pequeño no me hubiera enseñado que el esfuerzo y la constancia son la clave del éxito, a lo mejor nunca hubiera hecho esta tesis.

Por último, agradecer a la persona que más de cerca ha vivido esta tesis, y a la que por desgracia, más tiempo le he robado por ello. Gracias Malu por tener la paciencia necesaria estos años, por tus ánimos, pero sobre todo, por darme el equilibrio que necesito para compensar tantas horas de trabajo.

TESIS DOCTORAL

Memoria presentada por D. Fernando M. Moreno Navarro para aspirar al grado de Doctor por la Universidad de Granada con mención de Doctorado Internacional.

El doctorando Fernando M. Moreno Navarro y la directora de la tesis M^a Carmen Rubio Gámez, garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por el doctorando bajo la dirección de la directora de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

Granada, 15 de Enero de 2013

Directora de la Tesis

Doctorando

Fdo.: M^a Carmen Rubio Gámez

Fdo.: Fernando M. Moreno Navarro

RESUMEN

La fisuración por fatiga es una de las principales patologías en los firmes de todo el mundo, siendo además una de las prioridades de investigación en el ámbito de la ingeniería de carreteras, y concretamente, en el diseño de mezclas bituminosas. En la actualidad existen diferentes tipos de ensayos que permiten la evaluación del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas, pero a pesar de ello, casi ninguno de estos ensayos se emplea de forma generalizada. Debido a este hecho, no existe una referencia común para evaluar el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas, al contrario de lo que ocurre en otras patologías comunes como las roderas o las relacionadas con la acción del agua.

Por un lado, algunos de los ensayos existentes y que han tenido un uso más común, a pesar de proporcionar una información bastante útil para el análisis del comportamiento mecánico de la mezcla, no terminan de ser del todo adecuados para evaluar su respuesta ante el fenómeno de fisuración. Algunos no correlacionan las condiciones carga aplicadas con las sufridas en el firme durante su vida de servicio y por tanto no es fácil extrapolar los resultados obtenidos a la respuesta real del material. Otros simplemente son ensayos de fatiga que no se centran en el estudio de la fisuración, utilizando geometrías y condiciones de carga y de ensayo que no son las más adecuadas.

Por otro lado, los ensayos que reproducen las condiciones de carga con mayor fidelidad, suelen ser bastante sofisticados en términos de aplicación de carga e instrumentación, y con un elevado coste económico de reproducción y ejecución. Debido a ello es difícil hacer extensivo su uso en el diseño de mezclas en un contexto generalizado, quedando como pruebas muy útiles para ser utilizadas de manera puntual en un laboratorio, pero sin posibilidad de comparar resultados entre mezclas bajo las mismas condiciones en diferentes centros de estudio.

En este contexto, surge la investigación llevada a cabo en la presente tesis doctoral, cuyo objetivo es desarrollar un método de ensayo para el análisis de la resistencia a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas (UGR-FACT: University of Granada Fatigue Asphalt Cracking Test).

El presente documento recoge los trabajos realizados para el desarrollo de dicho método, los cuales contemplan una etapa inicial de estudio del estado del arte, el diseño y fabricación del dispositivo a utilizar, la definición de sus características y condiciones de ensayos, los procedimientos de evaluación de los resultados, y la validación en conjunto del método de ensayo como herramienta para el análisis del comportamiento mecánico a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que el UGR-FACT es un método que permite evaluar el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas, de manera que podría ser empleado para el estudio y diseño de este tipo de materiales.

Palabras clave: Ensayos de laboratorio, mezclas bituminosas, fisuración por fatiga, diseño de mezclas

ABSTRACT

Fatigue cracking in asphalt mixes is one of the most common pavement distresses found in roads all over the world. It has thus become a major research priority in road engineering and more specifically in the design of bituminous mixes. There are currently various tests that evaluate mix response to this pathology. However, none of these tests used constitutes a reference. For this reason, there is no standardized way to evaluate mix performance in the presence of fatigue cracking. Although there are standardized tests for other common road pavement pathologies, such as rutting or those related to moisture action.

Furthermore, even though some of the more frequently used tests provide useful information regarding the mechanical behavior of the mix, they are not suitable for evaluating mix response to cracking. More specifically, the load conditions applied in these tests are often not correlated with those that the pavement is actually subjected to during its service life. Consequently, it is not easy to extrapolate the results obtained to the real response of the mix material. Other tests are simple fatigue tests that are not specifically centered on the cracking. As a result, the geometries used as well as the load and test conditions could be improved.

In addition, the tests that best reproduce the loading conditions are often very sophisticated in terms of the load and instruments used. Therefore, they have high reproduction and execution costs. It is thus difficult to generally extend their use to mix design. Consequently, these tests are useful for one-off laboratory studies, but there is no possibility of comparing the results of different mixes under the same conditions at different research centers. This is the context of the research presented in this PhD thesis, the main objective of which was to develop a test method to assess the resistance of asphalt mixes to fatigue cracking (UGR-FACT: University of Granada Fatigue Asphalt Cracking Test).

This thesis presents the research work performed to develop this new test method. It reflects an initial phase that studied the most recent advances in research in the field. This

was followed by the design and manufacture of the testing device, the definition of its characteristics and test conditions, evaluation procedures, and the validation of the test method as a tool for analyzing how asphalt mixes respond to fatigue cracking. The results obtained show that the UGR-FACT is a method that accurately evaluates mix response to this type of pavement distress,

Keywords: Laboratory test, bituminous mixtures, fatigue cracking, mix design

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	11
ÍNDICE GENERAL	13
ÍNDICE DE TABLAS	19
ÍNDICE DE FIGURAS	21
1. INTRODUCCIÓN / INTRODUCTION	33
1.1. Justificación de la Tesis Doctoral	33
1.2. Contenido y Alcance de la Investigación.....	35
2. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE	43
2.1. Introducción	43
2.2. El Fenómeno de Fisuración en Firms de Carreteras	45
2.2.1. Los Firms de Carretera.....	45
2.2.1.1. Tipos de Firms	47
2.2.1.2. Patología de los Firms	49
2.2.2. Descripción del Fenómeno de Fisuración.....	53
2.2.2.1. Fisuración Reflexiva	56
2.2.2.2. Fisuración Descendente.....	64
2.2.3. Soluciones contra el Fenómeno de Fisuración en Carreteras	69
2.2.3.1. Actuaciones sobre la Capa de Base	71
2.2.3.2. Actuaciones en sobre el Pavimento	75
2.2.3.3. Actuaciones sobre las Capas de Mezcla Bituminosa	80
2.3. Estudio del Comportamiento de Mezclas Bituminosas ante Fenómenos de Fisuración.....	83
2.3.1. Las Mezclas Bituminosas	84
2.3.1.1. Principios de Comportamiento de las Mezclas Bituminosas	86
2.3.1.2. Propiedades de las Mezclas Bituminosas	88
2.3.2. Estudio del Comportamiento a Fatiga de Mezclas Bituminosas.....	90
2.3.2.1. Factores que Afectan al Estudio de Fatiga.....	91
2.3.2.2. Influencia de los Modos de Carga en el Comportamiento a Fatiga	92
2.3.2.3. Caracterización del Comportamiento a Fatiga.....	96

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

2.3.2.4.	Límite de Resistencia a Fatiga	115
2.3.3.	El Fenómeno de “Healing” en Mezclas Bituminosas	116
2.3.4.	Estudio de la Propagación de Fisuras en Mezclas Bituminosas	121
2.3.4.1.	Modelo Clásico de Propagación de Fisuras	123
2.3.4.2.	Modelos de Daño Continuo No Local	126
2.3.4.3.	Modelo Cohesivo de Fisuración.....	129
2.4.	Métodos de Ensayo para el Estudio del Comportamiento a Fisuración de Mezclas Bituminosas.....	134
2.4.1.	Ensayos sobre Materiales Simples	137
2.4.1.1.	Ensayos a Flexión	140
2.4.1.2.	Ensayos a Tracción/Compresión.....	148
2.4.1.3.	Ensayos a Tracción Indirecta	164
2.4.1.4.	Ensayos a Cortante/Cizallamiento	167
2.4.2.	Ensayos sobre Sistemas Complejos	171
2.4.2.1.	Ensayos que Simulan los Efectos de las Variaciones Térmicas.....	172
2.4.2.2.	Ensayos que Simulan los Efectos de las Cargas del Tráfico	180
2.4.2.3.	Ensayos de Simulación Mixta (Efectos del Tráfico y Térmicos)	199
2.4.2.4.	Ensayos a Escala que Reproducen el Tráfico Rodado	210
2.4.3.	Normativa de Ensayos	226
2.4.3.1.	Normativa de Ensayos Aplicable en España	227
2.5.	Conclusiones al Estudio del Estado del Arte. Motivación de la Tesis.....	235
3.	OBJETIVOS / OBJECTIVES	247
3.1.	Introducción	247
3.2.	Objetivo Principal.....	247
3.3.	Objetivos Secundarios	248
4.	METODOLOGÍA.....	257
4.1.	Introducción	257
4.2.	Diseño del Dispositivo de Ensayo	258
4.2.1.	Condicionantes de Diseño	258
4.2.2.	Diseño del Prototipo.....	260
4.3.	Definición de las Características de Ensayo.....	267
4.3.1.	Características de los Materiales a Ensayar y Geometría de las probetas	267

Índice General

4.3.2.	Condiciones de Carga	268
4.3.2.1.	Simulación de las Solicitaciones del Tráfico	268
4.3.2.2.	Simulación de las Solicitaciones Térmicas	274
4.3.3.	Condiciones de Ensayo	276
4.3.3.1.	Temperatura	276
4.3.3.2.	Humedad.....	277
4.3.3.3.	Envejecimiento.....	278
4.3.4.	Instrumentación y Toma de Datos. Criterio de Fallo	279
4.4.	Evaluación del Comportamiento a Fisuración.....	280
4.4.1.	Enfoque Fenomenológico. Ley de Fisuración por Fatiga.....	281
4.4.2.	Enfoque de la Energía Disipada. Parámetro de Daño Medio	283
4.4.3.	Estudio de las Etapas del Proceso de Fisuración. Umbrales de Daño.....	294
4.4.3.1.	Estudio del “Energy Ratio”	295
4.4.3.2.	Estudio del “Displacement Ratio”	296
4.4.3.3.	Definición de los Umbrales de Daño a Fisuración	301
4.5.	Validación del Método de Ensayo	303
4.5.1.	Materiales.....	304
4.5.2.	Plan de Ensayos.....	309
4.5.2.1.	Análisis de la Repetibilidad del Método de Ensayo UGR-FACT	310
4.5.2.2.	Evaluación de los Parámetros de Ensayo “Displacement Ratio” y “Parámetro de Daño Medio”	313
4.5.2.3.	Análisis de la Sensibilidad de UGR-FACT a las Condiciones de Ensayo.....	315
4.5.2.4.	Análisis de la Sensibilidad de UGR-FACT a los Materiales Evaluados.....	317
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	323
5.1.	Introducción	323
5.2.	Fabricación del Prototipo de Ensayo	323
5.3.	Definición de las Características del Método de Ensayo	332
5.3.1.	Características de las Probetas	333
5.3.2.	Amplitud de Carga.....	337
5.3.2.1.	Definición del Vehículo Tipo	338
5.3.2.2.	Definición del Tipo de Eje y Número de Neumáticos	340
5.3.2.3.	Definición del Peso por Eje	341

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

5.3.2.4.	Definición de la Superficie de Contacto Rueda/Pavimento	344
5.3.2.5.	Determinación de las Tensiones de Referencia	347
5.3.2.6.	Determinación del Rango de Carga a Aplicar en UGR-FACT	349
5.3.3.	Frecuencia de Ensayo. Periodos de Descanso	350
5.3.4.	Temperatura de Ensayo.....	354
5.3.5.	Humedad	356
5.3.6.	Envejecimiento.....	358
5.3.7.	Instrumentación y Toma de Datos. Criterio de Fallo.....	358
5.4.	Validación del Método de Ensayo UGR-FACT.....	363
5.4.1.	Análisis de la Repetibilidad	363
5.4.2.	Evaluación de los Parámetros de Ensayo	366
5.4.3.	Análisis de la Sensibilidad a las Condiciones de Ensayo	391
5.4.3.1.	Frecuencia	391
5.4.3.2.	Temperatura.....	402
5.4.3.3.	Distancia entre Apoyos	412
5.4.3.4.	Evaluación de la Influencia de las Condiciones de Ensayo en el Comportamiento a Fisuración de Mezclas Bituminosas.....	426
5.4.4.	Análisis de la Sensibilidad de los Materiales Evaluados	428
5.4.4.1.	Naturaleza del Árido	428
5.4.4.2.	Tipo de Ligante	438
6.	CONCLUSIONES / CONCLUSIONS.....	451
6.1.	Introducción	451
6.2.	Conclusiones Finales	452
	Dispositivo de ensayo UGR-FACT	452
	Características del Método de Ensayo UGR-FACT	452
	Evaluación del Comportamiento a Fisuración.....	454
	Validación del Método de Ensayo UGR-FACT	455
7.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	465
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	469
ANEXO – I: University of Granada Fatigue Cracking Asphalt Test (Borrador de Norma UGR-FACT)..		511
A-I. 1.	Objeto y Campo de Aplicación	511
A-I. 2.	Normas para Consulta	511

Índice General

A-I. 3. Términos, Definiciones, Símbolos y Abreviaturas.....	512
A-I. 4. Principio.....	514
A-I. 5. Aparatos.....	516
A-I. 6. Preparación de la Probeta	519
A-I. 7. Procedimientos	520
A-I. 8. Cálculos y Expresión de Resultados.....	523
A-I. 8. 1. Cálculos	523
A-I. 8.2. Expresión de Resultados	528
A-I. 9. Informe de Ensayo	529
A-I. 10. Precisión	530
ANEXO – II: Pruebas para Futuras Líneas de Investigación	535
A-II. 1. Estudio de la Influencia de los Periodos de Descanso.....	535
A-II. 2. Estudio del Comportamiento a Fisuración por Fatiga de Materiales Compuestos.....	538

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Soluciones contra el fenómeno de fisuración en carreteras.....	70
Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de las soluciones contra el fenómeno de fisuración.	82
Tabla 3. Comparación del modo de carga utilizado. (Tangella et al. 1990).....	95
Tabla 4. Ensayos para la evaluación del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas.....	137
Tabla 5. Dimensiones de probetas y condiciones de ensayos comunes de SE(B).	142
Tabla 6. Propiedades de los áridos utilizados en la fabricación de la mezcla AC 22 S.	307
Tabla 7. Propiedades de los áridos utilizados en la fabricación de la mezcla AC 16 S.	307
Tabla 8. Propiedades de los áridos utilizados en la fabricación de la mezcla BBTM 11A.	307
Tabla 9. Propiedades de los ligantes utilizados en la fabricación de las mezclas.....	308
Tabla 10. Características del polvo de neumático utilizado en la fabricación de las mezclas.	308
Tabla 11. Características mecánicas de las mezclas empleadas en el estudio.	309
Tabla 12. Plan de ensayos para el estudio de la repetibilidad del ensayo UGR-FACT.	312
Tabla 13. Plan de ensayos para la evaluación de los parámetros displacement ratio y daño medio	315
Tabla 14. Plan de ensayo para el estudio de la sensibilidad a las condiciones de ensayo del método UGR-FACT.	316
Tabla 15. Plan de ensayos para la evaluación de la influencia del árido en el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas.	318
Tabla 16. Plan de ensayos para la evaluación de la influencia del ligante en el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas.	319
Tabla 17. Clasificación de vehículos pesados según la FHWA 2001.....	338
Tabla 18. Número medio de ejes y tipo de neumático utilizado, en función de la clase de vehículo. (LTPP 2011).....	340
Tabla 19. Longitud de contacto rueda/pavimento máxima y mínima representativa según el tipo de eje y la clase de vehículo. (LTPP 2011).....	347
Tabla 20. Rangos de tensión de referencia a aplicar durante ensayos de fatiga en mezclas bituminosas en función de la clase de vehículo y tipo de eje.....	348
Tabla 21. Valores de tensión de referencia al paso de un vehículo de clase 9 de la FHWA.....	348
Tabla 22. Rango de cargas de ensayo de referencia.	349
Tabla 23. Distancias entre ejes en función de la clase de vehículo.	351
Tabla 24. Frecuencias a aplicar durante los ensayos de laboratorio para reproducir las condiciones del tráfico.....	351
Tabla 25. Periodos de descanso cortos a aplicar durante los ensayos de fatiga de mezclas bituminosas.	352
Tabla 26. Periodos óptimos de descanso en función de la frecuencia de ensayo utilizada.....	352
Tabla 27. Condiciones de inmersión para la evaluación de la humedad en el comportamiento mecánico de mezclas bituminosas.....	357
Tabla 28. Acondicionamientos para simulación de envejecimiento a nivel de laboratorio. (Bell et al. 1994b)	358

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

Tabla 29. Resultados de repetibilidad de la mezcla AC 22 S.....	364
Tabla 30. Resultados de repetibilidad de la mezcla AC 16 S.....	364
Tabla 31. Resultados de repetibilidad de la mezcla BBTM 11A con BMAVC.....	364
Tabla 32. Resultados de repetibilidad de la mezcla BBTM 11A con BM3c.....	364
Tabla 33. Estimación de los ciclo N_i y N_M a partir de los valores de Energy y Displacement Ratio....	399
Tabla A-I. 1. Símbolos y definiciones.....	514
Tabla A-I. 2. Valores de referencia de los parámetros de ensayo.....	522
Tabla A-I. 3. Resultados de repetibilidad del ensayo.....	531

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las capas del firme.....	47
Figura 2. Tipos de Firmes.....	48
Figura 3. Patologías de los firmes I: desprendimientos de material. (CMRPC 2006).....	50
Figura 4. Patologías de los firmes II: movimientos de material. (LCPC 1998)	51
Figura 5. Patología de los firmes III: deformaciones. (LCPC 1998).....	52
Figura 6. Clasificación de las fisuras de un firme según su aspecto (Pérez 2008).	55
Figura 7. Esfuerzos que provocan la fisuración del firme. (Hu et al. 2010; Lytton 1989)	57
Figura 8. Modos de fisuración según el movimiento de los labios de la fisura. (Laveissiere 2002)	58
Figura 9. Modos de fisuración asociados a las sollicitaciones del firme. (Laveissiere 2002)	59
Figura 10. Condiciones de la interfaz base/pavimento para la propagación de la fisura. (Goacolou & Marchand 1982).....	60
Figura 11. Valores del factor de intensidad de tensiones en función de la longitud relativa de la fisura (c=longitud de la fisura/d=espesor total de la capa). (Lytton 1989).....	61
Figura 12. Testigos que muestran la existencia del fenómeno de fisuración descendente (Proyecto Fenix 2010).	65
Figura 13. Aspecto de la fisuración descendente en la superficie de un firme (Proyecto Fenix 2010).	65
Figura 14. Distribución de cargas transmitidas por el neumático sobre el pavimento. (Molenaar 2004)	67
Figura 15. Principales soluciones de pre-fisuración ordenada. (Vanelstraete & Bondt 1997).....	73
Figura 16. (a) Método CRAFT (Eurovia-Vinci); (b) Junta activa. (Sacer); (c) Prefisuración OLIVIA. (STBA 1999).	74
Figura 17. Ejemplos de equipos de prefisurado (Sacyr, Quad prefisurador y dispositivo Black Tec) .	74
Figura 18. (a) Geotextil impregnado (Geotexan 2012); (b) Geomalla (Geosyntech 2012; Tensar 2002; 6DSolutions 2001); (c) Malla metálica (Bekaert 2002; Reflex 2002).....	78
Figura 19. Sellado de fisuras mediante ponteo. (Yildirim et al. 2006)	79
Figura 20. Detalle de mezcla bituminosa.	85
Figura 21. Respuesta elástica, viscosa y visco-elástica de un material sometido a una carga de tensión constante (Van der Poel 1954).....	87
Figura 22. Diferentes formas de carga a aplicar en ensayos de fatiga.....	91
Figura 23. Evolución de la tensión y deformación en función de los modos de carga.	93
Figura 24. Curva típica del incremento de fisura en función del factor de intensidad de tensiones. .	99
Figura 25. Comportamiento elástico y visco-elástico bajo condiciones de carga y descarga.	103
Figura 26. Ejemplo de lazo de histéresis, y desfase entre la tensión aplicada y la deformación producida sobre un material visco-elástico.....	104
Figura 27. Evolución de la energía disipada por ciclo de carga, en función del modo de carga aplicado.	105
Figura 28. Determinación de la energía de deformación disipada. (Zhang et al. 2001)	109

Figura 29. Ley de deformación con respecto al tiempo.	110
Figura 30. Estudio del tipo de fisuración en función de la energía de deformación disipada acumulada.....	111
Figura 31. Energía de disipada compuesta por energía de disipación visco-elástica y daño producido. (Behnia et al. 2011)	112
Figura 32. Curva clásica de Wöhler. (Wöhler 1968)	115
Figura 33. Esquema de la frecuencia de aplicación de cargas en laboratorio y en el firme. (Castro & Sanchez 2006)	118
Figura 34. Tipos de periodos de descanso.....	119
Figura 35. Influencia de los periodos de descanso en la evolución del módulo.....	120
Figura 36. Variación del factor de intensidad de tensiones.....	124
Figura 37. Modelización por elementos finitos de propagación de fisura mediante modelo de daño continuo.....	128
Figura 38. Representación del modelo de Dugdale.	130
Figura 39. Esquema analógico del modelo cohesivo de fisuración. (Uzan & Levenberg 2001).....	132
Figura 40. Tipos de sollicitación aplicada en ensayos de materiales simples.....	139
Figura 41. Ensayo de flexión en probeta semicircular. (Clyne et al. 2009).....	140
Figura 42. Ensayo a flexión de viga con entalla. (Wagoner et al. 2005b)	142
Figura 43. Esquema ensayo fisuración de flexión CEDEX.	143
Figura 44. Esquema del Dispositivo de Ensayo: (S) Probeta; (C) Cámara; (L) Punto de Luz, (I) Dispositivo de Grabación y Almacenamiento de Datos. (Hartman & Gilchrist 2004)	145
Figura 45. Imagen captada del proceso de fisuración. (Hartman & Gilchrist 2004)	146
Figura 46. Grietas de tracción en la parte inferior de la probeta debido a la aplicación de las cargas centrales. (Hartman & Gilchrist 2004).....	146
Figura 47. Resultados del Ensayo. (Hartman & Gilchrist 2004)	147
Figura 48. Imágenes de la evolución del proceso de fisuración.	148
Figura 49. Ensayo de la universidad técnica de Viena. (Tschegg et al. 1993)	149
Figura 50. Esquema dispositivo de ensayo AASHTO TP10-93. (Hung & Vinson 1994).....	150
Figura 51. Resultados ensayo AASHTO TP10-93. (Hung & Vinson 1994).....	151
Figura 52. Esquema ensayo Caltrans. (Shatnawi 1996).....	152
Figura 53. Esquema de fabricación de probetas para ensayo BTD. (Pérez Jiménez et al. 2007).....	153
Figura 54. Detalle ensayos BDT. (Pérez Jiménez et al. 2007).....	154
Figura 55. Esquema ensayo de tensión compacta. (Collop et al. 2004).....	155
Figura 56. Detalle de ensayo de tensión compacta. (Collop et al. 2004)	155
Figura 57. Imagen de propagación de la fisura en el ensayo de tensión compacta. (Collop et al. 2004)	156
Figura 58. Dimensiones de probeta para ensayo de disco compacto a tracción DC(T). (Wagoner et al. 2005c)	157
Figura 59. Influencia de la geometría de la probeta en la propagación de la fisura en el ensayo DC(T). (Wagoner et al. 2005c)	158
Figura 60. Detalle del ensayo DC(T), y de la probeta tras ser ensayada. (Wagoner et al. 2005c)	158
Figura 61. Detalle del ensayo de tracción directa de la UPC. (Pérez Jiménez et al. 2007)	160

Índice de Figuras

Figura 62. Detalle del ensayo Fénix. (Valdés et al. 2009)	161
Figura 63. Esquema de Ensayo y Gráfica de Resultados del Ensayo Fénix. (Valdés et al. 2009)	162
Figura 64. Ensayo de tracción Indirecta.	164
Figura 65. Esquema de ensayo a tracción indirecta. (Wysong 2004)	165
Figura 66. Detalle ensayo de disco con entalla. (Abdulshafi 1983)	167
Figura 67. Detalle del ensayo 3MSG. (Laveissiere 2002)	168
Figura 68. Esquema del ensayo de cizallamiento RCD. (Sousa et al. 1996).....	170
Figura 69. Detalle del ensayo RCD. (Sousa et al. 1996).....	170
Figura 70. Esquema ensayo de cizallamiento de la Universidad de Delft. (De Bondt 1999).....	171
Figura 71. Esquema de ensayo del fisurómetro E/G. (Di Benedetto et al. 1993b)	173
Figura 72. Detalle del dispositivo fisurómetro E/G. (Di Benedetto et al. 1993b)	174
Figura 73. Detalle ensayo BRRC. (Clauwaert & Francken 1989)	175
Figura 74. Esquema ensayo de la Universidad de Illinois. (Dempsey 2002).....	176
Figura 75. Esquema ensayo “Overlay Tester”	177
Figura 76. Detalle ensayo “Overlay Tester”	179
Figura 77. Detalle probeta “Overlay Tester”.	179
Figura 78. Detalle ensayo de la Universidad Tecnológica de Cracovia. (Grzybowska et al. 1993) ...	181
Figura 79. Esquema ensayo de la Universidad de Delft. (De Bondt & Saathof 1993).....	182
Figura 80. Esquema ensayo de la Universidad de Tecnológica de Israel. (Livneh et al. 1993)	183
Figura 81. Probetas utilizadas en el ensayo de la Universidad Tecnológica de Israel. (Livneh et al. 1993)	184
Figura 82. Esquema de ensayo a cortante del NTEC. (Brown et al. 1985)	185
Figura 83. Esquemas de ensayos de fisuración por fatiga del NTEC (I). (Brown et al. 1985)	186
Figura 84. Esquemas ensayos de fisuración por fatiga del NTEC (II). (Brown et al. 2001; Caltabiano & Brunton 2001).....	187
Figura 85. Detalle de probetas tras ser ensayadas. (Brown et al. 2001).....	188
Figura 86. Esquema ensayo del University College de Dublín. (Hartman et al. 2001)	189
Figura 87. Imágenes obtenidas tras el ensayo del University College de Dublín. (Hartman et al. 2001)	190
Figura 88. Esquema de aplicación de sollicitación de ensayo del University College de Dublín. (Gibney et al. 2002).....	191
Figura 89. Detalle de ensayo de fisuración ascendente del University College de Dublín. (Gibney et al. 2002)	191
Figura 90. Detalle de ensayo de fisuración descendente del University College de Dublín. (Gibney et al. 2002).....	192
Figura 91. Detalle del ensayo del Instituto Aeronáutico de Brasil. (Montestruque et al. 2004)	193
Figura 92. Imágenes obtenidas durante el ensayo del Instituto Aeronáutico de Brasil. (Montestruque et al. 2004).....	194
Figura 93. Resultados obtenidos con probetas con y sin sistema anti-fisuras. (Montestruque et al. 2004)	195
Figura 94. Esquema ensayo de la Universidad de Florida. (Sobhan et al. 2004)	196
Figura 95. Resultados de ensayo con y sin sistema anti-fisuras. (Sobhan et al. 2004).....	197

Figura 96. Detalle del ensayo de la Universidad Tecnológica de Amirkabir. (Khodaii et al. 2009)	198
Figura 97. Imágenes captadas durante ensayo con y sin sistema anti-fisuras. (Khodaii et al. 2009)	199
Figura 98. Detalle del ensayo de retracción-flexión del LRPC. (Dumas & Vecoven 1993)	200
Figura 99. Esquema de ensayo MEFISTO. (Tamagny et al. 2004)	201
Figura 100. Detalle del ensayo MEFISTO. (Tamagny et al. 2004).....	202
Figura 101. Esquema ensayo SIFIRE. (Florence 2005)	203
Figura 102. Detalle del ensayo WRC de la UPM. (Gallego & Prieto 2006)	205
Figura 103. Detalle del sistema de distribución de cargas del ensayo WRC. (Gallego & Prieto 2006)	206
Figura 104. Detalle de la probeta ensayada. (Gallego & Prieto 2006)	206
Figura 105. Esquema del ensayo de la Universidad de Québec. (Guissi 2005).....	207
Figura 106. Detalle del ensayo de fisuración de la India. (Bhosale & Mandal 2007)	209
Figura 107. Desplazamiento impuesto en el ensayo. (Bhosale & Mandal 2007).....	210
Figura 108. Primeros simuladores de tráfico a escala del Reino Unido. (Brown & Brodrick 1999) ...	211
Figura 109. Simuladores de tráfico rectilíneos (I). (AFD40 2011)	213
Figura 110. Simuladores de tráfico rectilíneos (II). (AFD40 2011)	214
Figura 111. Simuladores de tráfico curvos o mixtos. (AFD40 2011)	215
Figura 112. Detalle del ensayo MMLS3. (Lee 2003)	216
Figura 113. Esquema de ensayo MMLS3. (Lee 2003).....	217
Figura 114. Esquema de la pista de ensayos del NTEC. (Brown & Brodrick 1999)	218
Figura 115. Detalle de la pista de ensayos del NTEC. (Brown & Brodrick 1999).....	219
Figura 116. Esquema del dispositivo de ensayo FABAC. (Pérez 2008).....	220
Figura 117. Detalle del simulador de tráfico FABAC. (Pérez 2008)	221
Figura 118. Instrumentación de la pista de ensayos FABAC. (Pérez 2008)	222
Figura 119. Detalle de los resultados obtenidos tras el ensayo FABAC. (Pérez 2008)	223
Figura 120. Detalle de la pista de ensayos del simulador BAST. (AFD40 2011)	223
Figura 121. Detalle del sistema de aplicación de carga del simulador de tráfico alemán BAST. (AFD40 2011).....	224
Figura 122. Detalle de la instrumentación de la pista de ensayos del simulador BAST. (AFD40 2011)	225
Figura 123. Detalle de la pista de simulación de tráfico del CEDEX.	225
Figura 124. Geometría de ensayo de flexión en probeta semicircular según UNE-EN 12697-44. (AENOR 2011)	228
Figura 125. Dimensiones de la probeta a utilizar en norma UNE-EN 12697-44. (AENOR 2011)	229
Figura 126. Criterios de validación del resultado del ensayo. (AENOR 2011)	229
Figura 127. Principio de ensayo UTST. (BSi 2012)	232
Figura 128. Principio de ensayo TSRST. (BSi 2012).....	233
Figura 129. Principio de ensayo RT. (BSi 2012)	233
Figura 130. Principio de ensayo TCT. (BSi 2012)	233
Figura 131. Principio de ensayo UCTST. (BSi 2012)	234
Figura 132. Equipo Cooper para ejecución de la normativa EN 12697-46. (Cooper Technology 2012)	234

Índice de Figuras

Figura 133. Puntos desfavorables que aceleran la aparición de fisuras en el pavimento.	259
Figura 134. Diseño del mecanismo de actuación del dispositivo de ensayo.....	261
Figura 135. Distancia de separación entre apoyos para simular un defecto estructural o bache (a), una junta o pre-fisura (b), o una fisura (c), en la capa de base inferior al pavimento bituminoso. ..	262
Figura 136. Simulación del estado tensional producido por el paso del tráfico.....	263
Figura 137. Representación del plano de control de deformaciones bajo el estado tensional producido en el volumen representativo de estudio.....	264
Figura 138. Zona de colocación de los medidores de deformaciones producidas en el volumen de estudio.....	265
Figura 139. Disposición de toma de datos para el control de la evolución de la macro-fisura del material.	265
Figura 140. Dimensiones estimadas del dispositivo diseñado (cm).....	266
Figura 141. Esquema de las tensiones transmitidas sobre un punto del pavimento por el paso del tráfico.	269
Figura 142. Forma de la carga aplicada sobre un punto del pavimento por el paso de un eje (Baek 2010).	270
Figura 143. Función Senoverso.	271
Figura 144. Superficie de contacto rueda/pavimento circular (izq.) y rectangular (dcha.).....	272
Figura 145. Tensiones de tracción en el pavimento provocadas por los cambios de temperatura. .	275
Figura 146. Ejemplo de ley de fisuración por fatiga.	282
Figura 147. Concepto de trabajo realizado sobre un sistema.	284
Figura 148. Evolución del daño en el material reflejado en los cambios de histéresis.....	285
Figura 149. Evolución de los ciclos de histéresis en un ensayo real.	286
Figura 150. Comparación entre la energía disipada y el RDEC durante el desarrollo de un ensayo. .	292
Figura 151. Evolución del RDEC acumulado en un ensayo.	293
Figura 152. Evolución del parámetro de daño medio con respecto al nivel de carga aplicado.	293
Figura 153. Evolución del Energy Ratio en función del número de ciclos.....	295
Figura 154. Definición del coeficiente de Poisson considerando desplazamientos en 2D.	296
Figura 155. Deformaciones plásticas sufridas en la zona superior de la probeta sin fisurar, y aparición posterior de la fisura en el material con la permanencia de las deformaciones plásticas.....	298
Figura 156. Evolución de los desplazamientos sufridos en el volumen de estudio debido al proceso de fisuración por fatiga.	299
Figura 157. Evolución del Displacement Ratio en función del número de ciclos.	300
Figura 158. Umbrales de daño a partir del cálculo de la energía disipada acumulada.....	302
Figura 159. Ejemplo de los umbrales de daño de una mezcla bituminosa para diferentes niveles de carga.....	303
Figura 160. Granulometría de la mezcla AC 22 S.	305
Figura 161. Granulometría de la mezcla AC 16 S.	305
Figura 162. Granulometría de la mezcla BBTM 11A.	306
Figura 163. Conceptos de repetibilidad y reproducibilidad.	311
Figura 164. Imagen del dispositivo de ensayo fabricado.	324
Figura 165. Imagen de alzado, planta y perfil, del dispositivo fabricado.	325

Figura 166. Detalle general de la base y de cada uno de sus componentes desmontados.	326
Figura 167. Detalle del sistema de perno y puntos de fijación, y del tope al final del carril para evitar la salida del apoyo.	326
Figura 168. Detalle de los vástagos y de las piezas de posicionamiento de los LVDT verticales.	327
Figura 169. Detalle de la colocación de los carros sobre la base.	328
Figura 170. Detalle de los apoyos deslizantes y de cada una de las piezas que los forman.....	328
Figura 171. Detalle de colocación de los LVDT horizontales (izq.) y de la varilla de acero utilizada para ello (dcha.).	329
Figura 172. Posicionamientos de los apoyos posibles para la ejecución del ensayo.	329
Figura 173. Detalle del cabezal de aplicación de carga.	330
Figura 174. Detalle de posicionamiento de los LVDT para medición de deformaciones verticales sobre el cabezal de carga.....	330
Figura 175. Detalle del sistema de unión del dispositivo a la prensa.....	331
Figura 176. Preparación de la resina epoxi empleada para la fijación de la probeta.	331
Figura 177. Detalle de la fijación de la probeta a los apoyos.	332
Figura 178. Detalle de la fabricación de probetas prismáticas para la ejecución del ensayo.	334
Figura 179. Detalle de probeta compuesta por un micro-aglomerado BBTM 11A en capa de rodadura, un geotextil para retardar la propagación de la fisura, y una mezcla semidensa AC16 S.	335
Figura 180. Detalle de la malla de referencia dibujada en el lateral de la probeta.	336
Figura 181. Porcentaje de vehículos de cada clase en datos de aforos de diferentes años en EE.UU. (LTPP 2011)	339
Figura 182. Distribución porcentual por clase de vehículos en los principales tipos de vías de EE.UU tanto en ámbito urbano, como rural. (Hajek et al. 2005)	339
Figura 183. Instrumentos de medición de aforos de peso dinámicos. (Marcobal 2012)	341
Figura 184. Frecuencia normalizada de las cargas por eje transmitidas en función del tipo de eje en EE.UU. (LTPP 2011).....	342
Figura 185. Distribución porcentual de la carga por eje según el tipo de eje en Francia. (Balay & Brosseaud, 2010).....	343
Figura 186. Consideración de eje de carga estándar para cualquier tipo de vehículo pesado. (Balay & Brosseaud, 2010).....	344
Figura 187. Magnitud de las tensiones verticales de un mismo camión cargado (izq.) y en vacío (dcha.). (De Beer et al., 2004)	345
Figura 188. Diferencia en la presión de inflado de los ejes tractores y el resto de ejes. (De Beer et al., 2004).....	346
Figura 189. Esquema de frecuencia de paso y periodos de descanso debido a la circulación de vehículos sobre el pavimento.	350
Figura 190. Datos de la distribución horaria de tráfico en un aforo de EE.UU. (NCHRP 2004)	353
Figura 191. Temperaturas medias anuales en España en los años 2008 y 2009. (INE 2011)	355
Figura 192. Temperaturas máximas y mínimas en España en el año 2009. (INE 2011).....	355
Figura 193. Ejemplo de registro de datos en cada ciclo.	359
Figura 194. Detalle de la propagación del daño por fisuración en el volumen representativo de estudio, y de la aleatoriedad y dispersión del proceso en 3D.	360

Índice de Figuras

Figura 195. Control de la evolución del daño a fisuración producido en el material mediante imágenes.	361
Figura 196. Detalle de la ejecución del ensayo, el final, y la zona de colocación de los LVDT que analiza el volumen representativo de estudio.	362
Figura 197. Evolución del ángulo de fase entre la carga y los desplazamientos verticales y horizontales del volumen de estudio.	363
Figura 198. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BM 3c ensayada a 0,5 kN.	367
Figura 199. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BM 3c ensayada a 0,75 kN.	367
Figura 200. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BM 3c ensayada a 1,0 kN.	368
Figura 201. Comparativa Energy Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A BM3c... ..	369
Figura 202. Comparativa Displacement Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A BM3c.	370
Figura 203. Regresión lineal entre el daño a macro fisuración el módulo de rigidez y la energía disipada, para la mezcla BBTM 11A BM3c ensayada a 0,5 kN, 0,75 kN y 1,0 kN de amplitud de carga.	372
Figura 204. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70 ensayada a 0,5 kN.	373
Figura 205. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70 ensayada a 0,75 kN.	373
Figura 206. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70 ensayada a 1,0 kN.	374
Figura 207. Comparativa Energy Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A B50/70.	375
Figura 208. Comparativa Displacement Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A B50/70.	376
Figura 209. Regresión lineal entre el daño a macro fisuración, el módulo de rigidez y la energía disipada, para la mezcla BBTM 11A B50/70 ensayada a 0,5 kN, 0,75 kN y 1,0 kN de amplitud de carga.	378
Figura 210. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BMAVC ensayada a 0,5 kN.	379
Figura 211. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BMAVC ensayada a 0,75 kN.	379
Figura 212. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BMAVC ensayada a 1,0 kN.	380
Figura 213. Comparativa EnergyRatio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A BMAVC.	381
Figura 214. Comparativa Displacement Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A BMAVC.	382
Figura 215. Regresión lineal entre el daño a macro fisuración, el módulo de rigidez y la energía disipada, para la mezcla BBTM 11A BMAVC ensayada a 0,5 kN, 0,75 kN y 1,0 kN de amplitud de carga.	384

Figura 216. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5% PNFU ensayada a 0,5 kN.	385
Figura 217. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5% PNFU ensayada a 0,75 kN.....	385
Figura 218. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5% PNFU ensayada a 1,0 kN.	386
Figura 219. Comparativa Energy Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5% PNFU.	387
Figura 220. Comparativa Displacement Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5% PNFU.	388
Figura 221. Regresión lineal entre el daño a macro fisuración, el módulo de rigidez y la energía disipada, para la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5%PNFU ensayada a 0,5 kN, 0,75 kN y 1,0 kN de amplitud de carga.....	390
Figura 222. Ley de fisuración por fatiga de las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 1 Hz y 5 Hz..	392
Figura 223. Energía Disipada por las mezclas AC 16 y AS 22 ensayadas a 1 Hz y 5 Hz.	394
Figura 224. Valores de RDEC acumulado obtenidos por las mezclas AC 16 y AC22 ensayadas a 1 Hz y 5 Hz.	395
Figura 225. Estudio del parámetro de daño medio para las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 1 Hz y 5 Hz.....	396
Figura 226. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos en los ensayos llevados a cabo con la mezcla AC 16 S.	397
Figura 227. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos en los ensayos llevados a cabo con la mezcla AC 16 S.	398
Figura 228. Valores de energía disipada acumulada obtenidos en los diferentes ensayos llevados a cabo para las mezclas AC 16 S y AC 22 S.	400
Figura 229. Umbrales de daño a fisuración obtenidos en diferentes niveles de carga para las mezclas AC 16 S y AC 22 S en ensayos realizados a 1 Hz y 5 Hz.	402
Figura 230. Leyes de fisuración por fatiga de la mezcla AC 16 S a diferentes temperaturas.	403
Figura 231. Valores de energía disipada durante la evaluación del comportamiento a fisuración de la mezcla AC 16 S a diferentes temperaturas.....	404
Figura 232. Detalle del daño por fisuración ramificado y con aparición en ambas direcciones (ascendente y descendente), en mezcla AC 16 S ensayada a 40 °C.	405
Figura 233. Detalle de los problemas de humedad surgidos durante el ensayo de la mezcla AC 16 S acondicionada a 3 °C. Diferencia de color entre la mezcla afectada por la humedad (abajo) y una seca (arriba).	406
Figura 234. Valores de RDEC acumulado obtenidos en la evaluación de la mezcla AC 16 S a diferentes temperaturas.	407
Figura 235. Parámetro de daño medio de la mezcla AC 16 S a diferentes temperaturas de ensayo.	408
Figura 236. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos en la evaluación de la mezcla AC 16 S a diferentes temperaturas.	409
Figura 237. Detalle de las fracturas (ascendentes y descendentes) asociadas a las deformaciones plásticas sufridas por la mezcla AC 16 S ensayada a 40 °C.	410

Índice de Figuras

Figura 238. Valores de energía disipada acumulada de la mezcla AC 16 S ensayada a diferentes temepaturas.	411
Figura 239. Umbrales de daño a fisuración por fatiga de la mezcla AC 16 S ensayada a 3 °C y 20 °C.	412
Figura 240. Leyes de fisuración por fatiga de las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 15 mm y 50 mm de distancia de separación entre apoyos.	413
Figura 241. Detalle de la propagación más rectilínea y vertical de la fisura cuando el ensayo se lleva a cabo a una distancia de 15 mm.	414
Figura 242. Energía disipada por la mezcla AC 16 S ensayada con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm, y diferentes niveles de carga.	415
Figura 243. Energía disipada por la mezcla AC 22 S ensayada con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm, y diferentes niveles de carga.	416
Figura 244. Resultados de RDEC acumulado de la mezcla AC 16 S ensayada a 15 mm y 50 mm de separación entre apoyos.	417
Figura 245. Energía disipada por la mezcla AC 22 S ensayada con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm, y diferentes niveles de carga.	418
Figura 246. Parámetros de daño medio obtenidos para diferentes niveles de carga en las mezclas AC 16 S y AC 22 S, ensayadas a 15 mm y 50 mm de separación entre apoyos.	419
Figura 247. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos durante los ensayos de la mezcla AC 16 S con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm.	420
Figura 248. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos durante los ensayos de la mezcla AC 22 S con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm, y una frecuencia de 5 Hz.	421
Figura 249. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos durante los ensayos de la mezcla AC 22 S con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm, y una frecuencia de 1 Hz.	422
Figura 250. Energía disipada acumulada por la mezcla AC 16 S durante los ensayos realizados con 15 mm y 50 mm de separación entre apoyos.	423
Figura 251. Energía disipada acumulada por la mezcla AC 22 S durante los ensayos realizados con 15 mm y 50 mm de separación entre apoyos.	424
Figura 252. Valores umbrales de daño a fisuración obtenidos para las mezclas AC 16 S y AC 22 S en ensayos realizados con 15 mm y 50 mm de separación entre apoyos.	425
Figura 253. Leyes de fisuración por fatiga de las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas bajo diferentes condiciones de ensayo.	429
Figura 254. Energía disipada por las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 5 Hz de frecuencia, 20 °C de temperatura y una distancia entre apoyos de 50 mm.	430
Figura 265. Energía disipada por las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 1 Hz de frecuencia, 20 °C de temperatura y una distancia entre apoyos de 50 mm.	431
Figura 266. Energía disipada por las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 5 Hz de frecuencia, 20 °C de temperatura y una distancia entre apoyos de 15 mm.	432
Figura 267. Energía disipada por las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 5 Hz de frecuencia, 3 °C de temperatura y una distancia entre apoyos de 50 mm.	433
Figura 258. Parámetros de daño medio obtenidos para las mezclas AC 16 S y AC 22 S bajo diferentes condiciones de ensayo.	434

Figura 259. Umbrales de daño a fisuración para las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas bajo diferentes condiciones de carga.	436
Figura 260. (a) Áridos fracturados en probeta de AC 22 S caliza (izq.), e intactos en probeta de AC 16 S ofita (dcha.); (b) Detalle del proceso de fractura de los áridos calizos durante la propagación de la macro-fisura; (c) detalle del proceso de propagación de la macro-fisura fracturando el árido calizo (izq.) y rodeando el ofítico (dcha.).	438
Figura 261. Leyes de fisuración por fatiga de las mezclas BBTM11A fabricadas con diferentes tipos de ligante.	439
Figura 262. Energía disipada en los ensayos llevados a cabo con la mezcla BBTM 11A fabricada con diferentes tipos de ligante.	440
Figura 263. Valores de RDEC acumulado obtenidos en la evaluación del comportamiento a fisuración de la mezcla BBTM11A fabricada con diferentes tipos de ligante.	442
Figura 264. Estado de daño en su ciclo de fallo de cada una de las mezclas BBTM11A estudiadas.	443
Figura 265. Parámetro de daño medio de la mezcla BBTM11A fabricada con diferentes tipos de ligante.	444
Figura 266. Energía disipada acumulada por la mezcla BBTM11A en función del tipo de ligante utilizado en su fabricación.	445
Figura 267. Umbrales de daño a fisuración de la mezcla BBTM11A fabricada con diferentes tipos de ligante.	446
Figura 268. Estado de las probetas de mezcla BBTM11A tras ensayo UGR-FACT.	447
Figura A-I.3.279 Detalle del ajuste del dispositivo a la prensa.	521
Figura 280 Valores comparativos de energía disipada acumulada y RDEC, en ensayo llevado a cabo con y sin periodo de descanso.	538
Figura 281. Detalle del paquete de firme fabricado en laboratorio formado por una capa intermedia AC 16 S y una capa de rodadura BBTM 11A.	539
Figura 282. Detalle del paquete de firme compuesto por mezcla AC 16 S intermedia, mezcla BBTM 11A de rodadura, y geotextil como sistema anti-remonte de fisuras.	539

INTRODUCCIÓN / INTRODUCTION

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación de la Tesis Doctoral

En la actualidad nadie puede poner en duda la importancia que han tenido las carreteras en la evolución de nuestra sociedad. El hecho de dotar de accesibilidad al territorio, así como de posibilitar el flujo de personas y mercancías, ha contribuido de manera directa con el nivel de desarrollo alcanzado hoy en día. A pesar de ello, esta importancia tiene asociado un efecto de dependencia que implica que las carreteras tengan que atender un nivel de usuarios muy elevado, debiendo mostrar siempre condiciones óptimas que permitan garantizar una rodadura cómoda y sobretodo, segura.

La dependencia de estas infraestructuras hace que la inversión económica, ya sea en carreteras de nueva construcción o en mantenimiento de las existentes, sea muy elevada. Así, los esfuerzos llevados a cabo en los últimos años están siendo encaminados hacia el desarrollo de nuevos tipos de firmes de larga duración que impliquen una reducción en el consumo de recursos (económicos, energéticos, naturales, etc.), y que disminuyan la necesidad de actividades de conservación (García et al. 2006; Mateos et al. 2009). Para ello, resulta fundamental conocer en profundidad todas las patologías que afectan a las carreteras, modelando el efecto que provocan sobre cada tipo de pavimento, de manera que puedan diseñarse firmes más duraderos.

De entre el conjunto de las patologías sufridas por los firmes de carretera, una de las más comunes a nivel mundial, y una de las principales causantes del fin de su vida de servicio, es la fisuración. La aparición de este fenómeno puede tener consecuencias nefastas para la carretera a medio-largo plazo, tanto desde el punto de vista estructural (además de provocar una mala transferencias de carga que provoque problemas de deformaciones y punzomanientos, las fisuras permiten la entrada de agua y otros agentes químicos que ocasionan otros deterioros como baches, peladuras, lavado de finos, disminución de la capacidad portante, etc. que terminan agotando su vida de servicio), como desde el punto de vista de la seguridad y el confort (aumenta las irregularidades del firme, dificultando la

conducción, aumentando el nivel de ruido y disminuyendo el rozamiento con el neumático) (Colombier 1997).

A pesar de los esfuerzos desarrollados en todo el mundo por minimizar este problema, actualmente la aparición de fisuras en los pavimentos continúa siendo uno de los mayores motivos de actuación en conservación y rehabilitación de firmes. Debido a este hecho, el estudio de dicho fenómeno se ha convertido en una de las prioridades de la I+D+i en el ámbito de la ingeniería de carreteras, de manera que se disminuyan sus posibilidades de aparición y se contribuya con el desarrollo de pavimentos de larga duración.

Dado que se trata del material más utilizado en la construcción de firmes de carretera, uno de los principales campos de estudio en los que resulta necesario seguir avanzando es en el diseño de mezclas bituminosas resistentes a esta patología. Para ello, resulta fundamental la existencia de ensayos eficientes que permitan una evaluación precisa de la mezcla, previa a su uso en el firme. A pesar de que en la actualidad existen diferentes tipos de ensayos que permiten evaluar el comportamiento ante fisuras de mezclas bituminosas, ninguno de ellos se emplea de forma generalizada como criterio común para su diseño.

Por un lado, la mayoría de los ensayos con un empleo más generalizado se centran en evaluar el comportamiento a fatiga, o la simple resistencia a fractura del material bajo carga constante. Estas pruebas, a pesar de ser muy útiles en el análisis de la respuesta mecánica de la mezcla, en ocasiones no correlacionan de la mejor forma posible las cargas aplicadas, la geometría o las condiciones de ensayo con las sufridas en el firme durante su vida de servicio, siendo complicado hacer una buena extrapolación de los resultados obtenidos. Por otra parte, los ensayos que reproducen las condiciones de carga de manera más fiel, suelen ser muy sofisticados (en términos de reproducción de carga y esfuerzos, instrumentación, fabricación de las probetas, etc.), y normalmente con un elevado coste económico de reproducción y ejecución, por lo que es muy difícil que se consiga hacer extensivo su uso al diseño de mezclas a nivel de laboratorio. Debido a estas circunstancias, el desarrollo de un método de ensayo que trate de dar solución a esta problemática puede suponer un gran

avance en la mejora del tratamiento de esta patología, constituyendo una línea de investigación de interés.

En este contexto, la presente tesis doctoral tiene como objetivo el desarrollo de un método de ensayo de laboratorio, que permita la evaluación del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas.

1.2. Contenido y Alcance de la Investigación

El presente documento consta de diferentes capítulos que estructuran la investigación desarrollada durante el transcurso de la tesis doctoral. En primer lugar, este capítulo introductorio presenta una breve justificación del interés por llevar a cabo la investigación realizada y describe de forma concisa el contenido de cada una de las partes del documento.

En el capítulo 2, se recoge el estudio del estado del arte llevado a cabo para sentar las bases de la investigación. Dentro dicha revisión de conocimientos, se analizará en profundidad el fenómeno de fisuración en carreteras, definiendo las características de dicho fenómeno así como las actuaciones a realizar para paliar su efecto. Además, este capítulo se centra en el estudio del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas ante la fisuración por fatiga, analizando los diferentes factores que afectan a dicho fenómeno. Finalmente, se lleva a cabo una revisión de los métodos de ensayo existentes para el estudio y evaluación del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, realizando un análisis de sus ventajas y limitaciones.

Una vez finalizada la revisión de conocimientos y establecido el punto de partida de la investigación, en el capítulo 3 se formulan los objetivos principales y secundarios de la tesis doctoral.

En el capítulo 4 se explica la metodología seguida durante toda la investigación, especificando cada una de las etapas a seguir para la consecución de los objetivos propuestos. El desarrollo de un nuevo método de ensayo a nivel de laboratorio implica

cuatro etapas fundamentales, que han sido utilizadas para definir la estructura de la metodología de trabajo:

- Desarrollo de un dispositivo de ensayo que permita llevar a cabo la evaluación mecánica del material a estudiar.
- Definición de las características del método de ensayo (materiales a utilizar, condiciones de ensayo, adquisición de datos, criterio de fallo, etc.).
- Tratamiento de datos y evaluación de resultados.
- Validación del método de ensayo.

En base a estas consideraciones, en la primera etapa de la metodología se presentarán los condicionantes a tener en cuenta en el diseño del dispositivo a utilizar durante la ejecución del método de ensayo desarrollado. Posteriormente, se describirá el estudio de las características a cumplir por dicho método de ensayo, así como de las condiciones de evaluación del comportamiento mecánico a fisuración de las mezclas ensayadas. Finalmente, se analizarán los trabajos a llevar a cabo para la validación del método de ensayo desarrollado como herramienta en el estudio y diseño de mezclas bituminosas ante fenómenos de fisuración.

A continuación, en el capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos en cada una de las diferentes fases de la investigación. Para ello se sigue el orden establecido en la metodología.

Las conclusiones más interesantes obtenidas en la investigación se recogen en el capítulo 6, y a continuación, en el capítulo 7 se plantean las posibles futuras líneas de investigación.

Como cierre al documento se aporta un capítulo dedicado a las referencias bibliográficas, así como dos Anexos, uno en el que se recoge un borrador de norma para la posible estandarización de uso del método de ensayo, y otro en el que se muestran algunas de las pruebas realizadas para establecer las bases de las posibles futuras líneas de investigación a desarrollar como continuación a este estudio.

1. INTRODUCTION

1.1. Justification of the PhD thesis

The importance of roads and highways in the evolution of modern society is undeniable since they make a nation accessible. They allow people to travel freely, and they permit goods, and merchandise to be transported throughout the country. Clearly, good road networks have directly contributed to the current level of economic prosperity and development in the world. Nevertheless, since roads are forced to sustain heavy traffic loads, they must be kept in optimal condition to ensure comfortable and safe driving.

A nation's dependence on these infrastructures requires an important economic investment in the construction of new roads and the maintenance of existing ones. Consequently, in recent years, there has been a significant effort to develop new types of durable and long-lasting pavement that involve a reduction in the consumption of resources (economic, energy, natural, etc.), and which also reduce the need for conservation activities (García et al. 2006; Mateos et al. 2009). For this reason, it is crucial to have an in-depth knowledge of all of the pathologies that can affect asphalt pavements with a view to ascertaining the effect of pavement distresses on each type of road surface. Only in this way is it possible to design more long-lasting roads.

Of the various types of pathology, cracking is one of the most common. It is also a pathology that considerably shortens a road's service life. The appearance of this phenomenon can have devastating medium and long-term consequences for the road. This is true from a structural viewpoint. Besides causing bad load transfers that lead to deformation and shear failures, cracking allows the entry of water and chemical agents that produce potholes, scabbing, washing of fines, reduced bearing capacity, etc. All of these factors lead to a premature end of the road's service life. However, cracking also has consequences for safety and comfort since it increases road surface irregularity, makes driving more difficult, increases noise level, and reduces friction between vehicle tires and the road (Colombier 1997).

Despite efforts to minimize this problem, pavement cracking is one of the principal motives for pavement conservation and rehabilitation. For this reason, the study of this phenomenon has become a major R&D priority in road engineering. The objective is to reduce the potential appearance of fatigue cracking as well as to contribute to the development of durable, long-lasting road surfaces.

In this regard, one of the main areas of study is the design of crack-resistant asphalt mixes, especially since this is the material most frequently used in road construction. This means that it is also necessary to create tests that are able to accurately evaluate such mixes before they are used in road construction. Even though there are currently various tests that assess the mix response to fatigue cracking, none is used as a standard for their design.

Currently, the majority of the tests for asphalt mixes focus on evaluating their response to fatigue or on assessing their fracture strength under a constant load. Despite the usefulness of such tests for the analysis of the mechanical performance of the mix, the applied loads, the geometry, and the test conditions are often not adequately correlated with those that the pavement is actually subjected to during its service life. Consequently, it is not easy to extrapolate the results obtained to the real response of the mix material.

On the other hand, the tests that best reproduce the loading conditions are often very sophisticated in terms of the load and stress reproduction, instruments used, manufacture of test cylinders, etc. This means that they are generally very expensive to perform, which makes it difficult to extend their use to the design of mixes in the laboratory. For this reason, the development of a test method that takes into account these conditioning factors could be a significant contribution to the evaluation of this road pathology and thus to the improvement of asphalt mixes.

Consequently, the objective of the research presented in this thesis was the development of a laboratory method able to evaluate the response of asphalt mixes to fatigue cracking.

1.2. Content and scope of the research

This thesis is composed of various chapters that give a detailed description of the research carried out. The first introductory chapter provides a brief justification of the topic and explains why it is relevant. This chapter also summarizes the content of each section of the thesis.

Chapter 2 is a discussion of the state of the art in the field and presents the basic premises upon which this research is based. It provides an in-depth analysis of fatigue cracking, and defines the characteristics of this pathology as well as the remedial actions that are generally taken to mitigate its effects. Furthermore, this chapter also focuses on the study of the mechanical performance of bituminous mixes in response to fatigue cracking and analyzes the various factors affecting this phenomenon. Finally, this section of the thesis gives an overview of the methods that are currently used for studying and assessing mix response to cracking, and analyzes the advantages and limitations of each test method.

After this discussion of the literature, which was the starting point of this research study, Chapter 3 lists and explains the main general objective as well as the secondary operational objectives of this doctoral thesis.

Chapter 4 describes the methodology followed during the research. As such, it specifies each of the research phases followed in order to achieve the previously mentioned objectives. The development a new laboratory test method involved four basic stages, which also define the structure of the work methodology:

- Development of a test device able to perform the mechanical evaluation of the material to be studied.
- Definition of the test method characteristics (materials to be used, test conditions, data collection, failure criteria, etc.).
- Processing of data and evaluation of results.

- Validation of test method.

Based on these considerations, the first stage of the methodology presents the conditioning factors underlying the design of the device used for the test method. This is followed by a description of characteristics required by this test method as well as the evaluation conditions of the mechanical of the mixes tested to cracking. Finally, an analysis is given of the work carried out in relation to the validation of the test method that was developed as a tool in the study and for the design of asphalt mixes resistant to cracking.

Chapter 5 analyzes the results obtained in each of the research phases, based on the sequence established in the methodology.

The most interesting conclusions that can be derived from this research study are presented in Chapter 6. This is followed by Chapter 7, which proposes and discusses future lines of research. The final sections of the thesis include a list of the references cited as well as two annexes. The first annex includes a draft of the possible standardized use of this test method; the second annex shows some of the tests performed with a view to establishing the bases for future research.

ESTADO DEL ARTE

2. ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

El segundo capítulo de esta tesis doctoral lo conforma el estudio del estado del arte, el cual pretende sentar las bases para el desarrollo de la misma. Así, este capítulo puede dividirse en tres partes fundamentales en las que se profundizará en el conocimiento del fenómeno de fisuración en firmes de carretera, en el comportamiento de las mezclas bituminosas ante este fenómeno, y finalmente, centrándonos en la temática objeto de la tesis, en el estudio de los diferentes ensayos existentes para el análisis del comportamiento mecánico a fisuración de estos materiales.

La primera parte del capítulo dedicada al fenómeno de fisuración en firmes de carreteras, comienza con un apartado introductorio centrado en la descripción de los firmes de carretera, en el que además se presentan sus principales patologías. Posteriormente, el segundo apartado describe el fenómeno de fisuración en pavimentos, estableciendo los efectos que lo provocan, sus diferentes clasificaciones, las formas de propagación a través del espesor del firme, y las soluciones existentes hasta la fecha para paliar o prevenir su efecto.

La segunda parte del capítulo de estado del arte se centra en el estudio del comportamiento de mezclas bituminosas ante fenómenos de fisuración, analizando la respuesta de estos materiales ante la aparición y propagación de fisuras. Para ello, en el primer apartado se definen las principales características de las mezclas, así como los diferentes aspectos que gobiernan su comportamiento. Dado que los fenómenos de fatiga son los principales causantes del fallo por fisuración en mezclas bituminosas, en el segundo apartado se llevará a cabo el estudio del comportamiento de estos materiales ante dichos fenómenos (factores que afectan el proceso de fatiga, influencia del modo de carga utilizado, enfoques de caracterización, y definición del concepto de “límite de resistencia a fatiga”). Posteriormente, en un tercer apartado se analizará el fenómeno de “healing” (recuperación de las propiedades mecánicas de la mezcla cuando cesa la sollicitación a la

que está sometida), fundamental a la hora de estudiar el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas. Finalmente, en un último apartado se describen los diferentes modelos teóricos de propagación de fisuras en mezclas bituminosas (modelo clásico, modelo cohesivo, y modelo de daño continuo), analizando su evolución a lo largo de los años, así como sus principales características. Estos estudios nos permitirán sentar las bases del comportamiento de las mezclas bituminosas ante el fenómeno de fisuración, de forma que podamos llevar a cabo su diseño y la evaluación de su respuesta ante ensayos de laboratorio.

Dichos ensayos de laboratorio resultan un componente clave en el afán por encontrar una solución definitiva al fenómeno de fisuración en firmes de carretera. Por una parte, constituyen una herramienta fundamental en el análisis del comportamiento mecánico de la mezcla, llevando a cabo una evaluación previa antes de ser utilizada (ya que son sometidas a solicitaciones similares a las recibidas durante su vida de servicio en el firme), y permitiendo obtener los diseños que mejor respuesta ofrezcan. Por otra parte, los ensayos de laboratorio establecen un sistema de referencia imprescindible para establecer el grado de eficiencia de las diferentes soluciones anti-fisuras en función de las condiciones del firme (climatología, tipo de tráfico, etc.). Así, en la tercera parte del estudio del estado del arte, se llevará a cabo la descripción del conjunto de ensayos existentes para evaluar el comportamiento ante el fenómeno de fisuración de materiales bituminosos simples (compuestos por un único tipo de mezcla bituminosa), y complejos (compuestos por varios tipos de mezcla bituminosa, y/o sistemas anti-reflexión de fisuras). Se han definido los tipos de carga utilizados, las condiciones de ensayo, sus características geométricas, etc., valorando su grado de eficiencia en el análisis del comportamiento a fisuración. Además, también se ha realizado un repaso a la normativa de ensayo existente al respecto, describiendo y analizando sus diferentes aspectos, de forma que nos permita conocer el grado real de efectividad que puede aportar dicha normativa como sistema de referencia en la evaluación del comportamiento de mezclas bituminosas ante fisuras.

Finalmente, como cierre a este capítulo de revisión de conocimientos, se establecen las principales conclusiones del estudio del estado del arte, las cuales servirán para motivar y sentar las bases del desarrollo de la tesis.

2.2. El Fenómeno de Fisuración en Firms de Carreteras

2.2.1. Los Firms de Carretera

Los firms de carretera son estructuras formadas por un conjunto de capas compactadas horizontalmente superpuestas, de varios centímetros de espesor, y compuestas por diferentes materiales (Kraemer et al. 2004). Estas estructuras estratificadas se apoyan en la explanada, y han de poder soportar las cargas del tráfico durante un periodo de varios años sin deterioros que afecten a la seguridad, a la comodidad de los usuarios o a la propia integridad del firme (Figura 1).

Dado que la explanada no es capaz de soportar por si misma las cargas verticales transmitidas por el paso del tráfico, los esfuerzos tangenciales, y las condiciones ambientales, los firms han de cumplir con las siguientes funciones:

- Proporcionar una superficie de rodadura cómoda, segura y de características permanentes bajo las cargas repetidas del tráfico a lo largo de la vida útil de la carretera (aunque sean necesarias actividades puntuales de conservación y rehabilitación).
- Resistir las sollicitaciones previstas del tráfico pesado, repartiendo las presiones verticales ejercidas por las cargas, de forma que a la explanada llegue una pequeña fracción de éstas, compatible con su capacidad de soporte.
- Proteger la explanada de la intemperie, y en particular de la acción del agua, y los efectos del hielo-deshielo.

Los firms de carretera son por tanto estructuras multicapas constituidas por tres partes principales (pavimento, base y subbase), cada una de ellas con una función definida (Figura

1). El pavimento es la parte superior del firme y la que recibe directamente las solicitaciones del tráfico, aportando sus características funcionales (resistencia al deslizamiento, regularidad superficial transversal y longitudinal, reducción del ruido de rodadura y reflexión luminosa, y desagüe superficial), y absorbiendo los esfuerzos horizontales y parte de los verticales recibidos por el mismo.

Cuando el espesor del pavimento es superior a 8 cm (para carreteras con alta intensidad de tráfico), suele ejecutarse en 2 capas denominadas capa de rodadura y capa intermedia. Las características funcionales de las capas de rodadura suelen ser la rápida infiltración del agua de lluvia (utilizando para ello mezclas bituminosas de tipo drenantes), y la reducción del ruido de rodadura y reflexión luminosa (garantizando una rodadura cómoda y segura). Por su parte, la función de las capas intermedias es la impermeabilización del firme (para evitar los accesos de agua a la explanada), así como la disipación de parte de las cargas verticales transmitidas por el tráfico.

La capa de base es la capa del firme situada debajo del pavimento, siendo su función principal aportar resistencia a éste, absorbiendo la mayor parte de los esfuerzos verticales y reduciendo las deformaciones bajo las solicitaciones repetidas del tráfico pesado. Para tráficos con intensidades medias y bajas, se emplean bases granulares con gravas y arenas trituradas. Para tráficos con intensidades elevadas de vehículos pesados, se emplean materiales granulares tratados con un ligante o un conglomerante (las más comunes son las bases de mezcla bituminosa o grava cemento, aunque también pueden encontrarse bases de gravaemulsión, gravaescoria, gravacenza o suelocemento).

Finalmente, la subbase es la capa de firme situada debajo de la base y sobre la explanada, la cual no resulta necesaria con explanadas de elevada capacidad de soporte (aunque suele ser una capa de transición necesaria). Su función es proporcionar a la base un apoyo uniforme y constituir una adecuada plataforma de trabajo para su puesta en obra y compactación. Los principales materiales utilizados para su construcción suelen ser gravas, arenas rodadas o trituradas, suelocemento, escorias de horno alto, etc.



Figura 1. Esquema de las capas del firme.

2.2.1.1. Tipos de Firmes

Actualmente existe una gran variedad de tipos de firme que pueden ser clasificados en dos grandes grupos, los firmes flexibles y los firmes rígidos. Los firmes flexibles (Figura 2a) están formados por una serie de capas constituidas por materiales bituminosos (normalmente de espesor inferior a 15 cm), las cuales reposan sobre una o varias capas de materiales granulares (estando el espesor total del firme en torno a los 30-60 cm). El incremento de las intensidades y cargas del tráfico a lo largo de los años desembocó en los firmes semirrígidos (de espesor total comprendido entre los 20-50 cm, compuestos por capas de base tratadas o estabilizadas con cemento, sobre las que se coloca una capa de rodadura de material bituminoso, Figura 2b), y en los denominados firmes semiflexibles (compuestos por un espesor importante de mezclas bituminosas, mayor de 15 cm, Figura 2c). Normalmente, los firmes semirrígidos y semiflexibles suelen incluirse en el grupo de los flexibles debido a que tienen unas capas superiores bituminosas análogas, pero su comportamiento estructural es diferente, con una menor deformabilidad bajo las cargas.

Otro tipo de firme son los firmes inversos (con un espesor total de en torno a los 60-80 cm, Figura 2d), que aparecieron como solución para hacer frente al fenómeno de reflexión de fisuras, y en los que se interpone entre las capas bituminosas superiores (de unos 15 cm de espesor) y la capa tratada con cemento, una capa granular (formada exclusivamente por áridos) para evitar la transmisión de tensiones tangenciales (de en torno a 12 cm de espesor).

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

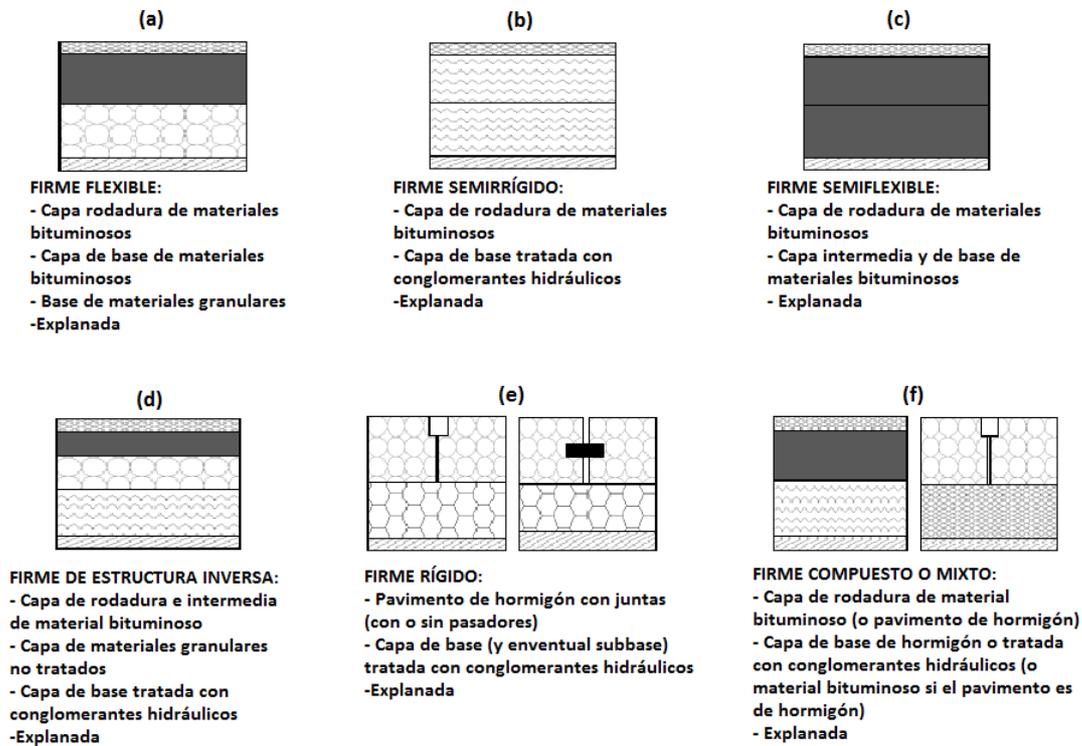


Figura 2. Tipos de Firmes.

Por su parte, los firmes rígidos están compuestos por un pavimento de hormigón que asegura la función resistente (Figura 2e), aunque en ocasiones (en casos de tráfico de alta intensidad) también de una capa de base tratada con cemento (suelocemento, gravacemento u hormigón magro, de manera que se proporcione un apoyo estable y evite el acceso de agua a la explanada a través de las juntas) y a veces incluso de una de subbase (cuando la explanada es algo plástica y sensible al agua). Dada su gran rigidez, distribuyen las cargas verticales sobre un área grande y con tensiones reducidas, de manera que (salvo en los bordes de las losas y juntas sin pasadores), las deflexiones son casi inapreciables. El pavimento suele ser de hormigón vibrado en masa, dividido en losas mediante juntas para evitar la aparición de grietas de retracción (en sentido transversal cada 4-5 m, que pueden incluir pasadores para asegurar la continuidad y la transmisión de cargas) y favorecer el alabeo de las losas (en sentido longitudinal entre carriles). Otras soluciones menos comunes debido a su elevado coste son la construcción de pavimentos de hormigón armado con

barras de acero, con fibras de acero repartidas aleatoriamente por la masa del hormigón, o los pavimentos de hormigón pretensado.

Además de estos tipos de firmes, en ocasiones podemos encontrar los denominados firmes compuestos o mixtos (Figura 2f), constituidos por una capa de hormigón (de unos 5-15 cm de espesor, que aporta durabilidad y capacidad portante) cubierta por un pavimento bituminoso de rodadura (que aporta flexibilidad y adaptabilidad a las deformaciones), aunque también pueden darse dispuestos de forma inversa. Este tipo de estructuras se desarrolló en los años 90 en EE.UU, y su éxito reside en la buena adherencia entre las dos capas de distinto material.

2.2.1.2. Patología de los Firmes

Durante la vida de servicio de los firmes de carretera, su exposición a las cargas del tráfico y a los efectos climáticos (lluvia, frío, radiación solar, etc.), provoca que se vaya produciendo un deterioro en sus propiedades, que termina desembocando en la pérdida de funcionalidad de los mismos. Así, poco a poco en los firmes van apareciendo patologías que en un principio se muestran como defectos puntuales (pudiendo subsanarse con tareas de conservación), pero que a la larga terminan provocando su fallo estructural (siendo necesaria su rehabilitación).

Las diferentes patologías que tienen lugar en los firmes de carretera pueden ser agrupadas en cuatro familias: los desprendimientos de material, los movimientos de material, las deformaciones, y las fisuras.

Los *desprendimientos de material* son patologías asociadas sobre todo a la calidad de las capas de rodadura, y por tanto tienen mayor influencia en torno a la seguridad vial debido a posibles problemas de adherencia, que en el fallo estructural del firme en si. Dentro de estos fenómenos se incluyen el **desgaste de la capa superficial o pulimento de áridos** (debido a un bajo CPA o su hundimiento dentro del mortero; Figura 3a), el **desprendimiento de áridos o descarnadura** (debido a la falta de adhesividad entre los áridos y el ligante, un

aumento de la fragilidad del ligante debido a su envejecimiento o su dureza, una dosificación de ligante escasa, falta de compactación en la puesta en obra, o una apertura al tráfico prematura; Figura 3b), las **peladuras o desprendimientos de trozos de pavimento** (debido a una mala adherencia con la capa inferior o a un espesor insuficiente de la capa de rodadura; Figura 3c), o los **baches** (debidos a fenómenos de desintegración por separación de la película ligante/árido por efecto del agua o productos químicos, el envejecimiento del ligante, la acción del tráfico, o imperfecciones locales; Figura 3d) (Thom 2008).

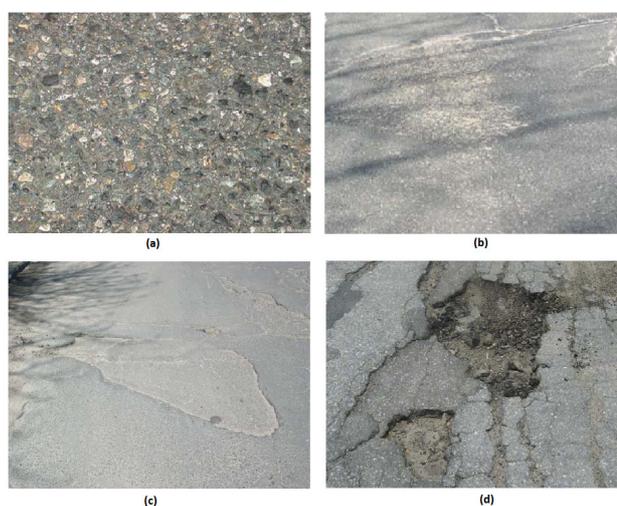


Figura 3. Patologías de los firmes I: desprendimientos de material. (CMRPC 2006)

Dentro de la familia de los *movimientos de material* podemos encontrar los fenómenos de **exudación o firme brillante** (debido al remonte del betún en la superficie de la carretera por una excesiva compactación, un contenido de ligante en exceso, o a una temperatura de compactación demasiado elevada; Figura 4a), el **lavado de finos** a la superficie del firme (debido al paso de los vehículos y la presencia de agua; Figura 4b), o la **incrustación de áridos en el mortero** durante periodos cálidos.



Figura 4. Patologías de los firmes II: movimientos de material. (LCPC 1998)

Las *deformaciones* son patologías irreversibles que se muestran en la superficie de la carretera entre las que podemos encontrar las **roderas** (debido a una resistencia deficiente a deformaciones plásticas en la mezcla por empleo de un ligante demasiado blando, una mala calidad de los áridos o el filler, una incorrecta dosificación de la mezcla, o una compactación insuficiente; Figura 5a), las **ondulaciones** (debido a deformaciones diferenciales en el suelo soporte, falta de estabilidad en las mezclas, o mala calidad en la puesta en obra de la capa de rodadura; Figura 5b), los **arrollamientos** (debidos a la falta de unión entre las capas bituminosas o el empleo de mezclas poco estables; Figura 5c), los **blandones** (debidos a falta de resistencia de la explanación, una mala construcción del firme, o una degradación puntual en las capas inferiores; Figura 5d), y las **protuberancias o abombamientos de la calzada** (debido a la acción del hielo o el entumecimiento de materiales por la absorción de agua).

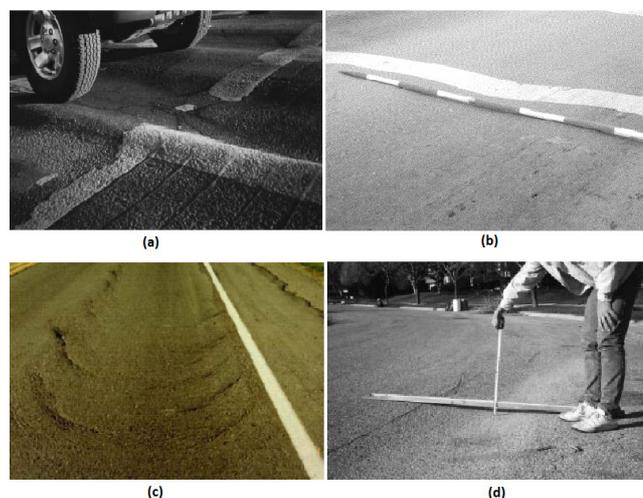


Figura 5. Patología de los firmes III: deformaciones. (LCPC 1998)

Por último, las *fisuras* pueden considerarse, junto con las roderas, las patologías más comunes en los firmes de carretera, y por tanto su principal modo de degradación. Su presencia, asociada o no a la del agua, pone en peligro la durabilidad del firme bajo la acción continua de las cargas transmitidas por el paso de vehículos pesados. Así, para el cálculo de la vida de servicio de un firme de carretera es primordial tener en cuenta la evolución de las fisuras que en él puedan aparecer, de manera que ha de evaluarse la posibilidad de aparición de fisuración reflexiva o descendente, la adhesividad entre capas, etc.

Dada la importancia que este tipo de patología tiene en los firmes de carretera de todo el mundo, y que se trata del tema central de la tesis doctoral aquí presentada, en los siguientes capítulos de este estado del arte se llevará a cabo un estudio en mayor profundidad de dicho fenómeno.

2.2.2. Descripción del Fenómeno de Fisuración

El fenómeno de fisuración es una patología común de los firmes de carretera que puede acarrear consecuencias nefastas para la misma, provocando el fin de su vida de servicio. Desde el punto de vista estructural, la resistencia a fatiga de los materiales que la componen se ve reducida considerablemente y la transferencia de cargas deja de ser continua pudiendo provocar deformaciones en la superficie y el punzonamiento del suelo soporte. Por otra parte, la estanqueidad de la carretera deja de estar asegurada, de manera que el agua y/u otros agentes químicos pueden introducirse dentro de ésta provocando daños en la estructura. Además, en la capa de rodadura la fisuración provoca un aumento de las irregularidades que se traducen en una disminución del confort y de la seguridad.

La aparición de fisuras puede afectar a cualquier tipo de pavimento independientemente de su tipología (flexible, semirrígido o rígido) o de su localización geográfica (climas cálidos o fríos, lluviosos o secos). Su evolución se debe a la combinación de diversos factores, siendo los más comunes los fenómenos de fatiga provocados por las sollicitaciones térmicas (cambios de temperatura entre la noche y el día, el invierno y el verano, que provocan dilataciones y contracciones en los materiales) y el efecto de las cargas del tráfico (particularmente de los vehículos pesados), aunque también pueden ocasionarla asientos del suelo soporte de la carretera (debido a pérdidas de capacidad portante, una mala compactación, un deslizamiento, etc.) y el envejecimiento del ligante (debido a su exposición al aire y a la radiación solar) (Bell et al. 1994; Bell & Sosnovske 1994) que aumenta la rigidez del pavimento, volviéndolo más frágil (Colombier 1997).

Así podemos distinguir cinco familias de fisuras según el origen de su aparición (Colombier 1997):

- Fisuras de fatiga: aparecen cuando una carretera es sometida a una carga de tráfico acumulado superior a su límite de resistencia. Este fenómeno puede afectar a todas las capas del firme o estar limitado únicamente a la capa de rodadura.

- Fisuras de retracción: si suponemos una capa de longitud infinita sometida a un esfuerzo de retracción, en algún punto de ésta puede aparecer una fisura desde el momento en el que el rozamiento con la capa de soporte alcance el valor de su límite de tracción. Dicha retracción tiene su origen en el fraguado de la capa de base o por efectos térmicos. Así, este fenómeno tiene lugar fundamentalmente en carreteras con capas de base tratadas con conglomerantes hidráulicos (cal o cemento), aunque también se da en capas formadas con materiales hidrocarbonados (como el betún) cuando las condiciones climáticas son severas.
- Fisuras debidas al movimiento del suelo soporte: los movimientos del suelo son provocados por una reducción de su capacidad portante, un asiento lento debido a una mala compactación, un deslizamiento de terreno, etc.
- Fisuras de construcción: originadas por errores de dimensionamiento o por la mala ejecución de los procesos constructivos.
- Fisuras de envejecimiento: debida a la acción combinada de los cambios térmicos y el envejecimiento del ligante. Así, un envejecimiento del betún más severo en superficie aumenta su módulo de rigidez y disminuye su capacidad para disipar tensiones.

A pesar de esta clasificación, el origen de una fisura en una carretera normalmente es debida a la combinación de varios de estos fenómenos.

Las fisuras son generalmente rectilíneas (en sentido longitudinal o transversal), aunque rara vez aparecen con forma curvada o en diagonal, y su ancho es variable en función del fenómeno predominante que la provoca (pueden ir desde algunas décimas de milímetro hasta centímetros). Por su aspecto se clasifican en franja (A), desdobladas (B) o ramificadas (C); mientras que según su agrupación podemos considerarlas aisladas (D), en bloque (E) o en piel de cocodrilo (F) (Figura 6) (Colombier 1997; Rababaah et al. 2005).

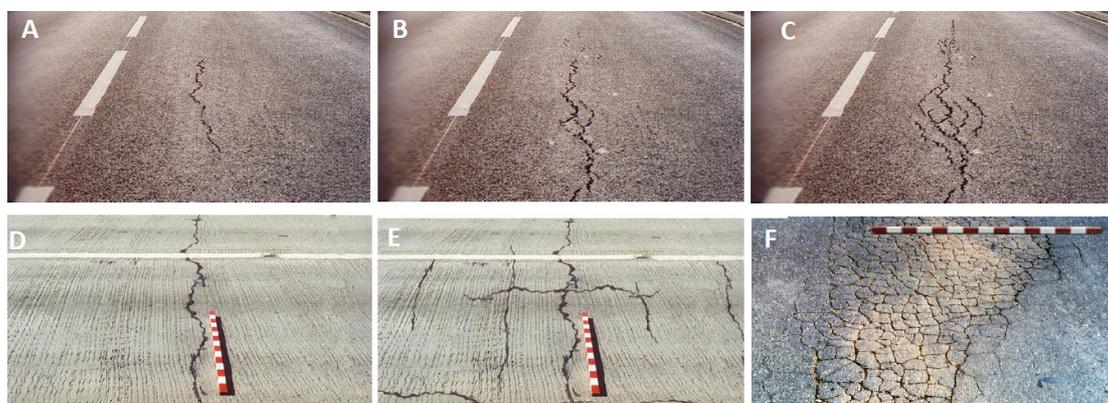


Figura 6. Clasificación de las fisuras de un firme según su aspecto (Pérez 2008).

Además, dependiendo de su sentido de propagación, se distingue entre *fisuración ascendente o reflexiva* (la más común, debida sobre todo a grietas aparecidas en la base del firme, como las de retracción en bases tratadas con conglomerantes hidráulicos, Bonnot 1992; Bonnot 1998; Loira et al. 2008; Perez 2008) y *fisuración descendente* (en inglés “top-down cracking”, debida a la fatiga del material debido a las cargas del tráfico y los fenómenos térmicos, así como a la falta de homogeneidad en la transferencia de cargas neumático/pavimento, Baladi et al. 2003; Emery 2007; Harmelink & Aschenbrener 2003; Proyecto Fenix 2010; Uhlmeier et al. 2000; Witczak & El-Basyouny 2004). A pesar de que hayan sido originados por diferentes causas, ambos tipos de fisuración pueden tener lugar a la vez en un mismo pavimento.

Por otra parte, en función del tipo de firme que haya sido empleado en la carretera, se encuentran algunos tipos de fisuración predominante (Florence 2005). Así por ejemplo, en firmes flexibles las fisuras aparecidas en superficie suelen estar motivadas por la fatiga de las capas debido a la acción del tráfico (localizadas primeramente en las bandas de rodadura, y posteriormente propagadas en bloque o piel de cocodrilo a toda la superficie) o por retracciones térmicas en condiciones climáticas muy severas a temperaturas muy bajas (presentándose fisuras transversales y regularmente espaciadas). Por su parte, en los firmes semi-rígidos las fisuras predominantes son debidas al remonte de las fisuras provocadas por

la retracción de su capa de base tratada con conglomerante hidráulico (si no existe prefisuración, suelen estar espaciadas entre 5 y 15 metros, tienen una forma rectilínea con una sola rama, que puede llegar a adoptar la forma de piel de cocodrilo bajo la acción del tráfico). En los firmes rígidos, la losa de hormigón se fisura por problemas de dimensionamiento bajo la carga de los vehículos pesados (espesor insuficiente, capacidad portante del suelo baja, etc.) o por problemas de retracción debido a juntas insuficientes o mal ejecutadas (mala transferencia de carga en las mismas), que provocan fisuras rectilíneas, transversales o longitudinales.

Además, existen ciertos tipos de fisuración que afectan a todo tipo de firmes, como la fisuración debida a movimientos en el suelo soporte, la cual es provocada por una reducción de su capacidad portante o un asentamiento (presentándose fisuras rectilíneas longitudinales o transversales que terminan formando fisuración en bloque en los firmes semi-rígidos y piel de cocodrilo en los flexibles), o debida a la retracción de un suelo tipo arcilloso o a un deslizamiento de terreno (presentándose en este caso fisuras anchas y profundas, longitudinales o transversales, aunque orientadas en el sentido del deslizamiento en dichos casos). Por otra parte, la fisuración descendente también puede afectar a cualquier tipo de firme (las fisuras creadas en este caso son finas y localizadas en las bandas de rodadura).

En el siguiente apartado se analizará en profundidad las características del fenómeno en función del sentido de propagación de las fisuras.

2.2.2.1. Fisuración Reflexiva

La fisuración reflexiva en pavimentos ha sido una seria preocupación asociada a los tratamientos de rehabilitación desde que en 1932 Gary y Martin estudiaran esta patología (Gary & Martin 1932). En el fenómeno de *fisuración reflexiva*, la aparición de fisuras en las capas de rodadura del firme es debida a la propagación de discontinuidades o defectos en las capas subyacentes, las cuales por efecto del tráfico (acciones de flexión o cizallamiento)

y/o de los gradientes térmicos (cambios de temperatura diarios o estacionales), además de otros condicionantes que pueden influir puntualmente como por ejemplo la acción del agua, terminan propagándose a través de éste hasta alcanzar la capa superior (Hu et al. 2010). Cada vez que pasa el eje de un vehículo, la carga aplicada induce sobre el pavimento una acción de flexión y dos cortantes (solicitud debida a rodadura de tráfico). Además de estos esfuerzos, las variaciones térmicas también afectan continuamente el proceso (provocando dilataciones y contracciones en el material que inducen la aparición de tensiones). Así, la combinación de estos tres mecanismos de esfuerzo (flexor, cortante, y térmico) debe ser tomada en cuenta a la hora de desarrollar un modelo de reflexión de fisuras (Figura 7, Hu et al. 2010; Lytton 1989). Por su parte, la reflexión de fisuras también se verá afectada por otros factores como la geometría estructural del pavimento existente o las propiedades de fractura de la mezcla (como la eficiencia de transferencia de cargas en las juntas y fisuras).

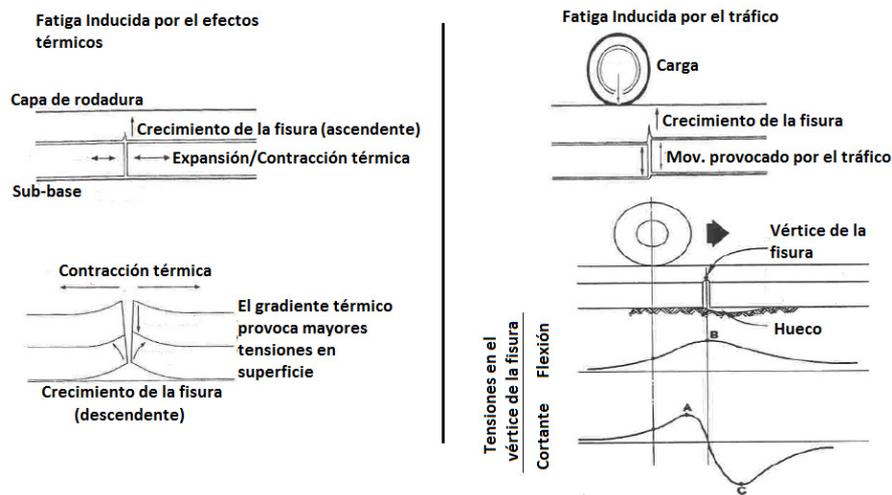


Figura 7. Esfuerzos que provocan la fisuración del firme. (Hu et al. 2010; Lytton 1989)

En base a su evolución, podemos dividir el fenómeno en tres fases principales, el *inicio de la fisura* (los esfuerzos debidos a la acción de las cargas del tráfico y las variaciones térmicas inducen el movimiento de los labios de una fisura o defecto preexistente en la capa

subyacente, el cual se transmite a la capa superior del firme provocando un estado de concentración de tensiones en dicha zona que termina motivando la aparición de la discontinuidad), la *propagación* (provocada por la acción continuada de las cargas del tráfico y los efectos térmicos, y cuya velocidad de avance dependerá del tipo de carga, y del espesor y la rigidez de la capa por donde se propaga), y la *ruptura de la capa* (la cual se caracteriza por la total propagación y la consiguiente aparición de la fisura en la superficie de la capa) (Florence 2005).

Por su parte, los modos de fisuración pueden ser también clasificados según el movimiento de los labios de la fisura (Irwin 1957), modo I o de abertura, modo II o de deslizamiento y modo III o de desgarre (Figura 8). Como la reflexión de una fisura existente en una capa es el resultado de los movimientos de los labios de la fisura o defecto de la capa subyacente (los cuales son transferidos a la otra capa), en función del tipo de sollicitación aplicada sobre el firme, el modo de fisuración obtenido variará. Así, la fatiga térmica provoca movimientos horizontales de los labios de la fisura, haciendo predominar el modo I, las cargas del tráfico inducen tanto movimientos horizontales como verticales, lo que provoca los modos I y II, aunque si el desplazamiento del tráfico se realiza a lo largo de una fisura longitudinal, entonces el modo de fisuración aparecido es el modo III (Figura 9, Colombier 1997; Laveissiere 2002).

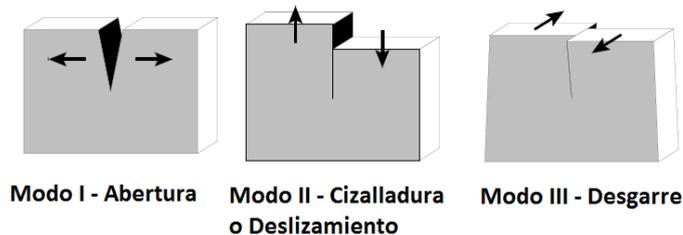


Figura 8. Modos de fisuración según el movimiento de los labios de la fisura. (Laveissiere 2002)

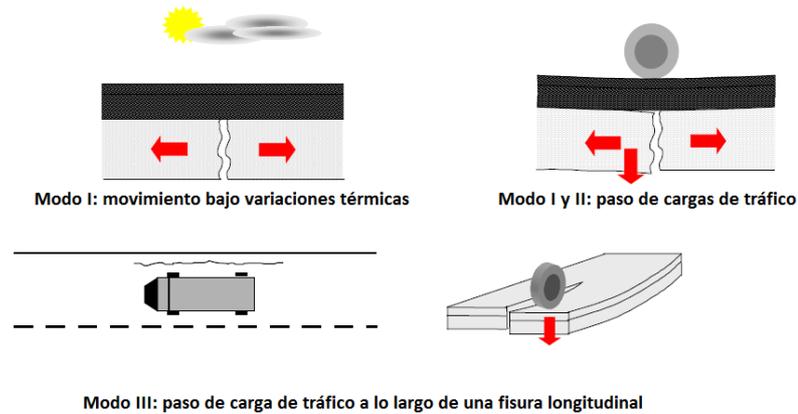


Figura 9. Modos de fisuración asociados a las solicitaciones del firme. (Laveissiere 2002)

Las diferentes posibilidades de progresión de una fisura reflexiva bajo carga del tráfico y fenómenos térmicos, fueron descritas por Goacolou & Marchand 1982, relacionando la propagación vertical y el despegue de la interfaz (Figura 10). Así, la existencia de adherencia entre las capas de base y de rodadura influye directamente en la naturaleza de la fisura reflejada. De esta forma podemos considerar dos esquemas, uno caracterizado por una excelente adherencia en la interfaz base/pavimento (Esquema 1), en el que ambas capas trabajan conjuntamente produciéndose una propagación vertical de la fisura, y otro caracterizado por una deficiencia de adherencia (Esquema 2) en el que las tensiones tangenciales producidas por el tráfico provocan un despegue entre ambas capas (que comienzan a trabajar por separado, incrementándose el valor de las tensiones generadas), y la fisura reflejada se presenta ramificada en superficie (evolucionando con rapidez y experimentando un gran deterioro).

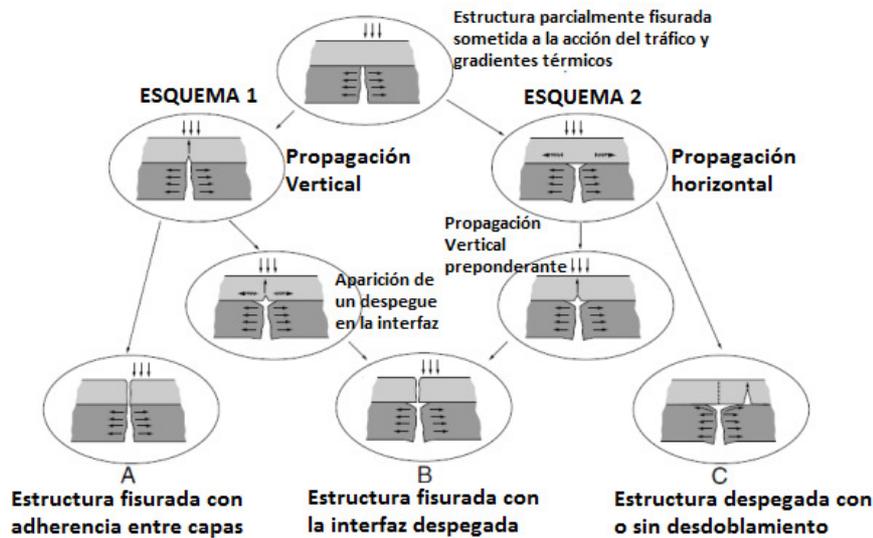


Figura 10. Condiciones de la interfaz base/pavimento para la propagación de la fisura. (Goacolou & Marchand 1982)

Ambos esquemas de propagación dan lugar a tiempos de remonte de fisuras variables. Así, una buena adherencia entre capas se traduce en la aparición rápida de una fisura limpia, y una adherencia mediocre, aunque retrasa el proceso de reflexión, conduce a situaciones más desfavorables, con grietas ramificadas, desdobladas, pérdidas de trozos de aglomerado, etc.

Los trabajos desarrollados por Lytton 1989 basados en el estudio del factor de intensidad de tensiones (Stress Intensity Factor, que describe el estado de tensiones en el vértice de la fisura, y cuya influencia se analizará en profundidad en el segundo capítulo de este estado del arte) inducido por las cargas del tráfico (K_{tr} asociado al modo II de fisuración) y por las variaciones térmicas (K_T asociado al modo I), muestran claramente que el efecto de las cargas del tráfico sobre la propagación de la fisura es mayor, cuanto mayor es la longitud de ésta (Figura 11). Por su parte, el factor de intensidad de tensiones asociado a las variaciones térmicas es predominante en la fase de iniciación de la fisura. Así, la acción térmica es predominante hasta que la fisura alcanza la mitad del espesor de la capa, pero una vez llegado a este punto, decrece rápidamente y las sollicitaciones por cizallamiento o abertura

(modo II, asociado al tráfico) se vuelven preponderantes en su propagación. Por su parte, en la tipología de carga debida a las tensiones generadas por los cambios de temperatura, el valor del factor de intensidad de tensiones crece hasta que la fisura alcanza la mitad del espesor del pavimento, para posteriormente mostrar una tendencia más estable. Posteriormente los estudios realizados por Molenaar & Potter 1997 apoyaron dicha teoría, poniendo de manifiesto que en el caso de la fisuración reflexiva, las cargas del tráfico, y en particular la componente de esfuerzo cortante o cizallamiento (modo II), juegan un papel preponderante en la evolución y propagación de la fisura hasta la ruptura total del pavimento.

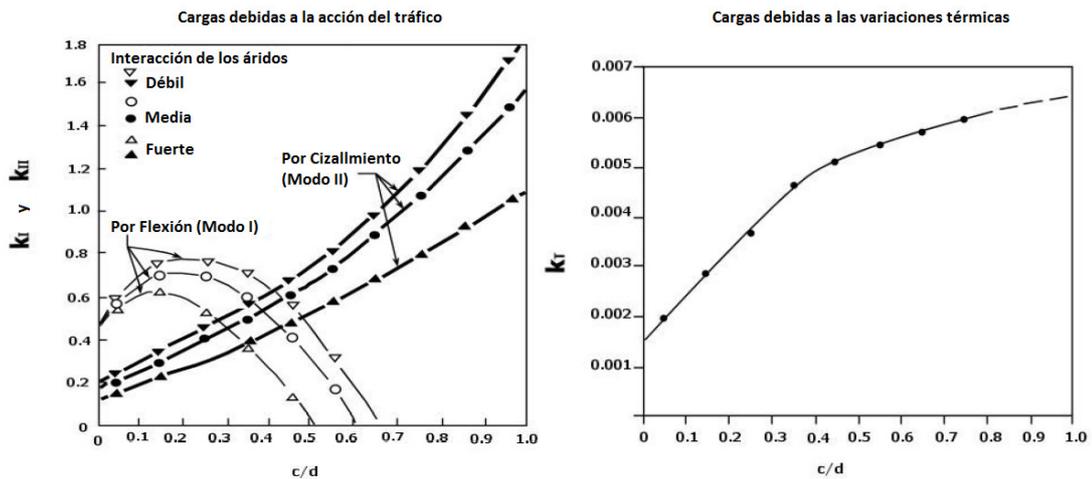


Figura 11. Valores del factor de intensidad de tensiones en función de la longitud relativa de la fisura (c =longitud de la fisura/ d =espesor total de la capa). (Lytton 1989)

Así, podemos decir que los principales factores que influyen en la reflexión de fisuras en firmes de carretera son las características de la capa de base, las de las mezclas bituminosas que lo componen, las condiciones de adherencia entre capas, las condiciones de puesta en obra, y por supuesto, los factores climáticos y las condiciones de tráfico.

- Las **características de la capa de base** influyen sobre todo en la construcción de firmes semirrígidos, en los cuales la naturaleza y granulometría de los áridos, o la

naturaleza y dosificación del conglomerante son los factores que influyen de forma más evidente en el nivel de fisuración por retracción de las capas de materiales tratados.

Por una parte, la naturaleza del árido puede acelerar la cinética del fraguado (como ocurre en el árido calizo), o modificar el valor del módulo de elasticidad de la misma, introduciendo una variación en su comportamiento ante fisuración. A pesar de ello, el principal motivo de fisuración en una capa tratada son los gradientes térmicos, y por tanto, el coeficiente de dilatación térmica del árido es el que mayor influencia tiene sobre la misma. Dada la importancia que representa el esqueleto mineral en la mezcla (en torno al 95% en peso), el coeficiente de dilatación de ésta será muy similar al de los áridos (los de tipo calizo proporcionan mejores resultados que los silíceos).

Además de la naturaleza del árido, su tamaño también influye en la aparición de fisuras en las capas tratadas. Así, los áridos de menor tamaño favorecen un aumento del gradiente térmico necesario para provocar la fisuración, disminuyen el valor del módulo de elasticidad del material aumentando la deformación a rotura del mismo, mejoran la homogeneidad de la mezcla y aumentan el número de enlaces conglomerante-árido.

La naturaleza y dosificación del conglomerante influyen directamente sobre la velocidad de fraguado y las características mecánicas del material. El desarrollo lento y continuado de resistencias es el factor que mayor influencia puede tener en el fenómeno de reflexión de fisuras. Las bajas resistencias iniciales motivan la formación de fisuras de retracción producidas por gradientes térmicos, limitando el tamaño y abertura de las mismas, lo que reduce sustancialmente el fenómeno en superficie. Además, la obtención de largos plazos de endurecimiento con formación continua de enlaces, proporciona al material cierta capacidad de autorregeneración de las fisuras formadas.

- A pesar de la aleatoriedad de los resultados obtenidos en torno a la reflexión de fisuras en pavimentos, las ***características de las capas de mezcla bituminosa*** como

granulometría, contenido y naturaleza del ligante, relación filler-betún, y espesor de la capa, influyen de forma significativa en este hecho. Las mezclas más compactas o con mayor contenido de ligante, tienen una evolución de la reflexión de la fractura más lenta. Asimismo, el empleo de espesores reducidos conduce a un desdoblamiento generalizado de las fisuras reflejadas en un periodo inferior a 5 años, favoreciendo la entrada de agua y aumentando la velocidad de degradación de la capa.

Por su parte, el empleo de un ligante que aporte mayor flexibilidad y cohesión a la mezcla resultará clave para garantizar el buen comportamiento de ésta. Así, se recomienda el empleo de ligantes modificados de alta viscosidad con polímeros elastoméricos.

Además de estos factores, un buen dimensionamiento de las mezclas utilizadas en el paquete de firmes, adecuándolas a los niveles de tráfico a soportar, será un factor clave para retrasar la aparición de fisuración por fatiga en la capa de rodadura.

- En el fenómeno de reflexión de fisuras, la existencia de **adherencia entre las capas** del firme influye directamente en la naturaleza de la fisura reflejada. En este sentido, resulta muy positivo la existencia de una buena adherencia entre capas que permita el desarrollo de fisuras localizadas, en lugar de una adherencia deficiente la cual no constituye una medida alternativa a pesar de que retrasa el proceso de reflexión. Es por ello por lo que resulta fundamental proporcionar un riego de curado y adherencia entre capas, antes de proceder a su extendido.
- En cuanto a las **condiciones de puesta en obra**, existe una clara influencia tanto del tiempo transcurrido entre la extensión de la capa de base y las capas de mezcla bituminosa, como de las condiciones climáticas que rodean la extensión de cada una de ellas. Además, el grado de compactación alcanzado, o el grado de humedad de la mezcla, también influyen en el comportamiento a largo plazo de estos materiales. La ejecución de juntas (transversales y longitudinales), y la pre-fisuración del pavimento, contribuyen con la formación de grietas más finas, rectilíneas y

regularmente espacia, que hacen que el firme sea menos degradable ante esta patología.

- Las **condiciones climáticas** de la zona, con fuertes diferencias de temperatura entre el día y la noche, afectan notablemente en el fenómeno de reflexión de grietas de retracción. Las losas formadas por una fisuración libre de la capa, o por la existencia de juntas de contracción regularmente espaciadas, sufren un combado de bordes hacia arriba o abajo en función de que el gradiente térmico sea negativo (paso de la noche al día) o positivo (del día a la noche), que unido al **efecto del tráfico** produce la aparición de importantes tensiones en la capa de rodadura del firme, favoreciendo la propagación de fisuras.

2.2.2.2. Fisuración Descendente

Hasta hace no muchos años, se pensaba que las fisuras de las capas bituminosas se iniciaban en el fondo de la capa (ya fueran debidas a un fenómeno producido en esa misma capa o por reflexión desde las capas inferiores), y posteriormente se propagaban a través de ésta hasta la superficie. Tradicionalmente, esta manera de entender el fenómeno de fisuración ha marcado la tendencia a seguir en los métodos de diseño y dimensionamiento de firmes, así como en las soluciones de rehabilitación. A pesar de ello, algunos estudios recientes (Baladi et al. 2003; Harmelink & Aschenbrener 2003; Uhlmeyer et al. 2000; Witczak & El-Basyouny 2004), han puesto de manifiesto que con frecuencia las fisuras en los firmes asfálticos se originan en superficie, y progresan paulatinamente hacia abajo. Este fenómeno es conocido como “Top Down Cracking”, o en español, fisuración descendente (Figura 12).



Figura 12. Testigos que muestran la existencia del fenómeno de fisuración descendente (Proyecto Fenix 2010).

La fisuración descendente se manifiesta tanto en fisuras transversales como longitudinales (más frecuentemente, situándose a ambos lados de las rodadas de los vehículos pesados), y su aspecto es relativamente rectilíneo, con algunas sinusoides (que lo hacen diferente a las fisuras longitudinales provocadas por las juntas constructivas longitudinales mal ejecutadas; Figura 13). En una primera fase del fenómeno aparecen las fisuras longitudinales, posteriormente, aparecen las fisuras transversales, y por último, se llega a una fisuración generalizada del pavimento.



Figura 13. Aspecto de la fisuración descendente en la superficie de un firme (Proyecto Fenix 2010).

Muchos de los modelos empleados tradicionalmente en la predicción de la vida de servicio de un pavimento, así como algunas de las técnicas de rehabilitación de firmes empleadas con asiduidad, han quedado en entredicho tras conocerse este fenómeno, ya que lo han obviado, y se han basado únicamente en el proceso de fisuración ascendente o reflexiva. Así, siempre se ha atendido más a resolver los problemas de resistencia estructural, cuyo primer elemento es la resistencia a la fatiga, o a la protección contra otros factores como las heladas, que contra la fisuración originada en superficie.

Según un estudio de 3 años llevado a cabo en Europa (en el que participaron 22 países, entre ellos España) en el que se analizaron las causas de deterioro de los firmes, el fenómeno de fisuración descendente se encuentra como la tercera causa de deterioro observada, después de las roderas y la pérdida de resistencia al deslizamiento (European Commission 1999). Posteriormente, varias investigaciones desarrolladas en EE.UU, demuestran que la fisuración descendente se trata de un fenómeno más frecuente de lo que se pensaba. En uno de estos estudios, llevado a cabo por el Departamento de Transportes de Colorado, se concluyó que la fisuración descendente se daba con una frecuencia tres veces superior a la fisuración reflejada de las capas inferiores (Harmelink & Aschenbrener 2003). Este hecho fue corroborado por el Departamento de Transportes de Michigan, encontrando una frecuencia de aparición de la fisuración descendente 4 veces superior a la de la fisuración reflejada (Baladi et al. 2003).

Según los estudios llevados a cabo por Emery 2007 las causas potenciales de la aparición de fisuración descendente (que tiende a ser más severa en climas cálidos y zonas elevadas) son:

- La aparición de grandes tensiones y esfuerzos cortantes en las superficies de rodadura debidas a cargas verticales no uniformes (porque la tensión de contacto del neumático no es uniforme ya que éste posee acanaladuras). Molenaar y Potter proponen una explicación al desarrollo de este tipo de fisuras, basada en la configuración de la carga aplicada por el tráfico (Molenaar & Potter 1997; Molenaar 2004). Según estos autores, la componente vertical de la carga aplicada por el

neumático sobre el pavimento no es uniforme y está inscrita en un rectángulo, de manera que también se traduce en una componente horizontal de cizallamiento (Figura 14). La distribución de este tipo de esfuerzos provoca deformaciones en la superficie muy localizadas que provocan la aparición de fisuras.

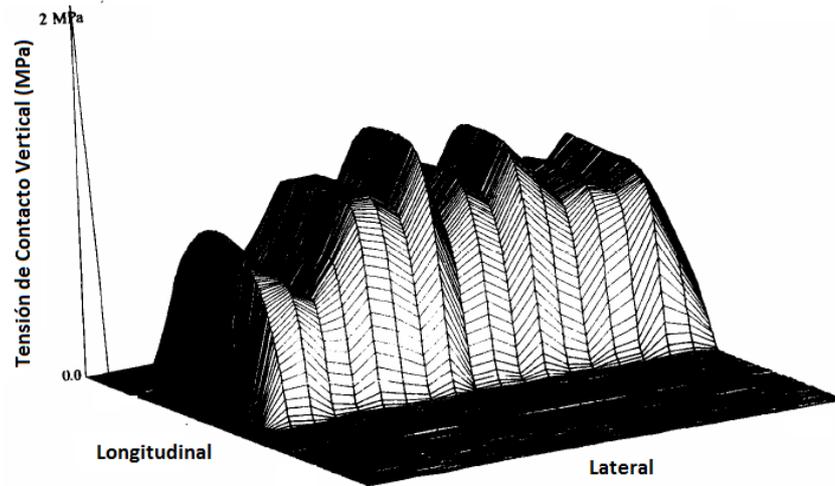


Figura 14. Distribución de cargas transmitidas por el neumático sobre el pavimento. (Molenaar 2004)

- La mala calidad de la mezcla bituminosa, ya sea por sus características propias o por una mala fabricación, extendido y compactación.
- Separación entre capas del firme.
- Tensiones debidas a los cambios de temperatura (gradientes térmicos). Las variaciones térmicas influyen de manera directa en la fisuración descendente (Nesnas & Nunn 2004), así la capa de rodadura sufre una contracción en verano y una dilatación en invierno, que puede contribuir al pandeo en la superficie y la aparición de fisuras cuando se alcance el límite de tracción del material.
- Gradientes de deformaciones entre la capa de rodadura y las capas inferiores.
- Envejecimiento prematuro de la capa de rodadura (la fisuración descendente se hace más severa cuanto más rígido es el pavimento, Witczak & El-Basyouny 2004).

Según Kim et al. 2006, la propensión a la aparición de fisuración descendentes es mayor, cuanto mayor es el espesor y la rigidez de la capa de mezcla bituminosa aplicada, menos uniforme es la presión de contacto rueda/pavimento, y menos rígida es la base del firme.

Por su parte, la guía sobre fisuración descendente desarrollada por el Proyecto Fenix 2010, destaca que la aparición de este fenómeno está asociada a la simultaneidad de dos circunstancias, la baja resistencia a deformarse del material asfáltico (mezclas demasiado rígidas) y las tensiones de tracción en la superficie del pavimento. Por un lado, la excesiva rigidez (o falta de resistencia a tracción) del pavimento puede estar provocada por la segregación del árido grueso de la mezcla, un bajo contenido en ligante, un exceso de huecos en la mezcla (que le resta cohesión interna), las bajas temperaturas de servicio (potenciada por la susceptibilidad térmica del ligante), o como Emery 2007 señala, el envejecimiento del material bituminoso. Por otro, las tracciones en la superficie del pavimento pueden tener origen en las cargas del tráfico o cambios de temperatura (como también señala Emery 2007). Las situaciones más propensas según esta guía para la aparición de fisuración descendente son:

- Flexión negativa del pavimento a ambos lados de la rodada.
- Falta de homogeneidad en la presión de contacto neumático-pavimento debido a las acanaladuras de éstos.
- Curvamiento cóncavo de losas y bloques en pavimentos de hormigón o en capas tratadas.
- Tracciones de origen térmico en capas bituminosas.

Tal y como ocurre con la fisuración ascendente cuando alcanza la superficie del pavimento, la fisuración descendente permite la entrada de agua a las capas inferiores del firme, provocando problemas en la adhesividad, y por tanto la desintegración parcial de la mezcla. Además, la aparición de este fenómeno supone una discontinuidad en el material, que se traduce en una pérdida de capacidad estructural que repercute en el resto de las capas y en el cimiento del firme.

En nuestro país se ha empezado a tomar conciencia de esta problemática, y se está elaborando un modelo que permita estimar el riesgo de que aparezcan problemas de fisuración descendente en determinadas secciones estructurales, de manera que esta patología se tenga en cuenta a la hora de dimensionar el diseño del firme (Proyecto Fenix 2010).

2.2.3. Soluciones contra el Fenómeno de Fisuración en Carreteras

Las principales soluciones adoptadas para ralentizar la propagación de fisuras a través del pavimento tienen como objetivo retardar la aparición de los fenómenos que las provocan. Hasta la fecha, y dado que la concepción del fenómeno de fisuración descendente es relativamente reciente, la mayor parte de estas soluciones han estado centradas en combatir la fisuración reflexiva. En base a ello, si consideramos que en dicho fenómeno intervienen tres fases (fisuración de la capa de base, inicio de la fisura en la capa superior por reflexión de la discontinuidad, y propagación de la fisura hasta la superficie), podemos decir que un sistema efectivo para ralentizarlo es aquel que tiene como objetivo retardar alguna de estas tres fases.

Atendiendo a cada una de las partes que conforman la estructura del firme, podemos encontrar diferentes tipos de actuaciones que permiten retardar la aparición o ralentizar la propagación de las fisuras a través del mismo. Estas actuaciones vienen recogidas en la Tabla 1, y son descritas a continuación en los siguientes apartados.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

Zona de actuación	Tipo de actuación	Variantes técnicas
CAPA DE BASE	Medidas sobre la naturaleza del material y las condiciones de puesta en obra	<ul style="list-style-type: none"> -Actuaciones sobre la dosificación y componentes del material -Adición de productos que disminuyan los fenómenos de retracción -Evitar condiciones climáticas extremas y cuidar la adherencia entre capas
	Localización de fisuras	<ul style="list-style-type: none"> -Pre-fisuración ordenada -Pre-fisuración no ordenada
PAVIMENTO	Aumento del espesor del pavimento por encima del estrictamente necesario a nivel estructural	-
	Interposición de sistemas de absorción de tensiones	<ul style="list-style-type: none"> -Técnicas de interposición generalizadas -Técnicas de interposición localizadas -Técnicas de interposición de capas espesas con aporte estructural
MEZCLA BITUMINOSA	Actuaciones sobre la granulometría	<ul style="list-style-type: none"> -Riegos con grava -Microaglomerados -Mezclas abiertas o discontinuas
	Actuaciones sobre el ligante	-Modificación con polímeros
	Incorporación de Aditivos	<ul style="list-style-type: none"> -Fibras -Polvo de caucho

Tabla 1. Soluciones contra el fenómeno de fisuración en carreteras.

2.2.3.1. Actuaciones sobre la Capa de Base

El empleo de capas de base tratadas con conglomerantes hidráulicos permite obtener un paquete de firme con una notoria capacidad estructural a un coste relativamente bajo, en comparación con otros tipos de soluciones. El hándicap que presenta este tipo de bases es la aparición del fenómeno de fisuración por retracción, que en la mayoría de las ocasiones llega a reflejarse en las capas superiores, incluso hasta la capa de rodadura, provocando la pérdida de estanqueidad del pavimento y un aumento de la irregularidad superficial.

La fisuración por retracción en las bases tratadas con conglomerantes hidráulicos es un fenómeno inherente a este tipo de materiales. La naturaleza de los áridos empleados, el tipo y dosificación del conglomerante, las condiciones de puesta en obra, y las condiciones climáticas a las que se va a ver sometida la capa, tienen una influencia directa sobre la intensidad y forma de la fisuración (CEDEX 1992).

A excepción de los firmes situados en zonas de climatología extrema (inviernos muy fríos y verano calurosos), con niveles de servicio excepcionales (autopistas y autovías con grandes intensidades de tráfico), la aparición de grietas de retracción en la superficie del firme es admisible siempre que se cumplan dos condiciones: que las fisuras sean finas incluso en invierno, y que la evolución de la fisuración no sea lo suficientemente importante como para entrañar la degradación de la capa de rodadura, a corto o medio plazo.

Para conseguir que las fisuras sean lo más finas posibles, es necesario actuar sobre dos parámetros fundamentales: el coeficiente de dilatación térmica del material tratado (que va a depender de la naturaleza del árido utilizado, siendo más acusada la fisuración cuanto mayor sea su coeficiente de dilatación) y la distancia entre las fisuras. Este último parámetro dependerá del nivel de adherencia de la capa tratada con la subyacente (cuanto mayor sea ésta, más finas y próximas resultarán las fisuras), y de las características mecánicas del material (resistencia y módulo de elasticidad) en el momento de la fisuración (a mayor rigidez y resistencia del material, mayor será el espaciamiento entre fisuras, y por tanto la abertura de las mismas).

Para conseguir que la fisuración de las capas tratadas sea lo más reducida posible, se cuenta con dos vías alternativas.

- **Medidas sobre la naturaleza de la mezcla y las condiciones de puesta en obra**

La primera solución a esta problemática es la mejora de las características de los materiales utilizados en la capa de base. Las actuaciones sobre la dosificación y la naturaleza de los componentes de la mezcla puede reducir el coeficiente de dilatación térmica de la capa de base, o bien disminuir su rigidez aumentando la deformación de la misma antes de alcanzar la rotura, lo que se traducirá en grietas de retracción y de origen térmico próximas y finas, reduciéndose su reflexión en la superficie del firme (LCPC 1988). No obstante, a pesar de que a nivel de pruebas de laboratorio muchas de estas actuaciones han tenido resultados satisfactorios, en obra no han obtenido el efecto deseado, y apenas se ha conseguido paliar la aparición de fisuras con estos métodos (CEDEX 1992).

- **Técnicas de localización de fisuras**

Si consideramos que la aparición de fisuras en las capas de base tratadas con conglomerantes hidráulicos es inevitable, una de las medidas de actuación para luchar contra su reflexión puede ser tratar de controlarlas. Por una parte, si las fisuras son próximas unas a las otras, son más finas y los movimientos que provocan son de menor intensidad (retardando el daño provocado). Por otra, la posibilidad de localizar las fisuras permite no solamente un tratamiento preventivo sino también facilita el mantenimiento de la misma. Así, se han desarrollado las llamadas técnicas de localización de fisuras con las que se pretende aplicar tratamientos preventivos sobre las fisuras, conseguir la linealidad de las mismas, así como determinar el número óptimo que garantice una abertura mínima y una reducción de las tensiones transmitidas a las capas inferiores. Existen diferentes técnicas de prefisuración entre los que podemos distinguir los métodos de creación de fisuras ordenadas y no ordenadas.

La **pre-fisuración ordenada** consiste en la ejecución de juntas rectilíneas en las capas de base tratadas de forma similar a la empleada en la tecnología de pavimentos de hormigón. Debido a su mayor sencillez, menor coste y eficacia, estas juntas suelen realizarse en fresco (las juntas por serrado con el material fraguado requieren un riguroso control, y encarecen excesivamente el coste de la obra). Las más simples consisten en provocar una fisura que reduzca la sección de forma local (Vanelstraete & Bondt 1997), mediante la ejecución de una entalla en la zona superior de la capa (Figura 15a) o la introducción de un perfil en la zona inferior (Figura 15e).

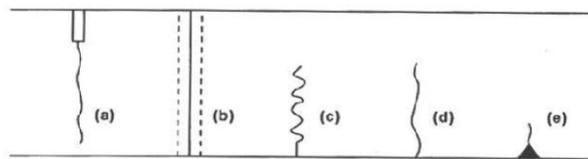


Figura 15. Principales soluciones de pre-fisuración ordenada. (Vanelstraete & Bondt 1997)

Asimismo, existen numerosas técnicas más efectivas y complejas como el método CRAFT (Figura 15b), creado por la empresa Eurovía, que permite asegurar la estanqueidad de la capa, para lo cual antes de su compactación se lleva a cabo la ejecución de la entalla en todo el espesor, donde se introduce una película bituminosa (Figura 16a). El método esquematizado en la Figura 15c se denomina Junta Activa, fue desarrollado por la empresa SETEC Géotechnique, y consiste en la ejecución de una fisura insertando un perfil ondulado en los 2/3 inferiores de la capa (Figura 16b). La Figura 15d muestra el procedimiento OLIVIA desarrollado por la empresa Viafrance consistente en la introducción de una banda de plástico flexible. Ambos métodos aseguran una buena transferencia de cargas entre losas gracias a la forma ondulada del perfil y a la deformabilidad de la banda de plástico, restableciendo la continuidad mecánica de la capa frente a los esfuerzos verticales, con lo que se consiguen losas independientes de pequeña longitud, disminuir la abertura entre los labios de las juntas formadas, y reducir la reflexión de fisuras en las superficie del firme (Figura 16c).

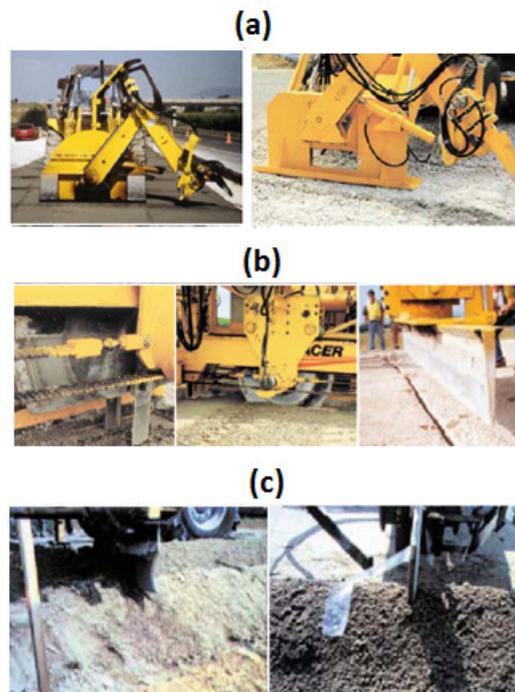


Figura 16. (a) Método CRAFT (Eurovia-Vinci); (b) Junta activa. (Sacer); (c) Prefisuración OLIVIA. (STBA 1999).

Además de estos métodos de prefisuración existen muchos otros, entre los que podemos citar el prefisurador de la empresa Sacyr (consistente en una máquina dotada de un mecanismo de corte robusto, con mayor estabilidad durante la operación de corte, cuya operación automatizada mejora el rendimiento del proceso, con objeto de que además que se cierre de nuevo la junta durante la compactación, permita transición de cargas entre los lados de la junta y así controlar y limitar la formación de fisuras), el dispositivo Black Tec, el sistema victoria o el quad prefisurador (Figura 17).



Figura 17. Ejemplos de equipos de prefisurado (Sacyr, Quad prefisurador y dispositivo Black Tec).

En lo que respecta a la **pre-fisuración no ordenada**, se prefisura la base tratada con el fin de aumentar notablemente el número de fisuras formadas, de manera que se produzca un reparto de los movimientos debidos a los gradientes térmicos, obteniéndose como resultado una abertura mínima de la fisura. Para su ejecución se utiliza el paso de tráfico pesado de obra sobre la capa de base tratada o un rodillo vibratorio. Las estructuras obtenidas se llaman estructuras multifisuradas o microfisuradas, de tal manera que la multitud de discontinuidades conduce a la creación de un sistema pseudo-continuo de losas articuladas de pequeño tamaño, que disminuye la fisuración en la capa superior. Por contra, se produce una pérdida de resistencia estructural que deberá ser tenida en cuenta a la hora del dimensionamiento del firme. A pesar de ello, los inconvenientes de esta vía son muchos, siendo necesaria la adopción de medidas adicionales como la impermeabilización de las capas para evitar la infiltración del agua a través de la misma.

2.2.3.2. Actuaciones en sobre el Pavimento

Durante años, la única medida adoptada para impedir, o al menos retrasar la reflexión de fisuras en firmes desde la capa de base, ha sido la de **aumentar el espesor del pavimento** por encima del estrictamente necesario desde el punto de vista estructural. Algunos autores apuntan que para retardar la aparición de fisuras en las capas superiores del firme, las soluciones adoptadas deben cumplir dos objetivos fundamentales, reforzar y mejorar la resistencia a la propagación de la fisura en la nueva capa, y conducir su propagación de forma que se aumente su recorrido hasta alcanzar la superficie (STBA 1999; Zhang & Li 2002).

Se trata de una de las soluciones más sencillas, en la que dicho aumento del espesor juega un papel fundamental proporcionando un mayor espacio físico a atravesar por la grieta, disminuyendo las tensiones verticales que llegan a los bordes de las grietas y protegiendo térmicamente a las capas de base tratadas con conglomerantes hidráulicos. Además de

éste, la naturaleza del betún empleado también ejercerá una influencia notable sobre la capacidad de deformación elástica reversible de la capa, la capacidad de auto-recuperación del aglomerado (cerrando y soldando fisuras en épocas de verano bajo el efecto del tráfico), y sobre la resistencia al envejecimiento de la mezcla. Por tanto, se recomienda el empleo de altos contenidos en betún (es necesaria una viscosidad mayor), de rigidez algo inferior a los utilizados habitualmente, y modificados con elastómeros para evitar problemas de roderas.

A pesar de ello, el coste adicional de estos sobre-espesores resulta, en muchas ocasiones, excesivo e injustificado. Por otra parte, con climas continentales y tráficos pesados, las fisuras acaban por reflejarse en superficie al cabo de unos cuantos años, a pesar de emplearse espesores de aglomerado superiores a 15 cm (se necesitan espesores de 20 cm para que la técnica comience a ser efectiva). La extensión de una nueva capa de mezcla bituminosa de 4 a 5 cm de espesor, tampoco resulta efectiva (a pesar de solucionar temporalmente el problema) ya que al subsistir el agrietamiento, es cuestión de poco tiempo el que las fisuras vuelvan a reflejarse en superficie.

Otra solución es la ***interposición de sistemas de absorción de tensiones en la interfaz base/pavimento***. La forma más sencilla de alcanzar este objetivo, retrasando la aparición de fisuras en superficie, se consigue impidiendo la adherencia base/pavimento. Sin embargo esta solución no es admisible por los graves inconvenientes que conlleva, entre los que cabe destacar la rápida fatiga de las mezclas bituminosas. Así, la solución a adoptar es la ejecución de las denominadas técnicas de interposición, entre las que distinguimos *técnicas de interposición generalizadas*, las *técnicas de interposición localizadas*, y las *técnicas de interposición de capas espesas con aporte estructural (estructuras inversas)*.

Las ***técnicas de interposición generalizadas*** consisten en la interposición de una capa delgada entre la base tratada y el pavimento bituminoso, con la misión de absorber los movimientos de las fisuras producidas por gradientes térmicos o cargas de tráfico, evitando su reflexión en la superficie del firme. La adherencia entre capas debe quedar asegurada en todo momento, así como la ausencia de deformaciones plásticas que produzcan la fatiga de las capas superiores.

Estas técnicas (conocidas como sistemas anti-reflexión de fisuras o sistemas retardadores de fisuras) llevan a cabo un tratamiento continuo sobre la totalidad de la superficie agrietada, y por tanto, suelen emplearse sobre carreteras ya fisuradas, consistiendo su aplicación en una primera capa de nivelación (de pequeño espesor, compuesta por áridos de tamaño máximo en torno a los 7 mm, y que permite obtener una superficie uniforme y que proporcione un buen contacto entre las capas existentes y el sistema anti-fisuras), una capa intermedia destinada a evitar la propagación de las fisuras, y una capa de mezcla bituminosa superior (que servirá de rodadura para el tráfico, y que podrá contribuir a disminuir la aparición de fisuras en superficie en función a su composición, utilizando betunes modificados o fibras, y a su espesor). Según el objetivo perseguido por la capa intermedia utilizada podemos clasificarlas en *flexibles* (capaces de resistir grandes deformaciones en las proximidades de las fisuras), *rígidas* (que actúan como refuerzo evitando la deformación de la capa de rodadura) o *impermeabilizantes* (que evitan la entrada de agua y otros agentes químicos dañinos, a la estructura del firme), pudiendo cumplir varios de ellos en función del material y el tipo de capa utilizada (Vanelstraete & Bondt 1997). Así, siempre que las condiciones de puesta en obra lo permitan, es posible la combinación de dos de estos sistemas. De entre todos los sistemas empleados, podemos destacar la *arena-betún*, los *sistemas SAMI* (Stress Absorbing Membrane Interlayer), los *geotextiles impregnados* con ligantes hidrocarbonados, las *geomallas*, las *mallas de armadura metálica*, y los *nidos de abeja* (CEDEX 1992, Figura 18).

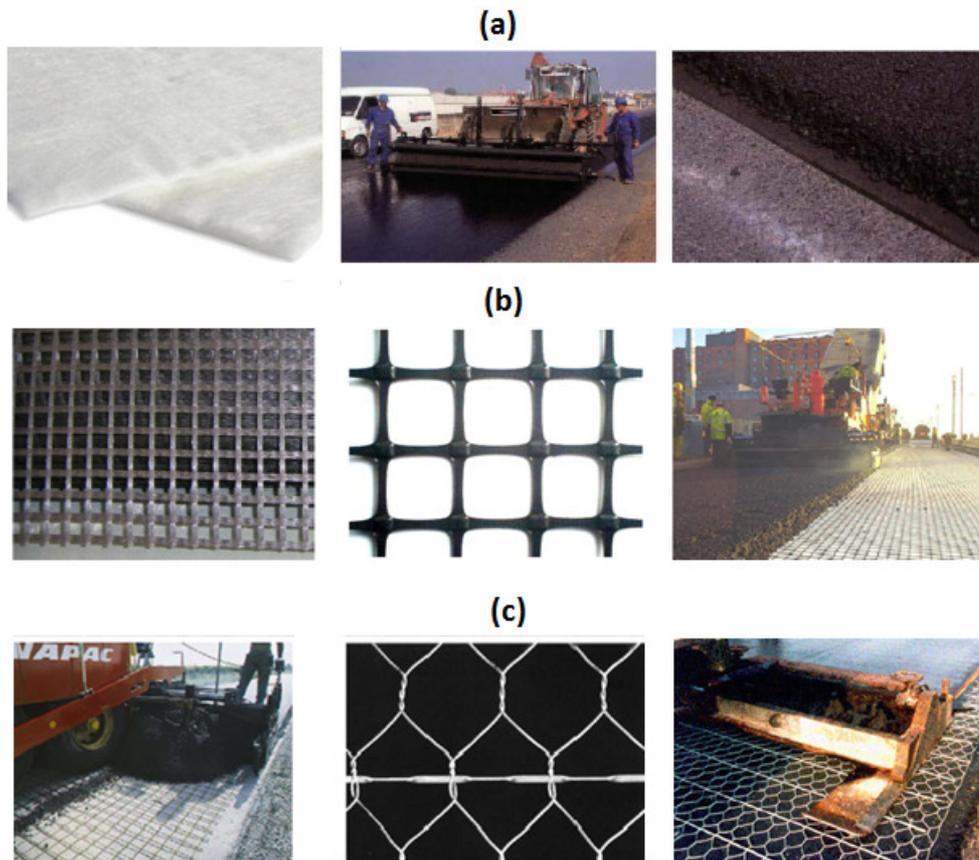


Figura 18. (a) Geotextil impregnado (Geotexan 2012); (b) Geomalla (Geosyntech 2012; Tensar 2002; 6DSolutions 2001); (c) Malla metálica (Bekaert 2002; Reflex 2002).

Las **técnicas de interposición localizadas** son aquellas que afectan exclusivamente a las juntas creadas en la capa tratada, cubriéndolas de manera que el pavimento bituminoso quede extendido sobre una superficie sin discontinuidades. Entre las más importantes pueden señalarse el sellado de juntas mediante ponteados, o el empleo de bandas bituminosas. Por otra parte, otra de las medidas posibles es el tratamiento de la fisura cuando ésta aparece en la superficie del pavimento, de forma que para ralentizar la degradación de firmes ya fisurados puede emplearse el sellado de las grietas superficiales con material bituminoso o algún tipo de resina que limite los movimientos de la discontinuidad y garantice la estanqueidad de la capa de rodadura (evitando la entrada de

agua a través de la fisura que pueda terminar dañando la capacidad estructural del firme) (Figura 19, Yildirim et al. 2006).



Figura 19. Sellado de fisuras mediante ponteoado. (Yildirim et al. 2006)

Por otra parte, la puesta en obra de una capa intermedia de material granular es también un medio para ralentizar el remonte de fisuras (Titi et al. 2003). Este tipo de estructura es conocida como estructura inversa, y la concentración de tensiones en el vértice de la fisura es absorbida en este caso por el movimiento relativo de los áridos. Así, la **técnica de las estructuras inversas** consiste en la interposición, entre la capa tratada con conglomerante hidráulico y la mezcla bituminosa, de una capa granular de pequeño espesor (12 a 15 cm). La propia naturaleza de la zavorra artificial impide la reflexión de las grietas de retracción y supone, por tanto, la posibilidad de disminuir el espesor de las mezclas bituminosas. A pesar de ello, su utilización presenta algunas dudas ya que algunos pavimentos que han utilizado esta técnica, han mostrado síntomas de fatiga, y otros han tenido problemas de entrada de agua, que han provocado un rápido colapso de la estructura. Para resolver dicho problema, han aparecido posibles soluciones con capas de grava-emulsión (desempeñan un papel similar al de la zavorra artificial en las estructuras inversas, pero con la garantía de calidad que proporciona la presencia del ligante), que además de suponer un mecanismo contra la reflexión de fisuras, suponen una contribución estructural al conjunto del firme.

2.2.3.3. Actuaciones sobre las Capas de Mezcla Bituminosa

Por último, queda la posibilidad de actuar directamente sobre la formulación de las mezclas bituminosas empleadas en el paquete de firmes, con el objetivo de proporcionarles las características mecánicas necesarias para mejorar su comportamiento ante los fenómenos de reflexión de fisuras (diseñando una solución de compromiso entre deformabilidad y buena resistencia a roderas). Así, podrá actuarse sobre la granulometría, en la que las mezclas discontinuas ricas en mortero, ofrecen un mejor comportamiento que las mezclas de granulometría continua. Además, las mezclas abiertas, preferiblemente en frío, también presentan un buen comportamiento ya que, por su propia naturaleza, presentan una gran flexibilidad lo que las hace más duraderas. Otro parámetro de actuación es el tipo de ligante empleado, de forma que el empleo de ligantes modificados con polímeros (SBS o EVA) o caucho, permiten alcanzar mezclas más resistentes a la tracción sin que por ello aparezcan problemas de deformaciones plásticas. Además de estos factores, la incorporación de fibras aumenta la resistencia a tracción de las mezclas y permite incrementar el contenido de ligante a adicionar (sin riesgo de exudaciones).

Así, una de las formas más efectivas para luchar contra la aparición de fisuras en el firme es adoptar soluciones que mitiguen sus consecuencias mediante el empleo de mezclas bituminosas de características especiales, diseñadas o modificadas para resistir las sollicitaciones impuestas por este fenómeno. Entre ellas podemos destacar algunas soluciones como los sistemas SAM (Stress Absorbing Membrane, Caltrans 2005, Caltrans 2006), los mircoaglomerados en frío (Elsamex 2012), las mezclas con polvo de caucho (CEDEX 2007; Gil & Herrero 2009; Pérez & Páez 2009; Páez et al. 2010; Ruiz 2010), las mezclas abiertas, las mezclas discontinuas con fibras (Cooper & Held 1987) o los reciclados en frío, las cuales son utilizadas como sistema anti-fisuras en firmes de carretera (habitualmente para capa de rodadura), ya sea en firmes de nueva construcción o en su rehabilitación como capa superficial una vez que este fenómeno ya ha aparecido.

Haciendo una síntesis del conjunto de actuaciones presentadas (Tabla 2), podemos decir que por un lado las actuaciones sobre las capas de base no terminan de abarcar todo el

campo de influencia del fenómeno de fisuración ya que se limitan a capas de base tratadas con conglomerantes hidráulicos. Además, el objetivo de dichas actuaciones no es eliminar la aparición de fisuras en el firme, sino limitar su espesor y número a unos niveles aceptables. Por su parte, las soluciones llevadas a cabo mediante la interposición de sistemas de absorción generalizadas suelen ser bastante costosas económicamente y relativamente difíciles de ejecutar (pudiendo provocar una pérdida de efectividad prematura). En este mismo sentido, las técnicas de interposición localizada y las estructuras inversas también presentan serios problemas de entrada de agua asociados a la evolución de los procesos de fatiga.

Adoptar un sobredimensionamiento del espesor del pavimento tampoco resulta una solución efectiva ya que se incurre en un incremento del coste de ejecución, y a largo plazo si no se introduce ninguna solución, la fisura terminará reflejándose en superficie. Así, podemos decir que los tratamientos que mayor potencial de mejora poseen son los realizados sobre las mezclas bituminosas (mejorando directamente sus propiedades resistentes anti-fisuras). En este sentido, la construcción de firmes con materiales que presenten una resistencia superior a la propagación de fisuras, se traducirá en una mejora del comportamiento de los mismos ante este fenómeno (adoptando soluciones desde la etapa inicial de diseño, y no incurriendo en remedios paliativos posteriores). Además, el empleo de este tipo de soluciones presenta las ventajas de su puesta en obra (las cuales se realizan de forma generalizada en toda la sección del firme y suelen llevarse a cabo con equipos convencionales) y la no necesidad de incurrir en sobre costes (puesto que la carretera se construye directamente con materiales anti-fisuras, sin necesidad de añadir ningún tipo de sistema como las membranas, geotextiles, etc.). Debido a ello, el estudio del comportamiento a fisuración de las mezclas bituminosas se postula como uno de los campos más interesantes en el avance de la investigación contra esta patología.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

Zona de Actuación	Actuación	Ventajas	Inconvenientes
CAPA DE BASE	Tratamiento sobre la naturaleza del material	-tratamiento económico -reduce el grosor de las fisuras producidas	-las experiencias en obra no han obtenido el efecto deseado -no resultan demasiado eficientes
	Pre-fisuración	-permite controlar el grosor y espaciamiento de la fisuras -facilitan el mantenimiento del firme -en combinación con otras actuaciones pueden ser bastante efectivas	-suelen ser difíciles de ejecutar con eficacia -en ocasiones suponen un sobre coste considerable -puede acarrear pérdida de resistencia estructural
PAVIMENTO	Aumentar el espesor	-proporciona mayor espacio físico a atravesar por la fisura -permite una mayor disipación de las cargas, disminuyendo las tensiones que provocan la fisura -aísla mejor térmicamente, disminuyendo los efectos de gradiente térmico	-supone un coste adicional considerable -aunque retarda su aparición, las fisuras terminan reflejándose siendo necesaria la actuación
	Técnicas de interposición generalizadas	-son tratamientos continuos sobre la totalidad de la superficie -disipan las tensiones que provocan la fisura -pueden servir como sistemas impermeabilizantes -en ocasiones actúan como refuerzo del firme	-pueden motivar problemas de deformaciones plásticas -suelen ser difíciles de ejecutar con eficacia -en ocasiones suponen un sobre coste considerable
	Técnicas de interposición localizadas	-garantiza la estanqueidad del firme -limita los movimientos de la discontinuidad	-con el tiempo deja de ser efectiva -mal resultado estético
	Estructuras inversas	-permite absorber las tensiones que provocan la fisura -permite disminuir el espesor del pavimento	-suelen presentar problemas de fatiga -la entrada de agua provoca su colapso
MEZCLAS BITUMINOSAS	Diseño y modificación de Mezclas Bituminosas	-fácil aplicación -tratamiento económico -gran flexibilidad para disipar las tensiones que provocan la fisura, con buena capacidad portante	-en ocasiones no resultan efectivas -sensibles a las condiciones de puesta en obra y climáticas

Tabla 2. Ventajas e inconvenientes de las soluciones contra el fenómeno de fisuración.

2.3. Estudio del Comportamiento de Mezclas Bituminosas ante Fenómenos de Fisuración

Una de las formas más efectivas para actuar contra la aparición de fisuras en pavimentos de carretera es conocer en profundidad el comportamiento mecánico ante este fenómeno de los materiales que lo componen. Dado que la mayor parte de los firmes de todo el mundo están fabricados con mezclas bituminosas (EAPA 2012), la tesis aquí presentada se centra en el estudio del comportamiento a fisuración de estos materiales, y por tanto, en lo que sigue profundizaremos en el análisis de su respuesta ante esta patología. Para ello será necesario atender a tres aspectos fundamentales que van a condicionar dicha respuesta, el comportamiento del material ante el proceso que provoca la fisuración, la capacidad del material para recuperarse de ese proceso, y la evolución del daño causado a través del material (estando los tres íntimamente relacionados entre sí).

Las fisuras aparecidas en los firmes de carretera pueden ser provocadas por diversos factores (cambios de temperatura, paso de las cargas del tráfico, defectos constructivos, deslizamiento de tierras, etc.). A pesar de ello, y salvando el hecho de que la fisuración por defectos constructivos es un problema evitable y que la fisuración por asentamientos del suelo soporte o deslizamientos se produce de manera más puntual, podemos afirmar que la fisuración por fatiga (tanto térmica, como debida a las cargas del tráfico), es la más común en las carreteras de todo el mundo. Así, a la hora de llevar a cabo el análisis de este fenómeno deberemos de tener muy en cuenta el estudio de este proceso en las mezclas bituminosas.

Por otra parte, hay que considerar que este proceso de fatiga que provoca la aparición de fisuras en el firme no es uniforme en toda la sección del pavimento (puesto que las cargas del tráfico no son aplicadas siempre en el mismo punto), ni un proceso continuo o con una frecuencia fija (ya que el paso de vehículos y los gradientes térmicos tienen lugar en intervalos de tiempos variables en los que influyen las características de día/noche, invierno/verano, horas punta/horas valle, etc.). Así, el proceso de fatiga de las mezclas

bituminosas va a estar condicionado por estas circunstancias, provocando que para una zona puntual del pavimento existan periodos de descanso que permitan la recuperación parcial de la mezcla. Por tanto, dado que este efecto puede ejercer una influencia fundamental en la respuesta de la mezcla ante la aparición de fisuras, será necesario tenerlo en cuenta durante el estudio de su comportamiento.

En base a todas estas consideraciones, el objetivo de este capítulo será conocer en profundidad el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas ante fenómenos de fisuración. Para ello, en primer lugar se describen brevemente las características del material, para posteriormente realizar el estudio de su comportamiento mecánico ante los procesos de fatiga, su capacidad de recuperación (fenómeno conocido como “healing”), y finalmente, analizar el proceso de propagación de fisuras en mezclas bituminosas. De esta forma, se sentarán las bases necesarias para poder analizar y definir ensayos de laboratorio más efectivos que permitan profundizar en su estudio, permitiendo optimizar el diseño y desarrollo de mezclas bituminosas más resistentes y duraderas que permitan alargar la vida de servicio de los pavimentos.

2.3.1. Las Mezclas Bituminosas

Las mezclas bituminosas son materiales compuestos por la combinación de áridos de diferentes fracciones (grava, arena y filler) y un ligante hidrocarbonado (betún o alguno de sus derivados), de manera que todas las partículas de árido queden cubiertas por una película continua y homogénea, de forma que el efecto adhesivo las mantenga unidas (Kraemer et al. 2004, Figura 20).



Figura 20. Detalle de mezcla bituminosa.

Los *áridos* son un conjunto de partículas minerales de distintos tamaños que proceden de la fragmentación natural o artificial de las rocas, que normalmente provienen de la explotación de canteras y graveras. El comportamiento de los áridos depende tanto de sus propiedades físico-químicas, como de su granulometría. Entre las propiedades de un árido podemos destacar la porosidad, el peso específico, la textura superficial, la forma, la dureza y su alcalinidad o acidez.

Por su parte los *ligantes* hidrocarbonados son aglomerantes constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos, con propiedades termoplásticas que hacen que su consistencia dependa de la temperatura. Existen diferentes tipos de ligantes hidrocarbonados, entre los que podemos encontrar los betunes asfálticos (subproductos de las refinerías de petróleo formado por un sistema coloidal tipo gel que a temperatura ambiente es sólido), los betunes fluidificados (disolución de un betún asfáltico en un fluidificante), o las emulsiones bituminosas (dispersiones coloidales de betún asfáltico en agua, que a temperatura ambiente es líquida).

La mayor parte de las mezclas bituminosas se diseñan para que después del proceso de puesta en obra contenga cierto porcentaje de huecos, de forma que permitan la dilatación del ligante evitando fenómenos de deformabilidad plástica o de exudación. En una mezcla convencional, el volumen ocupado por el árido suele estar comprendido entre el 83 - 87%, el betún entre el 8 -12% y los huecos entre el 3 - 8%. A pesar de ello, existen diferentes tipos

de mezclas en las que dichos porcentajes varían, como por ejemplo las mezclas porosas donde los áridos pueden representar el 70 %, el betún el 10 % y los huecos el 20 %.

Las mezclas bituminosas pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios como la temperatura de fabricación y puesta en obra (calientes, frías, semicalientes, o templadas), el volumen de huecos en la mezcla (abiertas, cerradas, semicerradas, o porosas), el tamaño máximo de árido (finas o gruesas), la fracción de árido utilizado (mástico, mortero, macadam u hormigón), o la granulometría (uniformes, continuas, o discontinuas). Así, entre los tipos de mezclas más empleados encontramos los hormigones bituminosos en caliente, los micro-aglomerados en caliente, las mezclas de alto módulo, las mezclas porosas, los micro-aglomerados discontinuos en caliente, las mezclas HRA (Hot Rolled Asphalt), las mezclas GA (Gussasphalt o mastic asphalt), las SMA (Stone Mastic Asphalt), o las mezclas SA (Soft Asphalt) (Bardesi 2010).

2.3.1.1. Principios de Comportamiento de las Mezclas Bituminosas

La base del funcionamiento de las mezclas bituminosas es un doble sistema de resistencia mecánica en el que por un lado, cuando es solicitada a compresión, el rozamiento entre las partículas minerales se opone a su desplazamiento relativo, y por otro, cuando está sometida a tracción, es el ligante el que resiste. Para este último aspecto resulta fundamental que exista una buena adhesividad entre el ligante y los áridos (incluso en presencia de agua), y que la mezcla tenga la suficiente cohesión interna de forma que el ligante no se rompa. Frente a los esfuerzos tangenciales, ambos modos resistentes actúan conjuntamente.

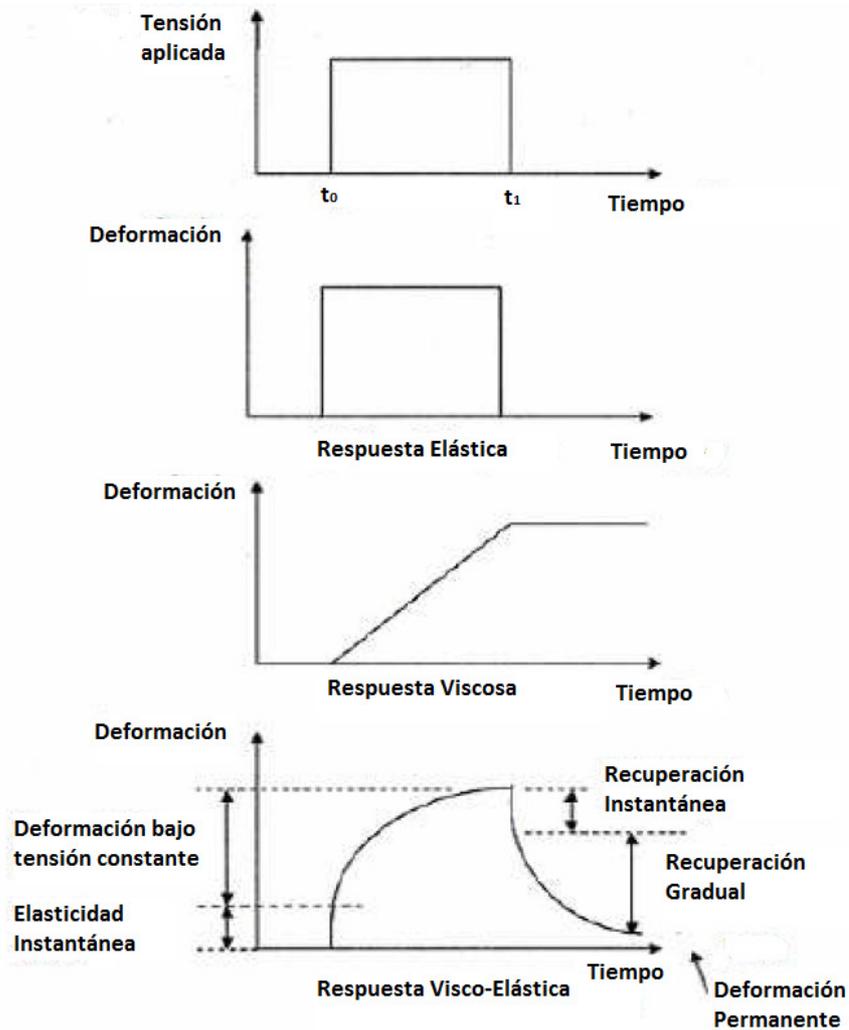


Figura 21. Respuesta elástica, viscosa y visco-elástica de un material sometido a una carga de tensión constante (Van der Poel 1954).

Debido a la naturaleza del material, el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas no depende solo de la magnitud de las tensiones soportadas, sino de cómo éstas son aplicadas (sobre todo de la velocidad de aplicación y la temperatura de la mezcla, Figura 21). Así, las mezclas bituminosas pueden presentar desde un comportamiento prácticamente elástico (en condiciones de baja temperatura y velocidad alta de aplicación de carga, o alta frecuencia), hasta un comportamiento más viscoso (en condiciones de temperatura más elevadas, con velocidades lentas de aplicación de cargas). De esta forma, podemos asumir que su comportamiento va a ser suma de los comportamientos de sus

componentes, de manera que nos encontramos con una componente elasto-plástica (áridos) y otra visco-elástica (betún), lo que nos conduce a una resultante de tipo visco-elasto-plástica (aunque también podemos hablar de resultante visco-elástica, ya que la componente plástica de los áridos va a influir en menor medida en su comportamiento). Algunos estudios afirman que en condiciones de carga y temperatura similares a las condiciones de servicio del pavimento, cualquier ensayo de laboratorio se puede considerar con un comportamiento visco-elástico lineal¹ (SHRP-A-389).

2.3.1.2. Propiedades de las Mezclas Bituminosas

Cada tipo de mezcla tiene unas propiedades intrínsecas diferentes, de forma que no es posible diseñar una mezcla que satisfaga plenamente todas las propiedades, debido a que algunas de ellas son contrapuestas y porque la importancia de unas u otras depende de la funcionalidad y la estructura del firme. Las principales propiedades que podemos encontrar en una mezcla bituminosa son (Bardesi 2010):

- **Estabilidad.** Es la capacidad para resistir las cargas y tensiones a las que se ve sometida, con unos valores de deformación tolerables. Esta resistencia mecánica es suma de la producida por el rozamiento interno de los áridos y la cohesión que proporciona el ligante hidrocarbonado.
- **Resistencia a deformaciones plásticas.** El comportamiento visco-elasto-plástico de las mezclas bituminosas en caliente conduce a que el paso de las cargas a baja velocidad y con temperaturas altas, vaya produciendo una acumulación de pequeñas deformaciones plásticas que, si la mezcla no tiene unas características adecuadas, se traduce en una fluencia del material. En esta propiedad influyen la

¹ La viscoelasticidad lineal es un comportamiento constitutivo especial que depende del tiempo, y que se caracteriza por el principio general por el cual se realizan cambios secuenciales en la tensión y deformación que son aditivos. Se expresa generalmente como el módulo complejo E^* (módulo dinámico), que representa la rigidez en una excitación sinusoidal y se define como la relación entre las amplitudes de tensión y las señales de deformación, mientras que el ángulo de fase representa la dependencia del tiempo.

relación filler/betún, la proporción y consistencia del betún asfáltico empleado, y la angulosidad del árido.

- **Resistencia a la disgregación.** En mezclas con un marcado esqueleto mineral en las que la resistencia mecánica se debe casi exclusivamente al rozamiento interno, el tráfico puede provocar su disgregación con pérdidas progresivas del material. Para evitarlo es necesario que la mezcla sea lo suficientemente cohesiva y resistente a la acción del agua.
- **Flexibilidad.** Se trata de una propiedad necesaria para evitar que la mezcla falle de forma prematura por procesos de fatiga. Esta propiedad es contrapuesta a la de resistencia a deformación, por lo que es necesario buscar una situación de compromiso entre ambas.
- **Resistencia al deslizamiento.** Para lograrla es necesario utilizar áridos poco pulimentables y lograr una textura rugosa mediante una adecuada selección de la granulometría (evitando que sea muy cerrada).
- **Impermeabilidad.** Al menos una de las capas del firme ha de ser impermeable para evitar el paso del agua a las capas granulares inferiores. Esta impermeabilidad se vuelve en muchas ocasiones inútil debido a la presencia de fisuras en el firme.
- **Durabilidad.** Las diferentes capas de mezcla bituminosas (y sobre todo la de rodadura), han de ser resistentes las acciones de la radiación solar, el envejecimiento del ligante por el aire y el agua, las heladas, los derrames de combustible, etc.
- **Resistencia a la fatiga.** La repetición de cargas o sollicitaciones, generalmente muy inferiores a las de rotura, produce un agotamiento progresivo por fatiga del material. Dado que se trata del proceso que ejerce mayor influencia sobre la aparición de fisuras en el pavimento, en el siguiente apartado nos centraremos en su estudio.

2.3.2. Estudio del Comportamiento a Fatiga de Mezclas Bituminosas

La caracterización del comportamiento a fatiga de materiales bajo esfuerzos cíclicos ha sido uno de los temas de investigación más estudiados en los últimos 150 años. Ya desde el año 1860 comenzó a tomar importancia cuando Wöhler investigó el efecto de las cargas cíclicas sobre la vida de fatiga de los ejes de ferrocarril y mostró que ésta crecía severamente cuando decrecía el nivel de tensión aplicado (Curva S-N de Wöhler o diagrama de Wöhler) (Wöhler 1968).

Una buena predicción de la vida de fatiga de un pavimento puede ayudar a desarrollar y mejorar los procedimientos de diseño de las mezclas bituminosas. Los fenómenos de fatiga en este tipo de materiales llevan siendo estudiados desde hace más de 60 años, pero a pesar de ello, aún no se ha conseguido desarrollar una teoría general que permita su correcta predicción. Así, poder realizar una predicción y evaluación adecuada del proceso de fatiga resulta una tarea bastante complicada, no solo debido a la compleja naturaleza del propio fenómeno, sino también debido a que los ensayos de fatiga en laboratorio desarrollados hasta la fecha consumen mucho tiempo y suelen ser muy costosos.

A día de hoy, la definición de la vida de fatiga de una mezcla bituminosa (el número de ciclos de carga al que puede ser sometido la mezcla hasta su fallo), especialmente en ensayos de deformación controlada, es todavía un concepto que causa cierta controversia. Entre los criterios definidos por los investigadores, podemos decir que la pérdida del 50% de la rigidez o de su módulo inicial ha sido empleado como criterio de fallo en la mayoría de las investigaciones (Hicks et al. 1963; Smith & Hesp 2000; Williams 1998), pero también existen otros posibles criterios como los basados en la variación de la energía disipada durante el proceso de fatiga (incluyendo la tasa de energía disipada o la tasa de daño acumulado) (Anderson et al. 2001; Rowe 1993; Rowe & Bouldin 2000), o la variación del ángulo de fase durante el ensayo de fatiga (de manera que un punto que muestra su máximo ángulo de fase es susceptible de encontrar fallo a fatiga) (Reese 1997). Más recientemente, una serie de estudios desarrollados desde mediados de los años 90, han sugerido un nuevo criterio de fallo basado en la pérdida del 50% de la pseudo-rigidez de la

mezcla (término utilizado para representar el daño acumulado en la mezcla bituminosa debido a una carga repetitiva de fatiga, eliminando la dependencia del tiempo de la viscosidad lineal) (Kim et al. 1997; Lee 1996; Lee et al. 2000).

Independientemente del criterio empleado para definir la vida de fatiga de una mezcla bituminosa, durante el estudio de su comportamiento a fatiga en laboratorio han de tenerse en cuenta tres aspectos fundamentales, los factores que afectan al proceso de fatiga, la influencia que ejerce el modo de carga empleado, y el enfoque utilizado para llevar a cabo su caracterización.

2.3.2.1. Factores que Afectan al Estudio de Fatiga

Los factores a considerar a la hora de estudiar el comportamiento de una mezcla bituminosa a fatiga en laboratorio son:

- **Tipo de carga:** en función de la intensidad, frecuencia y forma de la carga aplicada, la respuesta a fatiga del material bituminoso podrá ser una u otra. Así generalmente, en ensayos en los que se incrementa la frecuencia y el nivel de carga aplicada, las mezclas tienden a presentar una vida de fatiga más corta. Además, en función de la forma de carga aplicada (Figura 22), la vida de fatiga de la mezcla ensayada será mayor o menor.

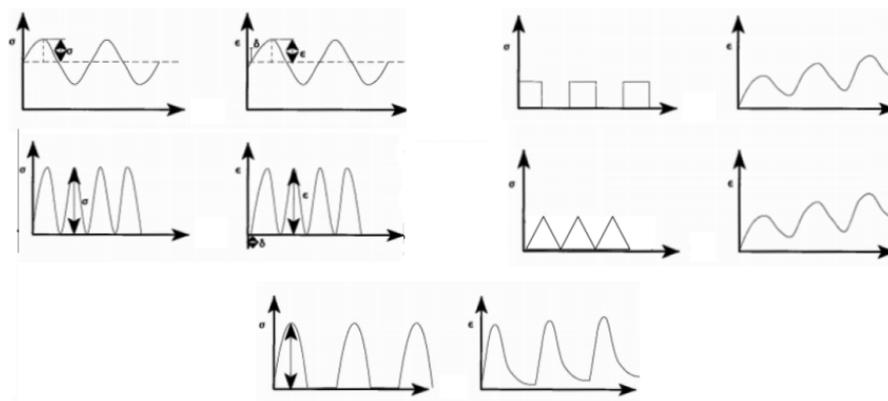


Figura 22. Diferentes formas de carga a aplicar en ensayos de fatiga.

- **Temperatura:** La rigidez general de una mezcla bituminosa disminuye con el incremento de temperatura, de manera que dicho parámetro influye directamente en la respuesta a fatiga del material.
- **Periodos de descanso:** a pesar de que normalmente los ensayos de fatiga son llevados a cabo sin periodos de descanso de carga, muchos investigadores han demostrado que la introducción de estos periodos permiten la recuperación de la mezcla y por tanto, alargar su vida de fatiga.
- **Características del material:** en general, las dos características principales de la mezcla que suelen influir en su comportamiento a fatiga son el contenido de betún y el porcentaje de huecos/mezcla. Así, un incremento en el contenido de ligante aumenta la resistencia a fatiga de la mezcla (siempre y cuando se respeten las condiciones de resistencia a deformaciones permanentes). Por su parte, una disminución en el contenido de huecos/mezcla, puede incrementar la resistencia a fatiga (respetando también las condiciones de resistencia a deformaciones permanentes).
- **Envejecimiento:** este fenómeno está íntimamente relacionado con el ligante bituminoso utilizado en la mezcla, y se manifiesta con un aumento de la viscosidad de betún y un incremento en la rigidez de la mezcla (el cual afectará a su respuesta a fatiga). El envejecimiento está asociado fundamentalmente a la pérdida de los componentes volátiles y la oxidación del betún durante el proceso de fabricación de la mezcla (envejecimiento a corto plazo), y a la progresiva oxidación de este material durante la vida de servicio de la mezcla (envejecimiento a largo plazo).

2.3.2.2. Influencia de los Modos de Carga en el Comportamiento a Fatiga

Existen dos tipos fundamentales de modos de carga en los ensayos a fatiga de laboratorio de mezclas bituminosas, ensayos a tensión controlada y ensayos a deformación controlada (Figura 23). En los ensayos a tensión controlada, la tensión se mantiene constante en cada

uno de los ciclos de carga, incrementándose la deformación en cada uno de ellos. Por su parte, en los ensayos a deformación controlada, la deformación se mantiene constante en cada ciclo de carga, y es la tensión la que varía, disminuyendo con el paso de cada ciclo. A pesar de que el material bituminoso debería de comportarse igual para cada modo de carga (puesto que realmente no es “consciente” de qué modo se le está aplicando, y por tanto su respuesta ha de ser la misma), la vida de fatiga obtenida con los ensayos a tensión controlada es menor que la obtenida con los ensayos a deformación controlada (Monismith & Deacon 1969). En este sentido, Brown 1978 apunta que la fase de propagación de la fisura depende de la intensidad de tensión en el vértice de la misma, de forma que en el ensayo de tensión controlada la propagación es más rápida (al permanecer la tensión siempre constante), mientras que en el caso de la deformación controlada, la caída gradual de tensión implica un periodo más largo de propagación de fisura.

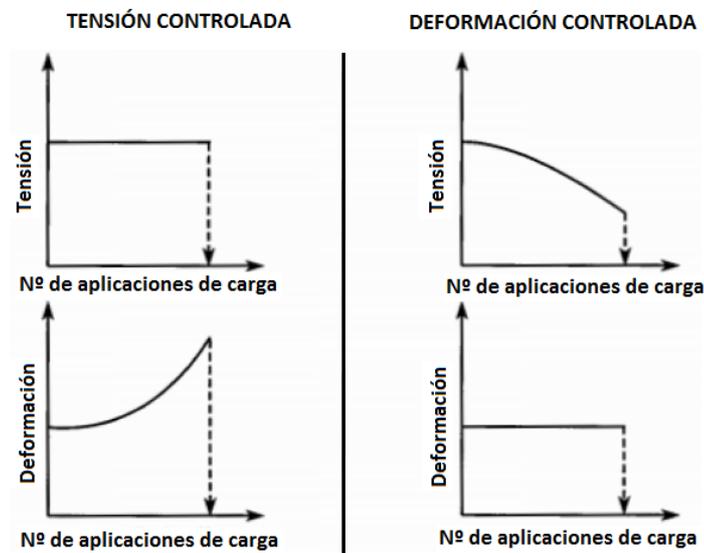


Figura 23. Evolución de la tensión y deformación en función de los modos de carga.

Las condiciones de carga recibidas por las mezclas durante su vida de servicio en carretera son más complejas que las utilizadas en laboratorio, y normalmente combinan ambos

modos de carga. Abordar el problema del modo de carga requiere por tanto que el comportamiento de la mezcla sea simulado para un rango adecuado de las condiciones reales del pavimento. Así, algunas aproximaciones en torno a este tema sugirieron que los ensayos a deformación controlada podrían ser utilizados para evaluar mezclas para pavimentos relativamente delgados situados sobre bases rígidas (con menos de 50 mm de espesor), debido a que la deformación en las capas de mezclas bituminosas está gobernada por las capas subyacentes y no se ve afectada por la rigidez de la mezcla bituminosa (Tangella et al. 1990; Huang 1993). Por otra parte, el ensayo a tensión controlada, se consideró más apropiado para capas de mayor espesor y rigidez, donde las mezclas bituminosas tengan un espesor de más de 150 mm. Además, para capas con espesores intermedios, puede llevarse a cabo una combinación de los modos de carga.

Dado que es esperable que los pavimentos experimenten un modo intermedio de carga entre tensión y deformación constante, Monismith & Deacon 1969, emplearon un factor de modo para determinar la curva de deformación controlada a partir de la relación a tensión controlada. Dicho parámetro está basado en un cambio porcentual de la tensión y deformación debido a una reducción en la rigidez de la mezcla teniendo en cuenta el efecto del modo de carga [Ecuación 1].

$$MF = \frac{|A|-|B|}{|A|+|B|} \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde A es el cambio porcentual en la tensión debido a una disminución de la rigidez del C %, B es el cambio porcentual en la deformación debido a una disminución de la rigidez del C %, y C es una arbitraria pero fija reducción en la rigidez como consecuencia de la acumulación de daño por fatiga ante cargas repetidas.

Se asumió que el factor de modo es -1 para ensayos a tensión controlada y de +1 para ensayos a deformación controlada, y que para modos de carga intermedios el factor de modo estaría comprendido entre $-1 < MF < +1$. También Van Dijk 1975, utilizó un parámetro basado en la energía para tener en cuenta el modo de carga aplicado. No obstante, a pesar

de estos esfuerzos, aún sigue siendo necesaria una consideración diferente para la vida de fatiga en función del modo de carga aplicado.

Así, han sido muchos los investigadores que han evaluado la influencia del modo de carga aplicado en el análisis del comportamiento a fatiga de la mezcla. Un buen resumen de las diferentes características de estos modos de ensayo lo encontramos en los trabajos realizados por Tangella et al. 1990 (Tabla 3):

Variables	Tensión Controlada	Deformación Controlada
Espesor de la capa de mezcla bituminosa	Capas relativamente gruesas	Capas delgadas
Criterio de fallo (nº ciclos)	Bien definido, hasta que la probeta se fractura	Arbitrario, en el sentido en que el ensayo termina cuando el nivel de carga decrece cierto porcentaje de su valor inicial
Dispersión en los datos de fatiga	Menos dispersos	Más dispersos
Nº de probetas requeridas para el ensayo	menor	mayor
Influencia de la simulación de condiciones a largo plazo	La simulación del envejecimiento del material conducen a un incremento de la rigidez y de la vida de fatiga	La simulación del envejecimiento del material conducen a un incremento de la rigidez y una reducción de la vida de fatiga
Magnitud de la vida de fatiga del ensayo	Generalmente más corta (el ensayo dura menos)	Generalmente más larga (el ensayo dura más)
Influencia de las características de la mezcla	Más susceptible	Menos susceptible
Tasa de disipación de energía	Más rápida	Más lenta
Tasa de propagación de la fisura	Más rápida que en el firme	Más representativa de las condiciones reales
Efecto beneficioso de los periodos de descanso	Mayor efecto beneficioso	Menor efecto beneficioso

Tabla 3. Comparación del modo de carga utilizado. (Tangella et al. 1990)

2.3.2.3. Caracterización del Comportamiento a Fatiga

Basados en la definición de fallo de fatiga, se pueden desarrollar modelos de predicción de vida de fatiga en mezclas bituminosas. Actualmente podemos decir que existen cuatro enfoques para caracterizar el comportamiento a fatiga de estos materiales: el enfoque *fenomenológico*, el enfoque de la *mecánica del daño continuo*, el enfoque de la *mecánica de la fractura*, y el enfoque de la *energía disipada*. A pesar de ello, algunos presentan ciertas carencias en la representación del mecanismo de daño que serán necesarias tener en cuenta.

Enfoque Fenomenológico Tradicional

El enfoque fenomenológico relaciona las tensiones o deformaciones en la mezcla bituminosa, con el número de repeticiones de cargas que causan su fallo (Pell 1962; Van Dijk et al. 1972; SHRP 1994). Se trata de una combinación de la observación fenomenológica y de la tabulación de los datos obtenidos en el laboratorio a partir de los ensayos de fatiga designados. Debido a su simplicidad, este enfoque ha sido ampliamente utilizado junto con la ley lineal de Miner de daño acumulativo (Miner 1945), en el diseño de pavimentos asfálticos y el análisis de su comportamiento.

Los resultados de los ensayos de fatiga son normalmente formulados de la siguiente forma en función del modo de carga aplicada:

$$N_f = A \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^b \text{ (para ensayo a deformación controlada) [Ecuación 2]}$$

$$N_f = C \cdot \left(\frac{1}{\sigma}\right)^d \text{ (para ensayo a deformación controlada) [Ecuación 3]}$$

Donde N_f es el número de aplicaciones de carga para el fallo, ε y σ , son la deformación y tensión aplicada en cada ciclo, y A , b , C , d , son coeficientes del material.

Pell demostró que la deformación es el parámetro más importante de la fisuración por fatiga (Pell 1967), de manera que modificó el enfoque para relacionar la deformación inicial con la repetición de cargas, incluso para ensayos a tensión controlada:

$$N_f = K_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{K_2} \text{ [Ecuación 4]}$$

Donde N_f es el número de aplicaciones de carga para el fallo a un nivel determinado de deformación, ε_i es la deformación inicial, y K_1 y K_2 son coeficientes del material.

Por su parte, Monismith et al. 1985 establecieron que en ensayos de laboratorio a deformación controlada las mezclas más rígidas generalmente tienen vidas de fatiga más cortas, de manera que obtuvieron una ecuación modificada para tenerlo en cuenta:

$$N_f = a \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^b \cdot \left(\frac{1}{S_0}\right)^c \text{ [Ecuación 5]}$$

Donde N_f es el número de aplicaciones de carga para el fallo, ε_t es la magnitud de deformación aplicada en cada ciclo, S_0 es la rigidez inicial de la mezcla, y a , b , c , son coeficientes del material determinados experimentalmente.

A lo largo de los años han sido varios los investigadores que han propuesto modelos predictivos de fatiga en base a esta ecuación debido a que posee la ventaja de relacionar el comportamiento a fatiga de la mezcla con su rigidez (Asphalt Institute 1981; Barenberg & Thompson 1992; Bonnaure et al. 1980; Finn et al. 1977; Pell & Cooper 1975; SHRP 1994; Shell 1978). En base a estos modelos puede decirse que en general las mezclas con mayor rigidez tienen una vida de fatiga más corta, mientras que las de menor muestran una respuesta a fatiga más larga (en ensayos de deformación controlada).

Los resultados obtenidos en diferentes estudios utilizando este enfoque muestran que la vida de fatiga está afectada por el modo de carga, el tipo de betún y árido utilizado, la densidad, y otras variables como los efectos de “healing”, el envejecimiento de la mezcla, etc. Debido a ello, las vidas de fatiga observadas en laboratorio con este modelo no suelen coincidir con las observadas durante la vida de servicio de la mezcla en carretera. Así, en ocasiones es necesario aplicar a estos modelos un factor de corrección para adaptar el valor de vida de fatiga obtenido en laboratorio al valor que pueda obtenerse en la vida real. En la actualidad han sido varios los investigadores que han llevado a cabo la determinación de dicho factor de corrección bajo diferentes condiciones de estudio (Al-Qadi & Nassar 2003;

Brunton et al. 1987; De la Roche & Riviere 1997; Di Benedetto et al. 1993; Roque et al. 2006).

A pesar de su amplia aplicación, el enfoque fenomenológico tradicional no proporciona un mecanismo de acumulación de daño en mezclas bituminosas sometidas a cargas repetidas. Además, el daño acumulado es tratado como una relación lineal entre la deformación y la vida de fatiga, la cual no es adecuada para condiciones bajas de deformación/daño (Carpenter et al. 2003). Debido a que se trata de un enfoque dependiente del tipo de carga y de las características del material, éste no puede ser directamente aplicado a los complejos escenarios de cargas que realmente ocurren en los pavimentos en servicio. El enfoque tradicional tampoco tiene en cuenta la complejidad de los mecanismos de las mezclas bituminosas como la recuperación de fatiga o la redistribución de cargas, los cuales tienen un conocido efecto sobre el comportamiento a fatiga de la mezcla.

Enfoque de la Mecánica de la Fractura

Los estudios desarrollados por Majidzadeh et al. 1971 establecieron que la forma general de la ley de crecimiento de grieta de Paris podía ser aplicable a las mezclas bituminosas. Este enfoque basado en la mecánica de la fractura caracteriza la fisuración por fatiga en tres etapas: inicio de la fisura, propagación estable de la fisura, y fractura inestable de la fisura. El tamaño de la zona plástica (abertura y longitud de la fisura) es crítico para obtener el factor de intensidad de tensiones en el vértice de la fisura y analizar la vida de fatiga durante la fase de propagación (Majidzadeh et al. 1971; Monismith & Salam 1973). El modelo de mecánica de la fractura basado en la ley de Paris fue propuesto para la fase de propagación de fisura, la cual consume un mayor tiempo de la vida de fatiga de la mezcla (Paris & Erdogan 1963, *Ecuación 6*).

$$\frac{dc}{dN} = A \cdot K_I^n \text{ [Ecuación 6]}$$

Donde dc/dN es el incremento de longitud de la fisuras en función del número de ciclos (o tasa de crecimiento de grieta), c es la longitud de la grieta, N es el número de repeticiones de carga, K_I es el factor de intensidad de tensiones en el modo I (índice de intensidad del

esfuerzo), A y n son constantes que dependen del material estudiado y de las condiciones de ensayo. El factor de intensidad de tensiones proporciona un parámetro simple, incluyendo los efectos de la configuración de la probeta, condiciones de contorno, y carga. El factor de intensidad de tensiones también proporciona información sobre el tamaño de la región plástica en el entorno del vértice de la grieta. Conociendo los valores de A y n , y utilizando la ecuación de crecimiento de grieta anteriormente presentada, la vida de fatiga puede calcularse como sigue:

$$N_f = \int_{c_0}^{c_f} \frac{dc}{A \cdot K^n} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

Donde c_0 es la longitud inicial de fisura, y c_f es la longitud final. En este análisis se asume que la ley de crecimiento de grieta es aplicable desde el primer ciclo y continua hasta que un fallo tiene lugar por fractura frágil a una longitud crítica de grieta, c_f , o hasta que la grieta alcanza el espesor total de la probeta. A pesar de ello, la Ecuación 6 solo es aplicable para describir el proceso de fatiga durante la fase de propagación de la grieta (perdiéndose la información en las fases de inicio y fallo), de forma que representa la pendiente de la curva del incremento de fisura en función del factor de intensidad de tensiones para dicha fase (Figura 24). Además, el factor de intensidad de tensiones depende linealmente de la tensión aplicada, y esta suposición de linealidad durante la propagación de una fisura en una mezcla bituminosa es cuestionable.

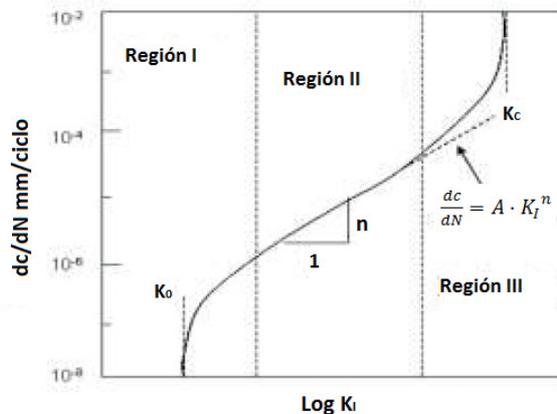


Figura 24. Curva típica del incremento de fisura en función del factor de intensidad de tensiones.

Trabajos posteriores indicaron que la relación propuesta por Paris & Erdogan 1963 no era suficiente para describir el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas. Así, Majidzadeh et al. 1971 presentó una ley de crecimiento de grieta compuesta de términos con exponentes constantes:

$$\frac{dc}{dN} = A_1 \cdot K_{IC}^2 + A_2 \cdot K_{IC}^4 \text{ [Ecuación 8]}$$

Donde $A_1(x10^{10})=7,02+77,9 \cdot (1000\sigma_t/E^*)^2 - 6,09 \cdot (K_{IC}/1000)^3$; $A_2(x10^{16})=31,36 - 1132,4 \cdot (1000\sigma_t/E^*)^3 - 43,32 \cdot (K_{IC}/1000)^3$; σ_t es la resistencia a tracción (tasa de tensión 1200 psi/segundo); E^* es el módulo de rigidez complejo (psi) (10 Hz); K_{IC} es la resistencia a fractura.

Posteriormente, otros modelos de mecánica de la fractura fueron presentados por Schapery 1982 y 1984, Moolenaar 1984, Ramsamooj 1991, Lytton 1993 y Lytton et al. 2010. En general, aunque los enfoques de la mecánica de la fractura están muy desarrollados y tienen grandes ventajas en el estudio de la fatiga y el “healing”, también tienen ciertas deficiencias (Tangella et al. 1990). Por una parte, son necesarios un gran número de datos experimentales para evaluar el proceso de inicio de la fisura, así como de su propagación. Además, en la mecánica de la fractura solo se considera la fase de propagación de la fisura, y el parámetro empleado para evaluar el comportamiento de la mezcla (factor de intensidad de tensiones) no es constante a temperaturas elevadas. Debido a que requiere que se asuma que hay defectos o micro-fisuras inherentes en el material, este enfoque tiene dificultades para describir el inicio de la fisura. Además, también asume que el crecimiento de ésta es continuo, estando determinada la tasa de crecimiento por la ley de Paris la cual concibe que el material se comporta en un modo elástico-lineal (Zhang et al. 2001).

Enfoque de la Mecánica del Daño Continuo

El enfoque de la mecánica de daño continuo es originario de un modelo constitutivo de daño. Un modelo constitutivo es un modelo matemático que proporciona una relación

entre los parámetros del modelo y las propiedades del material de acuerdo con unos principios mecánicos. Schapery 1984 desarrolló el principio de correspondencia elástico-visco-elástico, aplicable tanto a materiales visco-elásticos lineales, como a no lineales. En este sentido, sugirió que considerando las tensiones y deformaciones como pseudo-variables (y no como cantidades físicas), las ecuaciones constitutivas para ciertos medios visco-elásticos son idénticas a las de los medios elásticos. Así por ejemplo, para el caso de una tracción límite de superficie (como el crecimiento de una fisura), un problema visco-elástico puede reducirse a uno elástico utilizando tensiones físicas y pseudo-deformaciones [Ecuaciones 9 y 10].

$$\sigma = \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \text{ [Ecuación 9]}$$

$$\varepsilon^R(t) = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} d\tau \text{ [Ecuación 10]}$$

Donde σ es la tensión, ε^R es la pseudo deformación, E_R es el módulo de referencia, $E(t)$ es el módulo de relajación y ε la deformación actual. El módulo de referencia es una constante libre y tiene la misma dimensión que el módulo de relajación. Frecuentemente, el módulo de referencia se toma como unitario.

En la década de los 90, Kim et al. desarrollaron un modelo uniaxial visco-elástico de daño continuo aplicando el principio de correspondencia de Schapery para separar los efectos de la visco-elasticidad y entonces emplear variables internas de estado basadas en la teoría del trabajo potencial para cuantificar la evolución del daño bajo carga (basado en pseudo deformaciones). En dicho modelo, toda respuesta de las probetas de mezcla bituminosa bajo cargas de fatiga son asignadas a tres mecanismos: visco-elasticidad lineal, daño a fatiga, y recuperación de fatiga (micro-damage healing). El modelo visco-elástico tiene la ventaja de que solamente utiliza una variable simple, una función de estado interna S_m para describir el daño, ya que no distingue si el daño proviene de la fractura o evoluciona hacia otras formas como deformación plástica. La forma general uniaxial de esta relación constitutiva sin cambio de temperatura es (Little et al. 2001):

$$\sigma = \sigma(\varepsilon^R, S_m) \text{ [Ecuación 11]}$$

Donde σ es la tensión que depende de la pseudo-deformación (ε^R), y de la variable de estado interna de daño (S_m). Este modelo general constitutivo cuenta con una función $C(S_m)$ para la respuesta visco-elástica y el análisis del daño, conocida como “función interna de daño”:

$$\sigma = C(S_m) \cdot \varepsilon^R \text{ [Ecuación 12]}$$

El empleo de una función interna de daño sugiere que el daño puede ser correlacionado con el cambio de rigidez del material, de manera que el módulo de relajación (E^R) en viscosidad lineal se asume como constante. Por lo tanto, todos los cambios en la rigidez son considerados como daños en este enfoque, y expresados mediante la siguiente relación:

$$\sigma = I(\varepsilon^R)[F + G + H] \text{ [Ecuación 13]}$$

Donde I es la pseudo-rigidez inicial, F es una función de daño para ajustar el cambio de pendiente en cada transformación del lazo de histéresis tensión vs. pseudo-deformación, G es la función de histéresis con respecto a los caminos de carga y descarga dibujados, H es la función de “healing” que representa el cambio en la pseudo-deformación debido a los periodos de descanso.

El modelo analítico visco-elástico de daño continuo ha sido satisfactoriamente aplicado a mezclas bituminosas bajo cargas monotónicas (Park & Kim 1996) y bajo cargas cíclicas (Kim et al. 1997; Kim et al. 1998; Lee 1996). Este modelo presenta un gran potencial para predecir el comportamiento a fatiga de mezclas bituminosas ante condiciones de cargas realistas, sin embargo, también podemos encontrar algunas deficiencias. Así, en él solo se considera la micro-fisuración en las mezclas bituminosas, y se asume un crecimiento de grieta continuo, que falla a la hora de describir la propagación de fisuras después de que la macro-fisura comience. De hecho, el daño por fatiga es creado y propagado tanto a escala microscópica como macroscópica, y por otra parte, los trabajos desarrollados por Jacobs et al. 1996 y Kim et al. 1997 han demostrado que el crecimiento real de las fisuras se produce de manera discontinua. Además, es necesario realizar una importante carga de trabajo a

nivel de laboratorio para obtener primeramente los parámetros del modelo, antes de llevar a cabo la toma de datos de tensión-deformación en el propio ensayo de fatiga.

Enfoque de la Energía Disipada

Cuando un material está sometido a cargas externas, el área bajo la curva tensión deformación representa la energía que es introducida en el material. Para un material no puramente elástico, un proceso de carga y descarga estará siempre asociado con un proceso de disipación de energía, puesto que los caminos de carga y descarga no coinciden (Figura 25). Este fenómeno es denominado histéresis, y el área contenida dentro de un lazo de histéresis de tensión-deformación para un proceso de carga y descarga, indica la cantidad de energía disipada en un ciclo de carga. En la Figura 26 se muestra un ejemplo de un lazo de histéresis tensión-deformación, y el desfase de la entre la tensión y la deformación aplicada sobre un material visco-elástico ensayado a fatiga. Considerando las características fundamentales de los materiales no puramente elásticos de disipar energía durante los procesos de carga, el estudio de la naturaleza de la disipación de energía puede ser una herramienta con un gran potencial para evaluar las características de fatiga del material.

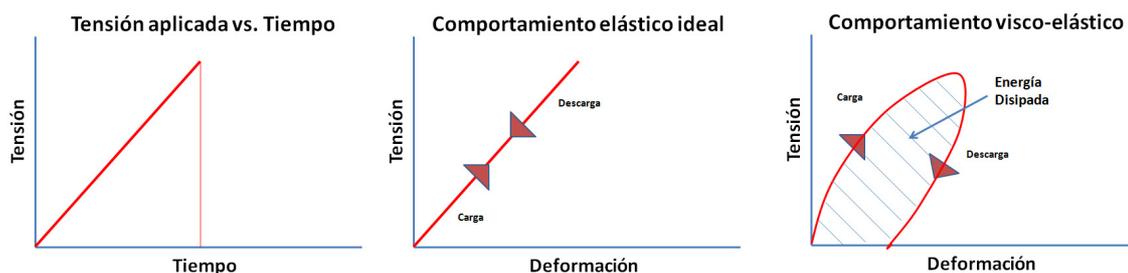


Figura 25. Comportamiento elástico y visco-elástico bajo condiciones de carga y descarga.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

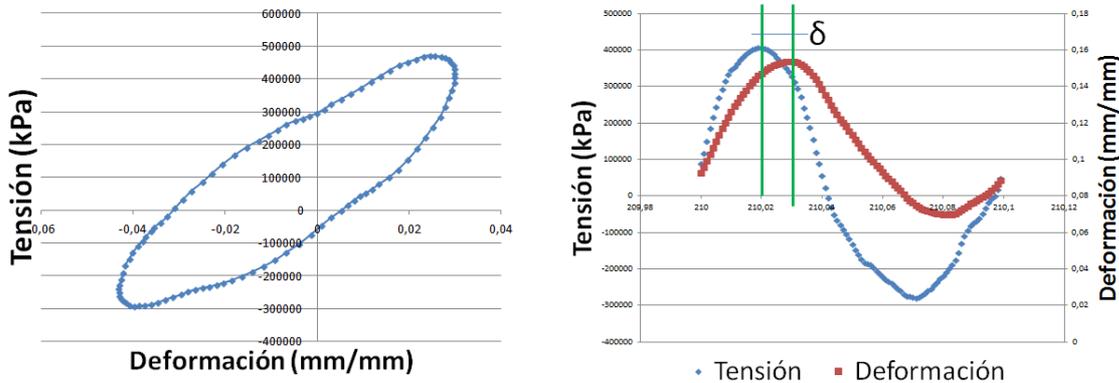


Figura 26. Ejemplo de lazo de histéresis, y desfase entre la tensión aplicada y la deformación producida sobre un material visco-elástico.

La energía disipada en cada ciclo de carga para un material visco-elástico puede ser calculada mediante las siguientes ecuaciones:

$$\omega_i = \pi \cdot \varepsilon^2 \cdot G_i^* \cdot \sin(\delta_i) \text{ (Ensayo a deformación controlada) [Ecuación 14]}$$

$$\omega_i = \pi \cdot \left(\frac{\sigma^2}{G_i^*}\right) \cdot \sin(\delta_i) \text{ (Ensayo a tensión controlada) [Ecuación 15]}$$

Donde ω_i es la energía disipada en cada ciclo i ; σ y ε , la tensión y deformación controlada, δ_i el ángulo de fase de cada ciclo, y G_i^* el módulo complejo del material en cada ciclo i . Así, para un material visco-elástico lineal bajo carga cíclica (como una mezcla bituminosa sometida a un ensayo de fatiga en laboratorio), podemos emplear la siguiente ecuación para determinar la energía disipada:

$$\omega_i = \pi \cdot \sigma_i \cdot \varepsilon_i \cdot \sin(\delta_i) \text{ [Ecuación 16]}$$

Donde ω_i es la energía disipada en el ciclo i , σ_i es el nivel de tensión en el ciclo i , ε_i es el nivel de deformación en el ciclo i , y δ_i es el ángulo de fase en el ciclo i .

Esta disipación de energía se produce durante todo el ensayo de fatiga, variando con cada ciclo, y en función del modo de carga aplicado (Rowe & Bouldin 2000), de forma que normalmente aumenta para los ensayos a tensión controlada y disminuye para los ensayos

de deformación controlada (Figura 27). Además, este enfoque se convierte en un medio preciso para analizar el daño acumulado a fatiga en un material debido a que los lazos de histéresis variarán conforme se vayan produciendo los daños (se irán deformando hasta llegar a ser planos, mostrando la evolución de la fatiga del material), y porque la energía disipada de un ciclo dependerá de la energía disipada en el anterior (dicha evolución de la fatiga es dependiente de la producida durante todo el ensayo).

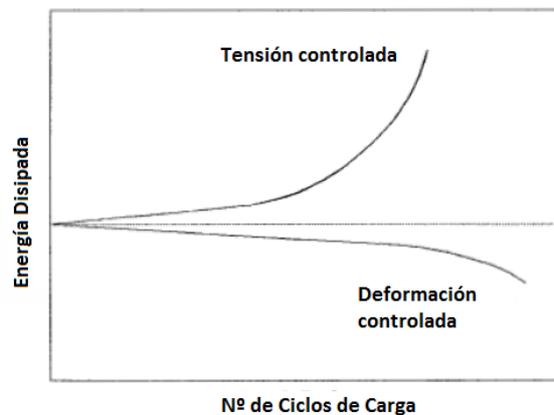


Figura 27. Evolución de la energía disipada por ciclo de carga, en función del modo de carga aplicado.

El estudio de disipación de energía en mezclas bituminosas ha sido llevado a cabo por algunos investigadores en las últimas décadas (Baburamani & Porter 1996; Carpenter & Jansen 1997; Carpenter et al. 2003; Rowe 1993; Schapery 1989; Tayebali et al. 1992; Tayebali et al. 1993; Van Dijk 1975; Van Dijk & Visser 1977). Así, se han desarrollado varias aplicaciones y representaciones de los conceptos de disipación de energía.

Enfoque de la energía inicial disipada

La “energía inicial disipada” es la energía disipada medida en los ciclos iniciales de carga. Normalmente en ensayos de fatiga, los 50 primeros ciclos son considerados como ciclos de acondicionamiento y la energía disipada en el ciclo 50 se considera como la energía inicial disipada.

Este concepto de “energía inicial disipada” se ha convertido en un buen indicador del comportamiento a fatiga para tipos similares de mezclas (Rowe 1993). Aplicando dicho concepto, Ghuzlan 2001 en su tesis encontró que éste es uno de los factores de mayor importancia en el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas. Por su parte, Baburamani & Porter 1996, también mostraron una buena correlación entre la energía disipada inicial y la vida de fatiga. Además, el informe del SHRP 1994, también utilizó un modelo para relacionar la energía inicial disipada con la vida de fatiga de la mezcla (donde N_f es la vida de fatiga, VFB es el porcentaje de huecos rellenos de ligante y w_0 la energía inicial disipada):

$$N_f = 6,72e^{0,049 \cdot VFB} (W_0)^{-2,047} \text{ [Ecuación 17]}$$

$$W_0 = 0,25 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0^2 \cdot (E_0 \cdot \sin \varphi_0)$$

Una desventaja del enfoque de energía inicial disipada es que no es apropiado para un rango completo de cargas, especialmente cuando se llevan a cabo ensayos de fatiga con baja deformación. Carpenter & Shen 2006, encontraron que la buena correlación entre la energía inicial disipada y la vida de fatiga a niveles “normales” de carga no se produce cuando los ensayos se llevan a cabo con niveles bajos. Además, el enfoque de la energía inicial disipada no tiene en cuenta el efecto del “healing” producido durante la fatiga de la mezcla.

Enfoque de la energía disipada acumulada

La energía disipada acumulada es la suma de la energía disipada experimentada por el material durante un ensayo de fatiga, la cual relata el comportamiento a fatiga del material tanto para los ciclos iniciales como para los ciclos finales. La relación entre la energía disipada acumulada y el número de ciclos de fallo puede caracterizarse como:

$$W_N = A(Nf)^z \text{ [Ecuación 18]}$$

Donde W_N es la energía disipada acumulada para el fallo por fatiga de la mezcla, A y z, son coeficientes de la mezcla, y Nf el número de ciclos de carga para el fallo por fatiga.

Van Dijk fue uno de los primeros investigadores que llevó a cabo un estudio extensivo de la fatiga en mezclas bituminosas basado en conceptos de disipación de energía (Van Dijk 1975; Van Dijk & Visser 1977). Así, estableció una fuerte relación entre la energía disipada acumulada y el número de ciclos para el fallo por fatiga. Esta relación no se ve afectada por el modo de carga (tensión o deformación controlada), los efectos de la frecuencia (entre 10 y 50 Hz), la temperatura (entre 10 y 40 °C), ni la existencia de periodos de descanso. Sin embargo, depende fuertemente de las características del material y ha de ser específicamente diseñado y aplicado para cada tipo de mezcla.

Pronk & Hopman 1991 sugirieron que la energía disipada por ciclo/periodo es la responsable del daño por fatiga de la mezcla. Para determinar su ecuación de fatiga empleó la energía total disipada combinada con la curva de Wöhler. Los ensayos de laboratorio llevados a cabo para este estudio fueron realizados a flexotracción en 4 puntos a deformación controlada y a 0 °C de temperatura, con un tipo de deformación compuesta no-sinusoidal.

Por su parte, Teyebali et al. 1992 introdujeron dos nuevos términos: la relación de rigidez, la cual es la relación entre la rigidez en cada ciclo de carga y la rigidez inicial; y la relación de energía disipada, la cual se define como la relación de energía disipada acumulada debida a un ciclo de carga y la energía disipada acumulada en toda la vida de fatiga. Así, en dicho trabajo se establece que existe una única correspondencia entre la relación de rigidez y la relación de energía disipada, pero no necesariamente entre la energía acumulada disipada y la vida de fatiga, lo que también fue verificado por SHRP 1994 y Fakhri 1997. La relación encontrada por estos investigadores es dependiente de la temperatura y del tipo de mezcla estudiado.

Enfoque de la tasa de trabajo

Este enfoque fue introducido primeramente por Van Dijk & Visser 1977, y posteriormente desarrollado por Rowe 1993. La tasa de trabajo, ψ_{N1} , se define como la relación entre el

producto de la energía inicial disipada en el ciclo 1 y N1, dividido por la energía disipada acumulada:

$$\Psi_{N1} = \frac{W_0 N1}{W_{N1}} \text{ [Ecuación 19]}$$

Donde W_0 es la energía inicial disipada, N1 es el número de ciclos de carga para iniciar la fisura, y W_{N1} es la energía disipada acumulada en el ciclo N1.

La tasa de trabajo puede ser calculada en términos de la reología de la mezcla y el factor del modo de carga, Γ , de manera que:

$$\Psi_{N1} = \left\{ \frac{2 \cdot \sin \Phi_0}{\sin \Phi_0 + \Gamma \cdot \sin \left[a \cdot E_{60}^{*(0,244 - 0,222 \log a)} \right]} \right\} \text{ [Ecuación 20]}$$

Donde Γ es el modo de carga ($\Gamma = [(100 - A - B)/100]$), A es el porcentaje de cambio en la deformación ($A = [(\epsilon_0 - \epsilon_{60}) / \epsilon_{60}] \times 100$), B es el porcentaje de cambio en la tensión ($B = [(\sigma_0 - \sigma_{60}) / \sigma_{60}] \times 100$), Φ_0 es el ángulo de fase inicial, E_0^* es el módulo complejo inicial (equivalente a la rigidez a flexión), ϵ_{60} es el 60% de reducción en la deformación inicial, σ_{60} es el 60% de reducción en la tensión inicial, y $a = 10^{[(\log \Phi_0 - 0,244 \log E_0^*) / (1 - 0,222 \log E_0^*)]}$.

Rowe 1993 postuló que la tasa de trabajo podía ser utilizada para predecir la vida de fatiga a partir del inicio de la fisura, asumiendo que el inicio de la fisura se produce cuando el módulo complejo ha sufrido una reducción del 60% [Ecuación 21].

$$N1 = 205 \times V_b^{6,44} \times W_0^{-2,01} \times \Psi_{N1}^{1,64} \text{ [Ecuación 21]}$$

Donde V_b es el volumen de ligante (%).

Enfoque de la energía de deformación disipada

Los trabajos desarrollados por algunos investigadores (Roque et al. 2006; Zhang et al. 2001), indican que el desarrollo del proceso de fatiga en mezclas bituminosas puede ser determinado mediante la energía de deformación disipada (Dissipated Creep Strain Energy, DCSE). Así, este concepto puede suponer además un buen parámetro para analizar el inicio

y propagación de fisuras, de forma que si el límite de DCSE no se ha alcanzado, podremos decir que no se ha producido daño.

La energía de deformación disipada es la diferencia entre la energía de fractura (EF) y la energía elástica (EF=DCSE+EE) [Ecuaciones 22 y 23]. La energía de fractura se obtiene mediante la ejecución de un ensayo de resistencia, mientras que la energía elástica se determina gráficamente (área triangular; donde M_R es el módulo resiliente y representa la pendiente de la línea recta que separa la energía elástica de la DCSE), de forma que es función de la tensión de tracción (S_t), la deformación inicial (ϵ_0) y la deformación final (ϵ_f) (Figura 28).

$$EE = \frac{1}{2} S_t (\epsilon_f - \epsilon_0) \quad [\text{Ecuación 22}]$$

$$\epsilon_0 = \frac{M_R \epsilon_f - \epsilon_0}{M_R} \quad [\text{Ecuación 23}]$$

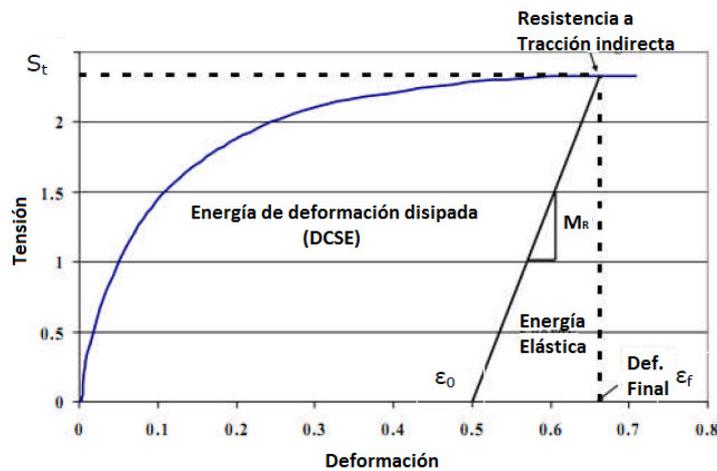


Figura 28. Determinación de la energía de deformación disipada. (Zhang et al. 2001)

Los mismos investigadores determinaron una ecuación para obtener la energía de deformación disipada por ciclo de carga, para lo que utilizaron la media de las tensiones en la zona donde se produce el inicio y/o propagación de la fisura, así como los parámetros de

cumplimiento de la ley de deformación (D_1 y m) obtenidos mediante un ensayo de deformación (Figura 29) [Ecuación 24].

$$DCSE_{cycle} = \frac{1}{20} \sigma (\sigma \cdot D_1 \cdot m(100))^{m-1} \text{ [Ecuación 24]}$$

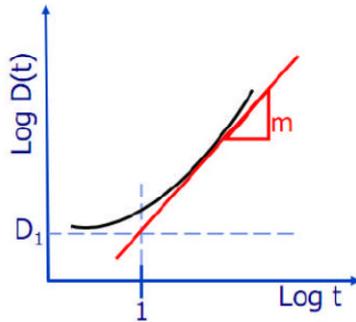


Figura 29. Ley de deformación con respecto al tiempo.

Además, de acuerdo con los trabajos desarrollados por Roque et al. 2006, la energía de deformación disipada puede ser también un buen parámetro para diferenciar la propagación de fisuras ascendente de la descendente (Figura 30). Para un número reducido de ciclos de carga, la acumulación de energía de deformación disipada es más rápida en la zona inferior que en la superior, y por tanto la fisuración ascendente se muestra dominante. Al llegar a un valor crítico de energía de deformación ($DCSE_c$), si éste es rebasado, la fisuración descendente comienza a ser dominante.

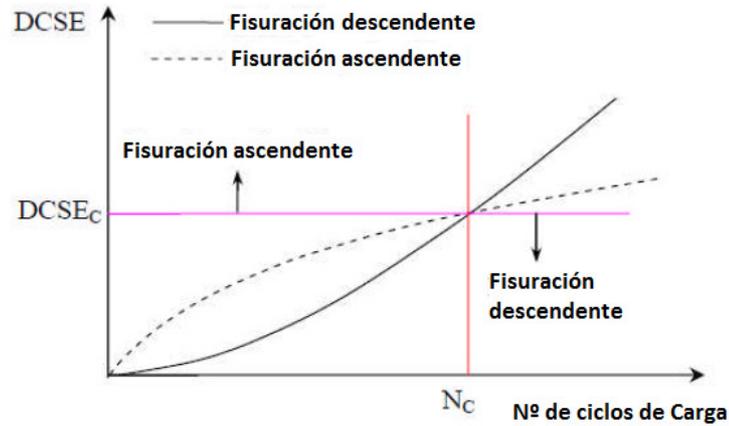


Figura 30. Estudio del tipo de fisuración en función de la energía de deformación disipada acumulada.

Enfoque de la tasa de energía de pseudo-deformación disipada

El área contenida en el interior de un lazo de histéresis se corresponde con la energía disipada debida a la visco-elasticidad del material, así como del daño causado durante un proceso de fatiga (fisuración y deformaciones plásticas). Por tanto, a la hora de analizar el proceso de fatiga de una mezcla bituminosa no debemos tener en cuenta la componente que no produce un daño en el material (componente de comportamiento visco-elástico). Aplicando los conceptos establecidos en el enfoque de la mecánica del daño continuo (principio de correspondencia elástico/visco-elástico de Schapery), se puede obtener la energía de pseudo-deformación disipada (DPSE) correspondiente únicamente al daño producido en la mezcla bituminosa (Figura 31).

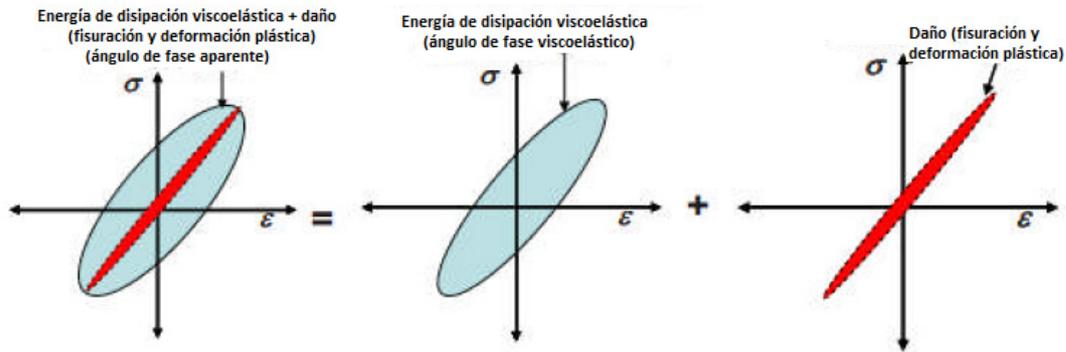


Figura 31. Energía de disipada compuesta por energía de disipación visco-elástica y daño producido. (Behnia et al. 2011)

Este enfoque es una de las investigaciones más recientes en las que aún se continúa trabajando, y en la que se ha definido dicha energía de pseudo-deformación disipada debida al daño como (Masad et al 2008):

$$DPSE_n = \pi \cdot G_n^* \cdot \gamma_0^2 \cdot \sin(\theta_n - \varphi) \text{ [Ecuación 25]}$$

Donde $DPSE_n$ es la energía de pseudo-deformación disipada medida en el ciclo n , G_n^* es el módulo dinámico a cortante aparente medido en el ciclo n , y θ_n es el ángulo de fase aparente medido en el ciclo n .

Durante el desarrollo de estas investigaciones han surgido ciertos problemas para la determinación del ángulo de fase (posiblemente debida a lo no linealidad del material visco-elástico). Así, este enfoque subestima la energía viscoelástica disipada para altos niveles de deformación, y por tanto ofrece una sobre estimación del daño provocado (Masad et al. 2008). Para resolver dicho problema, estos mismos investigadores proponen dividir la energía de pseudo-deformación disipada en tres componentes, uno debido al daño causado por el incremento del ángulo de fase, otro asociado a la deformación permanente, y otro asociado a la pseudo-rigidez del material (Masad et al 2009). A pesar de que este concepto de energía de pseudo-deformación disipada puede convertirse en un buen parámetro para analizar el proceso de fatiga en mezclas bituminosas, al ser dependiente del tipo de mezcla

utilizado y de las condiciones de carga, no puede definirse como parámetro único para evaluar la resistencia a fatiga del material.

Empleo mejorado de la energía disipada

La mejora del concepto de energía disipada para el análisis de fatiga en mezclas bituminosas fue iniciada por Carpenter & Jansen 1997, los cuales utilizaron la tasa de energía disipada (Dissipated Energy Ratio, DER) como parámetro relacionado con la vida de fatiga de la mezcla. Este enfoque apunta que no toda la energía disipada es responsable del daño en el material (Carpenter & Jansen 1997; Carpenter et al. 2003; Carpenter & Shen 2006; Ghuzlan & Carpenter 2000; Shen & Carpenter 2005). Solo la cantidad relativa de energía disipada perteneciente a cada ciclo adicional provocará un aumento del daño, excluyendo la energía disipada a través de comportamientos pasivos como la energía disipada plástica, amortiguaciones viscoelásticas y la energía térmica. Para cada ciclo de carga, la pérdida de energía debido al trabajo mecánico del material y a otras influencias medioambientales permanece casi sin cambios, así este valor incremental tiene una relación directa con la acumulación del daño. Por lo tanto, si la energía disipada comienza a variar de forma acentuada, puede entenderse que se está produciendo el desarrollo del daño. Posteriormente, este enfoque fue examinado y mejorado por Ghuzlan & Carpenter 2000, y Carpenter et al. 2003. Así, se determinó que la relación entre la tasa de energía disipada y la vida de fatiga es independiente del nivel de carga, el tipo de carga, y el tipo de mezcla. Otra investigación sugiere que el cambio relativo de energía disipada debido a la repetición de ciclos es un buen indicador físico directo del inicio y propagación del daño por fatiga, donde una baja cantidad de disipación de energía relativa puede ser encontrada en materiales con alta resistencia a fatiga, baja amplitud de carga externa, o ambos (Carpenter & Jansen 1997; Carpenter et al. 2003; Carpenter & Shen 2006; Ghuzlan & Carpenter 2000; Shen & Carpenter 2005; Shen et al. 2006; Delgadillo & Bahia 2005).

El enfoque de la tasa de energía disipada fue mejorado a partir de la investigación desarrollada por Shen & Carpenter 2007, en la cual se renombró como enfoque de tasa de cambio de energía disipada (Ratio of Dissipated Energy Change, RDEC), considerando el

hecho de que se utiliza la tasa de la cantidad de cambio de energía disipada entre diferentes ciclos de carga para representar la propagación del daño. El RDEC se calcula en base a las siguientes ecuaciones:

$$RDEC_n = \frac{(DE_n - DE_m)}{(DE_m \cdot (n - m))} \text{ (Deformación controlada) [Ecuación 26]}$$

$$RDEC_n = \frac{(DE_m - DE_n)}{(DE_m \cdot (n - m))} \text{ (Tensión controlada) [Ecuación 27]}$$

Donde $RDEC_n$ es el valor de la tasa de cambio de energía disipada en el ciclo n ; DE_n , DE_m es la energía disipada en los ciclo “ n ” y “ m ”, y “ n ” y “ m ” son ciclos de carga donde $m < n$.

El enfoque de RDEC tiene algunas ventajas en comparación con los distintos enfoques que caracterizan el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas viscoelásticas, en un amplio rango de cargas y para diferentes tipos de mezclas, tipos y condiciones de carga (Ghuzlan & Carpenter 2000). Debido a que se trata de un enfoque basado en la disipación de energía, el RDEC es válido para diferentes tipos de ensayo como ensayos de fatiga con viga a flexión (Carpenter et al. 2003; Ghuzlan & Carpenter 2000; Shen & Carpenter 2005), ensayos de tensión uniaxial (Daniel & Bisirri 2004), así como varios materiales incluyendo tanto mezclas asfálticas como hormigones a base de cemento Portland (Daniel & Bisirri 2004).

Así, el enfoque RDEC parece responder a las limitaciones presentadas en los casos anteriores de forma que permite relacionar las propiedades del material con el efecto de las cargas. Además, sus características en la representación de las tensiones y deformaciones con respecto a la vida de fatiga hacen posible la evaluación del límite de resistencia a fatiga o el fenómeno de “healing”, los cuales pueden aparecer y tener una gran influencia en el comportamiento a fatiga de la mezcla bituminosa. En base a estas ventajas, este enfoque se postula como el más adecuado para el desarrollo del análisis de resultados de ensayos de fisuración por fatiga.

2.3.2.4. Límite de Resistencia a Fatiga

El concepto de límite de resistencia a fatiga fue propuesto por Wöhler 1860 para materiales metálicos. La curva clásica de Wöhler es aproximadamente una hipérbola en la cual la asíntota paralela al eje del tiempo (tiempo de carga), indica que existe un nivel de carga por debajo del cual el número de ciclos de carga no disminuye proporcionalmente con el descenso de la carga aplicada, y por tanto, el material tiende a tener una vida de fatiga ilimitada. Esta asíntota representa el límite de resistencia a fatiga (Figura 32).

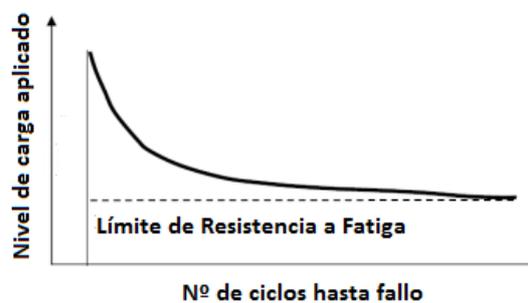


Figura 32. Curva clásica de Wöhler. (Wöhler 1968)

A pesar de que este concepto ha sido ampliamente estudiado para otro tipo de materiales, en el campo de las mezclas bituminosas no se han llevado a cabo demasiados estudios al respecto. No obstante, puede resultar fundamental en el diseño de los pavimentos de larga duración, diseñados para minimizar las tracciones de deformación en las mezclas bituminosas del firme para reducir el efecto de la fisuración por fatiga (Newcomb & Buncher 2001). De esta forma, con la aplicación de este concepto, incrementar el espesor de un firme más allá del límite de resistencia para reducir las tensiones en las capas inferiores, resulta un gasto de dinero innecesario.

El buen diseño estructural de un pavimento permitirá hacer frente a las solicitaciones reales teniendo suficiente vida de servicio. Así, si bien es muy perjudicial un diseño inadecuado del pavimento que provoque un fallo en la estructura que termine con su vida de servicio antes de lo previsto, también es un gasto económico sobredimensionar un pavimento con una capacidad estructural superior a la que va a necesitar. Por lo tanto, uno de los mayores retos para los investigadores del ámbito de la ingeniería de carreteras, es desarrollar un

procedimiento de diseño que pueda representar el comportamiento de los pavimentos actuales y predecir su vida de servicio.

Investigaciones recientes llevadas a cabo por Carpenter et al. 2003, definen un límite de resistencia a fatiga a partir del cual las mezclas bituminosas tienden a presentar una vida de fatiga enormemente larga. El estudio de este concepto utilizando técnicas energéticas ha ayudado a validar la existencia de dicho límite y determinar su valor aproximado, el cual proporciona un mecanismo de diseño fiable para pavimentos de larga duración (Shen & Carpenter 2007; Thompson & Hugo 1987). Así, el análisis del comportamiento a fisuración en mezclas bituminosas mediante la inclusión de este concepto puede ser muy provechoso, de forma que durante la fase de diseño en laboratorio dicho valor permita la consecución de mezclas en las que se garantice un buen comportamiento ante fisuras.

2.3.3. El Fenómeno de “Healing” en Mezclas Bituminosas

El estudio de fatiga de mezclas bituminosas suele llevarse a cabo mediante el análisis de leyes, las cuales son relaciones matemáticas entre la deformación impuesta y el número de ciclos necesarios para causar el fallo de la mezcla. Las mezclas bituminosas presentan un comportamiento complejo puesto que su respuesta dependerá de la temperatura, grado de humedad, velocidad de aplicación de la carga o nivel de tensión. Por tanto, para obtener dichas leyes de fatiga, los investigadores tratan de reproducir en el laboratorio las condiciones reales en la carretera, tanto como sea posible. Sin embargo, debido a la dificultad de esta tarea, las condiciones que son difíciles o imposibles de reproducir tratan de simplificarse.

Debido a la simplificación de estas condiciones, las leyes de fatiga determinadas en el laboratorio no siempre son capaces de predecir el comportamiento seguido por las mezclas bituminosas en las carreteras. La caracterización de la fatiga de mezclas bituminosas en laboratorio ha estado tradicionalmente basada en el enfoque fenomenológico, de manera

que la relación entre tensión-deformación y el número de ciclos de carga ha sido utilizada como criterio de fallo en la mayoría de los diseños de pavimentos.

A pesar de ello, Finn et al. 1977 encontraron que las mezclas bituminosas tienen una vida más duradera durante su servicio en la carretera que en los estudios a nivel de laboratorio, y por tanto dicha relación fenomenológica predice de forma errónea el comportamiento real a fatiga de estos materiales. Esta diferencia entre la predicción de fallo en laboratorio y la vida de fatiga en servicio es atribuida a la diferencia de las características de las cargas entre el laboratorio y la carretera. Los ciclos continuos de carga con una tensión o amplitud de deformación constante aplicados sobre las probetas, no simulan de forma realista las condiciones de carga a la que los pavimentos están sometidos debidos a las acciones del tráfico y los gradientes térmicos. Así, para poder interpretar dichas leyes de fatiga es necesario aplicar ciertos coeficientes que tengan en cuenta los siguientes factores:

- Las cargas no siempre son aplicadas en el mismo punto de la carretera, sino que son distribuidas a través de la sección.
- Las mezclas bituminosas en las carreteras están afectadas por periodos de descanso sin cargas, que tienden a incrementar su vida de fatiga.
- La manifestación del daño no es inmediata, puesto que pasa un tiempo desde que aparece la fisura y se manifiesta en la superficie del pavimento.

Una de las mayores diferencias entre el laboratorio y la carretera (salvando variables como el procedimiento de fabricación de las probetas, las condiciones de carga, el campo tenso-deformacional inducido, etc.), es la existencia de periodos de descanso correspondientes al tiempo transcurrido entre el paso de dos ejes consecutivos del mismo o distinto vehículo (Figura 33). Durante un periodo de descanso, dos mecanismos tienen lugar de forma simultánea en un pavimento bituminoso, por un lado una relajación debido a la naturaleza visco-elástica del material, y por otro una fluencia química en los contornos de las caras de las micro-grietas (Kim et al. 1990). Este último mecanismo, dota a la mezcla de una capacidad de auto-recuperación que se conoce como “healing”, y que ha llevado a concebir una nueva forma de describir el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas.

Cuanto mayor y más grandes son las moléculas y cadenas alifáticas contenidas en el ligante bituminoso, mejor es el “healing” químico. Además, este mecanismo está directamente relacionado con las propiedades de fluencia del betún, las cuales están influenciadas por las interacciones moleculares del ligante. Por lo tanto, las cadenas de alifáticos largas en los diferentes aromáticos polinucleares dificultan la estructuración molecular, favoreciendo una mayor fluidez y dispersión micelar, que se traduce en un mayor potencial de “healing”. Otra hipótesis mantiene que tras la reasociación de las superficies de fractura en las microfisuras, la mezcla de las cadenas alifáticas contribuye con la recuperación.

En la mayoría de los estudios empíricos de las mezclas bituminosas, la fatiga es estudiada mediante ensayos dinámicos con cargas cíclicas que se repiten continuamente, sin periodos de descanso sin carga (Figura 33, Castro & Sanchez 2006).

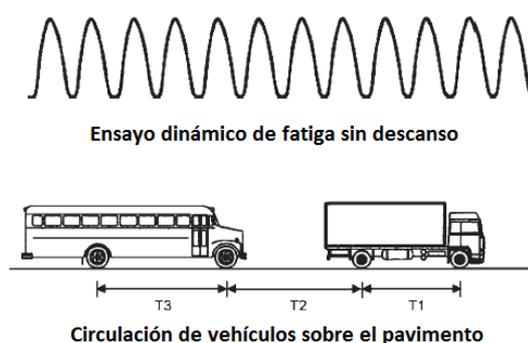


Figura 33. Esquema de la frecuencia de aplicación de cargas en laboratorio y en el firme. (Castro & Sanchez 2006)

Si aplicamos dichos periodos de descanso a las pruebas en laboratorio, podemos encontrar dos tipos de ensayos, los ensayos con periodos de descanso en intervalos (Figura 34a, el ensayo clásico de fatiga se detiene por un tiempo y al final de dicho tiempo sin carga, vuelve a comenzar hasta el siguiente periodo de descanso) y los ensayos de carga intermitente (Figura 34b, donde cada ciclo de carga es seguido de un periodo de descanso). Tradicionalmente los ensayos dinámicos han empleado el modelo de descanso en intervalos para simular la aplicación de las cargas en los firmes, pero en los últimos años, el empleo de

ensayos con cargas intermitentes está alcanzando mayor desarrollo ya que refleja mejor las condiciones de tráfico sufridas por el pavimento.

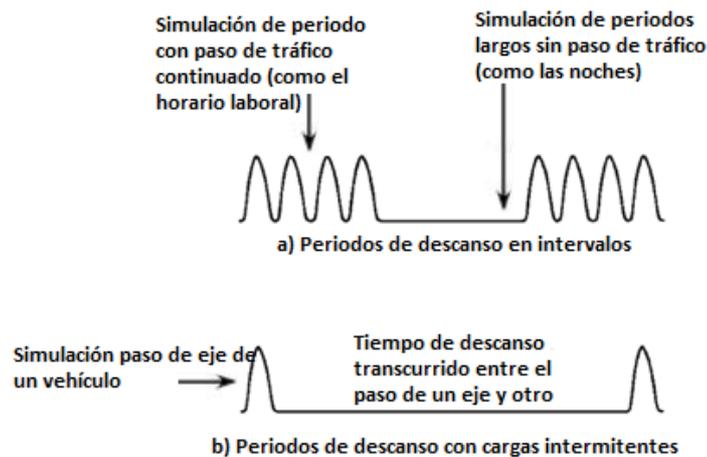


Figura 34. Tipos de periodos de descanso.

Así, son muchos los estudios que han demostrado que cuando se permite un cierto tiempo de descanso entre una secuencia continua de carga en un ensayo de fatiga, el módulo de la mezcla bituminosa puede tener un incremento después de dicho periodo, y de esta forma, alargar la vida de fatiga de la mezcla (Bazin & Saunier 1967; Bonnaure et al. 1982; Carpenter & Shen 2006; Kim et al. 2002; Kim et al. 2003; Little et al. 1999; Pronk & Hopman 1991; Shen 2006; Sias 1996; Song et al. 2005; Raithby & Sterling 1970; Williams et al. 2001). Durante el ensayo de fatiga, el valor del módulo de la mezcla bituminosa decrece en concordancia con la curva ABD descrita en la Figura 35, pero si se inserta un periodo de descanso dentro del ensayo, se produce una recuperación del módulo de la mezcla ($\Delta M = C - B$), teniendo lugar un proceso de recuperación de la misma (“healing”). Después del periodo de descanso, el módulo va a seguir la curva CE, siendo necesario aplicar un número de ciclos adicionales para que el valor del módulo vuelva a ser el mismo que era antes del periodo de descanso ($\Delta N = F - B$). Después de F, la forma de la curva con periodo de descanso es casi paralela a la que se hubiera obtenido sin el periodo de descanso. Por lo tanto, gracias al

periodo de descanso la mezcla bituminosa puede soportar un mayor número de ciclos antes de alcanzar su fallo por fatiga ($\Delta N = F - B$).

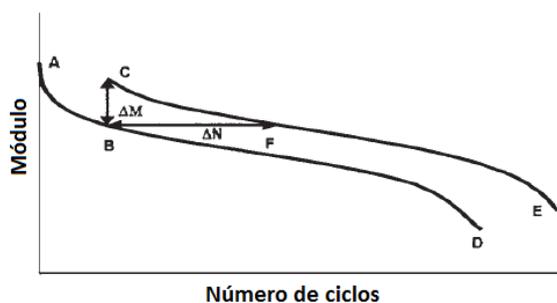


Figura 35. Influencia de los periodos de descanso en la evolución del módulo.

En base a ello, cada vez es mayor el número de investigadores que demuestran que las mezclas bituminosas tienen la capacidad de regenerar fisuras (Carpenter & Shen 2007), dejando en entredicho la concepción tradicional de que la aparición de grietas en el pavimento no es un fenómeno reversible (en el que cuando una fisura aparece, se asume que ésta se va a propagar independientemente del tipo de cargas aplicadas). De este modo, un estudio completo tanto cualitativo como cuantitativo del mecanismo de recuperación de la mezcla bituminosa ayudará en su diseño y selección de los materiales con mayor potencial para recuperar, mayor resistencia al daño, y mayor vida de servicio.

En cuanto a la duración de los periodos de descanso existen algunas discrepancias entre los diferentes estudios llevados a cabo. Una de las primeras investigaciones desarrolladas en este ámbito, Monismith et al. 1961, puso de manifiesto que incrementar el periodo de descanso de 1 a 19 segundos no tiene efectos en el comportamiento a fatiga de la mezcla. Deacon 1965 encontró que con impulsos de carga de 0,1 segundos de duración, reducir el periodo de descanso de 1,9 segundos a 0,5 segundos puede reducir significativamente la vida de fatiga a fisuras de la mezclas. Raithby & Sterling 1970, sugieren que debe haber un valor límite para el tiempo de descanso a partir del cual no exista un incremento

significativo en el comportamiento a fatiga de la mezcla. Bonnaure et al. 1982 definieron el periodo óptimo de descanso en torno a 25 veces el tiempo de carga.

Por su parte, en el caso de largos periodos de descanso, su incremento cada vez causa menos impacto en el aumento de la vida de fatiga de la mezcla, concluyendo diferentes estudios que ésta no aumenta significativamente para periodos de descanso superiores a 10 veces el tiempo de carga, y que la forma de dicha carga no tiene tanta influencia en la respuesta de la mezcla como la duración del tiempo de descanso (Raithby & Sterling 1972; Verstraeten et al. 1982). Así, y a pesar de que el periodo óptimo de descanso será diferente en función del tipo de mezcla y el ensayo utilizado en su evaluación, desde finales de los 90 los investigadores han aceptado que el tiempo óptimo de descanso es de 10 veces el tiempo de carga (Di Benedetto et al. 1997; Rivière & Chauvin 1997).

La revisión de la literatura existente sobre “healing” y periodos de descanso, ponen de manifiesto su importancia en el comportamiento a fatiga y ante el fenómeno de fisuración en mezclas bituminosas, de forma que su estudio resulta imprescindible a la hora de analizar la respuesta del material.

2.3.4. Estudio de la Propagación de Fisuras en Mezclas Bituminosas

Una vez analizados los comportamientos de fatiga y “healing” en mezclas bituminosas (fundamentales en la comprensión de la patología objeto de estudio en esta tesis), el siguiente paso para comprender el fenómeno de fisuración en este tipo de materiales es analizar la evolución del daño provocado en la mezcla. Para ello, se llevará a cabo el estudio de los principales modelos teóricos de propagación de fisuras existentes en torno al estudio de estos materiales.

A lo largo de los años se han desarrollado numerosos modelos para predecir y estudiar la propagación de fisuras en pavimentos, pero a pesar de ello, solo un número limitado de ellos ha conseguido validar el comportamiento real de la estructura del firme. En relación al fundamento en el que están basados, podemos distinguir entre modelos empíricos (que

describen el proceso de fisuración basados en el análisis de regresión de datos de campo), y los modelos mecanicistas o empírico-mecanicistas (basados en principios de la mecánica de materiales). Los modelos empíricos suelen ser bastante útiles para definir los parámetros que afectan a la propagación de la fisura en el firme pero, tienen la limitación de estar basados en datos tomados de medidas de evaluación puntuales, que no permiten explicar el fenómeno de fisuración de forma general. Una vez que han sido determinados y se han definido sus valores de entrada, éstos son relativamente fáciles de usar, pero la capacidad de predecir el comportamiento ante fisuración de un pavimento de estos modelos está limitada al conjunto de datos para los cuales ha sido desarrollado, y cualquier extrapolación fuera de estos datos puede resultar impredecible. Algunos de los modelos empíricos que han estudiado la fisuración de firmes son los aportados por Hall et al. 1989 o el recogido en el proyecto NCHRP 1-37 A 2007.

Por su parte, los modelos mecanicistas al estar basados en las teorías de la mecánica de materiales, son computacionalmente más complejos, requiriendo la solución de sistemas lineales o no-lineales de ecuaciones. Existen numerosos modelos de este tipo como los multicapa elástico-lineales (que suelen estar basados en la mecánica de la fractura clásica) (Van Gurp & Moolenaar 1989), los basados en ecuaciones de equilibrio (Seeds et al. 1985), los relacionados con la teoría del ancho de fisura (*crack band theory*, Joseph et al. 1987), los modelos basados en la mecánica de la fractura (los cuales han ganado un mayor rango de aplicación gracias a los programas de elementos finitos), en la mecánica del daño continuo no local, o los modelos cohesivos.

De entre todos estos modelos, en el estudio del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas podemos destacar tres modelos que han tenido un mayor éxito: el *modelo clásico* (basado en la teoría de la mecánica de la fractura clásica), el *modelo de daño continuo* (basado en la teoría del daño continuo) y el *modelo cohesivo*. En lo que sigue se analizará cada uno de los modelos, explicando su fundamento teórico, así como su aplicación en mezclas bituminosas.

2.3.4.1. Modelo Clásico de Propagación de Fisuras

El modelo clásico de fisuración está basado en la teoría de la mecánica de la fractura clásica, de manera que el desarrollo utilizado es el mismo que el empleado en el enfoque de la caracterización del comportamiento a fatiga de la mezcla, y por tanto este apartado completará en parte los conceptos teóricos expuestos en el punto anterior. La mecánica de la fractura elástico lineal aplicada a modelos de fisuración en pavimentos de carretera, tiene sus orígenes en los principios establecidos por Griffith 1924, y posteriormente por Orowan 1955, Orowan & Felbeck 1955, Irwin & Kies 1952, 1954, e Irwin 1957, a mediados del siglo XX. En dichos postulados se asumía que el fallo de los cuerpos frágiles viene dado por la presencia de numerosas fisuras internas que provocan una concentración local de tensiones, en el cual el crecimiento de la fisura se produce cuando el incremento de la energía superficial (motivada por la extensión de la fisura) se equilibra con la energía tenso-elástica liberada en el entorno de la grieta.

Los primeros modelos para el estudio de la propagación de fisuras de pavimentos de carretera se basaron en la “ley de Paris” desarrollada por Paris & Erdogan 1963, la cual nos dice que una vez iniciada una fisura, ésta se propaga a través del material a una cierta de velocidad. Esta ley puede ser empleada tanto para modelizar la fisuración por fatiga térmica como debida a las cargas del tráfico, y establece una relación entre el factor de intensidad del esfuerzo y la velocidad de propagación de la fisura [Ecuación 6]. Dentro del fenómeno de fisuración de pavimentos, la amplitud de K (Factor de Intensidad de tensiones) depende de la amplitud de la carga, de la longitud de la fisura, de la transferencia de cargas entre los labios de la fisura, y las características de rigidez de las capas del firme (Figura 36).

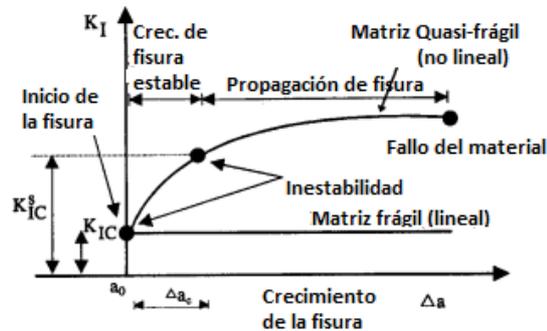


Figura 36. Variación del factor de intensidad de tensiones.

De esta forma, el factor de intensidad de tensiones es un factor de escala que se utiliza para medir la magnitud del campo de tensiones en el vértice de la grieta mediante [Ecuación 28], demostrándose la existencia de una fuerte relación entre la magnitud del factor de intensidad de tensiones y la longitud de la fisura propagada en función del espesor total del firme.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f(a) \text{ [Ecuación 28]}$$

Donde σ es la tensión en los bordes de la fisura, a es la longitud de fisura, y $f(a)$ es una función que actúa como factor de corrección geométrico y que depende del tipo de carga aplicado, la longitud de la fisura y la forma de la probeta.

Un material dado puede resistir la propagación de una fisura tanto tiempo como el factor de intensidad de tensiones sea inferior a la tenacidad de fractura del material (K_c , propiedad independiente de la geometría de la fisura y del tipo de carga aplicada). Los estudios realizados por Mobasher et al. 1997, definen valores de dicha tenacidad para mezclas bituminosas en función a su contenido de ligante.

Por su parte, también puede utilizarse una versión de la ley de Paris para materiales elásticos no lineales utilizando la integral J , que se define como la tasa de cambio de energía disipada por unidad de área de crecimiento de grieta (Kanninen & Popelar 1985). Las Ecuaciones 29 y 30 definen respectivamente la relación entre la integral J y el factor de

intensidad K , y la ley de Paris utilizando la integral J (donde ν es el coeficiente de Poisson, E es el módulo elástico).

$$J = \frac{1-\nu^2}{E} (K^2) \text{ [Ecuación 29]}$$

$$\frac{da}{dN} = A' \cdot (J)^{n'} \text{ [Ecuación 30]}$$

A lo largo de los años, han sido varios los autores que han profundizado en el estudio de la mecánica de la fractura clásica aplicada a la fisuración en pavimentos desde que Majidzadeh et al. 1971 sentaran las bases. Entre ellos podemos destacar los estudios llevados a cabo por Sharpey 1975, Majidzadeh et al. 1976, Molenaar 1983, Lytton 1993 o Jacobs et al. 1996.

Más recientemente, las investigaciones de Elsefi & Al-Qadi 2003, también utilizan el modelo lineal (aplicado en modelos tridimensionales de elementos finitos) en el desarrollo de un proceso de diseño de firmes que predice el número de ciclos de fatiga contra la fisuración reflexiva en pavimentos flexibles rehabilitados. Así, dicho modelo define el número total de ciclos que provoca la reflexión de fisuras en la superficie de un pavimento rehabilitado, como la suma del número de ciclos de carga para el inicio de dicha fisura (utilizando para ello el modelo definido por el BRRC 1998) y el número de ciclos de carga necesarios para su propagación.

En la investigación desarrollada por Hu et al. 2010, también se lleva a cabo la modelización de una herramienta de diseño y análisis de fisuración reflexiva en rehabilitación de carreteras basada en la teoría de la mecánica de la fractura. El modelo de propagación de fisuras reflexivas utilizado en esta investigación está basado en la ley de Paris, pero combinando las cargas producidas por la acción del tráfico (a flexión y cortante) y las producidas por los efectos térmicos.

No obstante, a pesar de todos estos estudios, los criterios presentados por el modelo clásico están basados en que la deformación plástica ocurrida en el material es despreciable, y por tanto, no pueden describir el comportamiento de un material si la zona de fractura es considerable en comparación con el tamaño de la fisura. Por tanto, para

materiales que no son elasto-frágiles (materiales que tienen un comportamiento proporcionalmente elástico hasta la rotura, y al alcanzar su límite elástico se produce la rotura sin pasar por el estado plástico), el modelo tiene algunas limitaciones. El uso de la ley de Paris implica que la fisura se va a propagar desde su inicio como una discontinuidad plana a través del material elástico frágil, basándose en la teoría de mecánica de la fractura elástica lineal (sin considerar el paso por el estado plástico antes de alcanzar su límite elástico). Su aplicación a materiales visco-elásticos como las mezclas bituminosas, se enfrenta a ciertas limitaciones (como la falta de heterogeneidad propia de este tipo de materiales o la más que cuestionable linealidad en la propagación de la fisura), que han provocado que varios investigadores que han trabajado con dicho modelo, hayan obtenido resultados muy dispersos entre la teoría y la práctica (Jacobs et al. 1992; Kunst & Kirschner 1993; Molenaar & Nods 1996; Ramsamooj 1994).

2.3.4.2. Modelos de Daño Continuo No Local

Algunos materiales visco-elásticos, como las mezclas bituminosas, exhiben un comportamiento u otro dependiendo del tiempo de aplicación de la carga a la que son sometidos, así como de la temperatura. La respuesta visco-elástica puede venir acelerada por una combinación de la fluencia y la carga cíclica, como en los casos de tensión-tensión fatiga (Vinogradov et al. 2001). Así, incluso para pequeñas cargas, muy inferiores a la resistencia última del material, pueden aparecer daños en forma de fisuras en un número relativamente bajo de ciclos (Case & Reifsnider 2003; Harris 2003; Reifsnider 2001; Talreja 1987). Por lo tanto, es importante desarrollar un modelo de daño que también incluya la tasa dependiente de la naturaleza del material visco-elástico sujeto a cargas cíclicas.

Algunos investigadores proponen que el crecimiento de una fisura debería describirse de manera global, utilizando un parámetro de daño, en lugar de la medida de la longitud de fisura. Por tanto, el hecho de que la propagación de pequeñas fisuras no siga la dirección de propagación de la fisura principal es una buena razón para utilizar una parametrización más global, en el marco del daño continuo no local en lugar del de la mecánica de la fractura

(Chaboche & Lesne 1988). Además, la clara influencia de las micro-fisuras en la respuesta mecánica de los sólidos sobre un amplio rango de circunstancias resulta demasiado evidente para ser obviada. La descripción de la evolución del daño en materiales utilizando el análisis micromecánico resulta en principio complicada debido a las características de la microestructura y a la dificultad de caracterización de la interacción de las microfisuras entre sí. Debido a este hecho, en ocasiones obvian los detalles físicos de los fallos estructurales y se centran en su respuesta macroscópica (como la rigidez).

El modelo de daño continuo no local permite describir los microprocesos heterogéneos implicados durante la tensión generada en materiales y estructuras de gran escala. Debido a que la descripción de la evolución del daño en materiales utilizando análisis micromecánicos resulta muy complicada, ya que es difícil establecer una relación entre la microestructura y los defectos surgidos en el material, el modelo de daño continuo ignora los detalles físicos de dichos defectos y se centra en una respuesta macroscópica del material. Tal y como apuntan Lundström & Ekblad 2006 al definir el dominio de validez del daño en la mecánica de medios continuos, el estado último del modelo de daño continuo corresponde generalmente a aquel en el que se presenta el inicio macroscópico de la fisuración, a partir del cual el problema deja de ser un problema de propagación de fisuras, para convertirse en un problema de mecánica de la fractura. Además, en este modelo se adopta la premisa de que en un medio no-local, la tensión en un punto no depende solamente del estado tensional de ese punto, sino también del de sus vecinos.

El objetivo fundamental del modelo de fisuración de daño continuo es establecer una alternativa metodológica en el estudio del comportamiento viscoelástico que puede ser usado en la predicción de la degradación de propiedades y resistencia residual. Su aplicación permite tener en cuenta la influencia de las micro-fisuras en la respuesta mecánica del pavimento, de manera que el parámetro de evaluación de daño es global, sin tener en cuenta la longitud de la grieta principal (Lundstrom et al. 2007). Este hecho se ajusta mejor a la realidad puesto que las grietas en los firmes no aparecen de manera

aislada, sino que están rodeadas de microfisuras, que influyen de forma directa en su comportamiento.

La aplicación del modelo de fisuración de daño continuo en mezclas bituminosas empezó a desarrollarse a finales de los años 90 (Kim et al. 1997; Lee & Kim 1998). Los trabajos desarrollados en torno a la fisuración de mezclas bituminosas basados en el modelo de aproximación de daño continuo, se centraron en la reducción de los parámetros de elasticidad incrementando las cargas (Baaj et al. 2003; Bodin et al. 2004), o en la aplicación del principio de correspondencia de Schapery y la teoría del trabajo potencial (Baek et al. 2008; Chehab 2002; Kutay et al. 2008; Lundstrom & Isacsson 2004). En torno a dichos trabajos, la posibilidad de utilizar un análisis numérico es una de las principales ventajas que presenta este modelo, de forma que permite modelizar la manera en que la fisuración por fatiga se desarrolla bajo condiciones reales. Así, en los últimos años los trabajos desarrollados por Wu et al. 2006 aplicando un programa de elementos finitos, han demostrado el potencial de este modelo para predecir la reflexión de fisuras en pavimentos (Figura 37).

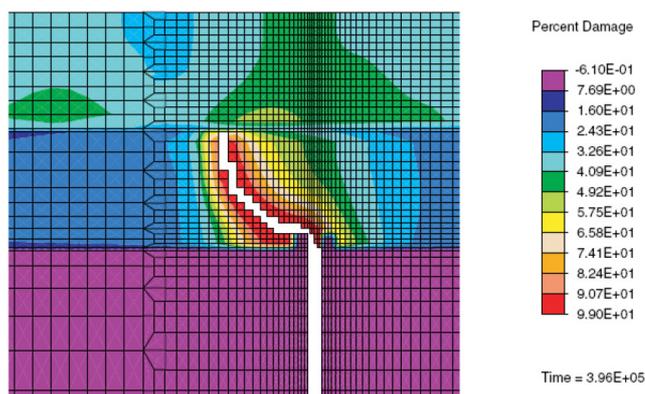


Figura 37. Modelización por elementos finitos de propagación de fisura mediante modelo de daño continuo.

A pesar de ello, la aplicación de la mecánica del daño continuo como modelo de fisuración ha quedado en un segundo plano, siendo desarrollada en mayor profundidad para análisis

de los procesos de fatiga en general en mezclas bituminosas. Este hecho se debe principalmente a que el modelo solo es capaz de considerar la micro-fisuración de la mezcla bituminosa, y asume un crecimiento de grietas continuo, lo que hace que la predicción de la propagación de la fisura no sea real una vez que la macro-fisuración comienza (debiendo utilizar entonces los principios de la mecánica de la fractura). No obstante, en los últimos años, se han llevado a cabo algunas investigaciones desarrolladas con este modelo (Wu et al. 2006), que ponen de manifiesto las posibilidades que ofrece para la modelización del fenómeno de fisuración en pavimentos, especialmente a la hora de tratar la influencia del healing durante la formación de micro-fisuras.

2.3.4.3. Modelo Cohesivo de Fisuración

Debido a la complejidad del fenómeno de fisuración en los materiales bituminosos (donde por su heterogeneidad y su comportamiento visco-elástico, la evolución de la fisura no sigue un comportamiento lineal), en los años 90 algunos autores empiezan a considerar que el comportamiento a fisuración en mezclas bituminosas tiene lugar en un volumen representativo del elemento, y que su representación mediante un modelo cohesivo de fisuración puede ser una solución efectiva para aportar una medida adecuada de los procesos de resistencia, inicio y propagación de la fisura (Jenq & Perng 1991; Jenq et al. 1993a; Scarpas et al. 1997; Witczak 1999).

Dicho modelo parte de los estudios desarrollados por Dugdale 1960 y Barenblatt 1962, en el que proponen una corrección al modelo clásico de fisuración elástico-lineal mediante la determinación de una zona con comportamiento plástico, situada por delante del vértice de la fisura, que permite explicar fenómenos de fisuración tanto en materiales dúctiles (e.g. metales) como frágiles (e.g. hormigón) (Figura 38). La aproximación de dicho comportamiento la modelizan mediante la definición de una zona de proceso de fractura situada en el vértice de avance de la fisura, en la que se produce un reblandecimiento del material (que define el comportamiento plástico), y en la que existen tensiones de cierre que impiden el crecimiento de la fisura (tensiones cohesivas). Posteriormente a los trabajos

de Dugdale y Barenblatt, Hillerborg 1978 propuso un modelo similar para hormigones, en el cual dicha zona con comportamiento plástico coincide con la zona de proceso fractura (con micro-fisuras y meso-fisuras), que terminó sentando las bases para el desarrollo del modelo cohesivo de fisuración.

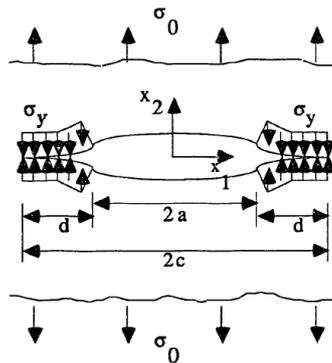


Figura 38. Representación del modelo de Dugdale.

Las mezclas bituminosas son materiales multi-fase de carácter heterogéneo, compuestas por áridos de diferentes tamaños, betún y huecos. Según los estudios de Hashin 1964, cuando se estudia el comportamiento mecánico de materiales heterogéneos y quieren obtenerse resultados de laboratorio consistentes y validos, es imprescindible considerar la observación en un volumen representativo del elemento (que ha de tener un tamaño mínimo de 2 a 4 veces el tamaño máximo nominal del árido empleado en su fabricación, Witczak et al. 1999). Cuando se trabaja con volúmenes representativos han de considerarse tres tipo de fisuras, las *micro-fisuras* (de apenas unos milímetros de longitud, del orden de los huecos contenidos en la mezcla), las *meso-fisuras* (resultado de la unión de dos o más micro-fisuras, que pueden alcanzar el orden de magnitud de los áridos de la mezcla) y las *macro-fisuras* (fisuras que reducen a cero la capacidad de transferencia de tensiones de la mezcla en el entorno del volumen representativo estudiado). Dichas fisuras se producen de dos formas, por problemas de adhesión (fisuras que aparecen en la interfaz árido-ligante, menos comunes y normalmente debidas a la acción del agua) y por problemas de cohesión

(aparecidas a través del mástico formado entre el ligante y la fracción fina del árido, FHWA 1998).

Cuando una mezcla es sometida a tensiones inferiores a la tensión máxima capaz de soportar, en ella se producen deformaciones (recuperables y no recuperables), así como pequeños daños estructurales irreversibles. Estos daños estructurales son debidos a la formación de micro-fisuras y el crecimiento de las ya existentes, así como a la formación de meso-fisuras cuando se está alcanzando la tensión máxima. Dentro del volumen representativo del material, el proceso de crecimiento de micro-fisuras y meso-fisuras tiene una distribución volumétrica aleatoria en tres dimensiones, de naturaleza dispersa que dependerá de la estructura adoptada por los áridos. Una vez rebasada la tensión máxima, el proceso de daño estructural continúa de manera más acentuada y menos dispersa, hacia la formación de una superficie de fallo dominante a través del volumen representativo. Esta superficie de fallo (macro-fisura, dentro de un volumen representativo), también se forma de manera aleatoria en un volumen tridimensional, ya que se trata del crecimiento y coalescencia de varias micro y meso-fisuras. En unas ocasiones, dichas meso-fisuras se detienen debido a que son forzadas a continuar alrededor de los áridos (en estos casos, las meso-fisuras se observan rodeando la macro-fisura), en otras ocasiones el avance de la macro-fisura puede introducirse dentro de un volumen representativo contiguo al que se ha desarrollado. Cuando esto ocurre, dichos volúmenes empiezan a sufrir daños estructurales (una vez rebasada la tensión máxima), formándose micro y meso-fisuras, por delante de la línea de avance del vértice de la macro-fisura. Esta zona se debilita y provoca el crecimiento de la macrofisura, denominándose zona de proceso de fractura (ZPF), pudiendo extenderse varios centímetros más allá del vértice de la grieta (Jenq et al. 1993a).

Así, el modelo cohesivo de fisuración se basa en la división de la longitud de fisura en dos regiones separadas, una zona libre de esfuerzos de tracción, y una zona cohesiva, en donde las reacciones a las tensiones de tracción resisten impidiendo la abertura de la fisura, y la transferencia de tensiones existentes entre las caras de la fisura, provoca la aparición de tensiones de cierre (Figura 39). Además, plantea como hipótesis fundamentales que las

propiedades del material en el exterior del volumen representativo del elemento permanecen intactas (considerando su comportamiento inalterado), y que la capacidad de transferencia de tensiones en la parte cohesiva sigue un camino descendente, partiendo de una capacidad de transferencia total (justo cuando los bordes de la fisura empiezan a separarse debido al pico de tensiones máximas) y terminando por una capacidad de transferencia nula (cuando el desplazamiento entre los dos bordes cohesivos de la fisura alcanzan la abertura crítica, δ_c).

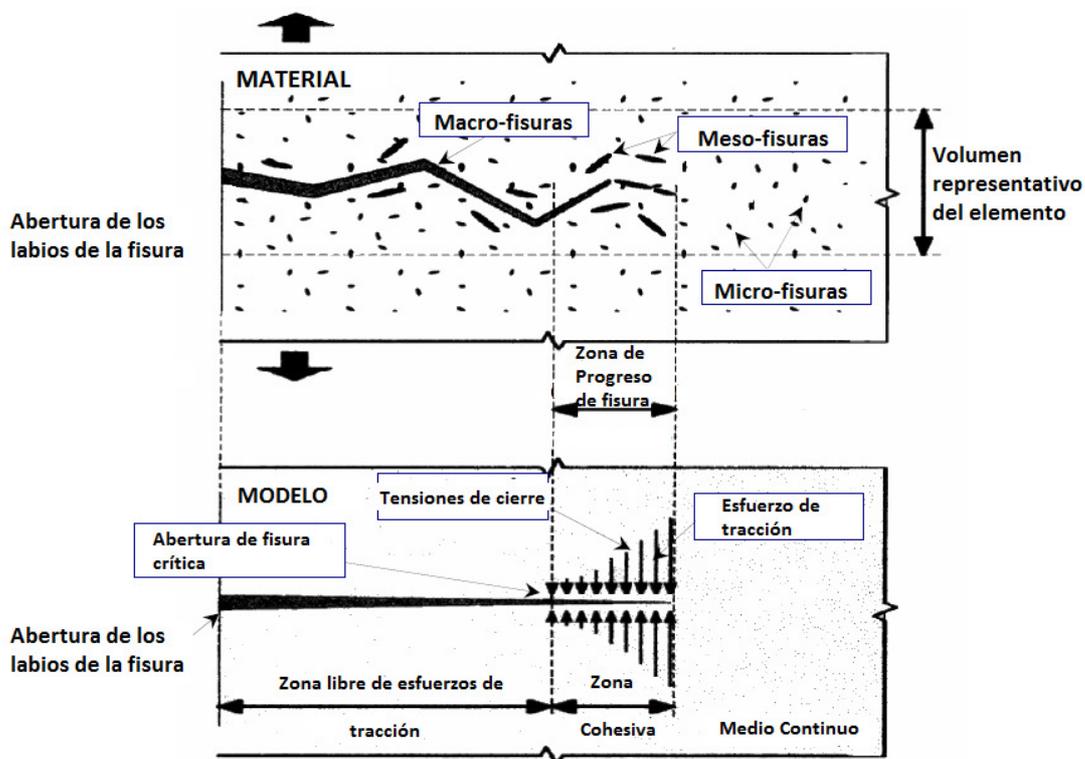


Figura 39. Esquema analógico del modelo cohesivo de fisuración. (Uzan & Levenberg 2001)

Por tanto podemos decir que el modelo cohesivo de fisuración está basado en la energía de fractura del material, que es la propiedad fundamental que describe la energía requerida por dicho material para crear una unidad de superficie de fractura. Así, en el modelo cohesivo, primeramente el material es sometido a un daño cuando la tensión aplicada

excede la elasticidad del material. Una vez alcanzada la tensión máxima, el material se somete a un estado de reblandecimiento (estado plástico que la mecánica de la fractura elástica lineal es incapaz de modelizar), por el que la capacidad de transferir carga a través de las superficies separadas decrece continuamente. Una vez que la energía equivalente a la energía de fractura del material es disipada, una microfisura se desarrolla. El modelo cohesivo define así una ley constitutiva (propia de cada material) que describe la relación entre el desplazamiento y la tracción a lo largo de la superficie de fractura. Así, puede modelizarse la formación y propagación de grietas en materiales bituminosos, tanto en el Modo I de fractura, como en un modo combinado, permitiendo además modelizar la capacidad del material de transferir cargas y la tasa de abertura de la fisura.

Las primeras aplicaciones del modelo cohesivo a mezclas bituminosas fueron hechas por Perng 1989 y Jenq & Perng 1991, aunque no consideraron la microestructura del material en su estudio. Posteriormente, el número de autores que han investigado el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas tratando dicho material con un comportamiento viscoelástico ha ido incrementándose (Abdulshafi & Majidzadeh 1985; Bhurke et al. 1997; Kim & El Hussein 1995; Majidzadeh et al. 1971).

En los últimos años son varios los autores que han adoptado este modelo para el estudio del fenómeno de fisuración en pavimentos (Dave et al. 2007; Jenq et al. 1993; Kim & Buttlar 2005; Kim et al. 2009; Scarpas et al. 1997; Seo et al. 2004; Soares et al. 2003; Paulino et al. 2004; Uzan & Levenberg 2001; Wagoner et al. 2005a). Tal y como define el modelo, los ensayos de laboratorio realizados hasta la fecha como los de Li et al. 2006 o Wagoner & Buttlar 2007, han puesto de manifiesto la aparición en las mezclas bituminosas de una zona de debilidad después de haberse alcanzado la carga máxima (Zona de Proceso de Fractura, ZPF), situada entre la macrogrieta y la región sin dañar, lejos del vértice de ésta. Así, Uzan y Levenberg definieron la existencia de una zona relativamente grande de proceso de fractura cuando una macro-fisura se forma y se propaga en mezclas bituminosas, lo cual provoca que el concepto de factor de intensidad de tensiones no pueda ser aplicable a estos materiales (Uzan & Levenberg 2001). En los estudios desarrollados por Wagoner & Buttlar

2007, se demostró que la longitud de dicha zona (ZPF) en mezclas bituminosas es de unos 43 mm aproximadamente. Los trabajos realizados por Song et al. 2005 y 2006, y Soares et al. 2003, demuestran que el empleo del modelo cohesivo para estudiar la propagación de firmes en pavimentos ofrece buenos resultados en comparación con los ensayos de laboratorio, mientras que por su parte, Li et al. 2006 sustentaron la aplicabilidad de este modelo, mediante un estudio de emisión acústica donde se manifiesta la no linealidad del material. Más recientemente Kim et al. 2009 definieron un modelo numérico de fractura basado en el modelo cohesivo de reblandecimiento y en una técnica de procesamiento de imágenes con la que se obtiene la microestructura de la probeta.

A pesar de todas estas aplicaciones, el modelo cohesivo aplicado a estos materiales aún se encuentra en una etapa de desarrollo. Uno de sus principales hándicaps es que la mayor parte de los trabajos de laboratorio realizados y validaciones del modelo han sido llevados a cabo en el cuadro de la fisuración provocada por una carga monótona. Así, para poder extender este modelo al estudio de la propagación de fisuras bajo cargas cíclicas (acorde con el fenómeno real de fisuración de pavimentos, como hemos visto anteriormente), resulta necesario seguir investigando de manera que se definan más parámetros que permitan la modelización de este tipo de cargas.

2.4. Métodos de Ensayo para el Estudio del Comportamiento a Fisuración de Mezclas Bituminosas

Anteriormente a este apartado, se ha llevado a cabo la descripción general del fenómeno de fisuración en firmes de carreteras, analizando sus características, tipologías, y las diferentes actuaciones preventivas y paliativas realizadas para minimizar su impacto. De igual forma, para poder comprender mejor la naturaleza de este fenómeno, se ha profundizado en el estudio del comportamiento de las mezclas bituminosas ante los procesos de fatiga, “healing”, y propagación de fisuras. Como complemento a estos estudios, en este apartado se presentan los diferentes tipos de ensayo de laboratorio

empleados para analizar y evaluar el comportamiento ante fisuras de las mezclas bituminosas (y sistemas anti-fisuras), así como la normativa existente al respecto.

La existencia de este tipo de ensayos resulta fundamental para poder caracterizar el comportamiento de mezclas bituminosas o sistemas anti-fisuras, a nivel de laboratorio, antes de ser utilizados en un pavimento real. De esta forma, a través de la simulación las solicitaciones producidas en los firmes de carretera, estos ensayos permiten realizar un diseño específico de estos materiales.

El hecho de utilizar ensayos que permitan una reproducción fidedigna de las solicitaciones a las que los firmes se encuentran sometidos, resulta fundamental para garantizar el buen comportamiento ante fisuras de los materiales durante su vida de servicio. Así, a lo largo de los últimos 50 años han ido desarrollándose diversos dispositivos y métodos de ensayo que han permitido evaluar los procesos de fatiga, “healing” y propagación de fisuras, tanto en mezclas bituminosas, como en sistemas anti-fisuras. Actualmente, existen por tanto numerosos tipos de ensayos de fisuración, los cuales pueden ser clasificados en función de sus características:

- Tipo de carga que provoca la fisuración (asociados a un modo de fisura): ensayos que simulan las variaciones térmicas (Modo I), ensayos que simulan las cargas del tráfico (Modo II), y ensayos que simulan ambos tipos de carga variaciones térmicas y la acción del tráfico (Modos I y II).
- Tipo de carga aplicada: ensayos que aplican cargas monotónicas hasta la rotura del material (ensayando de manera principal la cohesión del material ante la propagación de una grieta) o ensayos que aplican cargas cíclicas (reproduciendo condiciones más realistas de fatiga, que simulan el inicio y propagación de la fisura), los cuales pueden o no contener periodos de descanso.
- Tipo de estructura ensayada: ensayos sobre probetas simples compuestas por un único material (evaluando su resistencia individual a la fisura), ensayos sobre probetas multicapas (cuyo objetivo es el estudio experimental en laboratorio de la resistencia a fisuración de un conjunto de materiales con o sin capa intermedia para

retardar la propagación de fisuras), o ensayos sobre estructuras de carretera completas (ensayos a escala en pistas de ensayos de laboratorio, normalmente equipadas con un dispositivo de simulación de tráfico tipo APT-Accelerated Pavement Testing). Además de éstos, también puede llevarse a cabo el seguimiento de tramos de prueba de carreteras reales (que normalmente consisten en el control de las fisuras aparecidas en la capa de rodadura).

- Tipo de fisuración que tienen en cuenta: ensayos de fisuración ascendente o descendente por fatiga, o por propagación de fisura del material bajo carga monotónica.
- Tipo de resultados considerados: ensayos de tipo cualitativos (la mayor parte de los ensayos de fisuración reflexiva se interesan únicamente en la capacidad del material puesto en una capa intermedia del firme de retardar la aparición de fisuras) y ensayos de tipo cuantitativos (que principalmente tratan de crear la bases de un dimensionamiento teórico).

El objetivo final de este capítulo será conocer los diferentes tipos de ensayo de fisuración existentes en el campo de las mezclas bituminosas, analizando sus principales características. Se llevará a cabo la descripción de cada uno de ellos, evaluando sus diferentes aspectos, y estableciendo un análisis de su efectividad en la evaluación del comportamiento a fisuración de los materiales bituminosos y sistemas anti-fisuras. Además, se analizará la normativa de ensayos existente en torno a este fenómeno, centrándonos en la norma europea UNE-EN 12697-44 y en el proyecto de norma prEN 12697-46, de aplicación en nuestro país.

Para poder realizar un estudio abordable de todos los ensayos aquí recogidos, se realizará una clasificación general en base al tipo de material ensayado, y una clasificación específica en base al tipo de sollicitación impuesta en el mismo (Tabla 4). Así, se distinguirá entre ensayos realizados sobre materiales simples (ensayos realizados a probetas compuestas por un solo tipo de mezcla bituminosa) y ensayos realizados sobre materiales compuestos (llevados a cabo sobre probetas fabricadas por varios tipos de mezclas bituminosas, con o

sin la incorporación de sistemas anti-fisuras). Además, dentro de los ensayos realizados en materiales simples, se diferenciará entre los tipos de esfuerzos aplicados para provocar el fallo de los mismos (esfuerzos de flexión, tracción, cizallamiento, etc.), mientras que en los ensayos realizados con materiales compuestos, se hará entre los ensayos que simulen las sollicitaciones de las cargas térmicas, del tráfico, mixtos, o los ensayos que simulen los efectos del tráfico a escala.

Material Ensayado	Tipo de sollicitación o esfuerzo aplicado	Ensayos
Materiales simples	Flexión	SCB; SE(B); 3P CEDEX; 4P Image;
	Tracción-Compresión	Univ. Viena; Tracción AASHTO; Tracción Caltrans; BDT; Tensión Compacta; DC(T); Tracción Directa UPC; EBADE; Fenix
	Tracción Indirecta	Tracción Indirecta; Disco con entalla
	Cortante	3MSGC Egletons; RCD; Univ. Delft
Sistemas complejos	Simulación de efectos térmicos	Fisurómetro E/G; BRRC; Univ. Illinois; Overlay tester;
	Simulación cargas de tráfico	Univ. Cracovia; I.T. Israel; NTEC; Univ. College Dublin; I. A. Brasil; Univ. Florida; Univ. Amirkabir
	Simulación mixta	LRPC Autun; MEFISTO; SIFIRE; WRC UPM; ETS Quebec; I. T. India
	Simulación tráfico a escala	MMLS3; NTEC; FABAC; BAST; CEDEX

Tabla 4. Ensayos para la evaluación del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas.

2.4.1. Ensayos sobre Materiales Simples

Los ensayos recogidos en esta parte son realizados sobre probetas compuestas por un único tipo de mezcla bituminosa con el objetivo de caracterizar individualmente sus propiedades mecánicas, y más en particular, su resistencia a la fisuración.

A la hora de desarrollar métodos de evaluación del comportamiento a fisuración para materiales simples se han utilizado diferentes principios de ensayo. La geometría de las probetas, el tipo de sollicitación aplicada, los puntos de aplicación de la carga y los puntos de apoyo varían de un tipo de ensayo a otro. Por otra parte, las condiciones de aplicación de las cargas también varían, de manera que se pueden encontrar ensayos en los que se

aplican cargas monotónicas hasta el fallo de la probeta, y ensayos de fatiga en los que las cargas aplicadas son cíclicas.

Una de las clasificaciones más comunes a la hora de agrupar estos ensayos es utilizando el tipo de sollicitación aplicada. Por una parte se encuentran los ensayos a flexión, clasificados por Mathews & Monismith 1993 como:

- Flexión a 3 o 4 puntos: sobre una probeta prismática situada sobre dos apoyos se aplica una carga o una deformación, que puede ser ejecutada sobre uno (Figura 40a) o dos puntos (Figura 40b). La flexión a cuatro puntos tiene la ventaja de asegurar un momento de flexión constante en el centro de la probeta, entre los dos puntos de aplicación de la carga. Estos ensayos vienen recogidos en la norma UNE-EN 12697-24, concretamente en los anexos C y D (AENOR 2007).
- Flexión a 2 puntos: sobre una probeta trapezoidal o prismática cuya base se encuentra empotrada, se aplica una carga o un desplazamiento sinusoidal en su punto más alto (Figura 40c). Estos ensayos vienen recogidos en la norma UNE-EN 12697-24, concretamente en los anexos A y B (AENOR 2007).
- Flexión por rotación: una probeta cilíndrica se sitúa sobre una plataforma que gira, mientras que una carga es aplicada perpendicularmente en el otro extremo (Figura 40d).

Por otra parte, también es posible caracterizar los materiales bituminosos mediante los ensayos clásicos de tracción o de compresión (Figura 40e). La sollicitación uniaxial es realizada de forma cíclica (o monotónica) sobre la cara normal de la probeta mediante la imposición de una carga o un desplazamiento. Este tipo de ensayos normalmente combinan la tracción y la compresión con el objetivo de tener en cuenta la influencia de la inversión de la sollicitación en la degradación de las probetas de mezclas bituminosas ensayadas a fatiga.

El ensayo de tracción indirecta consiste en someter a una probeta cilíndrica a una carga de compresión aplicada sobre dos generatrices diametralmente opuestas (Figura 40f), y viene

recogido por la norma UNE-EN 12697-24, anexo E (AENOR 2007). Dicha sollicitación se lleva a cabo de forma cíclica pero el dispositivo no permite invertir la forma de aplicación de la carga. Otra desventaja es la imposibilidad de comparar directamente sus resultados con los obtenidos en los ensayos uniaxiales puesto que el estado de tensiones obtenido es biaxial. Además, también es posible caracterizar el comportamiento de las mezclas bituminosas mediante ensayos de cizallamiento o cortante (Figura 40g), o a través de ensayos triaxiales, aunque estos son raramente utilizados.

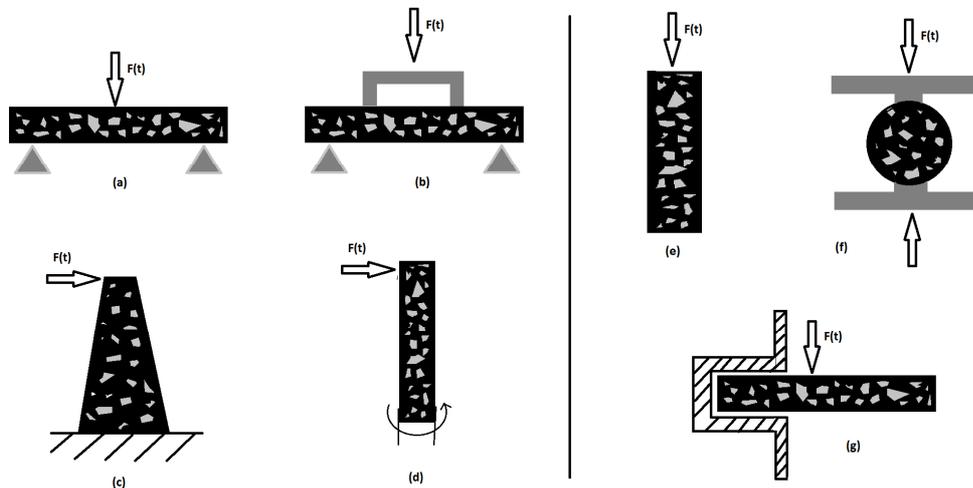


Figura 40. Tipos de sollicitación aplicada en ensayos de materiales simples.

Se recogen a continuación algunos de los ensayos de mezclas bituminosas más característicos para estudiar su comportamiento anti-fisuras, distinguiendo entre los que aplican cargas a flexión, tracción-compresión, tracción indirecta y cizallamiento. Notar que los ensayos aquí recogidos no se ajustan a ninguna normativa, y por tanto, sus características (frecuencia, tipo de carga, acondicionamiento de las probetas) están sujetas a modificaciones, de manera que aquí solo se recogen algunas de las más comunes utilizadas en diferentes investigaciones.

2.4.1.1. *Ensayos a Flexión*

Ensayo de flexión en probeta semicircular (SCB, Semi Circular Bend)

El ensayo de flexión en probeta semicircular fue desarrollado en la Universidad de Minnesota para investigar la resistencia de las mezclas bituminosas a la fisuración debido a las bajas temperaturas (Li 2005). Dicho ensayo está basado en principios de mecánica de la fractura, los cuales ya habían sido utilizados con éxito para caracterizar otros materiales como el hormigón o el acero. El ensayo se lleva a cabo sobre probetas semicirculares cortadas de probetas cilíndricas con una entalla en el centro (para facilitar la propagación de la fisura), y es utilizado para calcular la energía de fractura (área contenida bajo la curva carga-desplazamiento) y la resistencia a fractura (determinada a partir de la carga máxima registrada y la geometría de la probeta) del material ensayado. La obtención de valores altos de energía de fractura y de resistencia a fractura significa un mejor comportamiento del material ante el fenómeno de fisuración a bajas temperaturas.

El ensayo consiste en colocar la probeta semi-circular de mezcla bituminosa sobre dos apoyos situados en los extremos (Figura 41), aplicando una carga central que provoca la flexión de la probeta en su zona inferior. En dicha zona, se coloca un medidor de deformaciones que permite controlar la abertura de la grieta producida en la probeta conforme se aplica la carga.

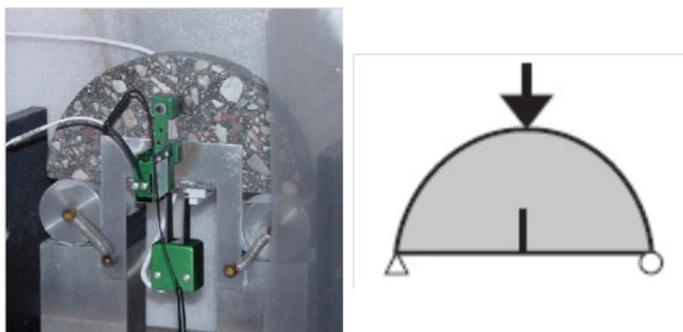


Figura 41. Ensayo de flexión en probeta semicircular. (Clyne et al. 2009)

Conforme se disminuye la temperatura a la que se lleva a cabo el ensayo (el cual se realiza en una cámara térmica a temperaturas cercanas 0 °C), la carga máxima aplicada en el ensayo aumenta, y el desplazamiento total disminuye, de manera que la energía de fractura disminuye y la resistencia a fractura aumenta (puesto que la mezcla se vuelve más frágil).

Este ensayo destaca por su fácil aplicación a probetas y testigos (de cada probeta cilíndrica pueden ensayarse dos), pero la aplicación de la carga produce un complejo estado tensional que afecta en el proceso de propagación de la fisura, generando un efecto arco con altos esfuerzos de compresión en la zona cercana a la fisura (Wagoner et al. 2005b). En España este ensayo viene regido por la norma UNE-EN 12697-44 (AENOR 2001), y actualmente se trata del único ensayo normalizado en nuestro país para evaluar el comportamiento de las mezclas bituminosas ante los fenómenos de fisuración. Posteriormente se dedica un apartado al análisis de esta norma y a la descripción de las condiciones de ensayo bajo esta norma.

Ensayo de viga entallada (SE(B), Single Edge Notched Beam)

El ensayo de viga entallada ha sido utilizado para determinar las características de fractura de mezclas bituminosas bajo diferentes condiciones de carga, temperatura y dimensiones de probeta (Bhurke et al. 1997; Hossain et al. 1999; Kim & El Hussein 1997; Marasteanu et al. 2002; Mobasher et al. 1997). En este caso, la flexión se produce sobre probetas prismáticas apoyadas en los extremos, en las que se le aplica una carga en la zona central (Figura 42). La estructura de este ensayo resulta ventajosa para medir la fractura en mezclas bituminosas debido a que permite una configuración simple de las cargas de ensayo y proporciona una adecuada propagación de la fisura de acuerdo al Modo I de fractura, permitiendo un crecimiento estable de la fisura tras su formación. Sin embargo, su geometría tiene la desventaja de que se limita su aplicabilidad a vigas compactadas en laboratorio, no permitiendo su aplicación a testigos (Wagoner et al. 2005b).



Figura 42. Ensayo a flexión de viga con entalla. (Wagoner et al. 2005b)

Una de las problemáticas más comunes asociadas a este tipo de ensayos es la determinación de una geometría estandarizada de las probetas a utilizar y de las condiciones de ensayo más adecuadas. Algunas de las dimensiones y condiciones más utilizadas en este ensayo vienen recogidas en la Tabla 5, elaborada por Wagoner et al. 2005b. Por su parte, uno de los tamaños más habituales de longitud de entalla es de 20 mm, de manera que se asegure la intensidad de tensiones en el vértice de la misma para iniciar la fisura.

Fuente	Tamaño de Viga (mm)	Temperatura de Ensayo (°C)	Tipo de ensayo
Majidzadeh et al. 1971	25 x 25 x 305 50 x 75 x 356	-5, 5, 25	Tensión controlada Deformación controlada
Ramsamooj 1991	75 x 100 x 406	24	Tensión controlada
Mobasher et al. 1997	89 x 89 x 406	-1, -7	Apertura de fisura controlada
Kim & El Hussein 1997	70 x 50 x 300	-5, -10, -15, -20, -25, -30	Deformación controlada
Bhurke et al. 1997	50,8 x 50,8 x 203,2	-10	Tensión controlada
Hossain et al. 1999	75 x 100 x 400	5, 25	Tensión controlada
Marasteanu et al. 2002	75 x 95 x 356	-18, -34	Apertura de fisura controlada

Tabla 5. Dimensiones de probetas y condiciones de ensayos comunes de SE(B).

La carga impuesta a la probeta suele provocar desplazamientos en el centro de la misma de 0,7 mm/min, de manera que se obtenga una tasa de crecimiento de fisura constante. Para

controlar las deformaciones producidas por la abertura de los labios de la grieta se utiliza un dispositivo de medida colocado en la zona inferior de la probeta. Además, el ensayo suele llevarse a cabo en una cámara térmica, a temperatura controlada.

Ensayo de viga a Flexión en 3 puntos del CEDEX

Este método de ensayo ha sido desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), y se trata de la adaptación española al método descrito en el punto anterior (ensayo de viga con entalla). En este caso las dimensiones de la probeta a ensayar son 305 x 55 x 90 mm, en las que se sierra una entalla de 20 mm de profundidad en el centro de una de las caras de dimensión 305 x 55 mm (García 1992). La probeta se sujeta en el dispositivo de ensayo por medio de tres casquillos metálicos pegados a ella, dos en la cara de la entalla, separados 270 mm y centrados, y el otro se pega en el centro de una chapa metálica de 0,3 mm situada en la cara opuesta (que se encuentra adherida mediante resina Epoxi; Figura 43).

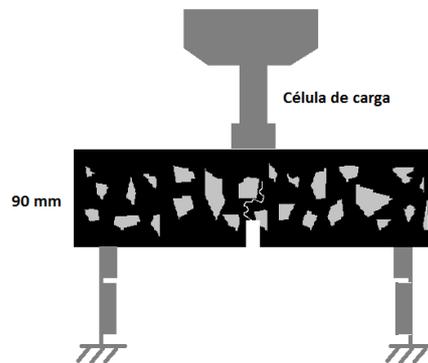


Figura 43. Esquema ensayo fisuración de flexión CEDEX.

Durante el ensayo, la probeta que se encuentra bi-apoyada, se somete a una carga de flexión cíclica sinusoidal, con frecuencia de 1 Hz y amplitud del desplazamiento central constante de 400 micras. El ensayo se lleva a cabo a una temperatura constante de 20°C. El control de las deformaciones obtenidas en el centro de la probeta donde se encuentra la entalla (abertura de la fisura) se realiza mediante un dispositivo tipo LVDT. Cada 100 ciclos

se lleva a cabo el registro de la carga aplicada, la flecha central, la energía de carga necesaria para abrir la fisura, la longitud media de la fisura (obtenida visualmente, mediante una escala de medida dibujada sobre un fondo blanco pintado sobre la probeta), y la energía disipada en forma de calor.

La velocidad media de fisuración (df/dc) y la velocidad media de decrecimiento de la energía de carga por unidad de espesor ($-dE_c/B*dc$; energía gastada durante un ciclo en romper la probeta), son determinadas mediante los datos obtenidos de las longitudes de fisuras comprendidas entre 10 y 50 mm. Así, para caracterizar la calidad de una mezcla bituminosa puede emplearse un único valor definido mediante la expresión “Índice de Velocidad de Fisuración”:

$$IVF = \frac{df}{dc} \text{ [Ecuación 31]}$$

Los valores de IVF varían entre 4 y 30 micras/ciclo para mezclas bituminosas usuales, siendo menor de 6 micras/ciclo, para mezclas bituminosas anti-fisuras bien dosificadas y con un ligante adecuado.

Ensayo de Flexión en 4 puntos con Cámara Digital de Análisis de Imágenes

A pesar de que se trata de ensayos bastante comunes para evaluar el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas (así como del comportamiento a fatiga), cuando se emplean ensayos a flexotracción en 3 o 4 puntos, resulta complicado analizar el daño sufrido por la probeta debido a que las fisuras formadas tienden a agruparse en forma de red, iniciándose éstas en más de un punto, desapareciendo detrás de los áridos, o separándose alrededor de ellos.

Así en el año 2004, desde la University College de Dublin y la empresa Africon Engineering International, se llevó a cabo el desarrollo de un ensayo de flexotracción a 4 puntos, en el que mediante el empleo de un dispositivo que realiza un proceso de captura de imágenes, y su posterior análisis, puede caracterizarse de manera más detallada el proceso de crecimiento de la fisura (Hartman & Gilchrist 2004). Además, el empleo del sistema en 4

puntos permite localizar mejor un área en estado de máxima tensión situada entre los dos puntos de carga central, donde va a tener lugar el fallo por fatiga de la probeta.

La captura de imágenes se realiza mediante un circuito digital de vídeo en blanco y negro, situado dentro de la cámara de acondicionamiento del ensayo, con el objetivo de proporcionar las mismas condiciones de grabación (distancia, luminosidad, etc.). El control del proceso de toma de datos se lleva a cabo a partir de un microprocesador que incorpora una tarjeta de memoria y un programa que permite la toma de imágenes en la zona de la fractura durante intervalos de tiempo establecidos. Un obturador de alta velocidad permite la captura de las imágenes durante todo el proceso de fatiga, y éstas son enlazadas en intervalos cíclicos específicos con los que se analiza el crecimiento de la fisura (Figura 44).

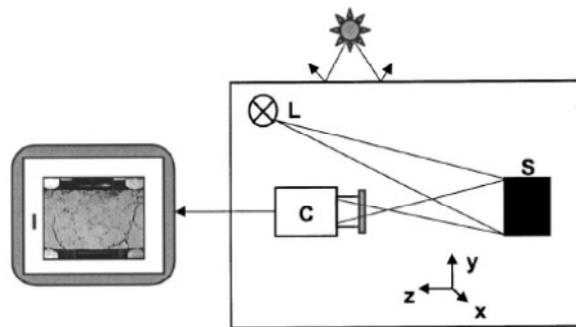


Figura 44. Esquema del Dispositivo de Ensayo: (S) Probeta; (C) Cámara; (L) Punto de Luz, (I) Dispositivo de Grabación y Almacenamiento de Datos. (Hartman & Gilchrist 2004)

Las imágenes captadas de las probetas tienen un tamaño de 768 x 576 píxeles, siendo almacenadas en escala de grises en formato “.BMP”, y posteriormente comprimidas en formato “.JPG”. Mediante el empleo de las dimensiones reales de la probeta, pueden extrapolarse medidas directamente de las imágenes digitales. Para ello pueden utilizarse dos métodos, uno de ellos calcula el área total de fisuras utilizando un algoritmo que cuenta el número de píxeles fracturados, que posteriormente son convertidos en un área de fractura (normalizándolos con ayuda de la profundidad de la probeta, d), con la que se determina un tamaño de fisura equivalente:

$$C_{DIA}^{eq} = d * \frac{A_c}{A_t} \text{ [Ecuación 32]}$$

Donde C_{DIA}^{eq} es el tamaño de fisura equivalente; A_c es el área total de fisura en el ciclo n ; y A_t es el área total de fisura en el fallo.

El otro método determina un algoritmo que reduce la fisura a un ancho de píxel, de forma que mediante el recuento de éstos puede determinarse la longitud de la grieta. Aunque el método de medida que muestra una mayor fiabilidad en los resultados es el método de conversión del área de fractura.

En las imágenes obtenidas mediante este ensayo se observa como la propagación de la fisura en la flexotracción a 4 puntos está íntimamente relacionada con las características del mortero (compuesto por la parte más fina de la arena, el filler y el betún), y tiende a desviarse en presencia de los áridos (Figura 45). En el proceso de fisuración se observa cómo pequeñas micro-fisuras se sitúan próximas a las macro-fisuras (Figura 46). Además hay que destacar la presencia de pequeñas grietas perpendiculares a la probeta en la parte inferior de ésta.

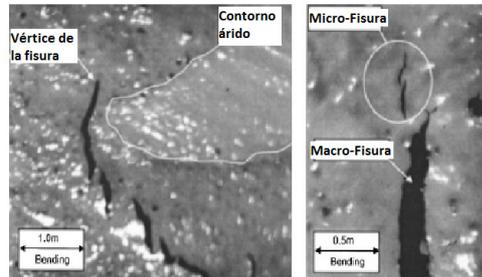


Figura 45. Imagen captada del proceso de fisuración. (Hartman & Gilchrist 2004)

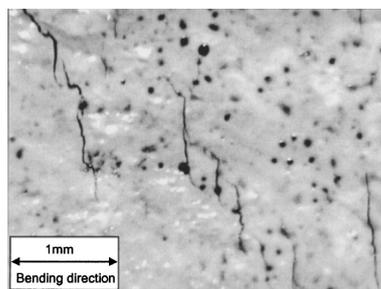


Figura 46. Grietas de tracción en la parte inferior de la probeta debido a la aplicación de las cargas centrales. (Hartman & Gilchrist 2004)

A partir de las imágenes captadas puede caracterizarse el comportamiento a fatiga de la mezcla. En la Figura 47 se muestran los datos obtenidos en la propagación de la grieta para una probeta, analizada con los dos métodos. El método de reducción de la fisura al ancho del píxel predice un aumento inicial del crecimiento de ésta, mientras que el de la transformación del área de fractura, muestra un retraso en el inicio de la fisura, con un posterior crecimiento exponencial hasta el final de vida de fatiga de la probeta.

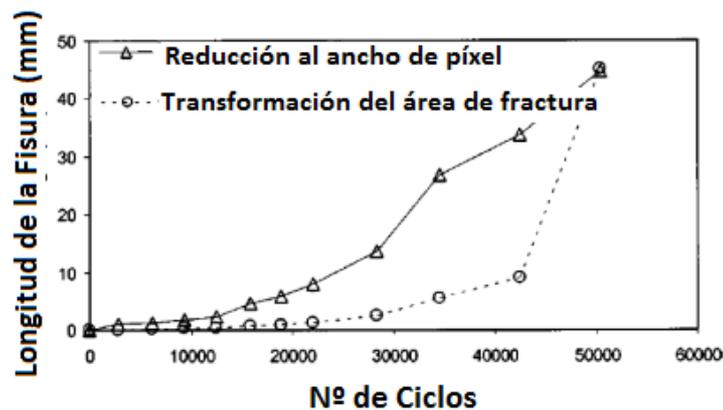


Figura 47. Resultados del Ensayo. (Hartman & Gilchrist 2004)

Utilizando la ley de Paris como ley de regresión, se obtiene la tasa de propagación de la grieta en función de su tasa de crecimiento para cada ciclo de carga [Ecuación 33].

$$\frac{dc_{DIA}^{eq}}{dN} = A\Delta K^n \text{ [Ecuación 33]}$$

Donde dc_{DIA}^{eq} es la longitud de fisura equivalente (mm); N es el número de ciclos de carga para el fallo a fatiga de la probeta; A, n, son coeficientes de material, y ΔK es el rango de factor de intensidad de tensión (N/mm). La Figura 48 muestra la evolución del proceso de fisuración en una de las probetas del ensayo.

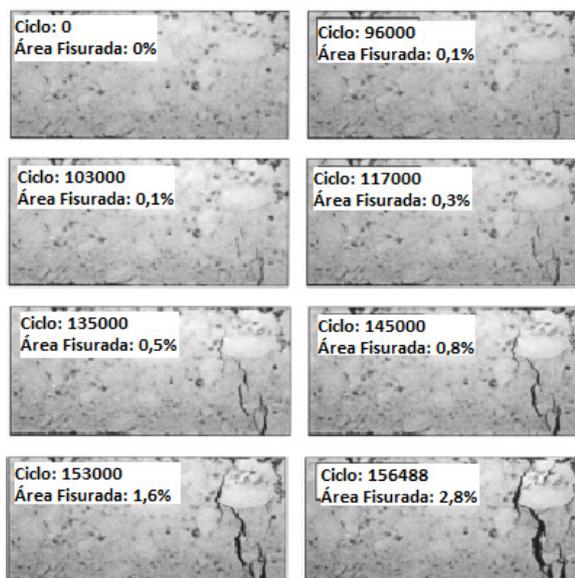


Figura 48. Imágenes de la evolución del proceso de fisuración.

2.4.1.2. Ensayos a Tracción/Compresión

Ensayo de la Universidad Técnica de Viena

Tschegg et al. 1993 desarrollaron un ensayo para caracterizar la fisuración en mezclas bituminosas mediante el modo I de fractura. Así, el dispositivo de ensayo desarrollado mide la curva carga-desplazamiento de una probeta de mezcla bituminosa cúbica o cilíndrica, determinando la información necesaria para caracterizar el comportamiento a fractura de las probetas ensayadas.

Las probetas son fabricadas con una ranura rectangular y una entalla pre-fisurada, y son situadas en un soporte lineal estrecho sometido a una carga de compresión (Figura 49). En el interior de dicha ranura se colocan dos piezas utilizadas para la transmisión de la carga, y una cuña de separación (con un ángulo comprendido entre 5 y 10°), situada en el mismo plano vertical que el soporte lineal y la entalla. Para reducir la fricción entre la cuña y las piezas de transmisión de la carga, se introducen unas barras cilíndricas entre ambos componentes (a modo de rodillos). La cuña transmite la fuerza desde la prensa de ensayo a

la probeta (con una tasa de aplicación de 1,3 mm/min), de forma que ésta es transformada en una fuerza de componente horizontal (separando la probeta como en los ensayos de flexión) y vertical. La división de la probeta va teniendo lugar durante la propagación estable de la grieta, hasta completar la separación en dos de la misma. Para la determinación de la deformación en la línea de aplicación de la fuerza (desplazamientos debido a la abertura de la grieta), se utilizan medidores situados en ambos extremos de la entalla.

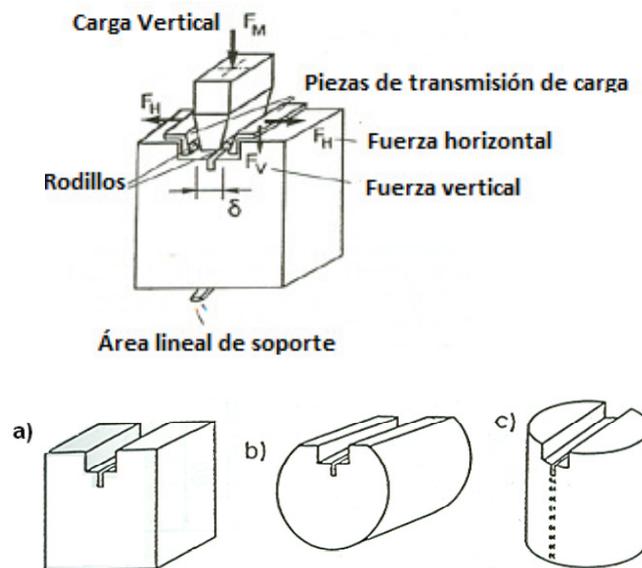


Figura 49. Ensayo de la universidad técnica de Viena. (Tschegg et al. 1993)

El área obtenida bajo la curva fuerza-desplazamiento se corresponde con la energía necesaria para dividir la probeta. El cociente entre esta energía y el área de fractura (proyección plana del área bajo la curva de la carga aplicada), permite obtener la energía específica de fractura del material (G_f). Dicho parámetro es una propiedad del material y no depende de la forma o tamaño de la probeta.

Durante la puesta a punto del dispositivo se llevaron a cabo ensayos a $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los resultados obtenidos demostraron que la fuerza máxima aplicada no tiene una relación directa con el comportamiento a fractura de las mezclas bituminosas, de manera que la

mejor forma de caracterizar el comportamiento a fisuración de las mezclas es mediante el parámetro de la energía de fractura.

Ensayo Estandarizado de la AASHTO para medir la resistencia a tracción

Este ensayo desarrollado dentro del marco del SHRP (Strategic Highway Research Program) por la Universidad de Oregón (Hung & Vinson 1994), es conocido como ensayo de resistencia a tracción térmica confinada (Thermal stress restrained specimen test), y es utilizado para simular los fenómenos de fisuración en mezclas bituminosas a bajas temperaturas.

El ensayo se rige bajo la norma AASHTO TP10-93, y consiste en someter una probeta de mezcla bituminosa (circular o cilíndrica) a cargas de tracción. Para ello, la probeta se pega a dos bases de aluminio con resina epoxi, en las que se acoplan 4 varillas, y posteriormente este conjunto, se monta dentro de una cámara de acondicionamiento que se enfría mediante vapor de nitrógeno líquido (Figura 50). Cuando los sensores detectan una contracción de la probeta de 0,0025 mm, el ordenador activa el funcionamiento de los gatos que la devuelven a su longitud original.

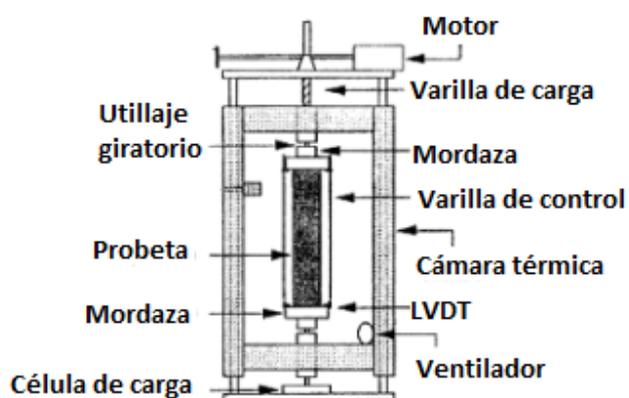


Figura 50. Esquema dispositivo de ensayo AASHTO TP10-93. (Hung & Vinson 1994)

La tensión inducida incrementa conforme disminuye la temperatura en la cámara de acondicionamiento, y el proceso continúa hasta que la tensión es igual a la resistencia de la

mezcla, produciéndose una grieta para aliviar las tensiones. Un sistema de almacenamiento de datos, registra las cargas, temperaturas y deformaciones, aplicadas a la probeta a través del tiempo. Los resultados se muestran en un gráfico tensión-temperatura, en el que la pendiente, dS/dT , va creciendo hasta un punto en el que se convierte en lineal, hasta llegar a su máximo donde se produce la rotura (Figura 51). Este punto se llama punto de transición de temperatura y divide la curva en dos tipos de comportamiento. Un primer comportamiento en el que el betún es viscoso y se deforma para aliviar las tensiones, y un segundo comportamiento en el que debido a la rigidez alcanzada por éste, se produce la fractura de la mezcla.

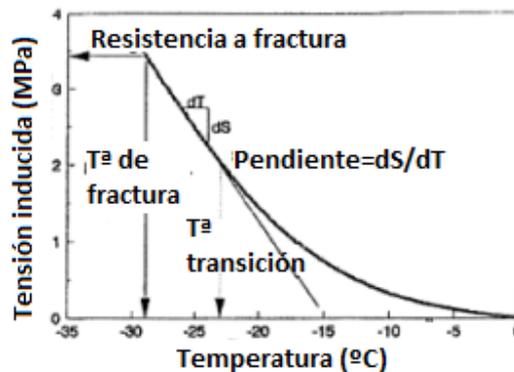


Figura 51. Resultados ensayo AASHTO TP10-93. (Hung & Vinson 1994)

Actualmente, en nuestro país se está preparando un proyecto de norma (prEN 12697-46) basado en este ensayo, del que se hablará posteriormente en el apartado correspondiente a la normativa de ensayo.

Ensayo de tracción repetitiva del Caltrans

Este ensayo fue desarrollado por Shatnawi 1996 en el Caltrans (California Department of Transportation) con el objetivo de llevar a cabo el estudio del comportamiento a fatiga y fisuración en mezclas bituminosas utilizando los principios de los ensayos uniaxiales.

El dispositivo de ensayo consiste en colocar una probeta prismática de dimensiones 200 x 50 x 63 mm en un actuador axial de carga utilizando dos platos metálicos sobre los cuales se

adhiera la probeta con pegamento y la acción de dos tornillos pasadores (Figura 52). El sistema de toma de datos de las deformaciones experimentadas por la probeta consta de dos medidores de tipo LVDT colocados en vertical entre los platos metálicos y paralelos a la probeta. La aplicación de las cargas permite inducir a la probeta tensiones de compresión, de tracción o ambas.

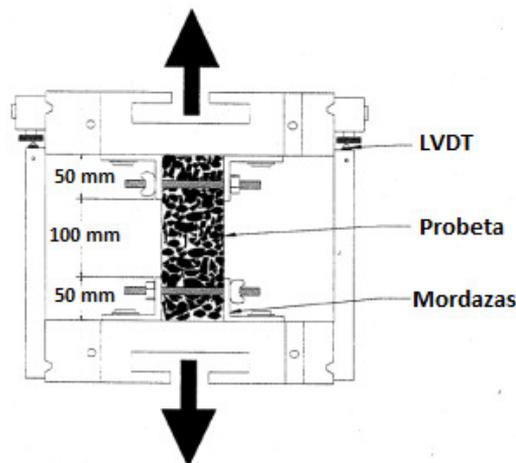


Figura 52. Esquema ensayo Caltrans. (Shatnawi 1996)

Los valores de sollicitación más comúnmente utilizados suelen estar en torno a las 100 micro-deformaciones (aplicando pulsos de carga a tracción-compresión sinusoidales), mientras que las frecuencias utilizadas varían desde los 0,01 Hz hasta los 10 Hz. Para evaluar el comportamiento a fatiga de la mezcla bituminosa ensayada se determina el lazo de histéresis (que relaciona la tensión y la deformación) de la probeta para calcular la energía disipada, y como criterio de fallo de la misma se utiliza la reducción de la rigidez.

Para el análisis de la evolución de la fisura se utiliza la energía disipada, de manera que se define una tasa de energía para definir el número de ciclos a partir del cual la fisura se inicia (dicho punto suele coincidir con una reducción del módulo de rigidez de la mezcla en torno a un 50-70%). Así, en el ensayo se define un parámetro llamado “Parámetro de propagación de fisuras” que es la diferencia entre el valor obtenido en el número de ciclos cuando el módulo de rigidez de la mezcla ha caído un 50% y el valor obtenido en el número de ciclos

para la aparición de la fisura en la probeta de acuerdo con el estudio de disipación de energía.

Ensayo BTD de la Universidad Politécnica de Cataluña

En 1997 el laboratorio de caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, desarrolló el ensayo BDT (Barcelona Tracción Directa), para evaluar la resistencia a la fisuración de mezclas bituminosas de manera rápida y sencilla (Pérez Jiménez et al. 1997).

Las probetas utilizadas en este ensayo son fabricadas mediante una compactadora de impactos, a partir de un molde formado por dos semicírculos con un resalto en la zona de contacto, lo que crea una entalla en la parte central de la probeta, debilitando esta zona para provocar la formación de un plano de fisuración, y de la misma forma, crear un sistema de anclaje donde aplicar los esfuerzos que permitan ensayar la probeta a tracción (Figura 53, Pérez Jiménez et al. 2007).

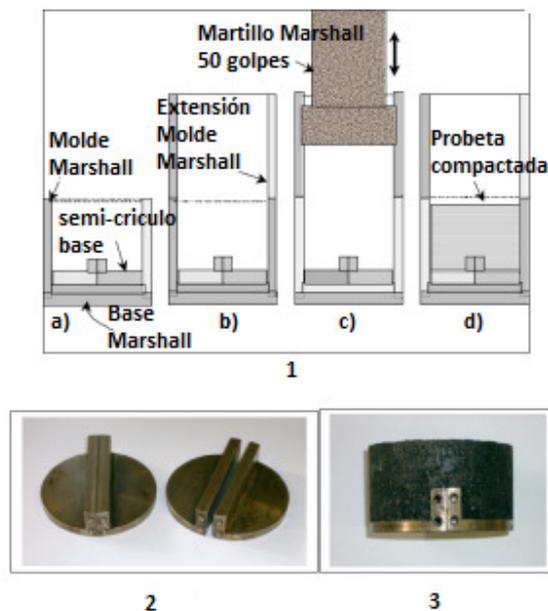


Figura 53. Esquema de fabricación de probetas para ensayo BDT. (Pérez Jiménez et al. 2007)

El ensayo es llevado a cabo a velocidad de desplazamiento constante, de manera que se va produciendo la abertura de la entalla, provocando la fisuración de la probeta (Figura 54). Durante el ensayo se registra el esfuerzo de tracción aplicado sobre la entalladura y la abertura de la fisura.



Figura 54. Detalle ensayos BDT. (Pérez Jiménez et al. 2007)

Ensayo de Tensión Compacta (Compact Tension Test)

Se trata de un ensayo utilizado en la evaluación de la resistencia a la propagación de fisuras, cuya configuración fue establecida primeramente por Manjoine 1965, posteriormente modificada por Wessel 1968, y tras varios años de desarrollo, a principios de los 90 se convirtió en un ensayo normalizado para determinar la resistencia a fractura de los materiales, así como la apertura crítica del vértice de grieta (BSi 1991).

Su aplicación en el estudio de resistencia a propagación de fisuras en mezclas bituminosas suele realizarse con probetas de geometrías compactas fáciles de fabricar. Así, suelen emplearse probetas de sección cuadrada de 150 x 150 mm, con un espesor de 60 mm, y con una entalla de 60 mm de longitud que facilite la aparición y propagación de la fisura (Figura 55). La probeta de mezcla bituminosa se une al marco de ensayos mediante dos pasadores introducidos en unos orificios efectuados en la misma, de manera que permite aplicar una carga de tracción, mientras que un medidor de deformaciones va determinando la apertura de la fisura.

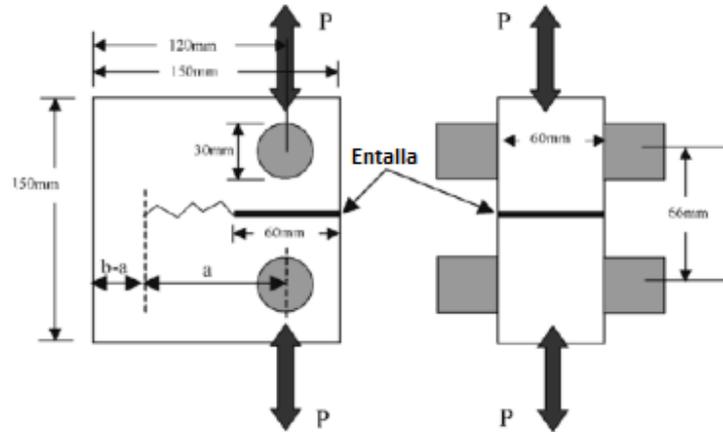


Figura 55. Esquema ensayo de tensión compacta. (Collop et al. 2004)

El ensayo se realiza a tensión controlada, en el cual la carga de tracción impuesta a la probeta es de tipo sinusoidal en un rango de valores de 0,2 a 3,3 kN, con una frecuencia de 5 Hz. Además, es realizado en el interior de una cámara térmica que permite establecer diferentes condiciones de temperatura, de manera que pueda evaluarse la influencia de ésta en el comportamiento de la mezcla.

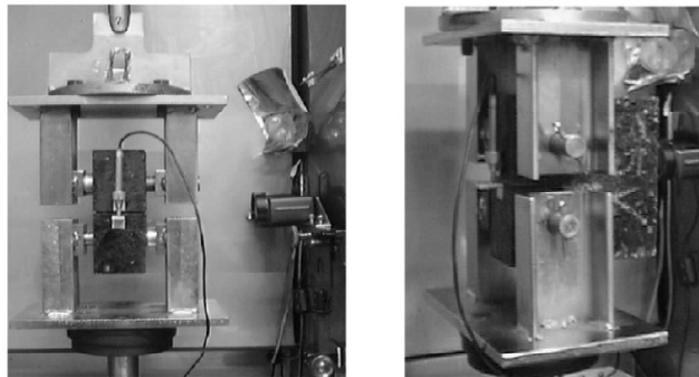


Figura 56. Detalle de ensayo de tensión compacta. (Collop et al. 2004)

En los trabajos desarrollados en el NTEC (Nottingham Transportation Engineering Centre) con este ensayo por Collop et al. 2004, podemos encontrar la adaptación de un sistema de toma imágenes con el que se llevó a cabo el seguimiento de la formación y propagación de la fisura (utilizando para ello una escala de medida dibujada sobre un fondo blanco pintado sobre la probeta) (Figuras 56 y 57). Dichos trabajos permitieron determinar los valores A y n de la ley de Paris [Ecuación 6] a diferentes temperaturas, encontrando una buena correlación entre la mecánica de la fractura y el módulo de rigidez de la mezcla.

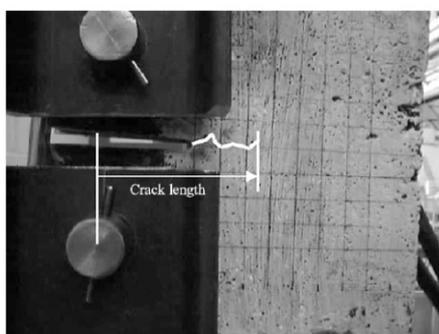


Figura 57. Imagen de propagación de la fisura en el ensayo de tensión compacta. (Collop et al. 2004)

Ensayo de disco compacto a tracción (DC(T), Disk-Shaped Compact Tension)

Se trata de una de las adaptaciones más extendidas del ensayo de tensión compacta, utilizado para obtener la energía de fractura de una mezcla bituminosa (Wagoner et al. 2005c). Mediante el empleo de probetas circulares, la geometría del ensayo intenta resolver los problemas planteados por el ensayo de viga entallada y viga semicircular. Así, la geometría de la probeta viene estandarizada por la norma ASTM E399 (Standard Test Method for Plane-Strain fracture Toughness of Metallic Materials), caracterizada por el serrado de uno de sus bordes, con la presencia de una entalla (para facilitar la propagación de la fisura), y dos orificios para facilitar la aplicación de la carga durante el ensayo. Las dimensiones más utilizadas a la hora de llevar a cabo este ensayo vienen recogidas en la Figura 58 (Wagoner et al. 2005c).

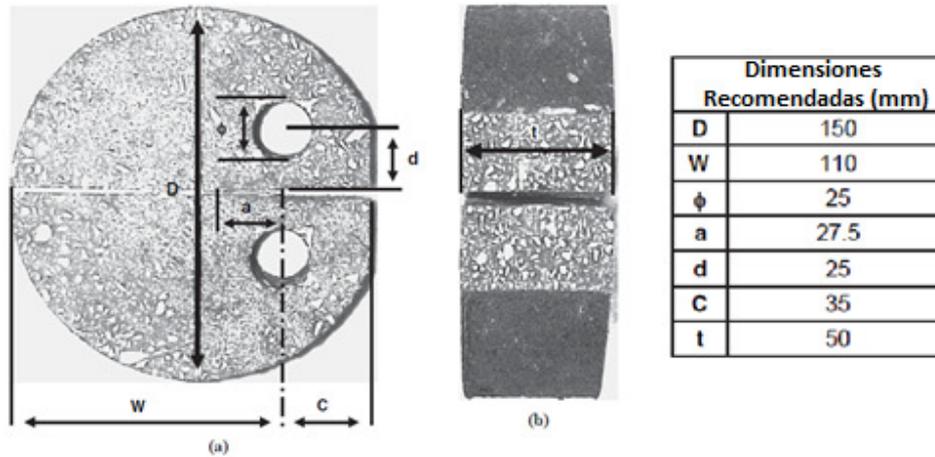


Figura 58. Dimensiones de probeta para ensayo de disco compacto a tracción DC(T). (Wagoner et al. 2005c)

Esta geometría maximiza la longitud de la sección de fisuración y previene la rotura de la probeta por los agujeros de carga, además de permitir que el ensayo sea aplicable a testigos. En la fase inicial de desarrollo de esta geometría, los agujeros de carga se colocaron lo más cercanos posibles a los bordes de la probeta, para crear así una mayor longitud de ligamento. Sin embargo, esta geometría se modificó porque la tendencia al fallo en estos agujeros de carga era del 50%, debido a la falta localizada de material en los puntos de carga. Para reducir la probabilidad de fallo, los agujeros de carga se desplazaron hacia el centro de la probeta, de forma que se aseguraba la existencia de material suficiente, consiguiendo que las probetas rompieran sin un solo fallo por los agujeros de carga. En la Figura 59 se observa la propagación de la fisura con la geometría inicial y la finalmente propuesta. El espesor de la probeta se determina en función de los espesores típicos para capas de pavimento (25-100 mm).

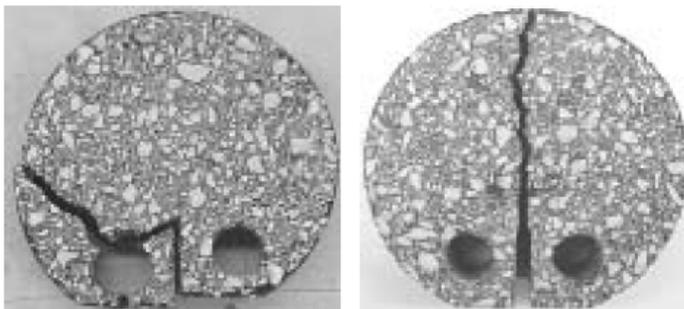


Figura 59. Influencia de la geometría de la probeta en la propagación de la fisura en el ensayo DC(T). (Wagoner et al. 2005c)

La energía de fractura obtenida de la geometría de este ensayo es comparable a la obtenida con los ensayos de viga entallada y viga semicircular. Además, ésta aumenta con el aumento de temperatura (sugiriendo que el material experimenta una transición de frágil a dúctil), así como con la disminución de velocidad de carga. A pesar de ello, las desventajas que presenta este ensayo son los problemas asociados a la generación de microfisuras en los alrededores de los orificios donde se aplica la carga, y la complejidad de efectuar el ensayo a temperaturas superiores a los 10 °C.

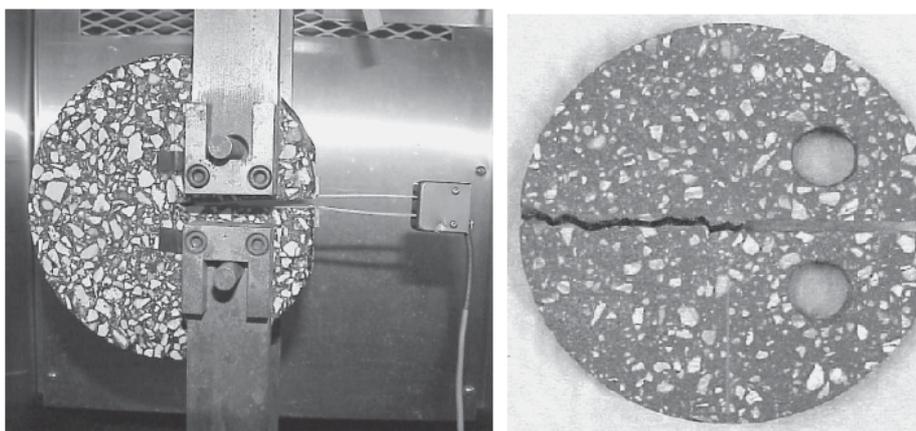


Figura 60. Detalle del ensayo DC(T), y de la probeta tras ser ensayada. (Wagoner et al. 2005c)

Se trata de uno de los ensayos más extendidos en el estudio del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas (Figura 60). Así, una de sus aplicaciones más recientes y singulares podemos encontrarla en los trabajos realizados por Behnia et al. 2011, en los que emplearon las emisiones acústicas transmitidas por las probetas durante el ensayo, para analizar el comportamiento a fisuración por bajas temperaturas de las mezclas.

Ensayo de tracción directa aplicado a probetas prismáticas de Universidad Politécnica de Cataluña. Ensayo EBADE

Este ensayo, similar al ensayo de tracción repetitiva del Caltrans (Shatnawi 1996), fue desarrollado en 2007 en la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña) con el objetivo de solventar los problemas que presentan algunos ensayos como el BDT o el DC(T), en los cuales la probeta ensayada no se encuentra sometida a un esfuerzo de tracción simple puro, lo que provoca la aparición de compresiones en el extremo opuesto de la aplicación de la carga (Pérez Jiménez et al. 2007). Por tanto, el objetivo de este ensayo es determinar la deformación de fractura de la mezcla bituminosa ensayada, así como su tenacidad.

La principal ventaja de este ensayo es que la geometría prismática de la probeta permite aplicar esfuerzos puros de tracción, de manera que los valores de resistencia a tracción, energía de rotura y deformación de rotura sean sencillos de obtener. El ensayo puede hacerse a diferentes temperaturas, utilizando probetas de dimensiones aproximadas a 150 x 50 x 50 mm, que se encuentran fijadas (mediante un adhesivo a base de resina epoxi) a dos placas metálicas que las conectan con el actuador axial que transmite la carga del ensayo. Las probetas (a diferencia del ensayo del Caltrans) poseen una entalla en su zona central para disminuir su sección, con objeto de inducir la fisura cuando se realiza el ensayo (Figura 61).



Figura 61. Detalle del ensayo de tracción directa de la UPC. (Pérez Jiménez et al. 2007)

El ensayo se realiza mediante control de desplazamiento del pistón actuador, aplicando un desplazamiento a una velocidad constante de 0,1 mm/min hasta llegar a la rotura total de la probeta. Unos extensómetros de 25 mm de recorrido registran la deformación producida durante la aplicación de la carga, llevada a cabo por una prensa tipo MTS. Los valores obtenidos, a partir de los cuales se evalúa el comportamiento de la mezcla son la tensión máxima alcanzada, el módulo de rigidez, la deformación de rotura y la tenacidad.

Cuando este ensayo se lleva a cabo aplicando una carga cíclica de tracción-compresión a deformación controlada con una frecuencia de 10 Hz, se denomina ensayo EBADE (Ensayo de Barrido de Deformaciones, Pérez Jiménez et al. 2011). Durante el ensayo se va aumentando el nivel de deformaciones impuesto (manteniéndolo durante un número constante de ciclos, normalmente 5000, hasta llegar a su rotura), con lo que se consigue caracterizar el comportamiento de las mezclas bituminosas bajo cargas cíclicas de diferentes amplitudes. La determinación de la tensión, el módulo complejo y la densidad de energía disipada, y la variación de la temperatura, permite analizar el comportamiento mecánico de la mezcla, mostrando una respuesta elástica y frágil a bajas temperaturas, y dúctil y tenaz a altas. El ensayo EBADE por tanto, puede ser aplicado para considerar el efecto conjunto de las tensiones térmicas y los ciclos de fatiga en materiales bituminosos.

Ensayo Fénix

Se trata de uno de los ensayos más recientes para el análisis del comportamiento a fractura de mezclas bituminosas (y su caracterización frente a fenómenos de fisuración), desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña dentro del marco del Proyecto Fénix (Valdés et al. 2009; Pérez Jiménez et al. 2011). Así, dicho ensayo se encuentra en la línea de algunos de los vistos anteriormente (SE(B), DC(T), SCB), tratando de resolver los ya citados problemas como la falta de estandarización de la geometría de las probetas, su imposibilidad de aplicación a testigos de obra, la complejidad del estado tensional que afecta al proceso de propagación de la fisura, o la complejidad de la elaboración de las probetas.

El ensayo Fénix consiste en someter media probeta cilíndrica (fabricada mediante compactador de impactos o giratorio), con una entalla de 6 mm de longitud, a un esfuerzo de tracción con una velocidad de desplazamiento constante (1 mm/min) (Figuras 62 y 63). Para ello, las dos secciones de la cara plana de la probeta (separadas por la entalla), se fijan a unas placas de acero, la cuales se unen al eje axial de aplicación de la carga de la prensa, en el cual se permite un movimiento de rotación respecto a las fijaciones. El ensayo se lleva a cabo en el interior de una cámara térmica, de forma que permite ser realizado a cualquier temperatura para evaluar la influencia de ésta en el comportamiento de la mezcla.

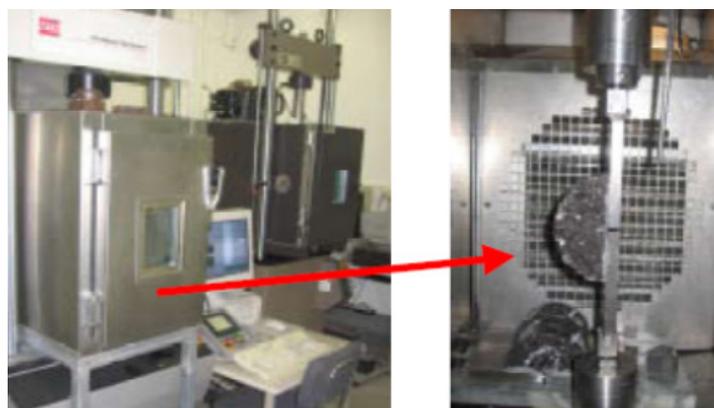


Figura 62. Detalle del ensayo Fénix. (Valdés et al. 2009)

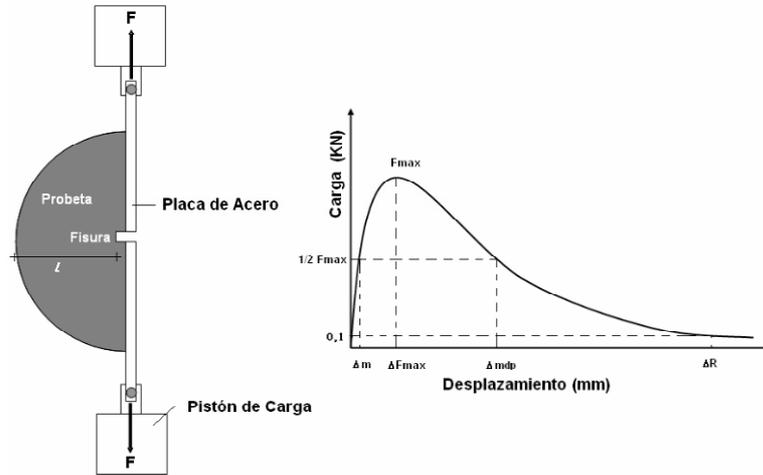


Figura 63. Esquema de Ensayo y Gráfica de Resultados del Ensayo Fénix. (Valdés et al. 2009)

Durante la ejecución del ensayo se van registrando las cargas generadas en función del desplazamiento, de manera que posteriormente se determine la energía disipada en todo el proceso de fisuración (G_D , ecuación 34). Además, también se determinan el índice de tenacidad (I_T , ecuación 36), el índice de rigidez a tracción (IRT , ecuación 37), y otros parámetros mecánicos de la mezcla como la carga máxima a tracción (F_{max}), el desplazamiento a carga máxima (ΔF_{max}), y el desplazamiento de rotura (ΔR).

$$G_D = \frac{W_D}{h \cdot l} \quad [\text{Ecuación 34}]$$

Donde, G_D es la energía disipada en el proceso de fisuración (J/m^2); W_D es el trabajo disipado en el proceso de fisuración ($kN \cdot mm$); h es el espesor de la probeta (m); l es la longitud inicial del ligamento (m).

$$W_D = \int_0^{\Delta R} F \cdot du \quad [\text{Ecuación 35}]$$

Donde, F es la carga en kN ; u es el desplazamiento en mm ; ΔR es el desplazamiento a $F=0,1$ kN post pico (mm).

$$I_T = \frac{W_D - W_{F_{max}}}{h \cdot l} \cdot (\Delta m_{dp} - \Delta F_{max}) \quad [\text{Ecuación 36}]$$

Donde, I_T es el índice de tenacidad (adimensional); W_D es el trabajo disipado en el proceso de fisuración (kN-mm); $W_{F_{max}}$ es el trabajo disipado hasta carga máxima (kN-mm); Δ_{mdp} es el desplazamiento a $\frac{1}{2}F_{max}$ post pico (mm); $\Delta_{F_{max}}$ es el desplazamiento a F_{max} (mm).

$$I_{RT} = \frac{\frac{1}{2} * F_{max}}{\Delta_m} \quad [Ecuación 37]$$

Donde I_{RT} es el índice de rigidez a tracción (kN/mm); F_{max} es la carga máxima a tracción (kN); Δ_m es el desplazamiento antes de la carga máxima a $\frac{1}{2}F_{max}$ (mm).

Así, a partir del IT puede determinarse y evaluarse la tenacidad de las mezclas asfálticas ensayadas, de manera que se defina la capacidad que tienen de mantener unidos sus materiales constituyentes una vez que se ha iniciado el fallo de fisuración. Este IT se ha definido físicamente como la energía disipada en la fase de relajación en la curva carga-desplazamiento del ensayo Fénix, ponderada por un factor de fragilidad de la mezcla dado por la diferencia entre desplazamiento requerido para que el valor de la carga máxima disminuya a la mitad de su valor y el desplazamiento a carga máxima.

El ensayo Fénix por tanto permite obtener la energía disipada en el proceso de fisuración del material (que es combinación de la energía liberada durante el proceso de fractura y deformación del material, Li et al. 2008), demostrando ser un buen procedimiento para caracterizar el comportamiento de mezclas bituminosas ante este fenómeno. Así, pueden destacarse como principales ventajas para su aplicación, su sensibilidad y repetibilidad a variables como la velocidad de aplicación de la carga o las características del betún (envejecimiento, tipo y contenido), o el hecho de que pueda ser aplicado en un amplio rango de temperaturas.

2.4.1.3. *Ensayos a Tracción Indirecta*

Ensayo a Tracción Indirecta

Se trata de uno de los ensayos más comunes en la caracterización del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas. Desde su desarrollo en la Universidad de Nottingham en el año 1989 (Cooper & Brown 1989), se ha convertido en uno de los ensayos más extendidos en el estudio de fatiga y fisuración de mezclas bituminosas, llegando a normalizarse según la serie UNE-EN 12697-24, anexo E (AENOR 2007). El ensayo consiste en someter a una probeta cilíndrica a pulsos de cargas cíclicas de tracción indirecta, midiéndose las deformaciones producidas, de manera que se determina la evolución del módulo de rigidez de ésta (Figura 64).



Figura 64. Ensayo de tracción Indirecta.

A pesar de no proporcionar demasiados datos sobre el comportamiento de la mezcla bituminosa, su facilidad y rapidez de ejecución, así como los buenos resultados en la obtención de los parámetros de las leyes de mecánica clásica de la fractura (Ley de Paris), han permitido su aplicación al estudio del fenómeno de fisuración.

Una de sus aplicaciones al estudio de la respuesta de estos materiales ante fenómenos de fisuración puede observarse en la tesis doctoral desarrollada por Wysong 2004. En este caso concreto el ensayo es utilizado para evaluar la susceptibilidad a la fisuración a bajas temperaturas de las mezclas bituminosas, debido a que permite de forma muy práctica, determinar la resistencia a tracción indirecta y las propiedades de deformación a bajas temperaturas, con las que es posible posteriormente estimar la temperatura crítica de fisuración.

Las probetas utilizadas en este tipo de ensayo son de tipo cilíndrico (100-150 mm de diámetro en función del tipo de compactador utilizado para su fabricación) y un espesor en torno a los 50 mm. Durante la aplicación de las cargas de compresión se va midiendo la deformación producida en la probeta (mediante unos extensómetros colocados en el centro de ésta en forma de cruz, donde las medidas son más uniformes; Figura 65). Dichos valores (verticales y horizontales), son grabados y posteriormente utilizados para el cálculo de la media, de forma que puedan reducirse al máximo los posibles errores de medición.

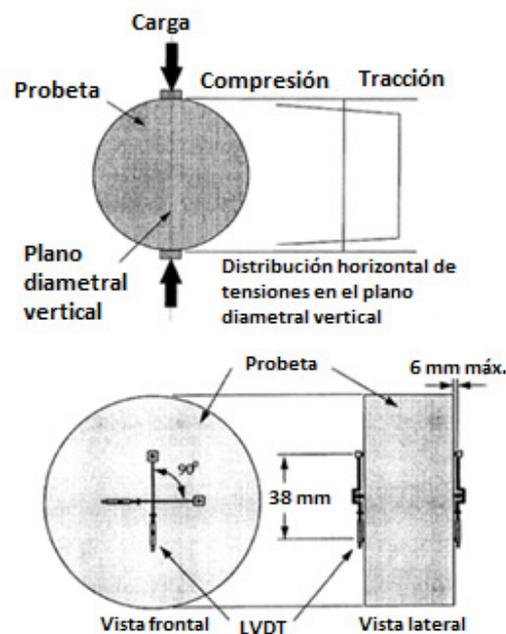


Figura 65. Esquema de ensayo a tracción indirecta. (Wysong 2004)

En el estudio llevado a cabo por Wysong para el análisis del comportamiento de mezclas bituminosas ante fisuras debidas a bajas temperaturas, el ensayo se realiza a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. La carga aplicada produce una deformación constante de $12,5\text{ mm/min}$, terminando el ensayo cuando dicha carga decrece un cierto rango debido al fallo de la probeta. La temperatura de fisuración se determina mediante la representación de la tensión térmica y la fuerza de resistencia a tracción respecto a la temperatura. La fisura tiene lugar en el punto en el que ambas curvas interceptan, lo que indica que la tensión térmica es igual a la resistencia a tracción.

Ensayo de propagación de fisuras de disco con entalla

Este prototipo de ensayo fue desarrollado por Abdulshafi 1983. Mediante el empleo de una probeta en forma de disco con una entalla llevaron a cabo el estudio de fisuración y fatiga en mezclas bituminosas, aplicando el concepto de la integral J [Ecuación 29] asociado a la mecánica de la fractura clásica.

Para la ejecución del ensayo se prepara un disco de tamaño similar al del ensayo de tracción indirecta ($101,6\text{ mm}$ de diámetro), en el que se coloca una cuña para acomodar el dispositivo de aplicación de la carga. La probeta se coloca en una mordaza de ensayo que consta de una generatriz de apoyo en la parte inferior, y un travesaño con movimiento vertical en la zona superior, a través del cual se transmite la carga (Figura 66). Así, se aplica una carga a velocidad constante (suelen ser comunes las siguientes tasas $0,127\text{ mm/min}$, $0,254\text{ mm/min}$, $0,381\text{ mm/min}$, $0,508\text{ mm/min}$ y $0,635\text{ mm/min}$) a una temperatura de ensayo de $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, midiéndose la longitud de la fisura en el tiempo.

Dicha medida de la longitud se realiza de forma visual, para lo cual el centro de la probeta se pinta de color blanco y sobre la misma se establece una escala de medida que permite obtener una referencia de la magnitud de avance de la fisura.

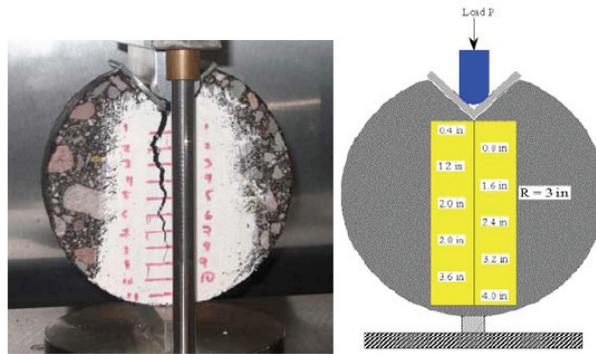


Figura 66. Detalle ensayo de disco con entalla. (Abdulshafi 1983)

Los datos obtenidos en el ensayo se utilizan para determinar la curva carga/desplazamiento en función de la longitud de la fisura, de forma que la energía de fractura se mide como el área contenida bajo dicha curva. En base a la energía de fractura disipada en cada probeta, y a la velocidad de propagación de la grieta, se evalúa el comportamiento ante fisuras de la mezcla ensayada.

2.4.1.4. Ensayos a Cortante/Cizallamiento

Ensayo de laboratorio de fatiga a cizallamiento 3MSGC de Egletons

El banco de ensayo de fatiga en laboratorio 3MSGC desarrollado en Egletons (Francia) permite realizar estudios experimentales de propagación de fisuras en mezclas bituminosas bajo modo de cizallamiento, que pueden asociarse a fenómenos de fisuración reflexiva (Laveissiere 2002).

La probeta se coloca sobre dos apoyos laterales empotrados en cada uno de sus extremos, y uno central móvil unido al vástago mecánico de la máquina de ensayo. Además, la probeta presenta dos entallas de prefisuración a ambos lados de la zona central tanto en la parte superior como inferior de la misma, cuyo objetivo es inducir una sollicitación de cizallamiento simétrica alterna. Así, la fisura de fatiga por cizallamiento se presenta de forma franca, propagándose en los planos medios guiadas por las entallas de prefisuración.

El ensayo se instrumenta con el objetivo de obtener los valores de esfuerzos y desplazamientos de la parte central de la probeta, los valores de la temperatura y de la propagación de la fisura cerca de las entallas. Los esfuerzos son medidos por un captador de fuerza situado sobre el apoyo central, los desplazamientos por captadores de tipo LVDT bajo la probeta, la temperatura por termopares y la propagación de la fisura por resistencias de tipo hilo de plata, situadas en los bordes de las cuatro entallas (Figura 67).

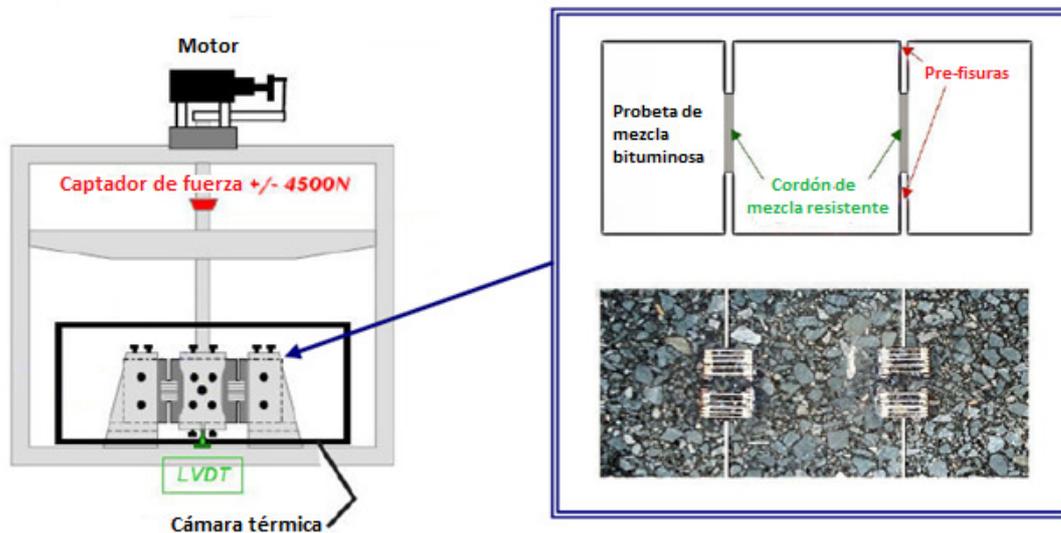


Figura 67. Detalle del ensayo 3MSG. (Laveissiere 2002)

La frecuencia máxima del banco de ensayo es de 6 Hz y la temperatura a emplear puede definirse entre los 60 °C y los -25 °C. Con el objetivo de utilizar frecuencias de ensayos próximas a las frecuencias de sollicitación debidas a las cargas del tráfico, se eligió una frecuencia de 1 Hz, mientras que la temperatura seleccionada fue de 5 °C. La combinación de la frecuencia y temperatura seleccionadas permite ensayar los materiales bituminosos en su dominio elástico atribuyéndole cierta fragilidad. Un comportamiento de rotura de tipo frágil es más aconsejable en este tipo de ensayos para reproducir correctamente la

fisuración reflexiva. Los valores de frecuencia y temperatura elegidos, además permiten guardar cierta equivalencia con las condiciones medias en Francia (10 Hz y 10 °C).

El sistema ha sido utilizado con un nivel constante de tensiones de cizallamiento global, y el plan de ensayos llevado a cabo para el análisis de la fisuración reflexiva por fatiga han proporcionado dos resultados importantes. El primero cuestionar la validez de la aplicación de la ley de Paris a mezclas bituminosas, ya que el modo de cizallamiento propició resultados físicamente no realistas, y el segundo, la proposición de una ley de evolución de la rigidez en la zona resistente de mezcla bituminosa.

Ensayo de Cizallamiento RCD (Reflective Cracking Device)

Este ensayo fue desarrollado debido a la falta de correlación entre los ensayos de flexión a fatiga y el remonte de la fisura en una carretera real, así el objetivo principal fue proporcionar un dispositivo experimental que permitiera simular de un modo más realista las solicitaciones soportadas por el firme mediante un ensayo de laboratorio a cizallamiento (Sousa et al. 2002).

El dispositivo experimental RCD fue desarrollado dentro del marco del SHRP (Sousa et al. 1996), para la predicción del comportamiento de mezclas bituminosas ante los fenómenos de fisuración reflexiva. Está compuesto de dos piezas metálicas en forma de U (separadas una cierta distancia simulando la discontinuidad de la capa de base, que normalmente suele ser de 10 mm), donde se fija la probeta (que tiene forma circular de 150 mm de diámetro y 50 mm de alto) mediante un adhesivo sintético en su base y la acción de unos pistones en la zona superior (Figuras 68 y 69). Las piezas metálicas tienen un movimiento independiente por medio de dos actuadores, uno en sentido vertical y otro en horizontal, y unos sensores colocados en la probeta permiten registrar las tensiones y deformaciones producidas en la misma. Este ensayo permite combinar de manera independiente la sollicitación en modo de abertura y cizallamiento, y puede llevarse a cabo tanto a deformación controlada, como a tensión controlada (Pais et al. 2000).

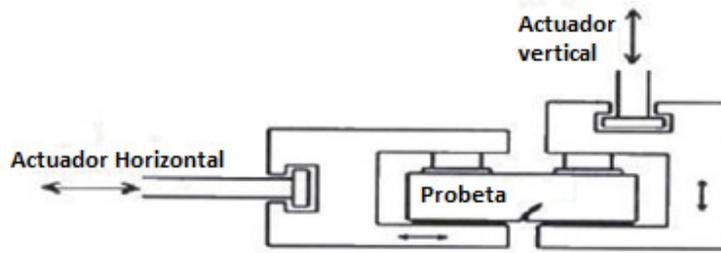


Figura 68. Esquema del ensayo de cizallamiento RCD. (Sousa et al. 1996)

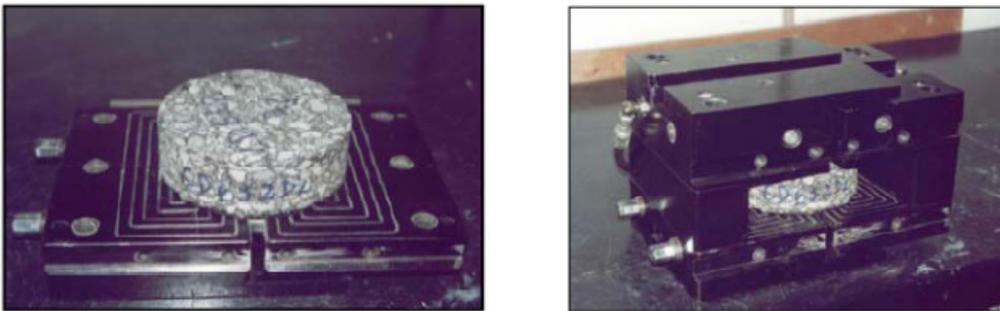


Figura 69. Detalle del ensayo RCD. (Sousa et al. 1996)

Durante el transcurso del ensayo el módulo equivalente de la zona susceptible de fisuración disminuye, lo que se traduce en un incremento del daño. Así, se estableció una correlación entre el módulo de la mezcla y la altura de la fisura. La campaña de ensayos realizada demostró que la combinación de esfuerzos de cizallamiento y de tracción son los más representativos. Además, también se observó que en la estructura de un firme el esfuerzo que menos evoluciona es el de cizallamiento.

Ensayo a Cizallamiento de la Universidad de Delft

Uno de los ensayos desarrollados por la universidad de Delft para estudiar la fisuración a fatiga en mezclas bituminosas fue diseñado por De Bondt 1999. El ensayo consistía en colocar una probeta prismática con doble entalla (450 x 125 x 110 mm) sobre un marco fijo en su zona inferior, y móvil en la parte superior, que mediante un sistema hidráulico permite aplicar a la probeta un esfuerzo de cortante (Figura 70). Por otra parte un cilindro

hidráulico horizontal aplica una presión sobre la probeta para favorecer la propagación de la fisura, creando una zona de tensiones de compresión.



Figura 70. Esquema ensayo de cizallamiento de la Universidad de Delft. (De Bondt 1999)

Este tipo de configuración permite llevar a cabo un ensayo de cizallamiento puro sin que exista ningún momento de flexión residual, siendo el esfuerzo transmitido a la sección de entre 11 y 15 veces el esfuerzo vertical total. El tipo de carga vertical normalmente impuesta es una carga sinusoidal de 0,52 MPa a 8 Hz de frecuencia, mientras que la toma de datos se lleva a cabo mediante la colocación de dispositivos de medida en los bordes de aparición de la fisura.

2.4.2. Ensayos sobre Sistemas Complejos

En el estudio de la propagación de fisuras en pavimentos, además de los ensayos sobre materiales simples, también existen los denominados ensayos multicapas o sobre sistemas complejos, los cuales hacen referencia a los ensayos efectuados sobre probetas que están compuestas de varios materiales diferentes (varios tipos de mezclas bituminosas, con o sin la incorporación de sistemas anti-remonte de fisuras), aunque también pueden ser empleados en probetas compuestas por un material simple. A diferencia de los ensayos simples (en los cuales se emplean tipos de esfuerzos definidos como la flexión, tracción, etc.), los ensayos sobre sistemas complejos pretenden simular, de la forma más precisa

posible, las solicitaciones a las que los firmes están sometidos (cargas del tráfico y variaciones térmicas).

Dadas sus características, estos ensayos pueden ser clasificados de diferente manera. Así, Vanelstraete et al. 1997 distinguen entre los ensayos que tienen como objetivo evaluar la unión entre materiales (cuando existen diferentes capas de mezclas bituminosas o la inclusión de algún sistema anti-fisuras) y los que tienen como objetivo evaluar la eficacia de un sistema anti-remonte de fisuras. Por otra parte, podemos clasificar los ensayos en función del tipo de solicitación que tratan de simular, así encontramos ensayos que simulan el efecto de las variaciones térmicas, las cargas del tráfico, o ambas. Además, podemos clasificar esos ensayos según su escala de ejecución, de forma que encontramos ensayos sobre probetas en laboratorio, o ensayos sobre secciones de firme.

En lo que sigue se llevará a cabo un repaso de los principales ensayos sobre sistemas complejos existentes en torno al estudio de la fisuración en firmes de carretera. Para ello, se distinguirá entre los ensayos que tratan de simular los efectos de las variaciones térmicas, los que tratan de simular los efectos del tráfico, los mixtos (que tratan de simular ambos tipos de solicitaciones), y los que llevan a cabo la simulación a escala del paso de tráfico rodado.

2.4.2.1. Ensayos que Simulan los Efectos de las Variaciones Térmicas

Este tipo de ensayos son realizados principalmente para las capas inferiores del firme (Clauwaert & Francken 1989; Di Benedetto et al. 1993b; Zhou et al. 2004). Dichas variaciones térmicas crean tensiones internas en el material que se traducen en deformaciones y desplazamientos de los bordes libres de las fisuras existentes. Así, el modo principal de actuación de los diferentes dispositivos desarrollados consiste en desplazar una parte de la capa de mezcla bituminosa, para de este modo simular la abertura y el cierre de la fisura (aunque también existen otros métodos).

Fisurómetro E/G

El fisurómetro E/G fue desarrollado en 1992 conjuntamente por el ENTPE (Laboratorio de Geo-Materiales de Francia) y la empresa Gerland (Di Benedetto et al. 1993b). Este dispositivo permite estudiar el impacto causado por las contracciones y dilataciones térmicas de las capas tratadas con ligantes bituminosos los cuales son sumisos a las variaciones de temperatura. La fatiga térmica no se simula directamente por cambios de temperatura sino por la imposición de una fatiga mecánica que simula las deformaciones producidas por la fatiga térmica. Las condiciones de temperatura son constantes con el objetivo de no alterar las propiedades mecánicas de los materiales bituminosos durante el ensayo. Así, el fisurómetro consiste en una capa superior de mezcla bituminosa situada sobre dos platos metálicos, uno de ellos es fijo, y el otro induce un movimiento en dirección horizontal por el efecto de un motor (Figura 71).

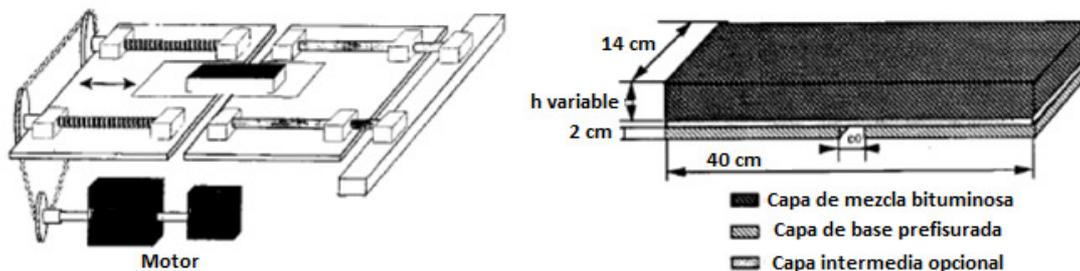


Figura 71. Esquema de ensayo del fisurómetro E/G. (Di Benedetto et al. 1993b)

Los sistemas de medida se componen de tres captadores de desplazamiento (situados de manera que pueda seguirse el desplazamiento relativo del soporte móvil en relación al fijo, el cual marca la sollicitación impuesta), dos captadores de fuerza dispuestos en cada una de las partes del plato fijo (para medir la fuerza aplicada en la sección media de la probeta de mezcla bituminosa), dos medidores de deformación situados en las caras laterales de la probeta, y un sistema de ultrasonido para cuantificar la degradación de la probeta (aparición de microfisuras) (Figura 72).

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

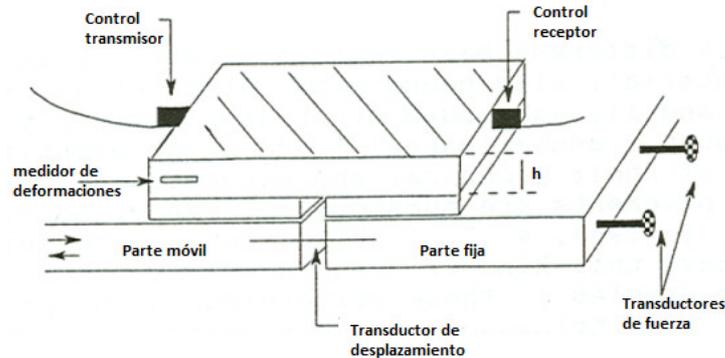


Figura 72. Detalle del dispositivo fisurómetro E/G. (Di Benedetto et al. 1993b)

La altura de la probeta es un parámetro del estudio, mientras que la abertura inicial de la pre-fisura es fija (del orden de 3 mm). La velocidad de variación de los platos es regulable y comprende entre 1,25 y 11 mm/h, de la misma forma que la abertura máxima entre los dos platos también es variable, pero no puede exceder de 20 mm. Así, los parámetros relacionados con la sollicitación aplicada son la temperatura a la que se lleva a cabo el estudio, la velocidad de abertura y cierre del plato móvil y la amplitud de abertura, pudiéndose llevar a cabo ensayos con cargas dinámicas o monotónicas. La mayor parte de los ensayos efectuados con este dispositivo han sido realizados con una velocidad de desplazamiento de 2,7 mm/h y una amplitud de abertura máxima de 0,4 mm (tratando de simular los efectos de los ciclos térmicos más característicos de la geografía francesa). Este dispositivo puede utilizarse eventualmente para ensayar la efectividad de capas intermedias anti-remonte de fisuras.

El ensayo se lleva a cabo a 5 °C y 20 °C, registrándose periódicamente los datos de la fuerza aplicada, el desplazamiento relativo de las placas metálicas, y la amplitud de carga en cada ciclo, determinándose el índice de rigidez obtenido.

Dispositivo Experimental de Ensayo BRRC (Belgian Road Research Centre)

El dispositivo de ensayo de fisuración térmica del centro de investigación de carreteras belga simula los movimientos debidos a las variaciones térmicas de las capas de base sobre

la capa de rodadura (Clauwaert & Francken 1989). Así, durante el ensayo se coloca una capa de mezcla bituminosa sobre una base fabricada en hormigón (a modo de firme semirrígido) que posee una pre-fisura de 1 mm en todo su espesor (constando así de dos partes; Figura 73). Con el fin de simular la abertura y cierre de la fisura, durante cada uno de los ciclos carga (de 3 horas de duración cada uno, acondicionados a una temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), una parte de la capa de base de hormigón se desplaza 1 mm y vuelve a su posición original. Este movimiento provoca la aparición y propagación de fisuras que son seguidas visualmente mediante fotos y grabaciones de video.

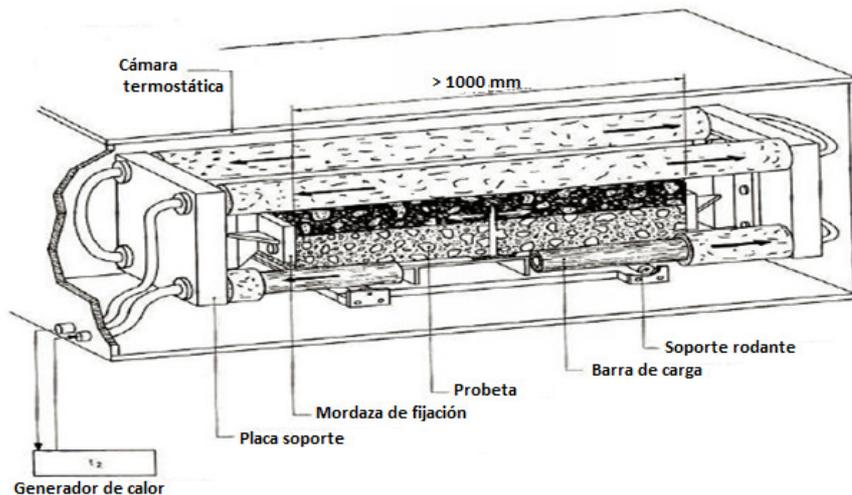


Figura 73. Detalle ensayo BRRC. (Clauwaert & Francken 1989)

Dado que la relación con modelos y estudios de fatiga no pueden llevarse a cabo (debido principalmente a que el modo de funcionamiento suele ofrecer sollicitaciones muy fuertes y un número de ciclos insuficiente), el análisis de resultados de este ensayo se realiza comparando los resultados obtenidos entre los diferentes materiales (tipos de mezclas bituminosas) y sistemas (soluciones de firme) ensayados. Así, el empleo de este dispositivo ha permitido comparar diferentes sistemas anti-fisuras, comprobándose la gran efectividad de las mallas.

Ensayo de la Universidad de Illinois

Dempsey 2002 desarrolló un compuesto inter-capas que absorbe tensiones para mitigar el efecto de la fisuración reflexiva en mezclas bituminosas. El sistema consistía en un geotextil de baja rigidez en la zona inferior, una membrana viscoelástica en el centro, y un geotextil de alta rigidez en la zona superior. La eficiencia de este sistema para evitar la reflexión de fisuras en pavimentos se comprobó en una sección de firme compuesta por una capa de mezcla bituminosa, situada sobre una capa de base de hormigón (con una junta central). Así, se desarrolló un dispositivo de ensayo para simular las tensiones debidas a los efectos térmicos en la capa de hormigón. El ensayo se llevó a cabo a una temperatura de $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la tensión en la capa de mezcla bituminosa, así como su movimiento relativo, fue medida utilizando dispositivos tipo LVDT.

El equipo consistía en dos cajas (sobre las que se apoya la probeta a ensayar), una fija y otra móvil, que mediante un dispositivo mecánico realiza movimientos horizontales de abertura y cierre de la junta situada en la base de hormigón (con una frecuencia de carga lenta de $0,041\text{ mm/min}$ para simular el efecto de las variaciones térmicas estacionales y diarias; Figura 74). La fuerza necesaria para realizar el movimiento de la base se monitoriza utilizando una célula de carga, mientras que la propagación de la fisura se controla visualmente. La probeta de ensayo utilizada tiene un ancho de 150 mm y un largo de 2250 mm , con un espesor de 68 mm para la capa de base de hormigón, y de $63,5\text{ mm}$ para la capa de mezcla bituminosa.

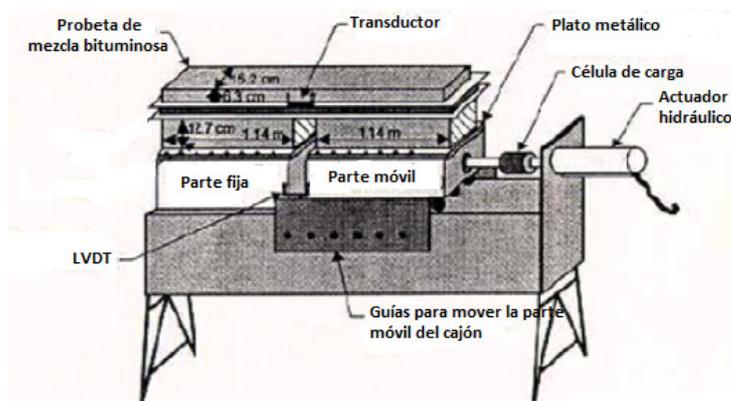


Figura 74. Esquema ensayo de la Universidad de Illinois. (Dempsey 2002)

El comportamiento del compuesto antifisuras desarrollado fue evaluado mediante su comparación con una sección de control en donde la mezcla bituminosa no disponía de ningún sistema anti-fisuras, y con otras dos secciones de control donde las mezclas bituminosas estaban reforzadas con dos sistemas anti-fisuras comerciales. Midiendo el número de ciclos de carga necesario hasta el fallo de las probetas, se demostró que el compuesto desarrollado por Dempsey mejoraba las propiedades a fisuración de las mezclas bituminosas, así como el comportamiento de las mismas con sistemas comerciales.

Ensayo del Instituto de Transportes de Texas (Overlay Tester)

A finales de los años 70 en el Instituto de Transportes de Texas, Germann & Lytton 1979 desarrollaron un ensayo denominado “Overlay Tester” para evaluar la eficiencia de los materiales geosintéticos como sistemas anti-remonte de fisuras. El aparato consistía en dos placas metálicas, una fija y otra móvil horizontalmente, que permite simular la abertura y cierre de una junta o fisura de una capa de base situada bajo una mezcla bituminosa. Así, una probeta de mezcla bituminosa (de dimensiones 375 x 50 x 75 mm) se coloca adherida mediante resina epoxi encima de las placas metálicas, atravesando la separación que tienen, con la mitad del cuerpo a cada lado de la misma (Figura 75). La placa móvil se abre y cierra con un movimiento que puede programar entre 0,0001 y 2 mm, permitiendo reproducir grandes rangos de sollicitaciones por variaciones térmicas. La zona central de la probeta, donde supuestamente va a aparecer la fisura, se pinta de blanco para mejorar la visibilidad y la medida de ésta.

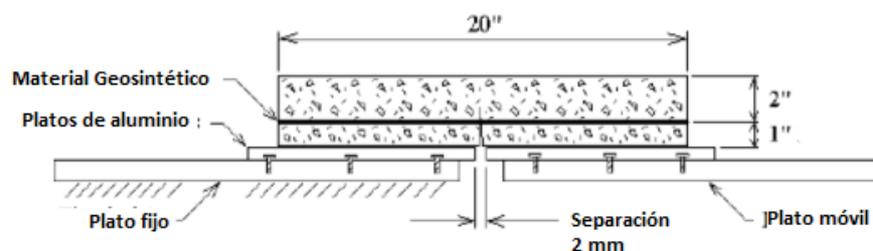


Figura 75. Esquema ensayo “Overlay Tester”.

Durante el ensayo se registran periódicamente la carga y el desplazamiento, midiéndose además la longitud de la fisura. De este modo, se define un valor J , como la energía necesaria para crear una superficie de fisura unidad. La diferencia de energía necesaria para separar las chapas en dos ciclos diferentes (dU) se considera igual a la energía consumida en crear superficie libre ($B*df$). Se obtiene por tanto la expresión:

$$J = \frac{1}{B} * \frac{dU}{df} \text{ [Ecuación 38]}$$

Donde B es el ancho de la probeta, df es el aumento de longitud de la fisura, y dU es la energía consumida en crear la fisura de longitud df .

El valor de J se relaciona con la velocidad de crecimiento de la fisura por medio de una ley exponencial (Ley de Paris):

$$\frac{df}{dc} = A * J^n \text{ [Ecuación 39]}$$

Siendo c el número de ciclos, y A, n , parámetros de la mezcla ensayada.

Con objeto de poder comparar la calidad de varias mezclas diferentes, interesa medir el comportamiento ante fisuración con un solo número, por tanto se define el Índice de Velocidad de Fractura (IVF) con la expresión:

$$IVF = n + \log A \text{ [Ecuación 40]}$$

Cuanto menor sea el valor del IVF, menor será la velocidad de propagación de la fisura, y por tanto, mejor será la calidad de la mezcla bituminosa.

Zhou et al. 2004 y Zhou & Scullion 2005, actualizaron este ensayo introduciendo programas de ordenador para su control (Figura 76). Así, los datos de ensayo son registrados automáticamente en un archivo tipo hoja de cálculo incluyendo el tiempo, el desplazamiento, y la fuerza. El tamaño de la probeta utilizada ha sido también modificado, reduciendo sus dimensiones a 150 x 75 x 38-50 mm, hacen que el ensayo sea más práctico y fácil de manejar (Figura 77).

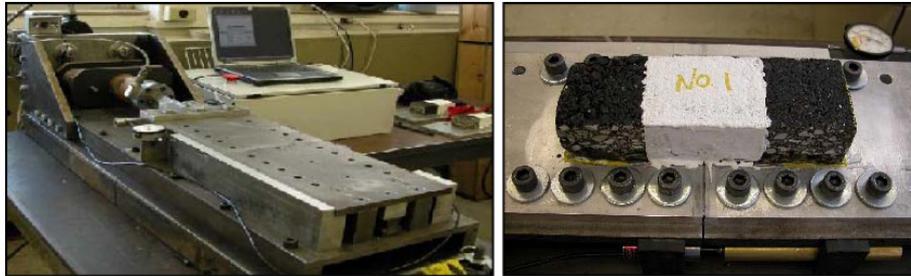


Figura 76. Detalle ensayo “Overlay Tester”.

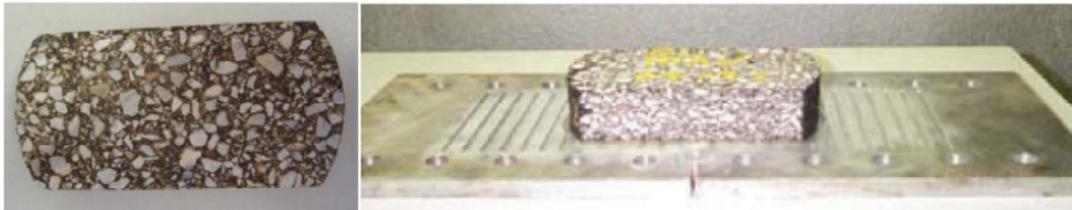


Figura 77. Detalle probeta “Overlay Tester”.

Este nuevo sistema puede llevar a cabo el ensayo a deformación controlada, con una abertura entre 0-2 mm, una tasa de carga de 24 horas/ciclo a 10 segundos/ciclo, y una temperatura entre 0 y 35 °C.

El principal aporte de este ensayo es la obtención de la vida de reflexión de fisura de una mezcla bituminosa, la cual viene determinada por el número de ciclos hasta completar la rotura de la probeta. La relación carga/número de ciclos durante este ensayo permite diferenciar de forma clara las tres fases del proceso de fisuración (inicio, propagación y fallo de la probeta). De esta forma, la vida de reflexión de fisura puede definirse como el número de ciclos correspondientes entre el inicio la fase de propagación y de la fallo de la probeta.

2.4.2.2. Ensayos que Simulan los Efectos de las Cargas del Tráfico

Existen diferentes dispositivos de ensayo que tienen como objetivo la reproducción de la fisuración debido a las sollicitaciones inducidas por el tráfico. Este tipo de ensayos suele presentarse en forma de ensayo de flexión a tres puntos, en los cuales los apoyos han sido modificados por un soporte deslizante o por una capa elastomérica (Brown et al. 1989; Fock 1989; Rigo 1993; Sobhan et al. 2004), con el objetivo de simular la presencia de un suelo.

Por su parte, la posición de la carga define el modo de fisuración simulado, pudiendo ser la fisuración en flexión (modo I), o la fisuración en cizallamiento (modo II). Además, podemos encontrar cargas de diferentes características como las aplicadas mediante disco (que permite repartir de forma más realista las sollicitaciones ya que se utiliza una fuerza puntual), las aplicadas de forma rodante (tipo “Wheel tracking”, en la que las pasadas atrás y delante de una rueda de caucho permite simular el desplazamiento efectivo de la carga) (Brown et al. 1989; Shimazaki et al. 2010; Yamaoka et al. 1989), o las que permiten analizar la influencia de la rigidez de las losas de hormigón en la velocidad de propagación de la fisura (Vanelstraete & Francken 1996).

Ensayo de la Universidad Tecnológica de Cracovia

En 1993 la Universidad Tecnológica de Cracovia evaluó de la efectividad de los geotextiles en mezclas bituminosas como sistemas anti-fisuras, utilizando un ensayo de flexión bajo carga estática y dinámica, y un ensayo a cortante (utilizado para evaluar el papel del geotextil en la disminución de las tensiones a cortante sobre la grieta) (Grzybowska et al. 1993). De esta forma pretendían simular los dos modos de fisuración aplicados por el paso del tráfico sobre un firme, el modo I (mediante el ensayo a flexión), y el modo II (mediante el ensayo a cortante).

Las probetas utilizadas para realizar los ensayos fueron de tipo prismático de 300 x 75 x 75 mm para los ensayos de flexión y de 80 x 75 x 75 mm para el ensayo a cortante, compactadas de forma estática y en las cuales se colocaba un geotextil a un tercio de su altura. En los ensayos a flexión las vigas estaban bi-apoyadas y se cargaban en el centro con

una tasa de carga de 12 mm/min (para el ensayo de carga estática), y de 2 kN con una frecuencia de 5 Hz con pulsos sinusoidales (para el ensayo de carga dinámica), siendo llevados a cabo a 20 °C de temperatura (Figura 78). Por su parte, en el ensayo a cortante se aplicaba una tasa de carga de corte directo de 1 mm/min, con una temperatura de ensayo de 30 °C.

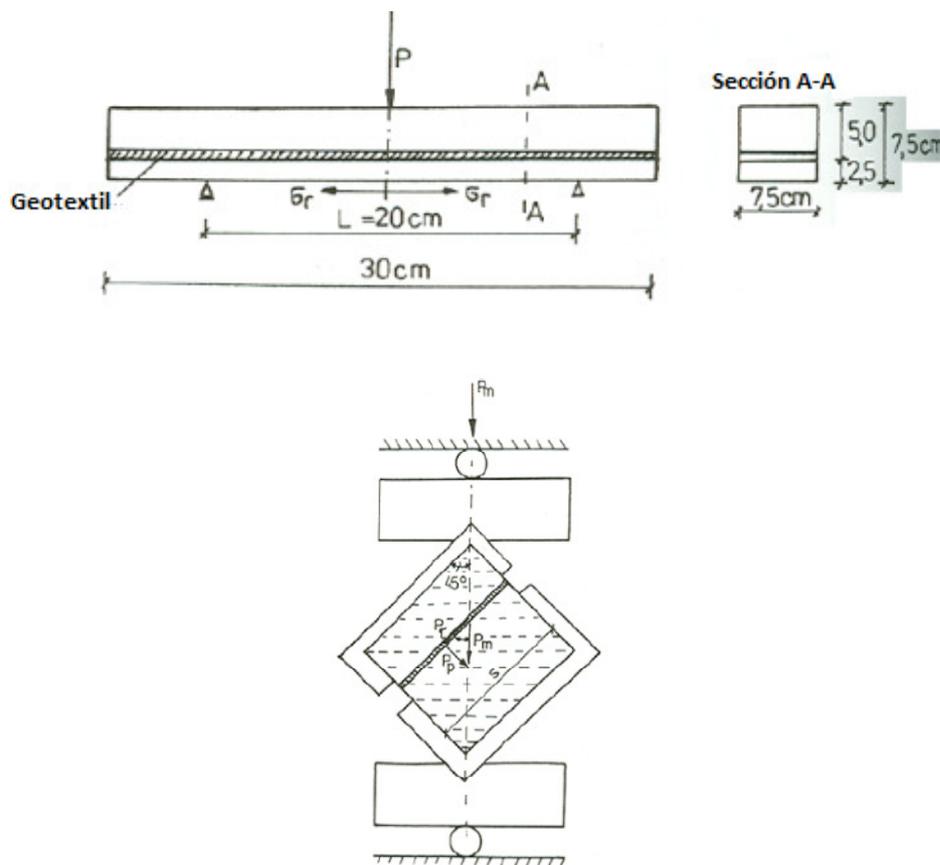


Figura 78. Detalle ensayo de la Universidad Tecnológica de Cracovia. (Grzybowska et al. 1993)

Los resultados pusieron de manifiesto que a pesar de que la resistencia a flexión de las mezclas bituminosa no se ve sustancialmente afectada por la presencia del geotextil, las probetas que presentan dicho material exhiben una notable mejora en la resistencia a la propagación de fisuras. Por su parte, el ensayo a cortante demostró que la presencia del

geotextil disminuye más de dos veces la adhesión entre las capas de mezcla bituminosa, lo cual puede ser ventajoso para evitar la propagación de la fisura, ya que disminuye la transferencia de tensiones entre capas.

Ensayo a cortante de la Universidad de Delft

Este método de ensayo fue desarrollado en los años 90 para determinar la rigidez y resistencia a cortante de láminas deformables utilizadas como sistemas para retardar la propagación de fisuras (De Bondt & Saathof 1993). El ensayo consiste en introducir una probeta de mezcla bituminosa en un dispositivo (Figura 79), el cual tras ser colocado en una prensa tipo Marshall y sometido a carga, rompe la probeta a cortante.

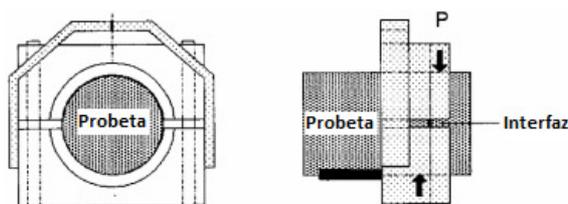


Figura 79. Esquema ensayo de la Universidad de Delft. (De Bondt & Saathof 1993)

La probeta empleada en este ensayo es de tipo cilíndrica (de 101,4 mm de diámetro), compuesta por tres capas, la primera capa de mezcla bituminosa abierta de 60 mm de espesor, la segunda es la lámina a ensayar y la tercera es una mezcla bituminosa cerrada de 40 mm de espesor. La rotura se realiza con control de desplazamiento a una velocidad de 850 micras/segundo, siendo la temperatura de ensayo de 15 °C.

Durante su transcurso, los valores de carga y desplazamiento son registrados, interpretándose la pendiente media de la curva formada como un índice de rigidez a cortante de la lámina (N/mm). Con el valor de la carga de rotura se determina la tensión de cortante de la lámina, estimándose su calidad con el índice de rigidez (cuanto más pequeño, mejor calidad).

Ensayo del Instituto de Tecnología Technion de Israel

Este ensayo fue desarrollado por Livneh et al. 1993, utilizando el dispositivo “Wheel tracking” para predecir el comportamiento de los geotextiles impregnados como sistemas anti-remonte de fisuras. Concretamente, el dispositivo consiste en una rueda cargada que realiza pasadas hacia delante y atrás, sobre una probeta de mezcla bituminosa que está colocada en una base de caucho elástico, simulando los modos I y II de fractura. La probeta utilizada tiene forma rectangular (700 x 100 x 100 mm), con una ranura que tiene una entalla pre-fisurada en el fondo, de manera que el crecimiento de la grieta es observado visualmente desde ambos lados de la probeta (Figura 80). El dispositivo se encuentra situado en una cámara térmica, llevándose a cabo el ensayo a 25 °C.

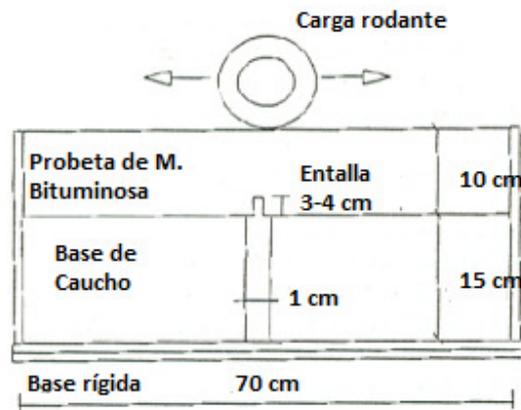


Figura 80. Esquema ensayo de la Universidad de Tecnológica de Israel. (Livneh et al. 1993)

Durante los trabajos realizados para el desarrollo de este equipo se fabricaron tres tipos diferentes de probetas, una compuesta por dos capas de mezcla bituminosa de tipo denso con un geotextil impregnado intermedio (estudiando varios tipos de geotextiles), otra compuesta por una única capa de mezcla bituminosa de tipo denso, y otra compuesta por dos capas de mezcla bituminosa con una capa de adherencia intermedia (Figura 81).

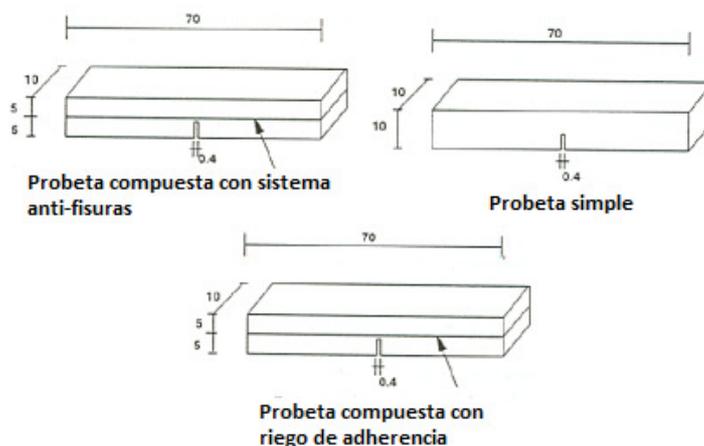


Figura 81. Probetas utilizadas en el ensayo de la Universidad Tecnológica de Israel. (Livneh et al. 1993)

Los ensayos pusieron de manifiesto la aparición de un fenómeno de propagación de fisuras dual, uno ascendente desde la entalla artificial, y otro descendente desde la superficie de la probeta. Además, denotaron que la presencia de uno de los tipos de geotextil mejoraba la resistencia a la propagación de fisuras, mientras que los otros dos tipos empeoraban el comportamiento de las probetas compuestas únicamente por mezclas bituminosas.

A pesar de que los investigadores no han manifestado las condiciones de ensayo utilizadas (frecuencia, carga de la rueda, etc.), postulan este dispositivo de ensayo como un sistema efectivo para diagnosticar la eficiencia de los tratamientos para retardar la reflexión de fisuras.

Ensayos de la Universidad de Nottingham

Uno de los centros de investigación que más ha trabajado en el estudio de los fenómenos de fisuración en carreteras es el Nottingham Transportation Engineering Centre (NTEC). Desde los años 70 ha desarrollado dispositivos de ensayo que permiten evaluar el comportamiento de mezclas bituminosas y sistemas anti-fisuras. Entre estos trabajos se encuentran ensayos dedicados a la evaluación de la eficacia de los sistemas de membrana (geotextiles, mallas, etc.) como sistemas anti-remonde de fisuras (Brown et al. 1985). Uno

de estos ensayos consiste en un molde, formada por un cajón superior móvil sobre el que se ejerce una fuerza horizontal (además de una vertical), y un cajón inferior fijo a la base, en la cual se introduce una probeta de sección cuadrada (320 x 320 x 150 mm), que es sometida a un esfuerzo de cortante (Figura 82). La probeta de mezcla bituminosa se compacta en dos capas, entre las cuales se coloca la membrana. La tensión tangencial de rotura debe encontrarse en un intervalo que permita el despegue local membrana-base.

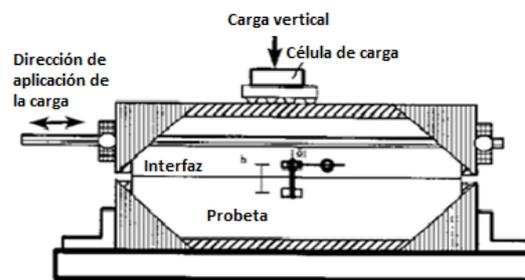


Figura 82. Esquema de ensayo a cortante del NTEC. (Brown et al. 1985)

Por otra parte, en el NTEC también se han desarrollado ensayos dedicados a la evaluación de la propagación de fisuras del pavimento. Para ello, se emplea una probeta de mezcla bituminosa con una entalla central de 5 mm de ancho y 15 mm de profundidad (para facilitar el inicio de la fisuración), situada sobre una capa elástica continua que hace de base flexible (Figura 83a). Otra posibilidad es colocar sobre la base elástica dos piezas rígidas de madera contrachapada separadas 10 mm que simulan la presencia de una junta en la capa de base. Dentro de la probeta, la membrana anti-fisuras a ensayar se sitúa entre 11 y 22 mm por encima de la zona inferior.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

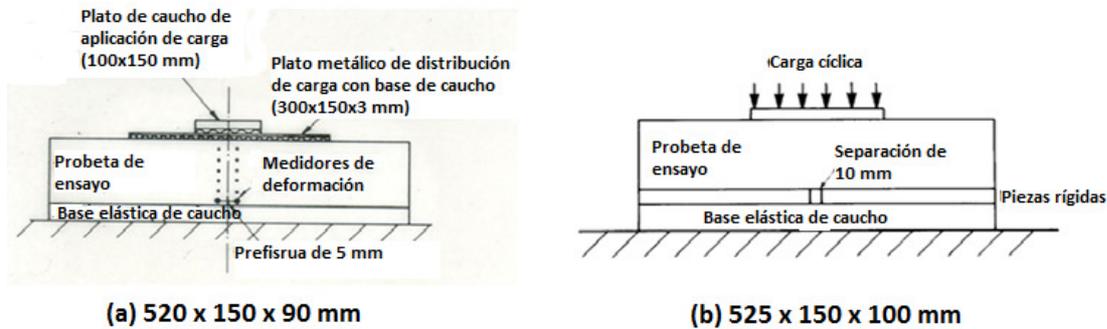


Figura 83. Esquemas de ensayos de fisuración por fatiga del NTEC (I). (Brown et al. 1985)

El ensayo se realiza a una temperatura de 22 °C, sometiendo a la probeta a una serie de ciclos de carga de flexión con una intensidad tal que provoque una deformación inicial en el fondo de la misma comprendida entre las 190 y las 700 micras, y con una frecuencia de aplicación de 10 Hz. Las cargas son aplicadas a través de un primer plato metálico de dimensiones 100 x 150 mm que conecta con el actuador y un segundo plato metálico de dimensiones 300 x 150 x 3 mm que reparte las cargas sobre la probeta (entre ambos platos se coloca un dispositivo elástico de caucho para disminuir tensiones diferenciales debido a la rigidez de los materiales), o bien directamente desde un plato metálico (Figura 83b).

La carga cíclica se aplica sin interrupciones y la longitud de la fisura se registra visualmente o con la ayuda de extensómetros horizontales tipo LVDT colocados a diferentes alturas en el borde de la probeta (Figura 84a). Para la evaluación del ensayo se lleva a cabo el ajuste de una recta con los puntos que relacionan la longitud de fisura y el número de ciclos aplicados, de tal forma que la pendiente de esta recta define un índice de propagación de fisuras. El fallo de la probeta quedó arbitrariamente definido como el momento (o número de ciclos) en el cual la fisura alcanza una longitud de 52 mm a lo largo de su espesor.

Posteriormente a estos ensayos, se desarrollaron otros más sofisticados que permiten estudiar con más detalle el desarrollo de la evolución de la fisura en mezclas bituminosas. Así, uno de ellos consta de una base compuesta por una placa metálica y dos apoyos

elásticos, sobre los que se coloca la probeta de mezcla bituminosa con una entalla (cargada verticalmente), que permite una reproducción más realista de las condiciones de reflexión de fisuras en el firme (Figura 84b, Brown et al. 2001). Por otra parte, se desarrolló un ensayo que pretendía combinar el efecto de las tensiones aplicadas por las variaciones térmicas, con las cargas aplicadas por el paso del tráfico (Figura 84c, Caltabiano & Brunton 2001). Además, para el estudio de los efectos de las cargas térmicas se desarrolló un ensayo similar al “Overlay tester” de la Universidad de Texas, en el que la probeta de mezcla bituminosa se coloca sobre dos bases de hormigón (una fija y la otra móvil), que se encuentra separadas una cierta distancia y que, bajo un acondicionamiento de -5 °C, provocan tensiones en la mezcla bituminosa debido a ciclos de movimiento horizontal que provocan su separación unos 8 mm.

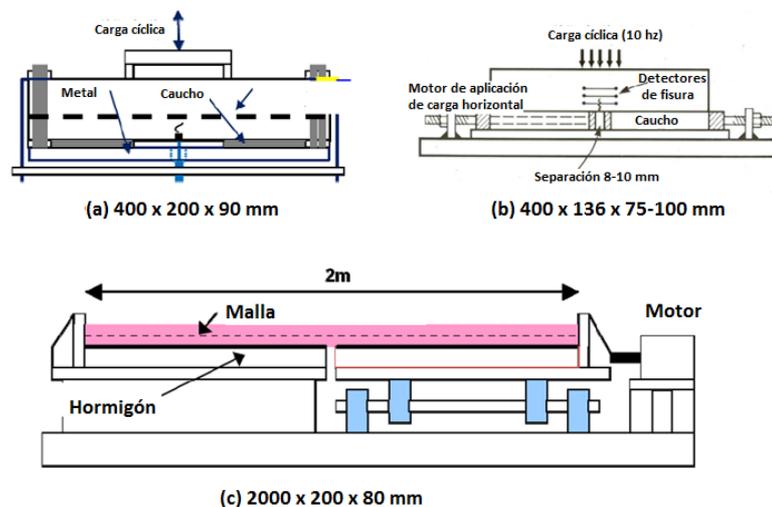


Figura 84. Esquemas ensayos de fisuración por fatiga del NTEC (II). (Brown et al. 2001; Caltabiano & Brunton 2001)

Este tipo de ensayos han resultado muy eficaces para evaluar el efecto de los sistemas anti-remonte de fisuras como las geomallas. Por ejemplo, en el ensayo presentado en la Figura 84a se han obtenido aumentos considerables de la resistencia a fisuración (de hasta 2,2 veces), obteniendo valores de longitud de fisura de 40 mm a los 250.000 ciclos de carga

para las probetas no reforzadas, mientras que dicha longitud ha sido alcanzada a los 550.000 ciclos en las probetas reforzadas (Figura 85).

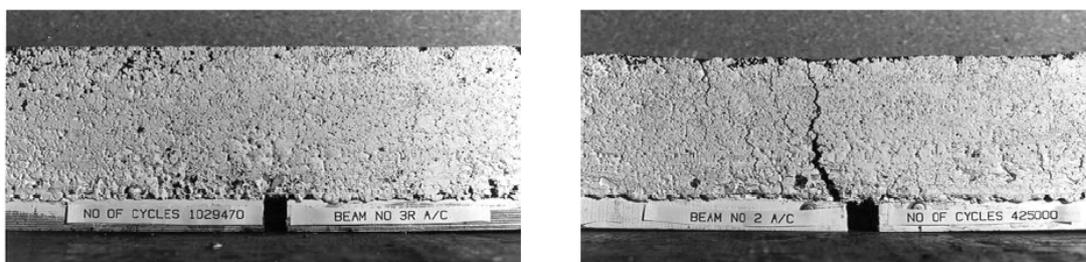


Figura 85. Detalle de probetas tras ser ensayadas. (Brown et al. 2001)

Ensayos de la University College de Dublín

Otra de las universidades de mayor experiencia en el estudio del fenómeno de fisuración en mezclas bituminosas es la University College de Dublin. Además de ensayos innovadores para su estudio en probetas de materiales simples, como el de flexión en 4 puntos con análisis de imágenes (visto en el apartado anterior), este grupo de investigación ha desarrollado otros ensayos para el estudio de la propagación de fisuras en pavimentos, dentro de la modalidad “Wheel tracking”.

Hartman 2000 y Hartman et al. 2001 desarrollaron un prototipo de ensayos para conocer mejor el inicio y propagación de fisuras en mezclas bituminosas denominado “Circular Wheel Tracking” (CWT). El CWT es un prototipo modelo “Wheel tracking” en el que las cargas son aplicadas sobre las probetas de mezcla bituminosa mediante el paso de una rueda, y que debido a un movimiento rotatorio (con un diámetro de 3 m y una velocidad de 3 km/h, que equivalen a unas 7 rpm), permite ensayar 4 probetas a la vez (Figura 86).

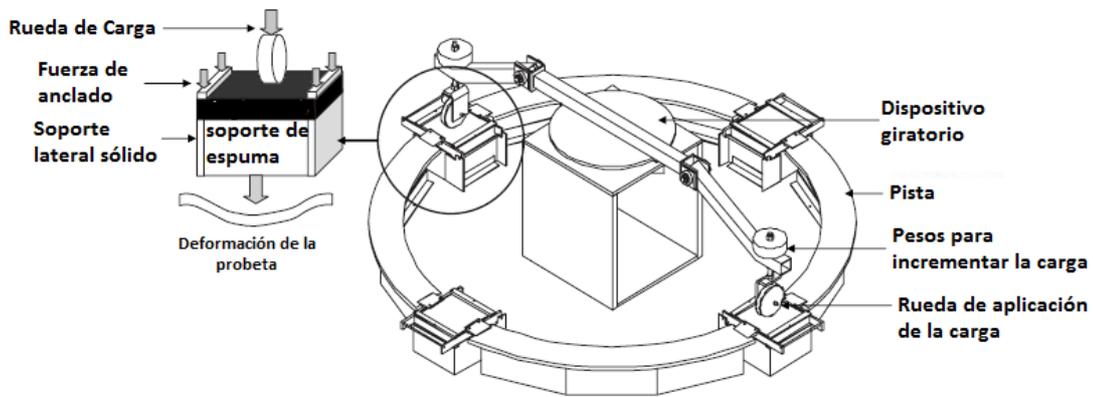


Figura 86. Esquema ensayo del University College de Dublín. (Hartman et al. 2001)

Las dimensiones de las probetas a ensayar son de 305 x 305 x 50 mm, las cuales son situadas sobre una base elástica que trata de reproducir una cimentación débil. Además, el dispositivo de ensayo se encuentra situado en una habitación acondicionada que permite llevar a cabo el ensayo a temperatura controlada, y mediante un sistema de adquisición de datos, se controlan las deformaciones dinámicas en la zona inferior de cada probeta. Así, este dispositivo permite ensayar 4 tipos de mezclas o probetas diferentes bajo las mismas condiciones de ensayo (que suelen ser 20 °C de temperatura, y 695 kPa por rueda).

Antes de ser ensayadas, las probetas son pintadas de blanco con un cuadro de 100 x 100 mm en el centro de la base para facilitar el estudio de la propagación de fisuras (Figura 87), y son acondicionadas durante 24 horas a la temperatura de ensayo. Las fisuras aparecidas durante el ensayo son monitorizadas utilizando un sistema de captura de imágenes digital, las cuales son posteriormente procesadas para convertirlas en escala de grises, y transformarla en un formato binario de píxeles blancos y negros que permitan una mejor apreciación de las fisuras. Posteriormente, mediante el programa MATLAB se calcula el área de fisuración a partir del contenido de píxeles de color negro.



Figura 87. Imágenes obtenidas tras el ensayo del University College de Dublín. (Hartman et al. 2001)

De esta forma el ensayo CWT permite controlar la evolución de la aparición de fisuras en las probetas en función del número de pasadas de la rueda, utilizando para ello el aumento del área fisurada en cada pasada.

Por otra parte, Gibney et al. 2002 evaluaron la resistencia a la fisuración reflexiva de un conjunto de mezclas bituminosas utilizando un dispositivo de tipo “Wheel tracking” con un fundamento similar al anterior. Dicho dispositivo es capaz de simular tanto la fisuración descendente como la fisuración ascendente de probetas de mezclas bituminosas situadas sobre una base de hormigón, pudiendo simular los modos I y II de fractura.

En la Figura 88 podemos apreciar los dos mecanismos de fisuración reflexiva que pueden ser estudiados con este dispositivo: por un lado el deterioro general y las grietas aparecidas en la losa de hormigón a ambos lados de la junta, y por otro, el movimiento diferencial de la placa base. El efecto del primer mecanismo sobre la capa de mezcla bituminosa provoca que la fisura comience en la zona inferior de la probeta y se propague en dirección ascendente hacia la superficie, mientras que en el caso del segundo mecanismo, la fisura comenzará en el punto de mayor tensión en la superficie de la probeta, y se propagará descendentemente.

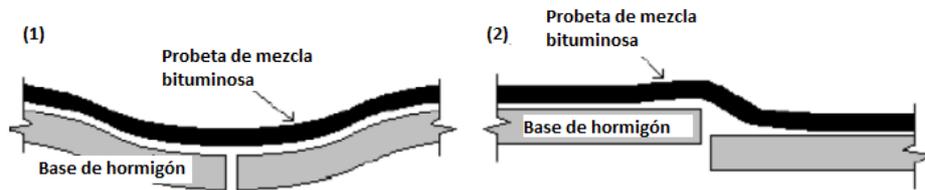


Figura 88. Esquema de aplicación de sollicitación de ensayo del University College de Dublín. (Gibney et al. 2002)

De esta forma, si el ensayo lo que trata es de determinar la fisuración ascendente en la probeta, la estructura del dispositivo constará de dos bloques estrechos de madera sobre los que se apoyarán los extremos de la probeta (como en un ensayo a flexión), y un bloque de espuma situado bajo el centro de la probeta (que representará una base de cimentación defectuosa). Además, se colocan unas placas metálicas de 10 mm de espesor sobre la espuma soporte para imitar el efecto de la base de hormigón, con una junta de separación de 10 mm entre ambas, simulando la fisura de ésta (Figura 89). Todo este dispositivo de ensayo se encuentra contenido en el interior de un molde metálico de 305 x 305 x 130 mm, utilizándose un tamaño de probeta de ensayo de 140 x 280 x 50 mm. Así, la longitud de la probeta permite disponer de espacio para deformar en sentido longitudinal de manera que se eviten tensiones en los bordes (para ello se introducen espaciadores de espuma en los extremos para evitar el movimiento de la probeta durante el ensayo). El tiempo de duración del ensayo puede estar en un rango comprendido entre los 20 minutos y las 8 horas.

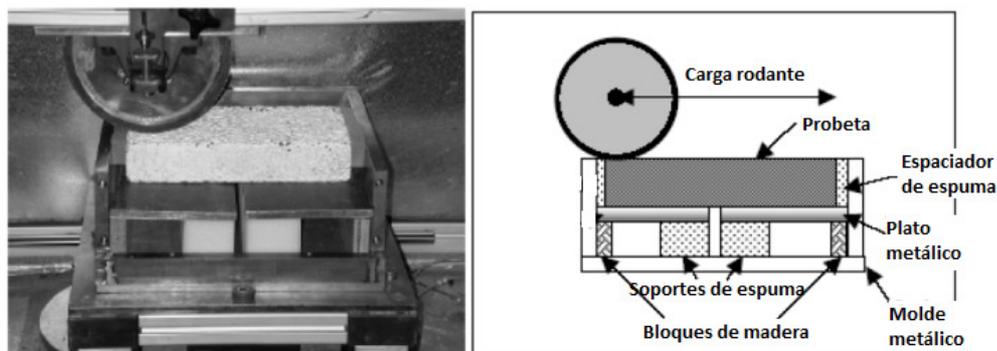


Figura 89. Detalle de ensayo de fisuración ascendente del University College de Dublín. (Gibney et al. 2002)

Por su parte, si el ensayo pretende estudiar la fisuración descendente se utiliza un modelo de probeta trabajando en voladizo (Figura 90). La probeta de ensayo (con unas dimensiones de 140 x 260 x 50 mm), es apoyada en uno de los extremos sobre un bloque de madera con un mecanismo de sujeción arriba que impide su movimiento, mientras que el final del voladizo es apoyado sobre espuma. De nuevo en este caso vuelven a utilizarse unas placas metálicas de 10 mm de espesor tanto sobre la espuma soporte como sobre el bloque de madera para imitar el efecto de la base de hormigón, con una junta de separación de 10 mm entre ambas para simular una fisura.

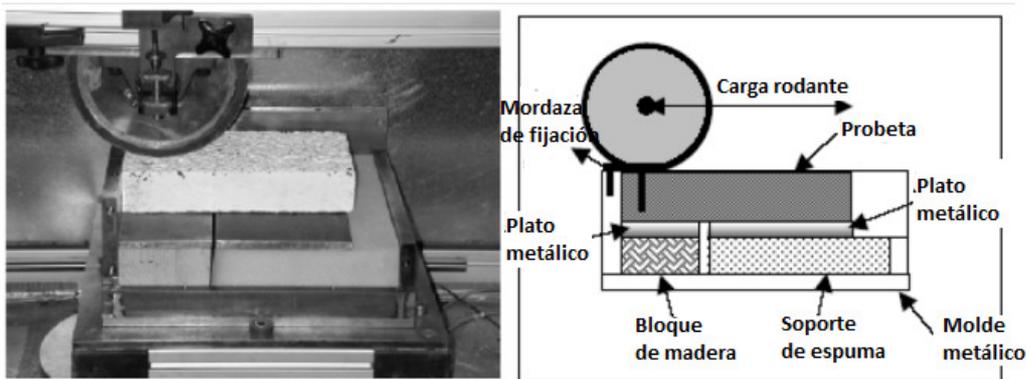


Figura 90. Detalle de ensayo de fisuración descendente del University College de Dublín. (Gibney et al. 2002)

En ambos tipos de ensayo la velocidad de pasada de la rueda se fija a 21 ciclos por minuto, aplicando una carga normal de 520 ± 5 N. La variación de periodos de descanso aplicados entre cada pasada no se tuvieron en cuenta a la hora de analizar el comportamiento del material. La temperatura de ensayo utilizada fue de 25 °C. Durante ambos ensayos la rueda va realizando pasadas hasta que se produce el fallo de la probeta, el cual se determinó como el instante en el que una grieta progresa por todo su espesor. Además, durante todo el ensayo, la deformación producida en los 200 mm centrales de la probeta se va registrando con un intervalo de medida de 10 mm.

Ensayo del Instituto Aeronáutico de Brasil

Montestruque et al. 2004 presentaron un método de ensayo de laboratorio innovador para estudiar el efecto de las geomallas de poliéster en la mejora del comportamiento ante fisuras de mezclas bituminosas. El método consistía en la ejecución de un ensayo de fatiga dinámico sobre probetas prismáticas situadas sobre unas placas metálicas (Figura 91). Este sistema fue concebido para simular la fisuración en un pavimento después de su rehabilitación, aplicándose cargas verticales que inducen solicitaciones a flexión y a cortante.

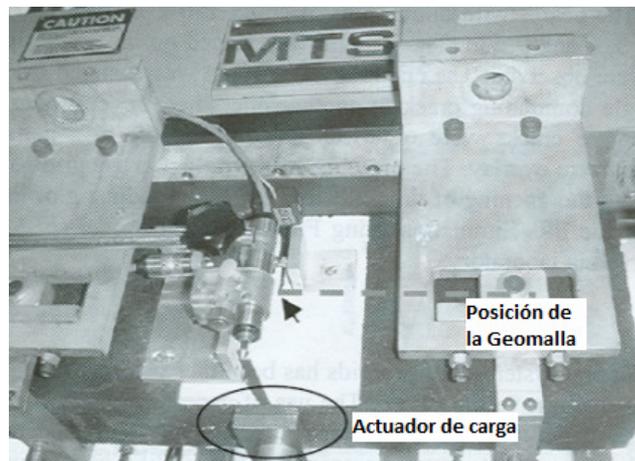


Figura 91. Detalle del ensayo del Instituto Aeronáutico de Brasil. (Montestruque et al. 2004)

La probeta utilizada en el ensayo es una viga prismática de mezcla bituminosa de dimensiones 460 x 150 x 75 mm, apoyadas sobre unas placas metálicas con una separación que simulan una pre-fisura (que puede ser de 2, 6 y 9 mm), sobre la que se aplica una carga vertical de tipo sinusoidal en el centro de la misma con una frecuencia de 20 Hz. La posición de la carga se cambia en función de la grieta para producir tanto esfuerzo cortante como a flexión (Figura 92), siendo aplicada mediante una placa metálica de 40 x 75 mm (con una placa de caucho situada entre la probeta y la placa para minimizar las tensiones relacionadas con la rigidez del plato), y generando una presión de 80, 62 y 47 psi. Por su

parte, la geomalla se sitúa en el vértice de la grieta entre la mezcla bituminosa y las placas de acero. La zona central de la probeta, donde supuestamente va a aparecer la fisura, se pinta de blanco para mejorar la visibilidad y la medida de ésta durante el ensayo.

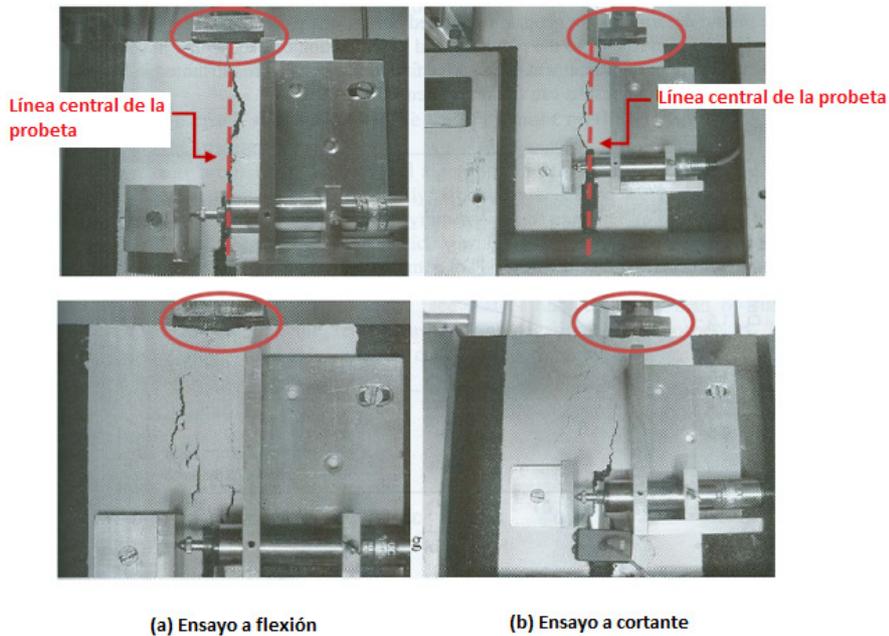


Figura 92. Imágenes obtenidas durante el ensayo del Instituto Aeronáutico de Brasil. (Montestruque et al. 2004)

Los movimientos horizontales de abertura de las grietas y las deformaciones plásticas durante la aplicación de los ciclos de carga, son medidos utilizando dispositivos LVDT instalados en el plato metálico y en una chapa metálica auxiliar adherida a la probeta. El factor de efectividad de la geomalla ($FEG = \text{vida de fatiga con geomalla} / \text{vida de fatiga sin geomalla}$), representa el efecto beneficioso de la misma (Figura 93).

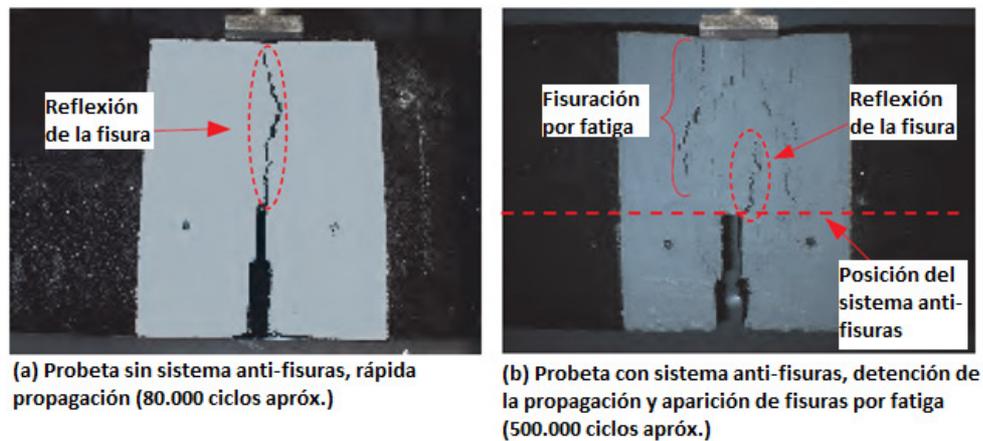


Figura 93. Resultados obtenidos con probetas con y sin sistema anti-fisuras. (Montestruque et al. 2004)

Ensayo de la Universidad de Florida

Sobhan et al. 2004 evaluaron los efectos del refuerzo de una capa de mezcla bituminosa con geomallas rígidas sobre el comportamiento ante la reflexión de fisuras propagadas a partir de las juntas en bases de hormigón. El primer objetivo de este estudio fue evaluar el crecimiento de la propagación de la fisura bajo cargas cíclicas en una mezcla bituminosa, y el segundo analizar los efectos de la colocación de una geomalla como sistema anti-fisuras. Para ello, desarrollaron un nuevo método de ensayo capaz de simular el modo I de fractura sobre una probeta de mezcla bituminosa cargada en el centro mediante un apoyo curvo (que reproduce el radio de curvatura de un neumático).

La probeta utilizada durante el ensayo de dimensiones 450 x 150 x 190 mm, se prepara en un compactador de segmento de rodillo metálico, lo que permite la adición de una geomalla en el interior de la misma. Tras su desmolde, y 24 horas antes del ensayo, se fijan dos piezas de madera contrachapada en la base de la probeta para simular una capa de base rígida (con una separación entre ellas de 10 mm para simular una junta, que es la que provoca el inicio de la fisura), y todo este conjunto es situado sobre un apoyo elástico de neopreno (Figura 94).

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

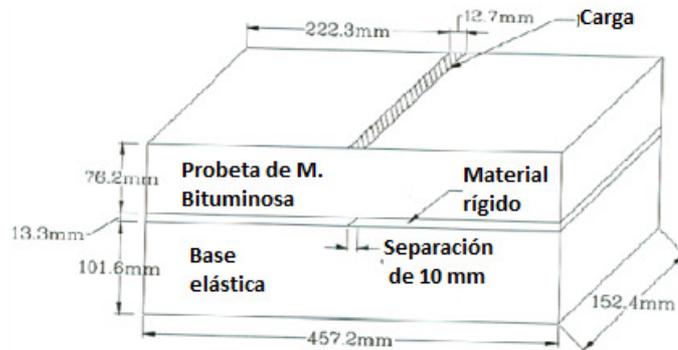


Figura 94. Esquema ensayo de la Universidad de Florida. (Sobhan et al. 2004)

Durante el estudio desarrollado en esta investigación se realizaron dos tipos de ensayos, estáticos y dinámicos. Los estáticos, realizados sobre probetas sin refuerzo, incluían series de cargas monotónicas crecientes para evaluar la capacidad del ensayo en la simulación del inicio y propagación de la fisura reflexiva, así como para determinar la capacidad de carga estática y desarrollar el criterio de fallo. Por su parte, los ensayos cíclicos a fatiga fueron llevados a cabo tanto sobre probetas con refuerzo de una geomalla como sin él, utilizando cargas sinusoidales con varias amplitudes (222, 444, 888, 1110, y 1332 N) y una frecuencia constante de 2 Hz.

La adquisición de datos registra para cada uno de los ciclos de ensayo el tiempo, la carga aplicada, y la deformación producida. Además, un sistema digital continuo de video enfocado a la zona donde se simula la junta graba la progresión de la fisura para su posterior análisis (Figura 95).

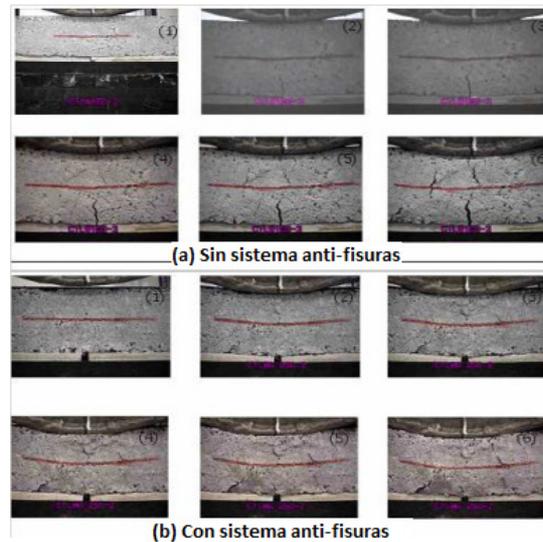


Figura 95. Resultados de ensayo con y sin sistema anti-fisuras. (Sobhan et al. 2004)

Se establecieron tres criterios de fallo basados en la longitud de la propagación de la fisura observada: fisura inicial (la carga o número de ciclos a partir de los cuales la fisura empieza a ser visible), fisura madura (la carga o número de ciclos necesarios para la reflexión de la fisura hasta la mitad del espesor de la probeta), y la fisura terminal (la carga o número de ciclos necesarios para que la fisura atravesase todo el espesor de la probeta).

Los resultados observados durante la realización de los ensayos demostraron que para las probetas ensayadas sin refuerzo, se producía una formación clara de fisuras durante el principio del ensayo, y de fisuras secundarias adicionales en las fases del ensayo cercanas al fallo de la probeta. Por su parte, en el caso de las probetas con la presencia de geomallas, la aparición de fisuras secundarias resulta más difusa, y sin que se produzca la aparición de una fisura principal preponderante. La evaluación del sistema anti-fisuras se estableció mediante el factor de efectividad de la geomalla, demostrándose que las probetas con las geomallas situadas en la zona inferior tienen menor resistencia a la propagación de fisuras que las que la tienen la zona media.

Ensayo de la Universidad de Tecnología de Amirkabir (Iran)

Tras evaluar diferentes ensayos llevados a cabo hasta esa fecha (Brown et al. 1989; Chang et al. 1998; Kim et al. 1999; Sobhan et al. 2005), Khodaii et al. 2009 desarrollaron un dispositivo de ensayos en el que probar la resistencia de un pavimento a la propagación de fisuras. La estructura utilizada para ello consistía en una probeta de 380 x 150 x 75 mm, compuesta por una capa de mezcla bituminosa (reforzada o no con un sistema anti-reflexión de fisuras a cierta altura de su espesor), una capa de 100 mm de espesor de otro tipo de mezcla o de hormigón (simulando la discontinuidad entre las capas existentes en un pavimento) con una entalla central (que modeliza una junta o fisura en la capa de base existente), y una capa de base resiliente formada por un neopreno con un módulo elástico de 11000 kN/m² (Figura 96).

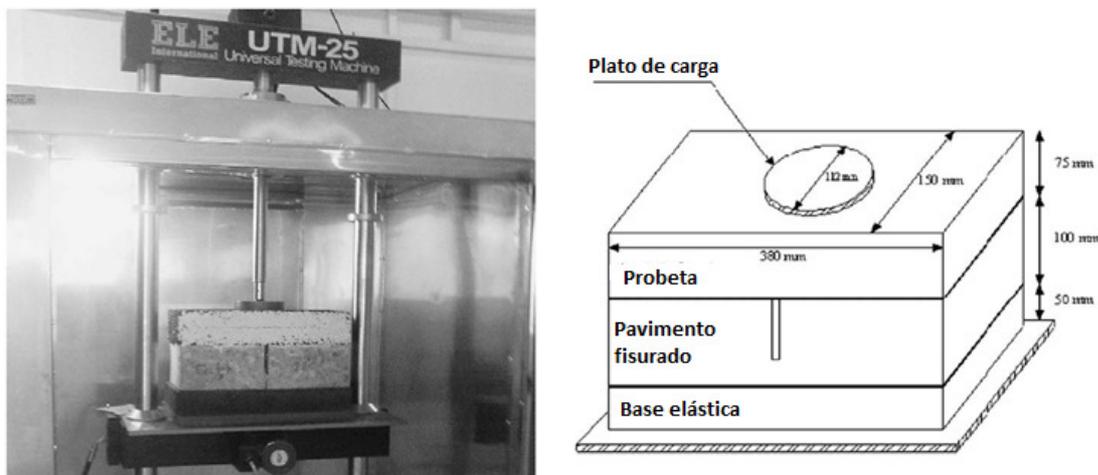


Figura 96. Detalle del ensayo de la Universidad Tecnológica de Amirkabir. (Khodaii et al. 2009)

El ensayo consistía en aplicar una serie de cargas cíclicas en el centro de la zona superior de la probeta, a través de un plato circular de 112 mm de diámetro. La frecuencia utilizada fue de 10 Hz (para simular el tráfico de alta velocidad), aplicando una carga máxima de 6,79 kN, para crear 690 kN/m² o 100 psi de presión en la zona superior de la probeta (para simular la carga aplicada por un camión). Las probetas son ensayadas a 20 °C y 60 °C de temperatura.

Además del registro de los valores de deformación producidos en la probeta, durante todo el ensayo un sistema de grabación de video permite la captación de la formación y reflexión de la fisura a través de la probeta (Figura 97). De este modo, el crecimiento de la grieta es monitorizado y medido mediante el procesado de imágenes cada cierto número de ciclos (600 en el caso del ensayo a 20 °C y 50 en el realizado a 60 °C), utilizando una pintura blanca para la mejor observación de la misma. El ensayo termina cuando la fisura atraviesa todo el espesor de la probeta ensayada (75 mm).

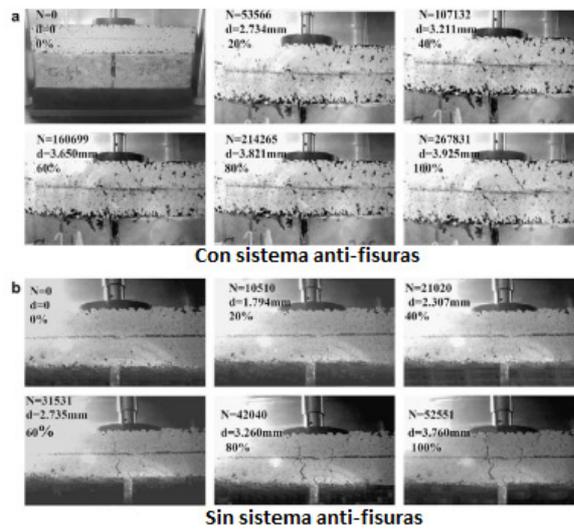


Figura 97. Imágenes captadas durante ensayo con y sin sistema anti-fisuras. (Khodaii et al. 2009)

2.4.2.3. Ensayos de Simulación Mixta (Efectos del Tráfico y Térmicos)

Los ensayos que mejor reproducen las solicitaciones a las que un firme está sometido son los que permiten aplicar los esfuerzos combinados de las variaciones térmicas y el paso del tráfico. Este tipo de ensayos suelen estar compuestos de dispositivos más sofisticados, y por tanto suelen ser más complejos de ejecutar. A continuación se recogen los prototipos que mayor éxito han tenido en el estudio de la propagación de fisuras en firmes en este sentido.

Ensayo de Retracción-Flexión del LRPC (Laboratoire Regional des Ponts et Chaussées) de Autun

Este ensayo fue desarrollado en 1988 y permite seguir el remonte de una fisura a través de una probeta de un sistema representativo de un firme que deseamos estudiar. Así, Dumas & Vecoven 1993 llevaron a cabo la ejecución de una serie de ensayos en los que analizaron diferentes técnicas anti-fisuras para pavimentos mediante el empleo de este dispositivo. Las probetas utilizadas en el ensayo tienen unas dimensiones de 560x110x80 mm y están formadas por el sistema anti-fisuras a ensayar y por una capa de mezcla bituminosa, los cuales se encuentran adheridos sobre una capa de base tratada con cemento, que está fija a dos platos metálicos (uno fijo y otro que se mueve horizontalmente a velocidad constante).

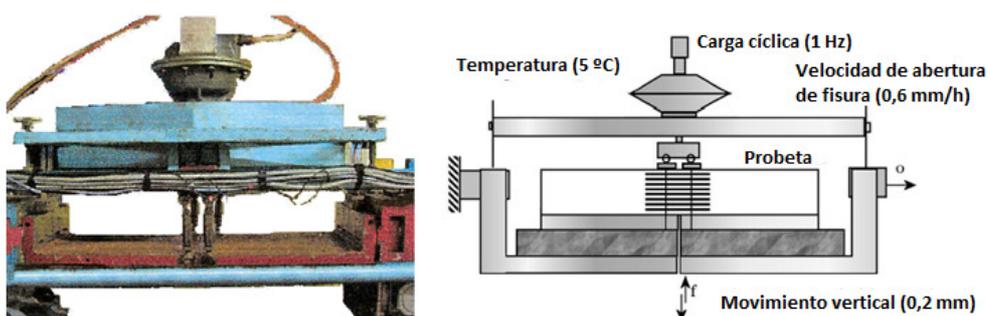


Figura 98. Detalle del ensayo de retracción-flexión del LRPC. (Dumas & Vecoven 1993)

Este dispositivo permite someter a las probetas a dos tipos de sollicitaciones simultáneas, una de tracción longitudinal mediante el movimiento horizontal de las placas, aplicada lentamente (0,01 mm/min) simulando la retracción térmica, y otra de flexión vertical cíclica que simula los efectos del tráfico (con una frecuencia de 1 Hz y una flecha impuesta de 0,2 mm) (Figura 98). De esta forma, el dispositivo de ensayo permite simular a la vez los modos de fractura I y II. La temperatura de ensayo se lleva a cabo a 5 °C con el objetivo de realizarlo en las condiciones de rigidez que favorezcan la fisuración reflexiva. La progresión de la fisura se sigue mediante el empleo de un medidor formado por una red de hilos conductores que se van rompiendo a medida que se fisura el material. Por tanto, las

medidas realizadas durante el ensayo consisten básicamente en la determinación visual del tiempo de inicio de la fisura y su longitud, del tiempo de propagación de la fisura y su longitud, y del tiempo que tarda en romper la probeta.

Los ensayos efectuados con este equipo sobre diferentes soluciones de firmes permiten comparar, bajo un mismo sistema cualitativo, el comportamiento de las diferentes soluciones anti-remonte de fisuras.

Ensayo MEFISTO del LRPC (Laboratoire Regional des Ponts et Chaussées) de Autun Tamagny et al. 2004 evaluaron las capacidades y eficiencia de un nuevo dispositivo de ensayo denominado MEFISTO (Figura 99), diseñado para determinar el comportamiento anti-fisuras de mezclas bituminosas simulando un proceso de fisuración por fatiga (sufriendo posteriores modificaciones que mejoraron su funcionamiento, Perez 2008). Este ensayo, que ha tenido como precedente el ensayo retracción-flexión, permite simular las características de las capas de base discontinuas, trabajando a temperaturas entre $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

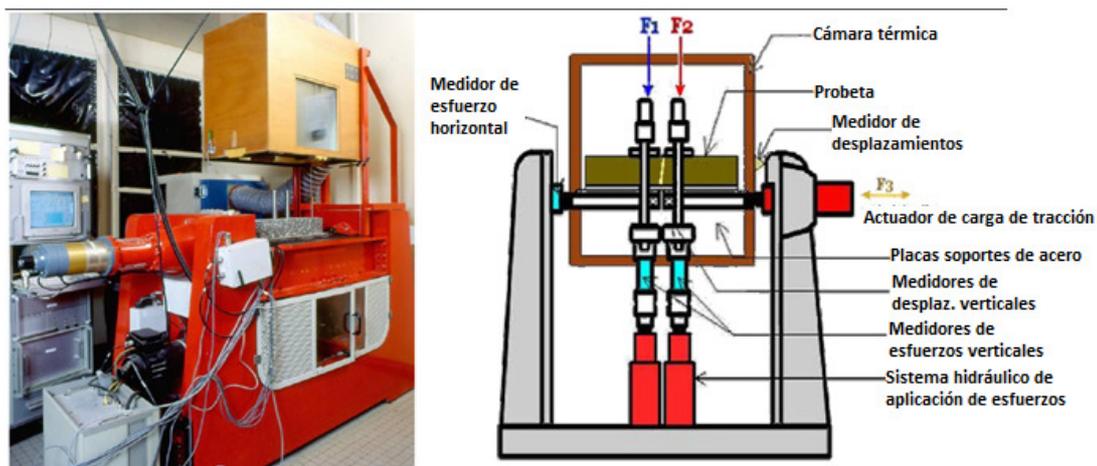


Figura 99. Esquema de ensayo MEFISTO. (Tamagny et al. 2004)

El dispositivo de ensayo se compone de dos placas de acero discontinuas sobre las cuales se fija (mediante adherencia por pegado) una probeta de mezcla bituminosa, con la posibilidad de añadir un sistema anti-remonte de fisura entre la interfaz acero/mezcla bituminosa. Las dimensiones de las probetas ensayadas suelen ser del orden de 50 x 100 x 560 mm, fabricadas con una pre-fisura de 10 mm en la zona central, siendo sometidas a una sollicitación a flexión por dos cilindros hidráulicos verticales y a tracción por un tercer cilindro horizontal.

El ensayo solo puede ser llevado a cabo en control por fuerza de manera que se aplica una carga vertical sinusoidal de 10 Hz de frecuencia (aplicada con una o dos columnas cercanas al centro de la misma), y una carga monotónica horizontal. Las probetas son instrumentadas con medidores de deformación y captadores de fisuración adheridos en los laterales (Figura 100). Así, el dispositivo tiene la capacidad de medir los desplazamientos en el centro de la probeta y las fuerzas verticales y horizontales aplicadas. Por otra parte, también se calcula la energía disipada como una función del número de ciclos necesarios hasta el fallo de la probeta, definido como el momento en el cual la fisura ha atravesado el espesor completo de la probeta.

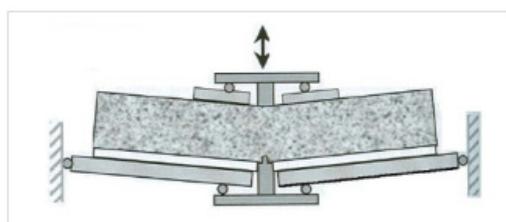
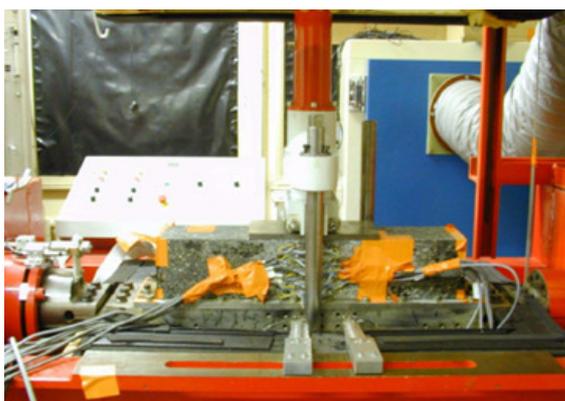


Figura 100. Detalle del ensayo MEFISTO. (Tamagny et al. 2004)

Ensayo de Simulación de Fisuración Reflexiva (SIFIRE, Simulation de la Fissuration Reflective)

Este ensayo de simulación de fisuración reflexiva ha sido desarrollado por el laboratorio LAMI de la ENPC (Ecole National des Ponts et Chaussées) con el objetivo de reproducir sobre una probeta de 1 metro de longitud y 0,5 metros de ancho, las condiciones de sollicitación propias de la fisuración reflexiva (Florence 2005). El banco de ensayos se compone de dos pórticos en los cuales hay instalados dos cilindros neumáticos verticales unidos a una viga horizontal que permite aplicar la carga sobre la probeta simulando la acción del tráfico, y uno horizontal que permite tener en cuenta el efecto de la temperatura (Figura 101). De esta forma es posible realizar un estudio experimental de la sollicitación combinada de la carga debida al tráfico y las variaciones térmicas, ofreciendo una mejor comprensión de su incidencia sobre la fisuración reflexiva. Además, el equipo de ensayo se sitúa en el interior de una cámara térmica en la que la temperatura permanece constante a 10 °C.

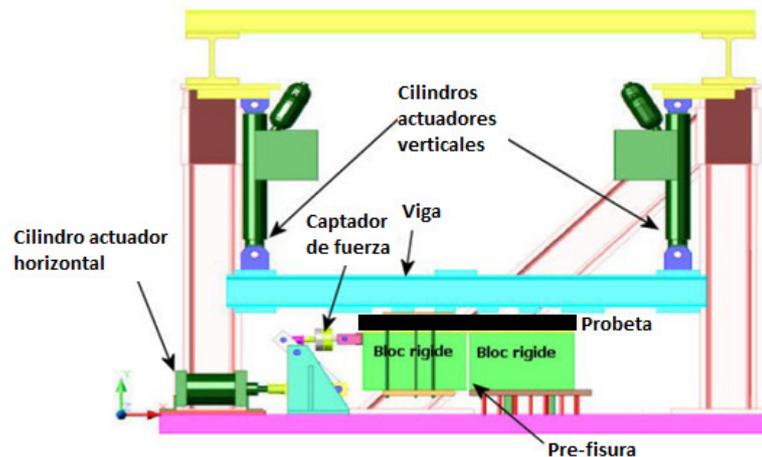


Figura 101. Esquema ensayo SIFIRE. (Florence 2005)

Los cilindros que constituyen el sistema de carga vertical funcionan por acción de un equipo servo-hidráulico, pudiendo aplicar 65 kN de esfuerzo nominal estático de compresión a 210

bares, y 56 kN de esfuerzo nominal dinámico a 180 bares, siendo en ambos casos la capacidad reducida a la mitad cuando se trata de esfuerzos de tracción. Un captador de presión y un captador de posición LVDT integrados en la cabeza de cada uno de los dos cilindros permiten manejar y controlar el sistema hidráulico. Para poder reproducir el estado de compresión en la capa de mezcla bituminosa durante el paso del tráfico pesado es necesario también aplicar una carga horizontal sobre la probeta, que es aplicada por un cilindro neumático capaz de desarrollar una fuerza de 12 kN a 6 bares.

El seguimiento de la propagación de la fisura se lleva a cabo mediante el empleo de unos medidores situados a cada lado de la probeta de mezcla bituminosa, a la altura de la pre-fisura realizada sobre los bloques de hormigón que representan la capa de base.

Ensayo WRC (Wheel Reflective Cracking) de la Escuela Politécnica de Madrid

Este dispositivo de ensayo ha sido desarrollado por la Escuela de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid en 2006 (Prieto Muñoz 2006; Gallego & Prieto 2006). Este ensayo permite comparar dos productos o ver si un producto cumple unos valores mínimos establecidos. Así, permite evaluar de forma comparativa la efectividad ante la propagación de fisuras entre dos materiales o diferentes sistemas anti-fisuras.

Los medios utilizados en el dispositivo permiten simular los mecanismos de sollicitación en el material asociados a las cargas del tráfico (movimientos verticales de los labios de la fisura y deflexión del pavimento) y a los efectos térmicos (aumento de la rigidez y movimiento horizontal de los labios de la fisura), de forma que pretenden simular el remonte de la fisura bajo estas condiciones. Así, la carga es aplicada mediante el paso de una rueda lastrada con pesas (dispositivo "Wheel tracking"), que en función de la posición que tenga, tendrá un efecto u otro sobre el sistema ensayado. La probeta se apoya sobre dos placas (a las que es adherida mediante el empleo de un adhesivo sintético) una deslizante y la otra fija, que a su vez se encuentran instaladas en dos cajones metálicos (separados 10 mm para simular la abertura de la fisura de la capa subyacente sobre la que

reposa el material ensayado), que se encuentran apoyados sobre un dispositivo que favorece su movimiento vertical relativo, y un apoyo de caucho que permite la deflexión del sistema (Figura 102).

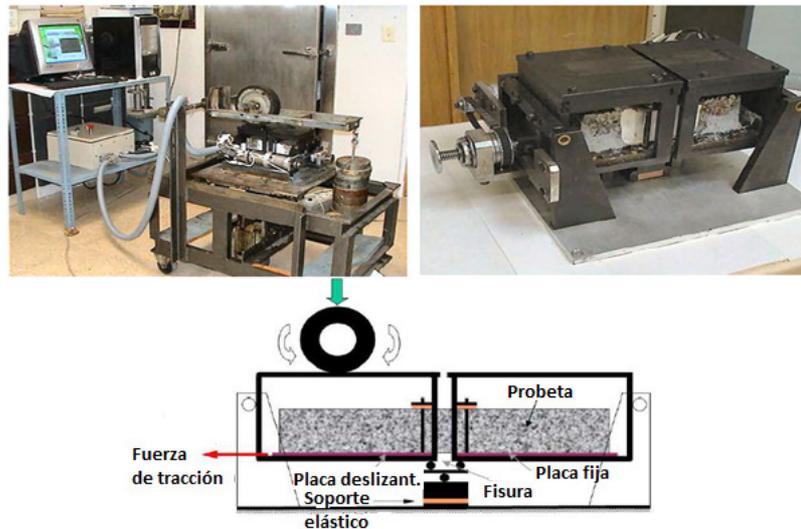


Figura 102. Detalle del ensayo WRC de la UPM. (Gallego & Prieto 2006)

Para la simulación del efecto de las bajas temperaturas, el dispositivo cuenta con una cámara térmica que permite acondicionar el ensayo entre 0 °C y 20 °C, el cual se programa a 5 ± 1 °C. Los efectos provocados por los cambios de temperatura se simulan llevando a cabo el desplazamiento horizontal de una de las placas sobre las que se apoya la probeta (únicamente en el sentido de tracción, accionada por un motor que permite aplicar un desplazamiento total de 10 mm con velocidades de entre 50 y 0,001 $\mu\text{m/s}$, pudiendo reproducir una gran variedad de cambios de temperatura). Por su parte, para simular el movimiento vertical de los labios de la fisura se utiliza un sistema de balanceo conseguido mediante el movimiento de pivote de los cajones (realizado sobre dos trapecios fijos a los que se encuentran unidos), que se ayuda de un dispositivo horizontal que transmite el movimiento de un lado a otro de la fisura conforme pasa la carga rodante, provocando el movimiento relativo de los labios de ésta, excepto cuando la rueda se encuentra en el

centro. En este punto la carga aplicada es simétrica a la abertura entre los dos cajones y lo que se produce es la deflexión de la probeta. Dicha deflexión ocurre gracias a la introducción de dos bloques de caucho superpuestos bajo el dispositivo horizontal, que permiten alcanzar deflexiones máximas de 0,2 mm (Figura 103).

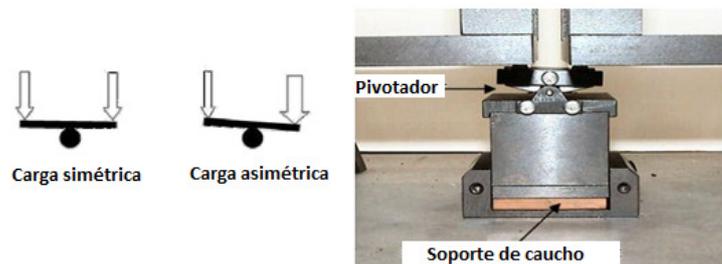


Figura 103. Detalle del sistema de distribución de cargas del ensayo WRC. (Gallego & Prieto 2006)

Durante el ensayo se miden los valores de la deflexión vertical en el centro de la probeta, la longitud vertical de la fisura, y el movimiento relativo entre los labios de la grieta, pudiéndose controlar también el tiempo transcurrido hasta el fallo de la probeta (Figura 104).

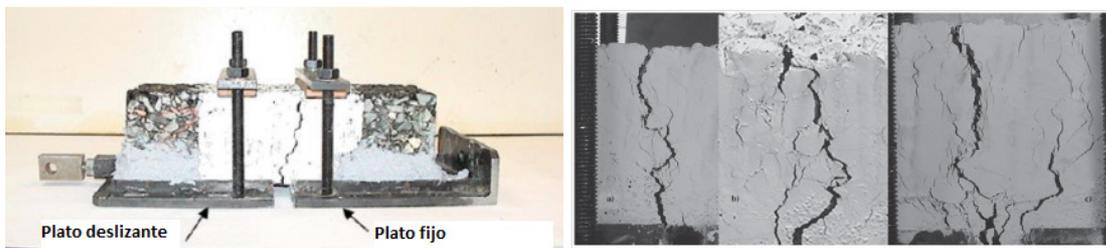


Figura 104. Detalle de la probeta ensayada. (Gallego & Prieto 2006)

El criterio de fin de ensayo utilizado es el movimiento vertical relativo de los labios de la fisura. Este criterio se considera un indicador objetivo del estado estructural de la probeta y de su capacidad de transmitir cargas a un lado y a otro de la fisura. Así, durante las pruebas del dispositivo se determinó que una probeta ha alcanzado su estado admisible último

cuando el desplazamiento vertical relativo entre los labios de la fisura es mayor de 0,2 mm (lo cual indicaba que todo el espesor de la probeta estaba fisurado). Además, se demostró que, una vez alcanzado, el desplazamiento vertical relativo de 0,2 mm permanece estable durante un intervalo de tiempo y después crece rápidamente, lo que lo postula como un valor de transición entre el estado no fisurado y el estado fisurado con pérdida total de capacidad estructural. Por su parte, los resultados visuales obtenidos con los diferentes ensayos realizados permiten apreciar desde fisuras simples hasta fisuras más ramificadas (Gallego & Prieto 2006).

Ensayo ETS de la Escuela de Tecnología Superior de la Universidad de Québec

El objetivo de este dispositivo de ensayo a fisuración es reproducir la sollicitación de retracción térmica y del aproximamiento de un vehículo sobre una probeta compuesta por una capa de base pre-fisurada y una capa superior a ensayar, situada sobre un sistema de dos placas móviles (una con movimiento en el plano horizontal y otra con movimiento en el plano vertical), y estando todo el conjunto instalado en el interior de una cámara térmica que permite controlar la temperatura (entre 5 °C y -5 °C) (Figura 105, Guissi 2005).

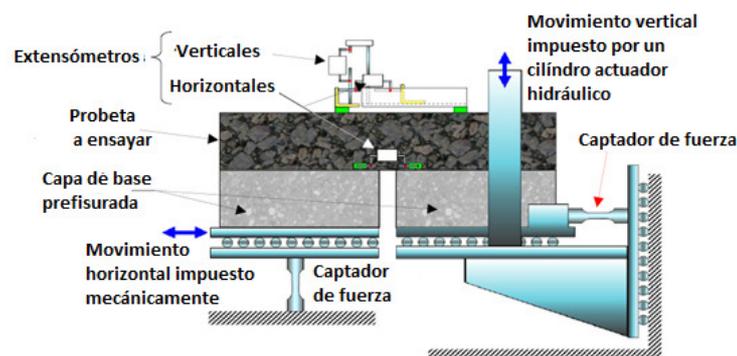


Figura 105. Esquema del ensayo de la Universidad de Québec. (Guissi 2005)

Con el fin de reproducir las sollicitaciones se aplica un movimiento cíclico sobre cada una de las dos placas, el movimiento horizontal (que reproduce el modo de fractura I) se aplica mediante un mecanismo motorizado, y el movimiento vertical (que reproduce el modo II) mediante una prensa tipo MTS. La variación de los movimientos horizontales se realiza con

una frecuencia de 52 minutos cada ciclo ($3,2 \times 10^{-4}$ Hz), con aberturas del orden de un milímetro. Por su parte, la variación de los movimientos verticales tiene una frecuencia de 1 Hz, y una deformación asociada de 0,02 mm.

La instrumentación del ensayo está constituida por tres captadores de fuerza (dos en sentido horizontal para controlar el esfuerzo transmitido en este sentido, y uno vertical impuesto por la prensa de carga) y tres captadores de desplazamiento de tipo extensómetro (dos horizontales situados cerca de la fisura permitiendo medir los desplazamientos relativos, y otro vertical para medir la deformación de la capa a ensayar).

Ensayo de Propagación de Fisuras del Instituto Tecnológico de la India

Este ensayo fue diseñado y fabricado en el año 2007 en la India, desarrollado por Bhosale & Mandal 2007, el cual permite simular sobre una probeta de mezcla bituminosa, no solo las solicitaciones debidas a las contracciones térmicas y los fenómenos de expansión del pavimento, sino también las cargas del tráfico con desviación diferencial.

El equipo se compone de dos placas metálicas sobre las que se coloca la probeta (una fija y otra móvil en sentido horizontal), las cuales se encuentran separadas una distancia de 5 mm, simulando el efecto de una junta o fisura en la capa de base. El movimiento horizontal para simular las contracciones térmicas viene aplicado por un dispositivo mecánico accionado por un motor eléctrico (llegándose a aberturas de 1,83 mm, conseguidas a una velocidad de 4,547 mm/min), mientras que un plato de carga asociado a un marco hidráulico aplica una presión vertical sobre la probeta (Figura 106). Además, sobre la probeta se adhiere un marco de aluminio en la zona superior, que es accionado por el dispositivo mecánico horizontal a la vez que el plato metálico inferior, permitiendo transmitir solicitaciones en la zona superior de la mezcla. Así, el equipo simula tanto la fisuración reflexiva ascendente, como la descendente (por medio del marco de aluminio adherido a la probeta mediante una resina epoxi).



Figura 106. Detalle del ensayo de fisuración de la India. (Bhosale & Mandal 2007)

El ensayo se lleva a cabo a deformación controlada para la carga horizontal, con un acondicionamiento en cámara térmica a 29 °C. Debido a aspectos de seguridad del motor eléctrico y del sistema de transmisión de carga, los movimientos horizontales aplicados por el motor tienen un periodo de descanso de 5 segundos, entre la abertura y el cierre de la grieta (Figura 107). Por otra parte, la aplicación de la carga vertical de compresión genera una presión de contacto de 478,7 MPa en una placa metálica de 15 mm de espesor (que simula la aplicación de la carga de un neumático), mediante un eje vertical que aplica una fuerza de 80 kN. Dicha carga vertical es aplicada en pulsos de 1 segundo de duración, aplicándose entre cada pulso un periodo de descanso de 4 segundos (lo cual simula una velocidad del tráfico de 1,6 Km/h). Mediante la instrumentación de la probeta con medidores de deformaciones, se controlan las deflexiones de la misma, analizándose además la propagación de la fisura visualmente mediante una zona pintada de blanco para su mejor apreciación.

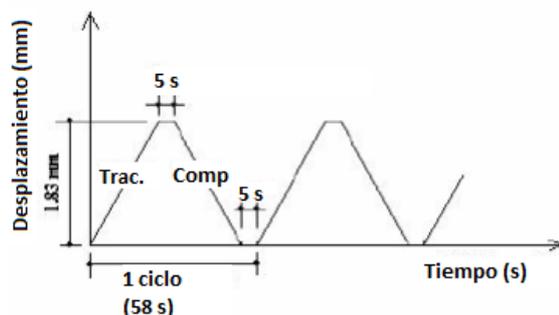


Figura 107. Desplazamiento impuesto en el ensayo. (Bhosale & Mandal 2007)

Las probetas a ensayar tienen espesor variable en función de las mezclas utilizadas en su fabricación o de si disponen de algún sistema anti reflexión de fisuras. Las dimensiones más comunes de las mismas son 500 x 400 x 75 mm. Las variaciones de resistencia ofrecida por la probeta en cada ciclo son registradas, de manera que posteriormente son utilizadas para determinar los módulos de rigidez y cortante. Así, se establecen como parámetros de evaluación del ensayo analizando su caída conforme transcurre el mismo.

2.4.2.4. Ensayos a Escala que Reproducen el Tráfico Rodado

A pesar de todas las ventajas que aportan los ensayos de laboratorio, la observación de los mecanismos de degradación de la carretera debido a los efectos del tráfico es esencial para su concepción y su mejor dimensionamiento, y para mejorar sus técnicas de construcción y mantenimiento. Las carreteras se conciben para largas duraciones de servicio (en torno a los 20-30 años), así el progreso de nuevos materiales y estructuras se encuentra frenado por los largos periodos de espera de resultados asociados a las experiencias y técnicas desarrolladas en carreteras reales.

Este hecho ha desembocado en que un número considerable de centros de investigación de carreteras se hayan equipado con simuladores de tráfico pesado a escala (Balay & Mateos 2004). Estos equipos son capaces de aplicar en unas semanas, las cargas pesadas que soportarían durante toda su vida de servicio real los tramos de carreteras experimentales

ensayadas. Así, este tipo de equipos permite ensayar tanto materiales como estructuras innovadoras sin tener que pasar largos periodos de observación y sin el riesgo de que un tramo de carretera real se arruine.

Los tramos ensayados son instrumentados con el objetivo de seguir su evolución con el paso de las cargas aplicadas. Se toman datos de los desplazamientos reversibles y permanentes, las sollicitaciones internas creadas por el paso de las cargas, así como de las temperaturas, el contenido de humedad, etc. Además, también se lleva a cabo el seguimiento de los daños estructurales como la fisuración y la aparición de roderas, la regularidad superficial, etc. De esta forma este tipo de pistas de ensayo también sirven para poner a prueba los equipos de auscultación utilizados en las carreteras reales.

El empleo de este tipo de equipos para el estudio del comportamiento de firmes de carretera se remonta casi a principios del siglo XX. Dos de estos primeros prototipos podemos encontrarlos en el Reino Unido (Brown & Brodrick 1999), donde el primer simulador de tráfico acelerado presentado data del año 1920 (de tipo circular, con 10 metros de diámetro, capaz de aplicar cargas de hasta 1,3 toneladas, y alcanzar velocidades de 14 km/hora), y el segundo del año 1933 (también de tipo circular, con 34 metros de diámetro, cargas de hasta 23 toneladas y velocidades de hasta 48 km/hora).

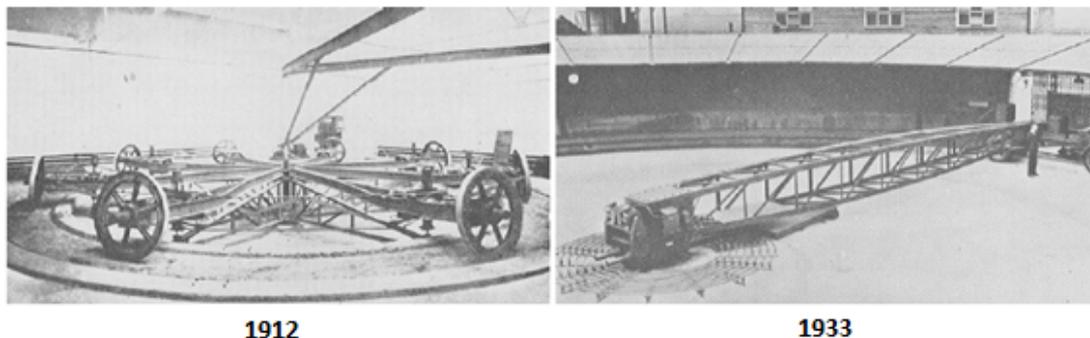


Figura 108. Primeros simuladores de tráfico a escala del Reino Unido. (Brown & Brodrick 1999)

Actualmente se enumeran aproximadamente unos 48 simuladores de tráfico en todo el mundo (de los cuales 28 se encuentran en EE.UU, AFD40 2001), de mayor o menor escala, siendo la mayoría de ellos lineales, aunque también existen algunos circulares y mixtos. Por otra parte, existen simuladores de tráfico en los que las cargas son aplicadas mediante ruedas (la mayoría de ellos, pudiendo utilizar actuadores hidráulicos, camiones reales o pesos muertos para aplicar la carga), y otros en los que la forma de aplicación de carga es mediante pulsos aplicados sobre platos metálicos (en esta modalidad solo existen pistas de ensayo rectilíneas). Además, su ubicación puede estar emplazada en el interior de naves, en pistas de ensayo exteriores, secciones de carreteras reales, o en el interior de laboratorio (cuando la escala es más reducida).

En función al tipo de ensayo llevado a cabo, se encuentran simuladores de tráfico real (sobre los que circulan vehículos pesados reales continuamente), y simuladores de tráfico de carga controlada (los más comunes, y además los más fiables ya que introducen menos variables en el estudio de los tramos). Las condiciones de los ensayos variarán en función del nivel de carga aplicado, la velocidad, el tipo de neumático (y su presión de inflado) y de rueda utilizada en el dispositivo (simple o doble), el tipo de eje, la climatología o acondicionamiento de la pista de ensayo (temperatura, ciclos de hielo-deshielo, nivel de humedad y saturación del suelo, presencia de lluvia e irradiación solar). Todas estas características pueden ser o no controladas, en mayor o menor medida, en función del simulador utilizado.

A continuación, hacemos un repaso a algunos de los simuladores de tráfico más característicos existentes en el mundo (Figuras 109, 110, y 111), los cuales se agrupan dentro de un comité organizado por el TRB (Transportation Research Board), que se denomina “ADF40 – Full Scale and Accelerated Pavement Testing”. Este comité tiene como objetivo la mejora y desarrollo de este tipo de ensayos, de forma que permitan una reproducción lo más fiel posible de las condiciones reales en la vida de servicio de los firmes, pudiendo así mejorar su diseño.

Una clasificación de estos simuladores puede hacerse en función de la geometría de la pista de ensayo. Algunos de los simuladores rectilíneos se recogen en las Figuras 109 y 110: (a) ARRB Australian Road Research Board; (b) Federal University of Rio Grande do Sul – Brazil; (c) Communications Research Institute of Liaoning Province – China; (d) Research Institute of Highway – China; (e) Technical University of Denmark; (f) Federal Highway Research Institute – Germany; (g) Materials and Geotechnical Research Group of PWRI – Japan; (h) Techno Center of Kajima Road – Japan; (i) Hanyang University – Korea; (j) DELFT University of Technology – The Netherlands; (k) Guateng Department of Public Transport – South Africa; (l) Swedish Road and Transport Research Institute – Sweden; (m) Laboratoire des Voies de Circulation – Switzerland; (n) Swiss Federal Laboratories EMPA – Switzerland; (o) Transport Research Laboratory – United Kingdom; (p) University of Nottingham – United Kingdom; (q) FHWA Federal Highway Administration – USA; (r) U.S Army Engineer Research and Development Center – USA; (s) University of Texas – USA; (t) Kansas State University – USA; (u) Caltrans – USA.

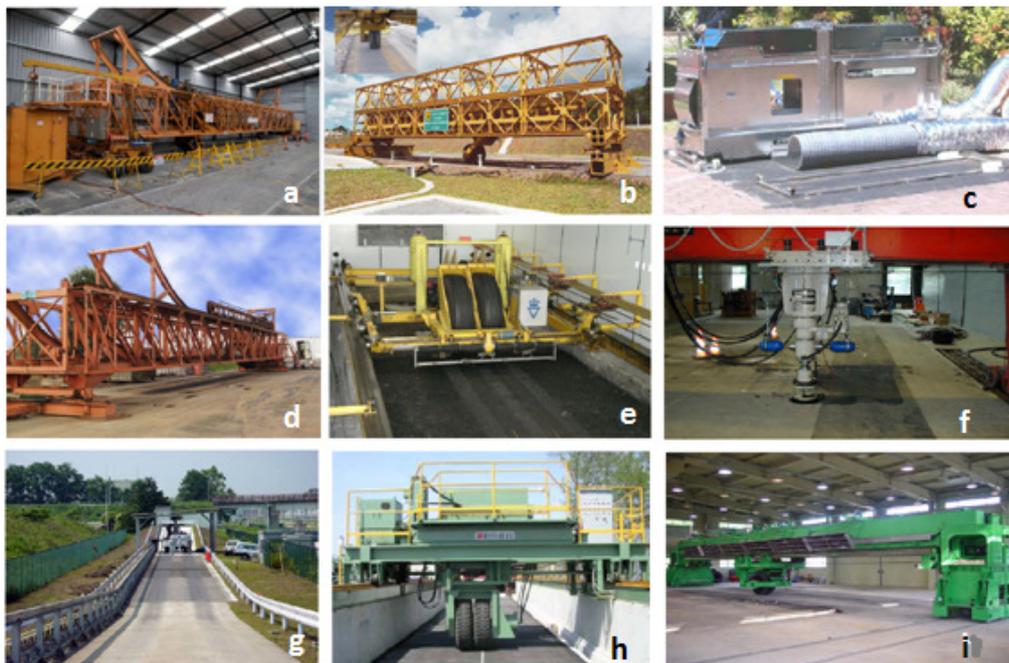


Figura 109. Simuladores de tráfico rectilíneos (I). (AFD40 2011)

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

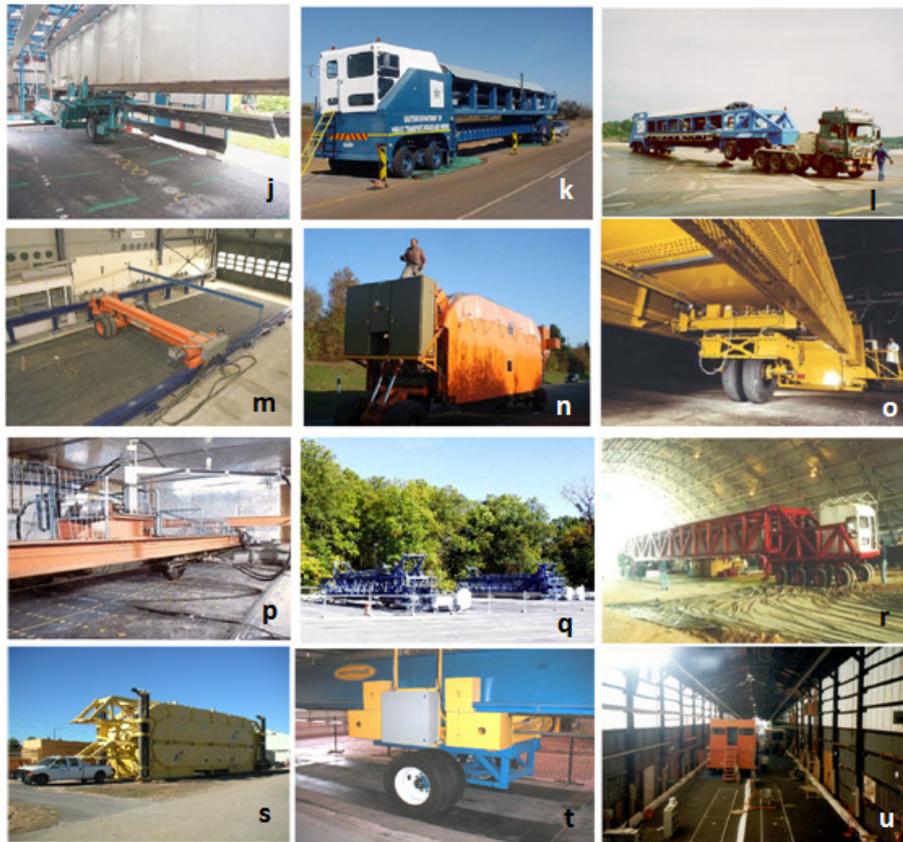


Figura 110. Simuladores de tráfico rectilíneos (II). (AFD40 2011)

Por otra parte, en la Figura 111 aparecen algunos ejemplos de simuladores de tráfico curvos o mixtos: (A) Chongqing Communications Research & Design Institute – China; (B) Road and Bridge Laboratory at Southeast University – China; (C) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – France; (D) Nippon Expressway Research Institute – Japan; (E) PWRI Public Work Research Institute – Japan; (F) Technical University of Gh. Asachi – Romania; (G) CEDEX Transpor Research – Spain; (H) NCAT Auburn University – USA; (I) MnROAD Minnesota – USA; (J) Switzerland; (K) Slovenia; (L) New Zealand.



Figura 111. Simuladores de tráfico curvos o mixtos. (AFD40 2011)

En los últimos años, este tipo de equipos ha tomado una importancia fundamental en el estudio del fenómeno de fisuración en firmes de carretera (Balay & Mateos 2004). Su capacidad para simular el paso de tráfico pesado a largo plazo, representando el comportamiento del firme durante toda su vida de servicio, permite evaluar su resistencia ante la propagación de fisuras. De esta forma son muchos los simuladores de tráfico que han sido utilizados para el estudio de la propagación de fisuras en mezclas bituminosas.

Se describen a continuación algunos de los simuladores de tráfico acelerado más característicos en el estudio del fenómeno de fisuración en firmes de carretera. Así, se ha escogido una muestra representativa de los mismos de manera que se describen equipos de diferentes tamaños, formas de aplicación de las cargas, etc.

Ensayo MMLS de la Universidad de Carolina del Norte

Este ensayo (Model Mobile Loading Simulator, MMLS), fue diseñado para someter a una estructura de un pavimento construida a escala a una serie de cargas, con el objetivo de analizar el comportamiento ante fisuras de un firme completo (Hugo et al. 1990) Con los primeros ensayos piloto se desarrolló un modelo de pavimento asfáltico a una escala 1:10 para analizar su comportamiento ante fisuración por fatiga debido a bajas temperaturas (Mc Daniel 1997), para posteriormente, llegar a la última versión fabricada a una escala de 1:3, el MMLS3 (Lee 2003).

El MMLS3 ha sido desarrollado para completar la información existente en torno al fenómeno de fisuración en pavimentos entre los ensayos propiamente de laboratorio y los ensayos a gran escala, de forma que todos los elementos del ensayo presentan las mismas propiedades que en pavimento real. La única salvedad importante a tener en cuenta es que en el empleo de dispositivos de ensayo contruidos a escala reducida, a pesar de que los componentes estructurales del mismo son de menor tamaño, las relaciones tenso-deformacionales han de ser similares que en el caso de escala real.

El dispositivo de simulación de tráfico fue desarrollado en Sudáfrica, y consiste en un simulador de carga unidireccional que utiliza un circuito cerrado compuesto por una cadena de transmisión en el que se integran 4 ejes, con una rueda de 300 mm de diámetro por eje (Figura 112). La carga estática transmitida por cada rueda es de 2,9 kN, lo que supone una novena parte de la carga que aplica un neumático de un eje simple de vehículo pesado con dos ruedas.

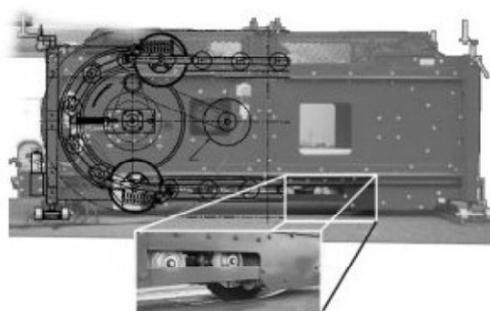


Figura 112. Detalle del ensayo MMLS3. (Lee 2003)

La frecuencia utilizada en el ensayo es de 1,67 Hz, lo que equivale a 5500 pasos de la ruedas cada hora, o bien de 3,3 Hz, con un periodo de carga de 0,3 segundos y un periodo de descanso de 0,3 segundos. La fuerza dinámica aplicada por el MMLS3 es medida en la superficie del pavimento a ensayar mediante sensores de presión circulares de 10 mm de diámetro. La fisuración puede observarse sobre la superficie del pavimento ensayado, así como mediante la extracción de testigos (Figura 113).

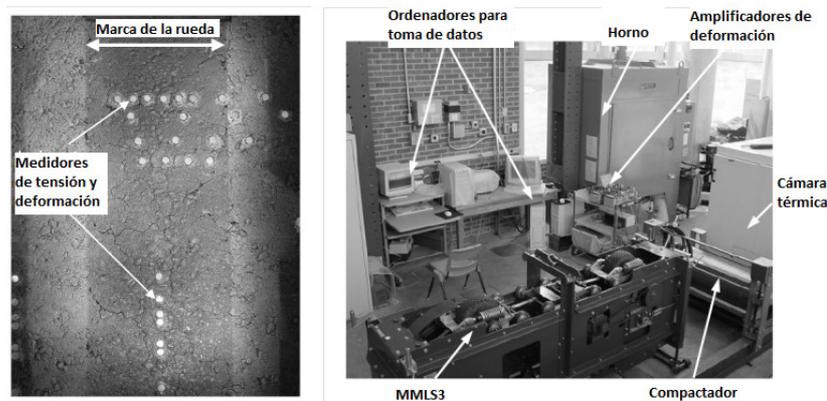


Figura 113. Esquema de ensayo MMLS3. (Lee 2003)

Pista de Ensayos de la Universidad de Nottingham

La pista de ensayos a media escala del NTEC (Nottingham Transportation Engineering Centre) fue construida en los años 70 con el objetivo de estudiar los mecanismos básicos de fallo de las mezclas bituminosas (AFD40 2011; Brown & Brodrick 1999). Dentro de estos mecanismos básicos de fallo, uno de los más investigados a lo largo de los años ha sido el fenómeno de fisuración en mezclas bituminosas, así como la evaluación de los sistemas anti-remonte de fisuras.

El ensayo consiste en una rueda cargada que realiza pasadas (pudiendo ser unidireccionales o bidireccionales) sobre una sección de firme instrumentada (accionada por un sistema servo hidráulico y transmitida por un cable, montado sobre un marco metálico), en la que se controlan las deformaciones y las tensiones aplicadas (Figura 114). Las dimensiones de la

pista de ensayo son de 4 metros de largo, un ancho de 2,4 m y un espesor de 1,4 m. Las cargas aplicadas pueden llegar a valores de 30 kN, distribuidos en una sección de unos 300 mm (dado que el radio del neumático utilizado tiene un diámetro de 560 mm), ejerciendo una presión de contacto rueda-pavimento de unos 500 MPa (similar a la ejercida por el tráfico pesado), a una velocidad máxima de 16 km/h (lo que permite unas 800 pasadas por hora, y unas 110.000 aplicaciones de carga mensuales). Además, el dispositivo se encuentra situado en el interior de una sala en la que puede controlarse la temperatura del aire y del pavimento, realizando normalmente los ensayos en un rango de 15-30 °C.

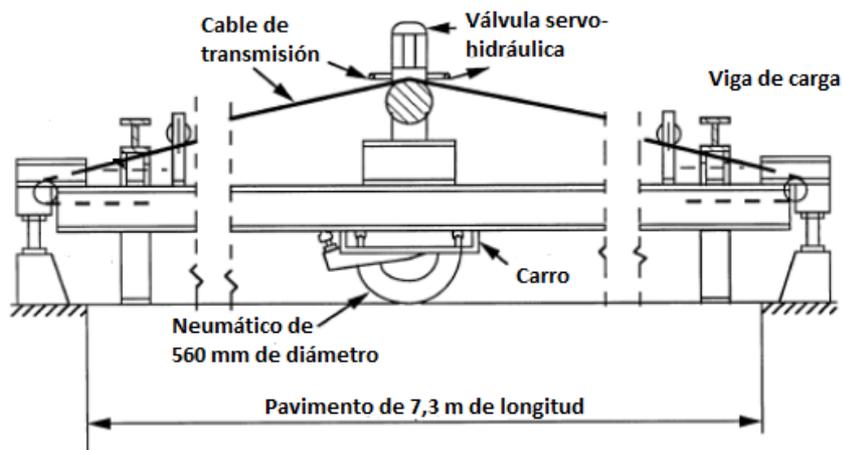


Figura 114. Esquema de la pista de ensayos del NTEC. (Brown & Brodrick 1999)

En base a la instrumentación establecida, en la sección de ensayo pueden medirse diferentes variables como la temperatura del pavimento, o las tensiones y deformaciones (verticales y horizontales), recibidas por las diferentes capas del firme ensayadas. Además, tras la extracción de testigos pueden analizarse un mayor número de propiedades mecánicas en base a la degradación del pavimento, y mediante la inspección visual puede controlarse la resistencia a deformaciones plásticas (roderas) o la fisuración (que también puede ser evaluada mediante la extracción de testigos).

Los dispositivos utilizados para la instrumentación son células de presión para las capas de base, bobinas y medidores de deformación, medidores de perfil transversal, y termómetros para la temperatura. Por su parte, resto del sistema de control del equipo también es servo-hidráulico (movimientos transversales del marco, posicionamiento de la rueda, etc.), utilizando un medidor LVDT para controlar la alineación de la rueda.

En torno al estudio de la fisuración en mezclas, en esta pista de ensayos se han estudiado numerosos tipos de mezclas bituminosas, así como sistemas tipo SAMI, geotextiles, geomallas, etc (Figura 115).



Figura 115. Detalle de la pista de ensayos del NTEC. (Brown & Brodrick 1999)

Ensayo FABAC del LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)

El equipo de ensayos FABAC es un simulador de tráfico pesado a escala para el estudio estructural de pavimentos desarrollados por LCPC en el año 1995 (AFD40 2011; Pérez 2008; Pérez et al. 2008). Desde su desarrollo, una de las principales aplicaciones que este dispositivo ha tenido es el estudio del comportamiento de secciones completas de firmes ante los fenómenos de reflexión de fisuras. El equipo de ensayo permite caracterizar los mecanismos que gobiernan este tipo de fisuración, mediante el estudio de la evolución en

la degradación de un firme (con o sin sistema antifisuras), cuya capa de base posee una discontinuidad (que simula una junta o fisura).

Su principal ventaja reside en que este simulador es capaz de aplicar las cargas de tráfico pesado equivalentes a 10-20 años de servicio de una carretera real, en menos de 2 meses. Así, las cargas son aplicadas mediante ejes dotados de dos ruedas capaces de transmitir hasta 65 kN (la mitad de la carga de un eje de referencia de 130 kN), estando el equipo compuesto por cuatro ejes que mediante el recorrido de un circuito traccionado por una cadena, permite aplicar la carga de cada eje en tramos de ensayos de 2 metros de longitud. Los apoyos del equipo se sitúan fuera del tramo a ensayar para que su efecto no interfiera en las medidas de las cargas aplicadas por el paso de las ruedas. Un sistema neumático corrige continuamente la distribución de esfuerzos entre los apoyos y las cargas rodantes, con el objetivo de mantener quasi-constante el esfuerzo aplicado en la zona de circulación de la carga (Figura 116).

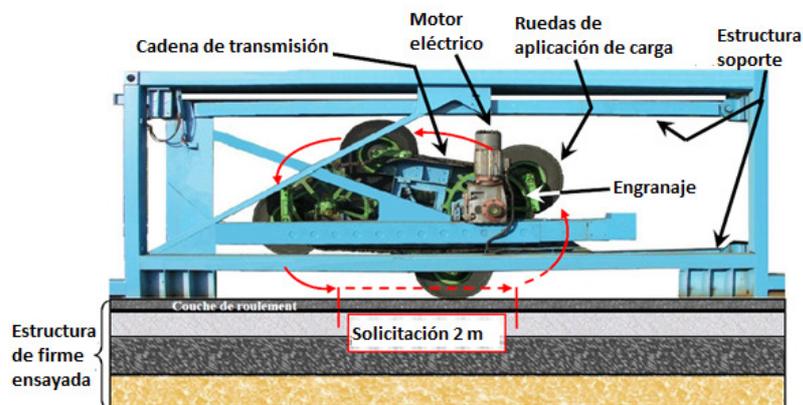


Figura 116. Esquema del dispositivo de ensayo FABAC. (Pérez 2008)

El marco metálico que contiene la maquinaria tiene una longitud de 5,5 m, lo cual le permite aplicar la carga sobre la longitud de ensayo a una velocidad de 7 km/h. El funcionamiento en continuo del equipo debe llevarse a cabo bajo la supervisión de personal, de manera que su aplicación de cargas es limitada, estando en torno a las 350.000 aplicaciones de ciclos semanales (Figura 117).



Figura 117. Detalle del simulador de tráfico FABAC. (Pérez 2008)

Para poder analizar el remonte de las fisuras de forma precisa y fiable, es fundamental prestar atención especial a la geometría de la estructura a ensayar, así como a su instrumentación (que permitan controlar las tensiones, desplazamientos verticales, propagación de fisuras y condiciones térmicas). La única forma de llevar a cabo el seguimiento del remonte de una fisura es mediante la observación lateral, de manera que el ancho de la pista de ensayos ha sido reducido (dejando cierto margen para evitar deformaciones laterales debido al paso de las ruedas) para introducir medidores de fisuración adheridos a los laterales . Así, además de dos medidores situados a cada lado de la junta para controlar la evolución de la fisura, la instrumentación del tramo incorpora 8 medidores de deformación en la zona inferior de la capa y 8 medidores pegados en la superficie (en los dos casos, tanto transversales, como longitudinales), 12 captadores LVDT para medir las deflexiones y desplazamientos verticales de la estructura, 5 captadores LVDT para medir la abertura de la junta, y 6 medidores para el control de la temperatura (Figura 118).

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

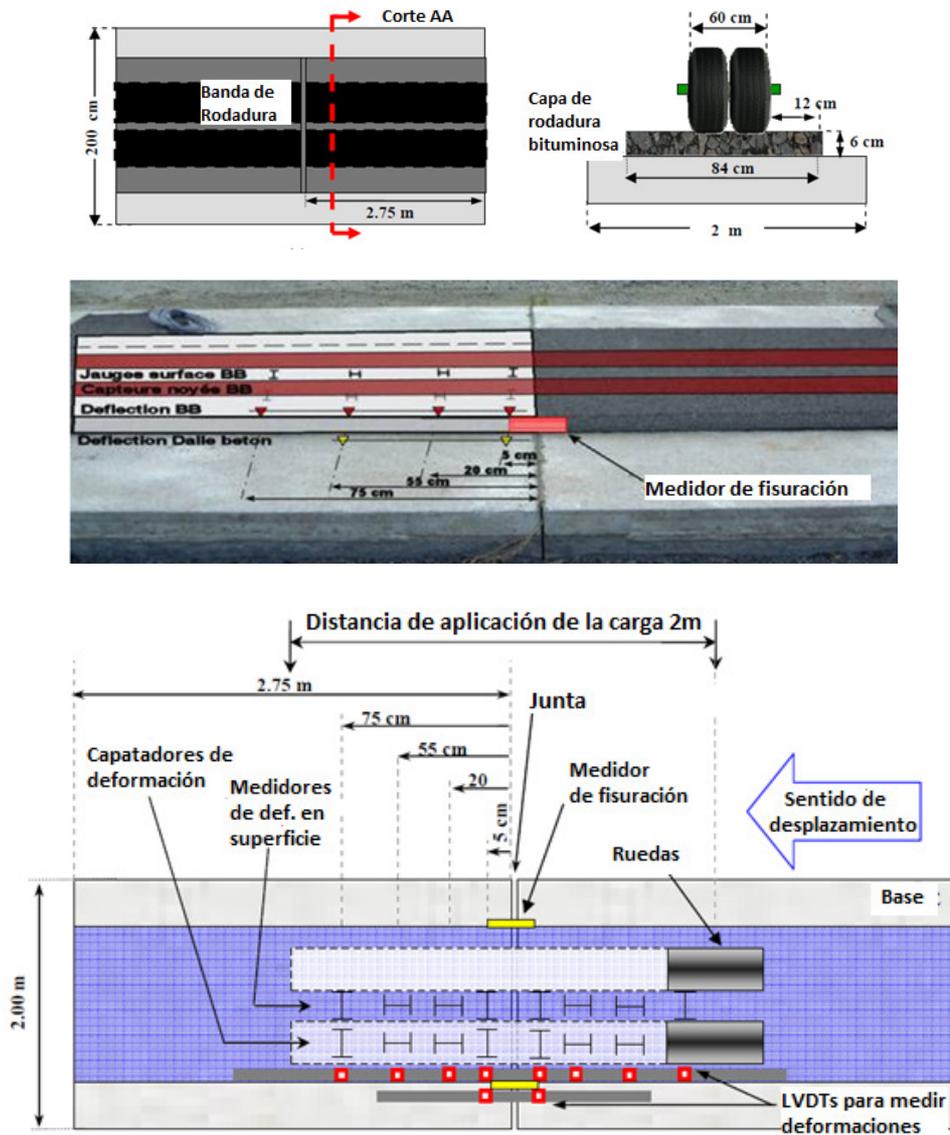


Figura 118. Instrumentación de la pista de ensayos FABAC. (Pérez 2008)

Durante la ejecución de los ensayos se ha encontrado el desarrollo de dos tipos de fisuración reflexiva debido a la presencia de las juntas. En unas ocasiones se produce la reflexión de una fisura doble (a cada lado de la junta), mientras que en otras es una única fisura la que se desarrolla (Figura 119).

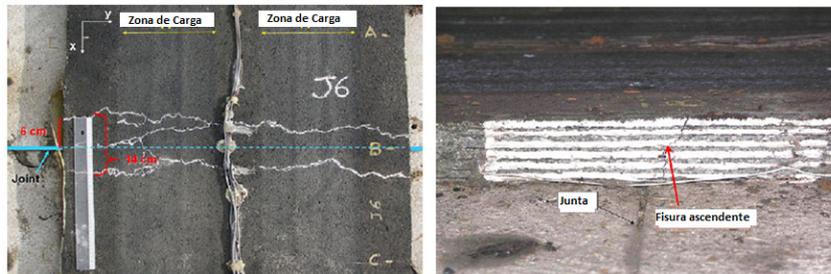


Figura 119. Detalle de los resultados obtenidos tras el ensayo FABAC. (Pérez 2008)

Ensayo a Escala del Instituto Federal de Investigación de Carreteras (BAST), Alemania
Este dispositivo de simulación acelerada de tráfico es uno de los más antiguos, desarrollado a finales de los años 60 por el Instituto Federal de Investigación de Carreteras en Alemania (AFD40 2011). Las dimensiones de la pista de ensayo son de 38 m de largo por 7,5 m de ancho (dividida en 4 secciones de 9,5 metros de largo), en la cual puede establecerse un espesor de pavimento de hasta 3 m para simular la estructura de un firme de carretera real (Figura 120). Dicha pista se encuentra construida en una sala interior en laboratorio, de forma que puede acondicionarse la temperatura de ensayo, ciclos de hielo-deshielo y el nivel de humedad.



Figura 120. Detalle de la pista de ensayos del simulador BAST. (AFD40 2011)

Una de las particularidades que tiene este simulador de tráfico a escala es que las cargas no son transmitidas por ruedas que recorren la sección de pavimento a ensayar, sino que se trata de dos platos metálicos de 300 mm de diámetro que aplican pulsos de carga (de 25 ms), los cuales van avanzando unidos a un marco por el borde de la superficie de la pista a ensayar (Figura 121). Las cargas aplicadas en cada punto pueden ser estáticas o dinámicas, siendo ambas aplicadas por un sistema hidráulico capaz de alcanzar los 360 kN en dinámico, con frecuencias máximas de 8700 aplicaciones por hora, lo que equivale a una simulación de tráfico de en torno a un 1.000.000 de ejes al mes.



Figura 121. Detalle del sistema de aplicación de carga del simulador de tráfico alemán BAST. (AFD40 2011)

La instrumentación de la pista permite tomar los datos de la temperatura del pavimento, las deflexiones, las tensiones verticales aplicadas, y las deformaciones horizontales producidas. Para ello la pista es instrumentada con sensores térmicos, células de presión y medidores de deformación. El inicio y propagación de la fisura se observa visualmente (Figura 122).

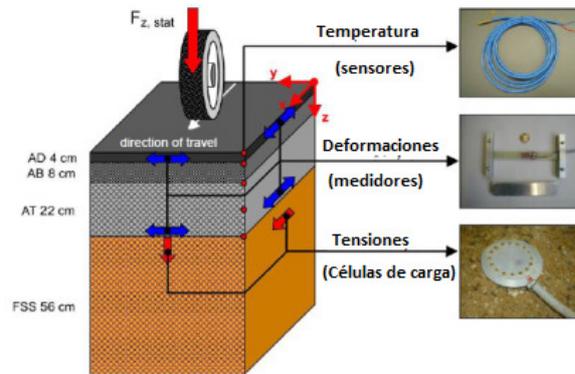


Figura 122. Detalle de la instrumentación de la pista de ensayos del simulador BAST. (AFD40 2011)

Pista de Ensayo Acelerado de Firmes del CEDEX

La pista de ensayos del CEDEX es un simulador de tráfico acelerado a gran escala de tipo mixto (consta de tramos en curva y tramos rectos) con forma ovalada (Figura 123), construido en Madrid el año 1987 (AFD40 2011). La longitud total de la pista de ensayo es de 288 metros, cubierta por dos vehículos capaces de aplicar cargas entre los 110-140 kN (en eje simple doble), a una velocidad que alcanza los 60 km/h (lo que supone una frecuencia de ensayo de 400 pasadas a la hora, que se traducen en unas 100.000 aplicaciones de carga mensuales). El ancho de la pista de ensayos es de 8 metros, mientras que su espesor es de 2 metros.



Figura 123. Detalle de la pista de simulación de tráfico del CEDEX.

Las cargas aplicadas por los dos simuladores de tráfico reproducen con gran fiabilidad los esfuerzos a los que está sometido el firme en la realidad, de manera que tanto el nivel de carga aplicado, como el tipo de neumáticos, sistema de amortiguación, distribución transversal, etc. son idénticos a los vehículos pesados que circulan por nuestras carreteras. Además, con el fin de reproducir un comportamiento lo más cercano posible a los firmes en servicio, el ensayo se lleva a cabo bajo la acción del sol y de la lluvia, permitiendo además la generación de un nivel freático a 1 metro bajo la coronación de las explanadas.

Durante la ejecución del ensayo se realizan auscultaciones periódicas en las que se evalúan las deflexiones del firme, las deformaciones plásticas, la regularidad longitudinal, y la fisuración en superficie (mediante inspección visual y extracción de testigos). Además, esta información se complementa con la proporcionada por 248 sensores embebidos en las diferentes capas del firme construido, que permiten establecer medidas de las tensiones y deformaciones (verticales y horizontales) registradas en cada capa. De esta forma, esta pista de ensayos permite llevar a cabo un estudio bastante aproximado de las diferentes estructuras de firmes ante los fenómenos de fisuración, así como la evaluación de los distintos sistemas y mezclas bituminosas anti-fisuras (geotextiles, geomallas, etc.).

2.4.3. Normativa de Ensayos

A pesar de que la fisuración es una de las principales patologías aparecidas en los firmes de carretera, resulta llamativo que en España el pliego de prescripciones técnicas que regula su construcción (PG-3, DGC 2008), no se incluya ningún ensayo de obligado cumplimiento para garantizar el correcto diseño de las mezclas bituminosas. Por el contrario, otro tipo de patologías comunes como las debidas a deformaciones plásticas (roderas) o las debidas a los efectos provocados por la presencia de agua, si se encuentran reguladas mediante la ejecución de ensayos específicos, y a través de la aplicación de un rango de valores que permiten calificar de aceptable o no el uso de la mezcla.

Para que un método de ensayo sea utilizado en un pliego de prescripciones técnicas como referencia en la evaluación del comportamiento de mezclas bituminosas, es necesario que exista una norma técnica que regule su ejecución. A pesar del número de ensayos desarrollados para evaluar el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, casi ninguno de ellos se encuentra regulado bajo normativa técnica. El hecho de que la mayoría de estos métodos de ensayo hayan sido desarrollados en investigaciones puntuales, con maquinaria sofisticada o con elevadas inversiones económicas, dificultan en gran medida su estandarización y por tanto la generalización de su uso.

Por este motivo, no es posible encontrar una extensa normativa técnica en torno a los métodos de ensayo a fisuración. No obstante, para suplir esta ausencia y establecer alguna referencia al respecto en el estudio de las mezclas bituminosas, recientemente algunos métodos de ensayos han sido objeto de normalización por las series UNE-EN. A continuación se presentan los ensayos de fisuración existentes en nuestro país.

2.4.3.1. Normativa de Ensayos Aplicable en España

UNE-EN 12697-44

En Septiembre de 2011, durante el periodo de ejecución de esta tesis, se llevó a cabo la publicación de una norma de la serie UNE-EN que permite la evaluación de la propagación de fisura por medio del ensayo de flexión con probeta semicircular (UNE-EN 12697-44, AENOR 2011).

Esta norma describe el método de ensayo a flexión de una probeta semicircular, para determinar la resistencia a tracción o resistencia a rotura de una mezcla bituminosa, en la evaluación del potencial para la propagación de fisuras. Así, los resultados obtenidos permiten definir la carga máxima que puede soportar un material que tiene una fisura (en este caso entalla provocada) antes de romperse, y si la presencia de esa fisura resulta crítica o no.

Durante el ensayo únicamente se tiene en cuenta la resistencia de la mezcla bituminosa a la propagación de fisuras, sin analizar la primera fase de iniciación de la misma. El principio utilizado para ello es el descrito anteriormente en el ensayo SCB, en el cual una probeta semicircular que presenta una fisura central se somete a flexión en tres puntos (en la Figura 124 se recoge la geometría del ensayo marcada por la norma). En este caso concreto, la norma marca una aplicación de carga que provoca una deformación a velocidad constante de 5 mm/min, hasta alcanzar un valor de carga máximo (F_{max}), relacionado con la resistencia a rotura de la probeta.

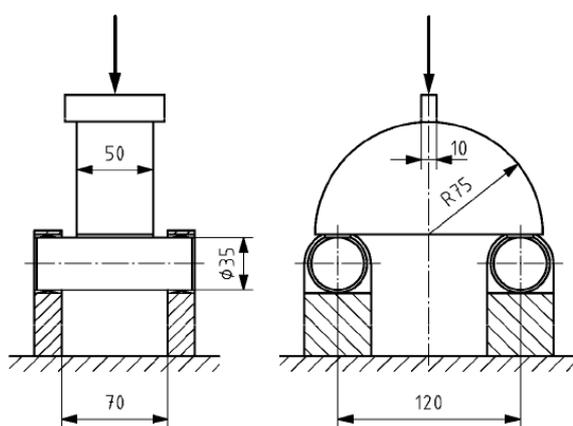


Figura 124. Geometría de ensayo de flexión en probeta semicircular según UNE-EN 12697-44. (AENOR 2011)

Las dimensiones de las probetas a utilizar han de ser de 150 mm de diámetro (D) y 50 mm de espesor (t), sobre las que se realiza una entalla en la zona central de anchura nominal de 0,35 mm y una profundidad nominal (a) de 10 mm (Figura 125). Las probetas se deben acondicionar a la temperatura de ensayo en una cámara climatizada durante al menos 4 horas, recomendando la norma su ejecución a una temperatura de 0 °C.

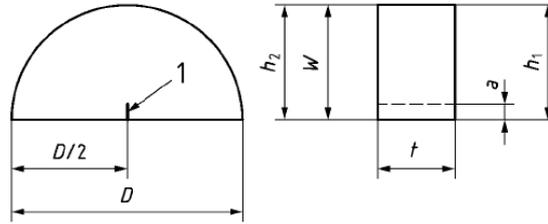


Figura 125. Dimensiones de la probeta a utilizar en norma UNE-EN 12697-44. (AENOR 2011)

El ensayo se considera válido si la fisura termina en una zona situada a ± 15 mm (10% del diámetro de la probeta) del centro de la pletina de carga, sino deberá someterse a ensayo otra probeta (Figura 126). Esta zona de validez resulta necesaria para eliminar los riesgos de dispersión en los resultados, la cual aumenta con el tamaño de los áridos. Así, la norma marca que para poder obtener una evaluación fiable de la propagación de fisuras en la mezcla deberá efectuarse el ensayo sobre cuatro probetas con resultados válidos.

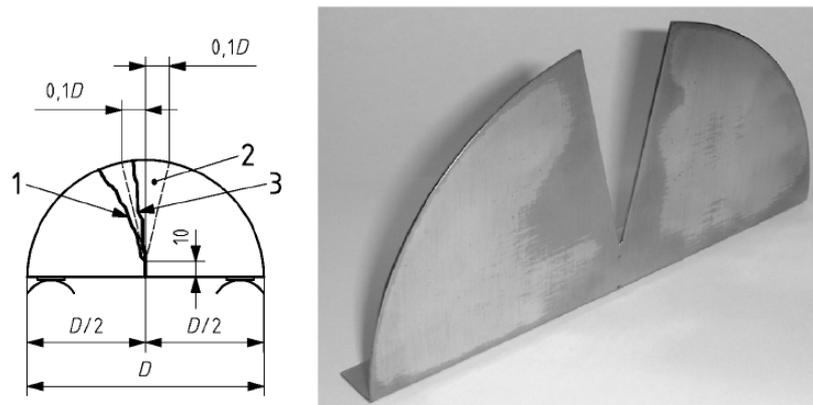


Figura 126. Criterios de validación del resultado del ensayo. (AENOR 2011)

Los resultados a obtener tras la ejecución del ensayo son la fuerza máxima (F_{\max}) y el desplazamiento obtenido a dicha fuerza máxima (ΔW_i), la tensión máxima de rotura (σ_{\max} ;

ecuación 41), la deformación unitaria bajo fuerza máxima ($\varepsilon_{m\acute{a}x}$; ecuación 42), y la resistencia a la rotura (K_{IC} ; ecuación 43).

$$\sigma_{max} = \frac{4,263 * F_{max}}{D * t} N/mm^2 \text{ [Ecuación 41]}$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta W_i}{h} * 100 \% \text{ [Ecuación 42]}$$

$$K_{IC} = \sigma_{max} * f\left(\frac{a}{h}\right) N/mm^2 \text{ [Ecuación 43]}$$

Donde h es la altura de la probeta (en mm), D es el diámetro de la probeta (en mm), t es el espesor de la probeta (en mm), y f(a/h) es el factor geométrico de la probeta obtenido según la Ecuación 44:

$$f\left(\frac{a}{h}\right) = -4,9965 + 155,58 * \left(\frac{a}{h}\right) - 799,94 * \left(\frac{a}{h}\right)^2 + 2141,9 * \left(\frac{a}{h}\right)^3 - 2709,1 * \left(\frac{a}{h}\right)^4 + 1398,6 * \left(\frac{a}{h}\right)^5 \text{ [Ecuación 44]}$$

Para la normalización de este ensayo se llevó a cabo un estudio realizado por 3 laboratorios distintos en el que se ensayaron 9 mezclas del tipo AC16 con betunes de penetración 20/30, 40/60, y 70/100, a una temperatura de 0 °C. Cada laboratorio ensayó 10 probetas de cada mezcla, obteniendo una repetibilidad del ensayo de 2,44 N/mm^{3/2} y una reproducibilidad de 2,49 N/mm^{3/2}, sobre el valor medio de la resistencia a rotura de las mezclas ensayadas.

Al tratarse de un ensayo de reciente normalización, aún no se ha generalizado su empleo en la evaluación del comportamiento ante fisuras de mezclas bituminosas en nuestro país. No obstante, a pesar de que presenta ciertas ventajas como la rapidez y facilidad de ejecución, o la buena repetibilidad y reproducibilidad, su aplicación presenta una serie de limitaciones para evaluar de forma efectiva el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas.

Por un lado, este ensayo permite evaluar la resistencia a rotura de la mezcla y comparar los resultados en términos del esfuerzo a realizar para provocar la propagación de una grieta (así podrá determinarse si una mezcla opone mayor resistencia a la propagación de una grieta que otra). Pero por otro, las condiciones en las que la propagación de la grieta se produce, no tienen demasiada similitud con las que realmente producen dicha propagación en un firme real.

El tipo de carga utilizado en la ejecución del ensayo no se corresponde con el tipo de cargas que provocan la propagación de fisuras en las mezclas bituminosas de un firme. En el ensayo se emplea una carga que provoca una deformación a velocidad constante hasta la rotura de la probeta (sin tener en cuenta la fatiga del material, ni los esfuerzos de cortante aparecidos en el firme), mientras que un firme real las cargas aplicadas (por el paso del tráfico y las variaciones térmicas) provocan pequeñas deformaciones que someten a la mezcla a un proceso de fatiga (debido a esfuerzos cíclicos de flexión, cortante y tracción), que provoca la propagación de la fisura existente.

Por otro lado, la temperatura a la que se lleva a cabo el ensayo (0 °C) no representa las condiciones reales a las que comúnmente se encuentra una mezcla bituminosa en un firme, de forma que ésta se comporta de manera más elástica (volviéndose más rígida y frágil), minimizando la respuesta visco-elástica que realmente tienen las mezclas bituminosas. Además, este ensayo no permite analizar la fase de inicio de la fisura, solo la de propagación, por lo que se pierde información importante en la evaluación del comportamiento de la mezcla bituminosa ante este fenómeno.

En el mismo sentido, dentro de esta fase de propagación, tampoco analiza el proceso en sí (velocidad de propagación, energía disipada, etc.), de forma que es imposible evaluar cómo se propaga la fisura, y por tanto el comportamiento entre varias mezclas. Finalmente, en lo que se refiere a la forma de la probeta y geometría del ensayo, no permite el estudio de materiales compuestos (más de un tipo de mezclas simulando un paquete de firmes, o el ensayo de un sistema anti reflexión de fisuras). De esta forma, el ensayo sobre probeta semicircular podría referirse más como un ensayo para evaluar la tenacidad y/o ductilidad de la mezcla bituminosa, que como un ensayo que permita propiamente analizar su comportamiento ante el fenómeno de fisuración.

prEN 12697-46

Además de la norma UNE-EN 12697-44, actualmente se está desarrollando un proyecto de norma (prEN 12697-46, en nuestro país pendiente de aprobación, pero en otros países de la unión ya vigente BSi 2012), que tiene por objeto la descripción de ensayos de tensión uniaxial para la caracterización de la resistencia de mezclas bituminosas ante el fenómeno de fisuración por efecto de las bajas temperaturas. Esta nueva norma está basada en el ensayo de resistencia a tracción descrito por la norma AASHTO TP10-93 (presentado anteriormente), y puede ser utilizada para:

- La evaluación de la resistencia a tracción en función de la temperatura (Uniaxial Tension Stress Test, UTST). Para lo cual una probeta acondicionada a cierta temperatura, se somete a un incremento de deformación constante hasta su rotura, de forma que se miden los valores máximos de deformación y tensión alcanzados (Figura 127).

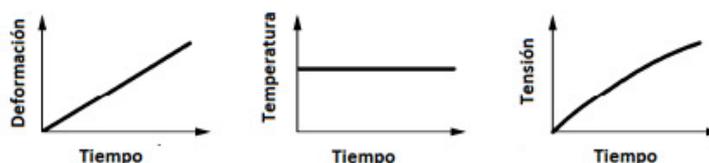


Figura 127. Principio de ensayo UTST. (BSi 2012)

- El cálculo de la mínima temperatura que una mezcla puede soportar antes de provocar su fallo a fisuración (Thermal Stress Restrained Specimen Test, TSRST). Para ello se somete una probeta de mezcla bituminosa a un descenso constante de temperatura, manteniendo fija su longitud, de manera que se impide su retracción térmica, apareciendo por tanto tensiones crecientes que terminan provocando el fallo de la misma (Figura 128).

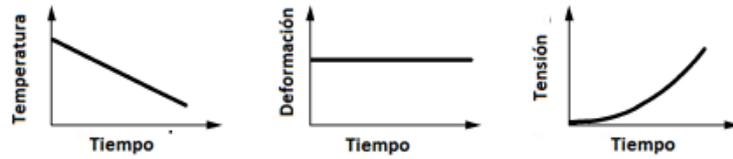


Figura 128. Principio de ensayo TSRST. (BSi 2012)

- El cálculo del tiempo de relajación de la mezcla (Relaxation Test, RT). El cual se obtiene tras someter a una probeta de mezcla bituminosa a una deformación constante a temperatura constante, tras la cual se mide el descenso de tensión producida en la misma, anotando el tiempo necesario para alcanzar la tensión residual (tiempo de relajación) y el valor de dicha tensión (Figura 129).

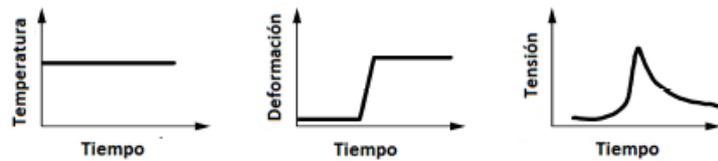


Figura 129. Principio de ensayo RT. (BSi 2012)

- La obtención de la curva de fluencia para calcular los parámetros reológicos de la mezcla (Tensile Creep Test, TCT). Para ello la probeta de mezcla bituminosa se somete a una tensión constante a una temperatura constante, y se mide la progresión de la deformación. Tras un tiempo determinado se libera la tensión, y mediante el análisis de la deformación se determinan los parámetros reológicos que describen las propiedades elásticas y viscosas de la mezcla bituminosa (Figura 130).

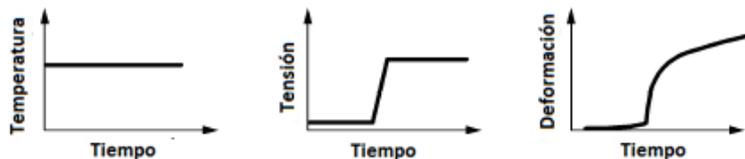


Figura 130. Principio de ensayo TCT. (BSi 2012)

- La evaluación de la resistencia a fatiga de una mezcla bituminosa debida a ciclos de baja temperatura ((Uniaxial Cyclic Tension Stress Test, UCTST). El principio de ensayo empleado es igual al utilizado en el UTST, solo que en lugar de aplicar una deformación creciente constante, se aplican ciclos de deformación (Figura 131).

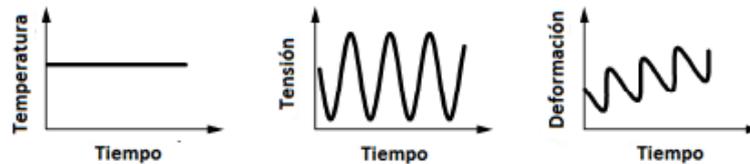


Figura 131. Principio de ensayo UCTST. (BSi 2012)

Las dimensiones de las probetas a utilizar serán de 40 x 40 x 160 mm o 60 x 60 x 250 mm en el caso de las prismáticas, y de 40 o 60 mm de diámetro y 160 o 250 mm de altura, para el caso de las probetas cilíndricas. El equipo utilizado para la ejecución de estos ensayos se compone de una cámara térmica (capaz de alcanzar un rango de temperaturas de entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$), un sistema de gatos hidráulicos capaces de aplicar deformaciones o mantener la probeta con un determinado tamaño, y varios medidores de deformación LVDT que son adheridos al cuerpo de la probeta (Figura 132, Cooper Technology 2012). Además, para alcanzar las temperaturas de ensayo se utiliza nitrógeno líquido.



Figura 132. Equipo Cooper para ejecución de la normativa EN 12697-46. (Cooper Technology 2012)

A pesar de que la aparición de esta nueva normativa de ensayo va a permitir obtener información útil en el estudio del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, como ya ocurriera en el caso de la UNE-EN 12697-44, tampoco termina de adaptarse completamente a las necesidades requeridas para el estudio de las mezclas ante este fenómeno. Por un lado, las cargas aplicadas en el ensayo son uni-axiales (cosa que no ocurre en un firme real), por lo que los esfuerzos recibidos por la probeta son diferentes a los recibidos las mezclas bituminosas durante su vida de servicio. Por otro lado, tampoco permite estudiar el proceso de propagación de la fisura en la mezcla, de forma que se pierde información importante sobre el comportamiento del material. Por su parte, la temperatura de ensayo no resulta la más idónea, ya que los ciclos de frío suelen llevarse a cabo entre los $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperaturas en las que la mezcla se encuentra totalmente rígida y no se analiza su comportamiento visco-elástico real). Además, la forma de la probeta y geometría del ensayo, no permite el estudio de materiales compuestos.

2.5. Conclusiones al Estudio del Estado del Arte. Motivación de la Tesis

El estudio del estado del arte presentado constituye el punto de partida para el desarrollo de la investigación llevada a cabo durante esta tesis doctoral. En esta revisión de conocimientos se ha analizado el fenómeno de fisuración en firmes de carreteras, centrándonos en el estudio del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas, y más concretamente en los sistemas de evaluación de estos materiales a nivel de laboratorio.

A pesar de que en la actualidad existen numerosos tipos de actuaciones para paliar su efecto, el fenómeno de fisuración por fatiga sigue siendo una de las patologías que mayor impacto provocan en los firmes de carreteras de todo el mundo. Estas actuaciones son muy variadas y pueden llevarse a cabo sobre la capa de base, sobre el conjunto del pavimento, o sobre las propias capas de mezcla bituminosa que lo conforman. De entre este conjunto de actuaciones, el empleo de materiales que presenten una resistencia superior a la

propagación de fisuras se presenta como la más efectiva para la concepción de pavimentos más duraderos (de manera que se abogue por soluciones preventivas utilizando materiales más resistentes que retarden la aparición de la patología, en lugar de actuaciones paliativas que den solución a los problemas ya surgidos). En este sentido, el análisis del comportamiento mecánico y diseño de mezclas bituminosas a nivel de laboratorio juega un papel fundamental, puesto que permitirá desarrollar materiales con mayor capacidad resistente antes de ser utilizados en el firme.

A lo largo de los últimos años, los estudios en torno al comportamiento mecánico de mezclas bituminosas han centrado los esfuerzos de numerosos investigadores, lo que ha permitido que los conocimientos sobre el comportamiento a fatiga, “healing” o propagación de fisuras en este tipo de materiales hayan evolucionado mucho. Actualmente se conocen herramientas teóricas de mayor precisión como el estudio de la energía disipada o la capacidad de recuperación de las mezclas, que permiten precisar bastante su comportamiento a fatiga. Por otra parte, los modelos de comportamiento se encuentran mejor adaptados a la respuesta visco-elástica del material, permitiendo un análisis de la evolución del daño más acorde con la realidad. Estas circunstancias han permitido que el diseño de este tipo de materiales a nivel de laboratorio haya mejorado de manera muy considerable.

De la misma forma, los métodos de ensayo desarrollados para la evaluación del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas también han experimentado un avance muy significativo. Estos métodos de ensayos permiten reproducir, en mayor o menor medida, las condiciones ambientales y tensionales a las que están sometidas las mezclas bituminosas durante su vida de servicio y que provocan el desarrollo de fenómeno de fisuración. En este sentido, suponen una herramienta fundamental para el estudio de estos materiales puesto que permiten establecer unos criterios de diseño a partir de los cuales se analizará su comportamiento empleando los fundamentos teóricos anteriormente citados.

A pesar de que todos los ensayos existentes ofrecen gran información y son muy útiles en el estudio del comportamiento mecánico de las mezclas, existen ciertos condicionantes que de mayor o menor forma, pueden llegar a limitar su empleo en la evaluación a fisuración de estos materiales:

- **Geometría de Ensayo**

En los ensayos a fisuración de materiales simples, la disposición y geometría de las probetas no siempre son las más adecuadas. A pesar de que la forma y dimensiones de las probetas suelen ser bastante adecuadas (lo cual garantiza la homogeneidad de un ensayo a otro), podemos encontrar desde ensayos sobre probetas cilíndricas cargadas diametralmente en los que la fisura se propaga en el mismo sentido que la aplicación del esfuerzo de compresión (a tracción indirecta), ensayos con probetas prismáticas cargadas uni-axialmente a tracción directa, o probetas semicirculares sometidas a esfuerzos de flexión o tracción, que no reproducen de forma real los estados tensionales ocurridos durante la propagación de la fisura en el pavimento (en ninguno de estos ensayos suelen aparecer situaciones de esfuerzos combinados como los que provocan el fenómeno de fisuración en un firme real). Además, la mayoría de estos ensayos no permiten evaluar probetas compuestas por más de un tipo de mezcla, o por un sistema anti-remonte de fisuras.

En cuanto a los ensayos sobre sistemas complejos, además de permitir ensayar probetas con varios tipos de mezclas y sistemas anti-fisuras, en su mayoría llevan a cabo una distribución tensional similar a la ocurrida en el firme. Así, encontramos ensayos que simulan las cargas del tráfico, ensayos que simulan los efectos de las variaciones térmicas, ensayos mixtos (que simulan ambos tipos de efectos, ejerciendo esfuerzos de flexión, cortante y tracción), y ensayos a escala que simulan el paso del tráfico rodado. Su mayor limitación es que gran parte de las probetas utilizadas en este tipo de ensayos suelen tener dimensiones difíciles de reproducir (ya sea por su forma o tamaño), lo cual puede inducir variables en los resultados de una probeta a otra (en el caso de los ensayos a escala suelen construirse pequeños

tramos de carretera, cuyas condiciones pueden variar mucho de un tramo a otro, aunque las condiciones de ensayo sean las mismas), y tiempos efectivos de ejecución de ensayo considerablemente largos. Otra cuestión abordable sería la evaluación de cuál de ellos simula de forma más fehaciente las solicitaciones reales ocurridas en el firme, lo cual resulta complicado de definir debido a que la mayoría de estos ensayos carecen de experiencias de contraste con mezclas utilizadas en firmes reales.

- **Condiciones de Carga**

Por una parte, la mayoría de las cargas utilizadas en la mayor parte de los ensayos a fisuración de materiales simples suelen ser monotónicas (el escalón de carga y/o deformación se va incrementando hasta provocar el fallo de la probeta), de forma que la aparición de la fisura no aparece por un proceso de fatiga. Por otra, la mayoría de los que aplican cargas cíclicas, más que ensayos de evaluación a fisuración, son básicamente ensayos a fatiga, los cuales tampoco tienen en cuenta los niveles de amplitud de carga y frecuencias más adecuadas a utilizar. Por este motivo muchos de estos ensayos, a pesar de ofrecer una información valiosa para el análisis del comportamiento de la mezcla bituminosa, no terminan de ser del todo adecuados para medir su resistencia a fisuración.

Los ensayos sobre materiales complejos proporcionan una adaptación más precisa de las condiciones de aplicación de carga, pero a pesar de ello también existen limitaciones como por ejemplo en los ensayos que simulan el paso del tráfico rodado a escala, los cuales no son capaces de alcanzar las velocidades reales de circulación y por tanto, la frecuencia de aplicación de la carga no se ajusta a la realidad.

Además, tradicionalmente ninguno de los ensayos desarrollados para analizar el fenómeno de fisuración en mezclas bituminosas ha tenido en cuenta la aplicación de periodos de descanso para analizar los fenómenos de "healing". Si bien es verdad, esta tendencia ha ido variando en los últimos años, y cada vez van encontrándose

mayores estudios al respecto, aunque la mayoría, únicamente en el campo del análisis a fatiga del material y no específicamente en el de fisuración.

- **Condiciones de ensayo**

La tendencia habitual de los ensayos a fisuración de mezclas bituminosas (tanto sobre materiales simples, como complejos) suele ser aplicar unas condiciones de ensayo favorables para la pronta aparición y propagación de la fisura, sin centrarse en si éstas reproducen el entorno real de la mezcla durante su vida de servicio. Así, la mayoría de los ensayos existentes se hacen a temperaturas relativamente bajas, en las cuales las mezclas se comportan de forma más rígida, sin tener en cuenta el análisis del proceso de fisuración durante su estado visco-elástico. Por otra parte, estos ensayos no suelen realizarse bajo condiciones de humedad, por lo que no se analiza el efecto que ejerce el agua sobre el comportamiento a fisuración de la mezcla. Así, sería interesante estudiar la influencia que ejerce el agua sobre factores como la cohesividad de la mezcla o la adhesividad árido betún, que tanto influyen el proceso de fisuración.

En este sentido, hemos de destacar que los ensayos que utilizan simuladores a gran escala, al ser realizados normalmente a la intemperie, permiten una reproducción de los efectos medio-ambientales real, y por tanto las condiciones de ensayo son las idóneas (con ciclos térmicos y de humedad reales). Por otra parte, también existen determinados ensayos desarrollados en laboratorio permiten reproducir las condiciones térmicas y de humedad deseadas durante el tiempo de ensayo.

- **Instrumentación y toma de datos**

En los ensayos existentes para materiales simples suele ser bastante común analizar la deformación y la tensión sufrida por la probeta, al menos en uno de los sentidos, durante todo el ensayo. Menos común, dado en parte a que también es menos frecuente la aplicación de cargas cíclicas en este tipo de ensayos, es la toma de datos del ángulo de fase entre la tensión y la deformación, lo cual proporcionaría buena

información sobre la histéresis del material. Por otra parte, la visualización de la evolución de la fisura suele llevarse a cabo en casi todos (aunque en algunos no da tiempo a estudiarla ya que aplican una carga monotónica que provoca una rápida propagación de ésta), ya sea visualmente (ayudada en muchas ocasiones mediante un fondo de pintura blanca y una escala de referencia) o mediante la grabación del proceso en video y la toma de fotos. Este hecho resulta de gran utilidad, pero no es un factor imprescindible ya que solo es capaz de registrar la evolución de macro-fisuras exteriores, sin tener en cuenta las micro-fisuras ni las ocurridas en el interior de la probeta. Además, en la mayoría de las ocasiones, dichos ensayos solo comprenden el estudio de la fase de propagación de la fisura y fallo de la probeta, ya que éstas suelen poseer una entalla inicial que simula una fisura ya existente.

En relación a los ensayos sobre sistemas complejos, al ser más sofisticados tienen una mejor instrumentación y un sistema más preciso de adquisición de datos. Así, encontramos ensayos en los que se registran valores de deformaciones tanto verticales como horizontales, e incluso en varios puntos de la probeta o sección de firme a escala (como es el caso de los ensayos simuladores de tráfico a gran escala, que suelen estar muy bien instrumentados). Además, también es común la adquisición del valor del ángulo de fase y de la evolución de la fisura, ya sea mediante la colocación de galgas extensométricas en el camino de la misma, y/o mediante su visualización (comúnmente con toma de imágenes). En muchas ocasiones, estos ensayos tampoco permiten analizar la fase de inicio de fisura ya que las probetas son fabricadas con una entalla para agilizar el proceso de fisura. A pesar de ello, la aplicación de cargas cíclicas permite un crecimiento paulatino por fatiga del tamaño de la fisura y por tanto una mejor apreciación de su evolución.

- **Tratamiento de datos y análisis de resultados**

La mayoría de los ensayos presentados para el análisis de los fenómenos de fisuración en mezclas bituminosas se basan en la teoría clásica de la mecánica de la fractura o en el enfoque fenomenológico tradicional, que como hemos visto a lo

largo del capítulo, presentan ciertas limitaciones. Por otra parte, la teoría más comúnmente empleada en estos ensayos para analizar el proceso de propagación de la fisura es el modelo clásico, cuyos criterios están basados en que la deformación plástica ocurrida en el material es despreciable, y por tanto, no pueden describir el comportamiento de un material si la zona de fractura es considerable en comparación con el tamaño de la fisura. Debido a ello, para materiales que no son elasto-frágiles como las mezclas bituminosas, el modelo tiene algunas limitaciones. Además, el uso de la ley de Paris implica que la fisura se va a propagar desde su inicio como una discontinuidad plana a través del material elástico frágil, basándose en la teoría de mecánica de la fractura elástica lineal (sin considerar el paso por el estado plástico antes de alcanzar su límite elástico).

Además, la mayoría de los ensayos existentes tampoco tiene en cuenta el empleo de un modelo que permita considerar el daño por fisuración como un proceso aleatorio y disperso en las 3 dimensiones, que implique la degradación del material a diferentes escalas: micro, meso y macro-fisuras.

- **Reproducibilidad y repetibilidad**

Los ensayos a fisuración sobre materiales simples, al tener un nivel de sofisticación menos elevado, suelen presentar un alto grado de reproducibilidad y repetibilidad. El hecho de no aplicar esfuerzos combinados (en la mayoría de los casos), y utilizar geometrías de ensayo sencillas, contribuye de forma directa a que los resultados de un ensayo a otro, o entre varios centros de investigación, sean homogéneos. A pesar de que en muchas ocasiones no resultan los ensayos más adecuados para el análisis del comportamiento a fisuración de la mezcla, su uso se ha extendido de forma habitual, e incluso han sido objeto de normalización (como el caso del ensayo a flexión semi-circular).

Al contrario que en el caso anterior, los ensayos sobre materiales complejos, suelen tener un alto grado de sofisticación (suelen aplicar esfuerzos combinados, y la geometría de ensayo suele ser más compleja), de forma que su grado de

reproducibilidad y repetibilidad puede verse afectado. Por una parte, la mayoría de estos ensayos han sido desarrollados en el marco de una investigación concreta, bajo unas condiciones específicas para testar el comportamiento de algún material definido. Por otra, los prototipos de ensayo desarrollados para su ejecución suelen estar compuestos de maquinaria sofisticada (difíciles de reproducir en otros centros diferentes a donde fueron desarrollados), así como de probetas o secciones de ensayos complejas (que hacen que las características de una probeta o sección a otra varíen de forma significativa). De esta forma, podemos decir que los ensayos desarrollados sobre materiales complejos tienen un ámbito de uso más limitado, y por tanto, un bajo nivel de contraste de su repetibilidad y reproducibilidad.

- **Coste económico**

Si analizamos los ensayos existentes para evaluar la fisuración en mezclas bituminosas, podemos decir que la mayor parte de los ensayos a escala de simulación de tráfico rodado tienen un gran lastre en este sentido (suelen requerir una instalación de grandes dimensiones, el empleo de maquinaria muy costosa, la construcción de secciones de firme, etc.). Por otra parte, los ensayos de laboratorio sobre materiales complejos también suelen incurrir en costes elevados, ya que suelen utilizar equipos de registros de datos sofisticados, diferentes equipos para la aplicación de las cargas, geometrías de probetas, marcos de ensayo y fijaciones especiales, etc. (hecho que también ha contribuido en la baja generalización de su empleo). Así, son los ensayos sobre materiales simples los que presentan un coste económico más favorable, de ahí que este aspecto también haya contribuido de forma directa con su mayor grado de utilización.

Debido a estos condicionantes, en la actualidad ninguno de los métodos de ensayo presentados en el estudio del estado del arte se emplea de forma generalizada en el análisis de la resistencia a fisuración por fatiga en mezclas bituminosas. Al contrario de lo que ocurre en otras patologías igualmente habituales como las roderas o las afectadas por la

acción del agua (en las que si existen ensayos extendidos como el de “wheel tracking” o “sensibilidad al agua”), en el caso de la fisuración por fatiga no existe un ensayo de referencia comúnmente aceptado, que permita establecer unos criterios estándares en el diseño de estos materiales. Este hecho incide de manera directa en el desarrollo de este tipo de materiales, puesto que no es posible comparar la respuesta mecánica de las mezclas bajo un patrón común.

Para poder combatir de manera más eficiente la fisuración por fatiga en firmes de carretera, sería interesante un método de ensayo de laboratorio que permita dar solución a los condicionantes presentados anteriormente. El desarrollo de una herramienta de estas características, podría suponer un primer paso para establecer unos criterios de diseño comunes, que garanticen un nivel de resistencia de los materiales bituminosos ante el fenómeno de fisuración por fatiga.

Basándonos en estas premisas, se decide llevar a cabo la presente tesis doctoral **“Diseño de un método de ensayo de laboratorio para el análisis de la resistencia a fisuración de mezclas bituminosas”**, en la que se ha desarrollado el método de ensayo **“UGR-FACT: University of Granada – Fatigue Asphalt Cracking Test”**.

OBJETIVOS / OBJECTIVES

3. OBJETIVOS

3.1. Introducción

Durante el desarrollo del capítulo anterior se ha puesto de manifiesto la problemática existente en torno al fenómeno de fisuración en firmes de carreteras. De entre las diferentes soluciones existentes contra esta patología, el empleo de materiales que permitan la construcción de firmes más duraderos se presenta como una de las más efectivas. Debido a ello, en los últimos años se están llevando a cabo esfuerzos por desarrollar mezclas bituminosas que presenten una mayor resistencia a fisuración por fatiga. Así, a nivel de laboratorio se está trabajando en la optimización del diseño de este tipo de materiales, buscando unas características resistentes que les permitan soportar un mayor número de años de servicio sin fisurar.

Para poder mejorar el diseño de este tipo de materiales resulta necesario perfeccionar los métodos de ensayo de laboratorio con el fin de efectuar una evaluación más efectiva ante esta patología. En este sentido, dicho ensayo deberá tener en cuenta la problemática asociada a los condicionantes expuestos en el anterior apartado del estudio del estado del arte.

3.2. Objetivo Principal

En base a las circunstancias anteriormente expuestas, se establece como objetivo principal de la presente investigación **desarrollar un método de ensayo de laboratorio para el análisis de la resistencia a fisuración de mezclas bituminosas.**

El desarrollo de un método de ensayo de estas características capaz de cumplir con una serie de condicionantes técnicos y económicos, puede permitir el establecimiento de una serie de criterios en la evaluación del comportamiento mecánico y diseño de mezclas

bituminosas, que ayuden a mejorar la respuesta de estos materiales ante el fenómeno de fisuración por fatiga.

Podemos decir por tanto, que la consecución de dicho objetivo principal se concreta en el logro de unos objetivos secundarios que marcarán el desarrollo y las etapas a seguir durante la investigación.

3.3. Objetivos Secundarios

El objetivo principal de la presente tesis doctoral se concreta en los siguientes objetivos secundarios:

1. Diseño de un dispositivo de ensayo con el que llevar a cabo la ejecución del método de ensayo.

Definición de una geometría del dispositivo de ensayo adecuada, que sea capaz de garantizar un estado tensional similar al ocurrido en el firme. Además, las características de dicho dispositivo deben de poder garantizar la evaluación tanto de materiales simples, como compuestos por varios tipos de mezclas y/o sistemas anti-reflexión de fisuras.

2. Definición de las características del método de ensayo.

Definición de las dimensiones de las probetas a evaluar, de manera que permitan su fácil fabricación y manipulación, sin necesidad de un consumo excesivo de material para no incurrir en costes económicos elevados. Además, las características de las probetas fabricadas deben ser lo más homogéneas posibles, de forma que se garantice una buena reproducibilidad de su comportamiento mecánico.

Definición de las condiciones de ensayo de forma que traten de reproducirse en la medida de lo posible las sufridas por este tipo de materiales durante su vida de servicio. Este hecho implica desde la definición de las frecuencias, amplitudes y

forma de la carga a aplicar, hasta las temperaturas de acondicionamiento, grado de envejecimiento del material o condiciones de humedad.

Definición de la instrumentación del ensayo y de la toma de datos para una correcta evaluación de todo el proceso de fisuración ocurrido en el material.

3. Definición del método de evaluación del comportamiento a fisuración.

Definición de la teoría a utilizar para el estudio y evaluación del comportamiento a fisuración por fatiga de los materiales estudiados.

4. Validación del método de ensayo desarrollado.

Evaluación de la repetibilidad y reproducibilidad, así como de la sensibilidad ante diversas condiciones de ensayo y para evaluar diferentes tipos de materiales, de manera que se garantice su empleo para analizar el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas.

3. OBJECTIVES

3.1. Introduction

The previous chapter provided a detailed discussion of the problems related to fatigue cracking in road surfaces. Of the possible solutions for this pathology, the use of high-quality materials that allow the construction of more durable road surfaces is one of the most effective. In recent years, there have been significant efforts to create stronger and more resistant asphalt mixes with a better response to fatigue cracking. In the laboratory, research is currently being carried out to optimize the mix design with durable materials that will give road surfaces a longer service life.

In order to improve the design of this type of material, it is necessary to perfect laboratory test methods with a view to a more accurate evaluation of the characteristics of asphalt mixes in regards to fatigue cracking. In this sense, this test should take into account the problems associated with the conditioning factors discussed in Chapter 2.

3.2. Main Objective

Based on the previously described circumstances, the main objective of this research was to **develop a test method for the analysis of the response of asphalt mixes to fatigue cracking.**

The development of a test method that takes into account certain technical and economic conditions can lead to the specification of a set of criteria for the evaluation of the mechanical performance and design of bituminous mixes that improve their response to fatigue cracking.

The following list of secondary operational objectives marks the development and phases followed during the research.

3.3. Secondary Objectives

The main objective in this doctoral thesis had the following secondary operational objectives:

1. To design of a test device for the testing procedure

Specification of the characteristics of a test device, capable of simulating the same stresses sustained by the road surface. Moreover, the characteristics of this device should guarantee the evaluation of individual materials as well as materials composed of various types of mix and/or anti-reflective cracking systems.

2. To outline and specify the parameters of the test method

Specification of the dimensions of the test specimens so as to facilitate their manufacturing and handling. This should be accomplished without an excessive consumption of material in order to reduce costs. Furthermore, the characteristics of the specimens should be as homogeneous as possible in order to guarantee a good reproducibility of their mechanical performance.

Specification of the dimensions of the test specimens so as to facilitate their manufacturing and handling. This should be accomplished without an excessive consumption of material in order to reduce costs. Furthermore, the characteristics of the specimens should be as homogeneous as possible in order to guarantee a good reproducibility of their mechanical performance.

Specification of test conditions so as to replicate the same conditions sustained by the pavement during its service life. This involves the definition of frequencies, amplitudes, applied loads, temperatures, degree of ageing of the material, and degrees of moisture.

Specification of test instruments and data collection methods for an accurate evaluation of the cracking process in the material.

3. To define and justify the theoretical foundations for the test method

Specification of the theory used for the study and evaluation of mix response to fatigue cracking.

4. To validate the test method

Evaluation of the replication of the method as well as its sensitivity to various test conditions and different types of material with a view to validating its usefulness for analyzing the response of asphalt mixes to fatigue cracking.

METODOLOGÍA

4. METODOLOGÍA

4.1. Introducción

En este capítulo se expone la metodología seguida en el desarrollo de la investigación, con objeto de alcanzar los diferentes objetivos propuestos. Las fases de la investigación se estructuran y ordenan de manera cronológica, coincidiendo con los objetivos marcados en el capítulo anterior. En primer lugar será necesario desarrollar el utillaje sobre el que se va a evaluar el comportamiento mecánico del material. Así, en una primera etapa se llevará a cabo el diseño del dispositivo a utilizar para la ejecución del ensayo. Esta fase comprende tanto la definición de las características geométricas del dispositivo, como de su funcionamiento mecánico para inducir sobre la probeta los esfuerzos necesarios que provoquen su daño a fisuración por fatiga.

Posteriormente será necesario definir las características del método de ensayo con el que se evaluará el comportamiento a fisuración de la mezcla. Dichas características engloban desde los materiales a utilizar en el mismo, hasta los parámetros de frecuencia, amplitud y tipo de carga, así como las condiciones de temperatura de ensayo, humedad o grado de envejecimiento. Además, en esta etapa de la investigación deberán definirse otro tipo de aspectos fundamentales como son la instrumentación y la toma de datos a realizar durante el mismo, y el criterio de fin de ensayo.

Una vez definido el dispositivo a utilizar y las características del ensayo, es necesario determinar el método que se va a emplear para la evaluación del comportamiento a fisuración por fatiga de las mezclas bituminosas. En la tercera etapa de la metodología se definirá por tanto la teoría para el estudio y tratamiento de los datos obtenidos durante el ensayo, así como los criterios de evaluación del comportamiento a fisuración de la mezcla.

Finalmente, en la última etapa de la metodología será necesario validar el método de ensayo desarrollado, de manera que se valore si cumple con los objetivos propuestos en el apartado anterior. Para ello se evaluarán las condiciones de repetibilidad del ensayo, así

como su sensibilidad en el análisis del comportamiento a fisuración de diferentes tipos de materiales y bajo diferentes condiciones de ensayo.

4.2. Diseño del Dispositivo de Ensayo

4.2.1. Condicionantes de Diseño

En este apartado se definen los condicionantes que marcarán el diseño del dispositivo a desarrollar para llevar a cabo la ejecución del método de ensayo UGR-FACT. En primer lugar se debe tener en cuenta que el método de ensayo ha de ser capaz de evaluar el comportamiento de materiales simples y compuestos. De esta forma el dispositivo debe tener una funcionalidad total, permitiendo ensayar desde mezclas bituminosas de manera individual, hasta paquetes de firme compuestos por varios tipos de mezclas, o por algún tipo de sistema anti-fisura (geotextil, geomalla, etc.).

Por otra parte, las características geométricas del dispositivo deben permitir la evaluación de probetas de diferentes tamaños y espesores, de forma que pueda estudiarse el comportamiento de materiales compactados en laboratorio y también testigos tomados de obra. Además, hay que tener en cuenta que para que el dispositivo diseñado sea de utilidad, sus dimensiones totales deben ajustarse dentro de unos valores que faciliten su manejo y adaptación a los útiles que existen comúnmente en laboratorio (marcos de ensayo, cámaras climáticas, etc.), para no incurrir en un incremento de costes debido a su instalación.

En cuanto a consideraciones geométricas se refiere, el dispositivo de ensayo debe ser sencillo de fabricar, de manera que su reproducción sea fiable y no induzca variabilidad en los resultados de un dispositivo a otro. Asimismo, la inversión económica realizada en su fabricación no ha de ser demasiado elevada, ya que de lo contrario esto supondría un hándicap para la generalización de su uso (como ya ha ocurrido con otros de los dispositivos de ensayo estudiados durante el estado del arte).

Además de los condicionantes anteriores, el funcionamiento mecánico del dispositivo diseñado debe de ser capaz de inducir sobre el material ensayado un proceso de fisuración

por fatiga controlado, simulando en la medida de lo posible las condiciones reales que tienen lugar durante su vida de servicio en el firme. Para ello, las probetas se dispondrán en el dispositivo de ensayo de forma horizontal, aplicando cargas que simulen los efectos del tráfico en dirección vertical (flexión y cortante), y a su vez que simulen los efectos de los gradientes térmicos en dirección horizontal (tracción). Con esta disposición se garantiza que la propagación de las fisuras sea en dirección vertical, tal y como ocurre en el firme en la realidad (Figura 133), permitiendo evaluar desde el comportamiento de sistemas anti-fisuras, hasta la influencia de la adherencia entre capas.

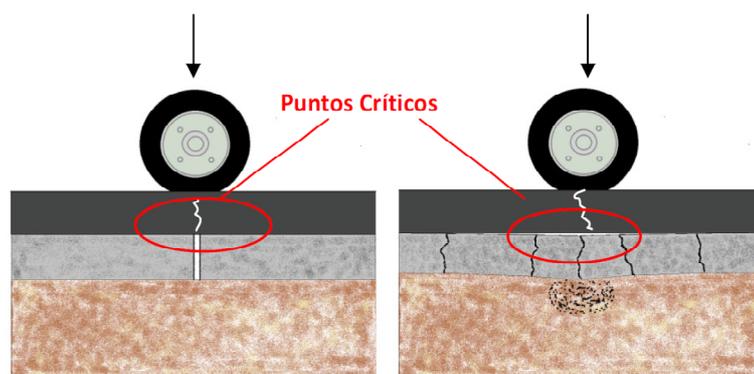


Figura 133. Puntos desfavorables que aceleran la aparición de fisuras en el pavimento.

Finalmente, tanto el inicio como la propagación de la fisura debe ser un proceso controlado, de manera que permita estudiar su evolución de forma precisa. En este sentido, muchos ensayos no definen bien la zona de aparición de la fisura, o las fisuras aparecen desdobladas y/o ramificadas, lo que dificulta en gran medida el análisis del fenómeno. Así, el estado tensional producido en la probeta debe favorecer el inicio de la fisura en una zona definida a partir de la simulación de un punto de debilidad (sin necesidad de la ejecución de una entalla, ya que en este caso la fisura no aparecería por un estado tensional desfavorable, sino por una disminución de la sección resistente del material). Resultará interesante la reproducción de la presencia de imperfecciones como las de las capas inferiores del pavimento (fisuras de retracción térmica o baches provocados por fallos en la capacidad portante de la base granular) o de juntas de dilatación o pre-fisuras (utilizadas para mitigar

y controlar la aparición de fisuras), que provoquen la presencia de puntos críticos en los que la concentración de las tensiones se acentúe (Thom 2008), propiciando la aparición de este fenómeno (Figura 133).

4.2.2. Diseño del Prototipo

En base a las consideraciones establecidas en el apartado anterior, y aprovechando las ventajas que aportan algunos de los ensayos de fisuración ya existentes, se llevó a cabo el diseño del prototipo del dispositivo de ensayo desarrollado en esta investigación. En primer lugar, antes de definir sus dimensiones, es necesario determinar el mecanismo de funcionamiento a utilizar para simular el estado tensional producido sobre la mezclas durante su vida de servicio.

Para poder inducir tensiones de cortante y de flexión que reproduzcan las condiciones de carga transmitidas por el paso del tráfico, así como las de tracción debido a los efectos térmicos, es necesario provocar sobre la probeta movimientos tanto en sentido vertical como en horizontal. Esta técnica ya ha sido la empleada con éxito por algunos de los ensayos de simulación mixta existentes en la actualidad como los desarrollados en el LRPC (MEFISTO, SIFIRE y retracción-flexión), en la Universidad de Nottingham, en la de Delft o en la Politécnica de Madrid. A pesar de ello, los mecanismos empleados para inducir dichos movimientos son bastantes sofisticados y sería interesante simplificar las características del dispositivo de manera que permita la ejecución de ensayos más sencillos como los llevados a cabo en la UPC (EBADE y Fénix).

Dado que el principal parámetro de diseño de mezclas y dimensionamiento de los firmes son las cargas inducidas por el tráfico, se consideró necesario primar el efecto de éstas, frente a las tensiones transmitidas como consecuencia de los gradientes térmicos (las cuales además son muy variables en función de las condiciones climáticas de la zona). Por otra parte, el mecanismo utilizado en la Universidad Técnica de Viena, a pesar de tratarse de un ensayo monotónico que no induce un proceso de fatiga sobre el material, permite de

manera simple y efectiva transmitir parte de una carga de componente vertical en componente horizontal.

A partir de ambos conceptos surge la idea para definir el mecanismo de funcionamiento del dispositivo. Así, el dispositivo de ensayo diseñado basa su mecanismo en una carga vertical controlada que simule los efectos del paso del tráfico, la cual gracias a la geometría del dispositivo puede transformarse en tensiones de tracción de componente horizontal (que contribuyan a reproducir los efectos térmicos). Para ello, se pensó en un sistema de transmisión de carga sencillo, pero que mejorara el empleado en el ensayo de la Universidad Técnica de Viena, de manera que permitiera inducir esfuerzos de flexión y cortante sobre la probeta. De esta forma se concibió el empleo de unos apoyos deslizantes sobre planos inclinados (colocados sobre guías a modo de carril para evitar su cabeceo e introducir movimientos no deseados), por los que parte de la carga aplicada en dirección vertical, se transforma en componente horizontal, la cual unida a la tensión constante ejercida por el peso de dichos apoyos (que inducen unas tensiones horizontales de tracción constantes) simularan el efecto acentuador de los ciclos de fatiga térmica (Figura 134).

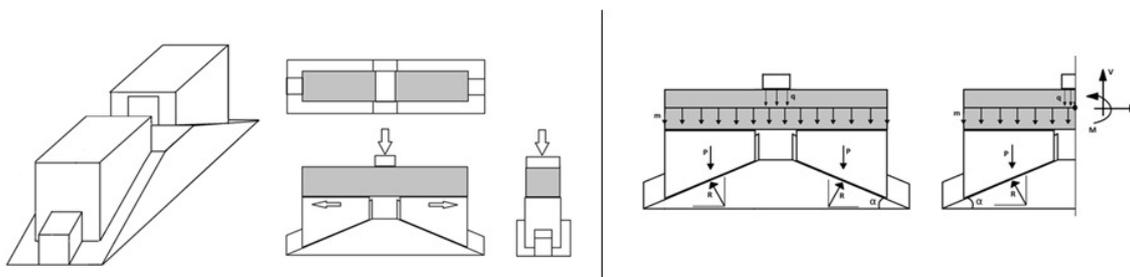


Figura 134. Diseño del mecanismo de actuación del dispositivo de ensayo.

Por otra parte, la distancia de separación entre ambos apoyos deslizantes puede hacerse variable como en el ensayo del Instituto Aeronáutico de Brasil, de forma que se utilice para simular la presencia de diferentes tipos de imperfecciones en las capas inferiores del pavimento (como fisuras de retracción térmica, baches provocados por fallos en la

capacidad portante de la base granular, juntas de dilatación o pre-fisuras). La idea de emplear dicha separación entre apoyos es provocar una concentración de las tensiones que permita el desarrollo de un proceso de fisuración controlado de forma más rápida (Figura 135). Dicha distancia será una variable más del ensayo en función del tipo de punto crítico de firme que se desee reproducir, de manera que pueden evaluarse firmes en los que en la capa de base existe una cierta discontinuidad (como una fisura o pre-fisura ya existente, o una junta de dilatación), o firmes donde existe algún defecto considerable en la base (como un bache o socavón).

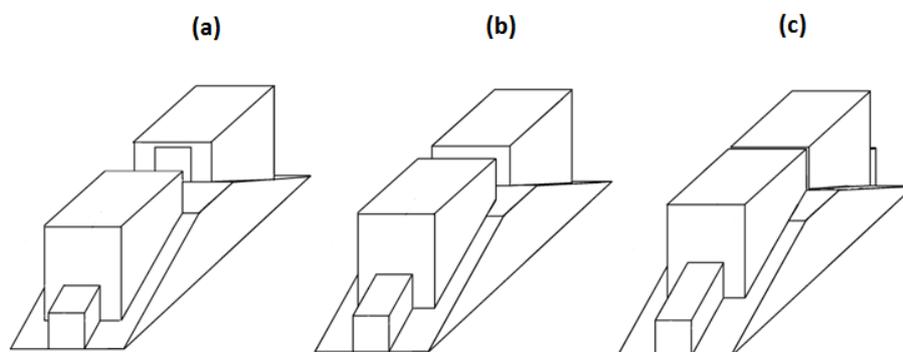


Figura 135. Distancia de separación entre apoyos para simular un defecto estructural o bache (a), una junta o pre-fisura (b), o una fisura (c), en la capa de base inferior al pavimento bituminoso.

A partir de una geometría sencilla, la configuración del dispositivo diseñado trata de reproducir los esfuerzos a los que está sometido el material durante su vida de servicio (Figura 136), simulando además diferentes estados del firme en los que existe un punto que favorezca la aparición de fisuras (baches, juntas, fisuras, etc.). Por su parte, el grado de inclinación de los planos debe de estar en consonancia con las deformaciones producidas en dirección vertical, de manera que los movimientos en dirección horizontal sean proporcionales a los producidos en vertical. Para evitar una generación de tensiones descompensada dentro del volumen representativo de estudio, los desplazamientos de fatiga producidos en una dirección, serán proporcionales a los producidos en la otra. Así, para permitir el mismo rango de desplazamiento en dirección vertical que en horizontal, el ángulo de inclinación elegido para el deslizamiento de los apoyos horizontales fue de 45°.

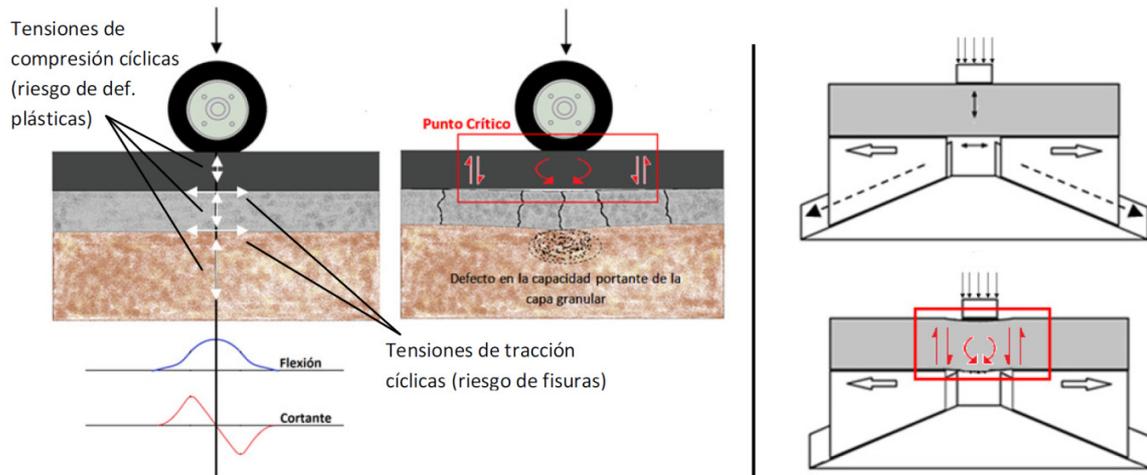


Figura 136. Simulación del estado tensional producido por el paso del tráfico.

Tal y como ocurre en el firme real, el proceso de fisuración por fatiga inducido por el dispositivo diseñado comenzará con la aparición de daño en forma de deformaciones plásticas no recuperables que van provocando un ligero incremento en la rigidez del material (ante la aplicación de cargas, la primera respuesta del material es deformar), una vez que el material ha agotado su capacidad de deformar, el daño producido se transforma en micro-fisuras que van creciendo y uniéndose (meso-fisuras), hasta provocar una superficie de fallo dominante que termina propagándose a través del material (macro-fisura, apreciable a la vista). Así, el dispositivo de ensayo permite el estudio del proceso de fisuración en sus tres etapas: el *inicio de la fisura*, la *propagación* (cuya velocidad de avance dependerá del tipo de carga, y del espesor y la rigidez del material), y el *fallo por fisuración* (la cual se caracteriza por la total propagación del daño estructural producido, con la consiguiente aparición de la fisura en la superficie de la capa).

Para poder realizar una toma de datos precisa, se utilizará el mismo sistema de instrumentación que en el ensayo de fisuración desarrollado en la Universidad de Quebec. Así, dentro de un mismo plano del material se tomarán medidas tanto de las deformaciones verticales como horizontales (dentro del volumen representativo en el que tiene lugar la concentración de las tensiones y la formación de la fisura). Además, dichas medidas

deberán ser tomadas en la zona donde su aparición es más acentuada (para facilitar los cambios en el registro de datos). De la misma forma que en el ensayo de la Universidad de Quebec, la zona donde las deformaciones verticales son mayores se encuentra situada en la parte superior de la probeta (ya que es la zona donde tiene lugar la aplicación de la carga vertical, y por tanto donde se va a observar mejor el efecto de las deformaciones plásticas), mientras que las deformaciones horizontales máximas se van a dar en la parte inferior, debido a que las cargas de tracción en dicho sentido son máximas en esta zona (provocando el inicio del proceso de fisuración de la probeta en dicha zona) (Figura 137).

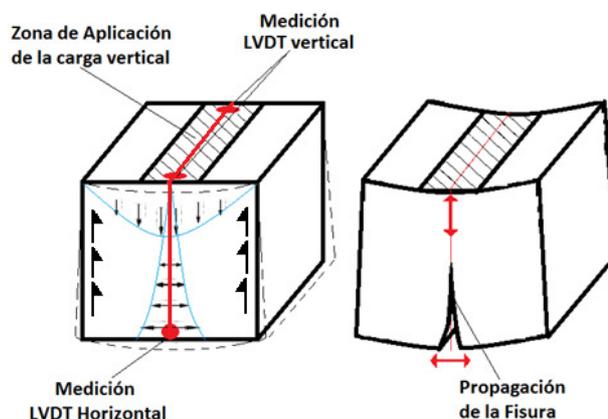


Figura 137. Representación del plano de control de deformaciones bajo el estado tensional producido en el volumen representativo de estudio.

Para la colocación de los medidores de deformación horizontales se pensó en utilizar los apoyos deslizantes, tomando una solución como la presentada en la Figura 138a (uno a cada lado para tener información completa del volumen), mientras que para la colocación de los verticales la solución adoptada aparece en la Figura 138b, en la que se emplean dos vástagos que permiten llevar a cabo la medición de las deformaciones en la parte superior de la probeta.

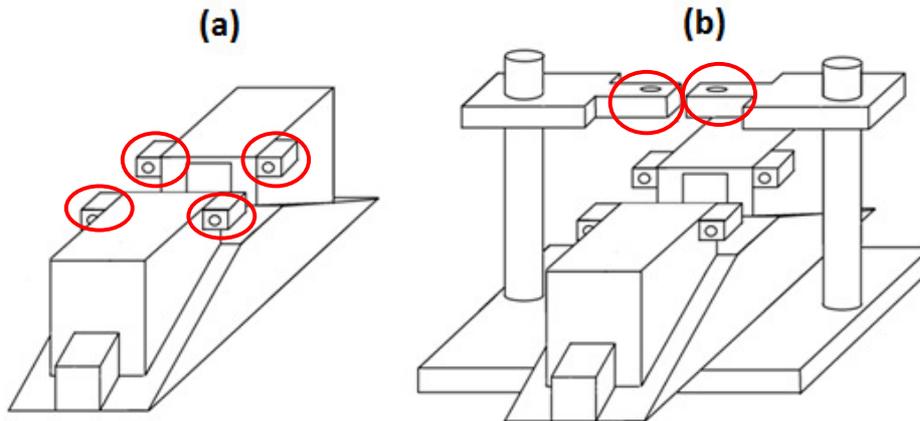


Figura 138. Zona de colocación de los medidores de deformaciones producidas en el volumen de estudio.

La ventaja de esta forma de toma de datos es que las medidas se realizan en zonas fijas rígidas sin riesgos de desplazamientos o deformaciones propias que puedan inducir errores en la medición. Además, su disposición no dificulta la colocación de sensores pegados a la probeta que puedan ser utilizados en el estudio de la propagación de la macro-fisura (como los utilizados en el ensayo MEFISTO), o la adición de un tercer vástago en el que pueda colocarse una cámara para la toma de imágenes durante el proceso de ensayo (como la utilizada en los ensayos de la Universidad de Nottingham o de Dublin), de manera que se registre la evolución de la degradación provocada en la probeta con la ayuda de un sistema de referencia (Figura 139).

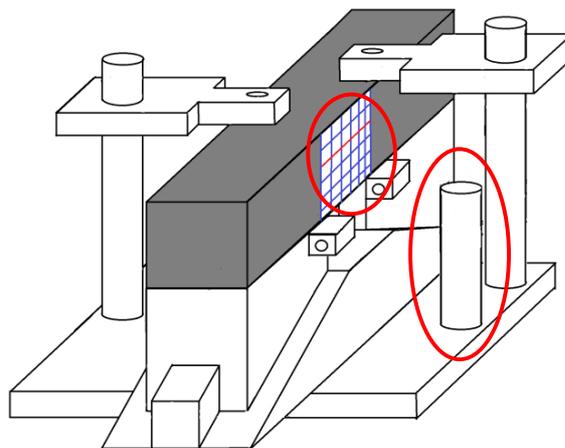


Figura 139. Disposición de toma de datos para el control de la evolución de la macro-fisura del material.

Por último, decir que la aplicación de la carga se llevará cabo a partir de una superficie independiente adaptable al travesaño superior del marco de ensayos, que simule el efecto de la carga del tráfico, y sobre la que se pueda colocar los LVDT's de medida de deformación vertical (de manera que ha de tener una superficie plana, y estar fabricada de un material no deformable para no inducir errores en la medición). Cada una de las partes definidas del dispositivo (excepto el cabezal de aplicación de carga) se montarán sobre una base de apoyo, en la que repose el sistema, de manera que ésta sea fácilmente adaptable a cualquier marco de ensayos que exista en laboratorio.

Como último paso en la fase de diseño, se determinaron las dimensiones estimadas del dispositivo de ensayo, recogidas en la Figura 140, y definidas teniendo en cuenta que la geometría de las probetas a fabricar no debía ser demasiado grande (para facilitar su homogeneidad, manejabilidad y facilidad de elaboración), así como que debe ser colocado en un marco de ensayos y una cámara climática de tamaño estándar comúnmente empleadas en laboratorios de carreteras.

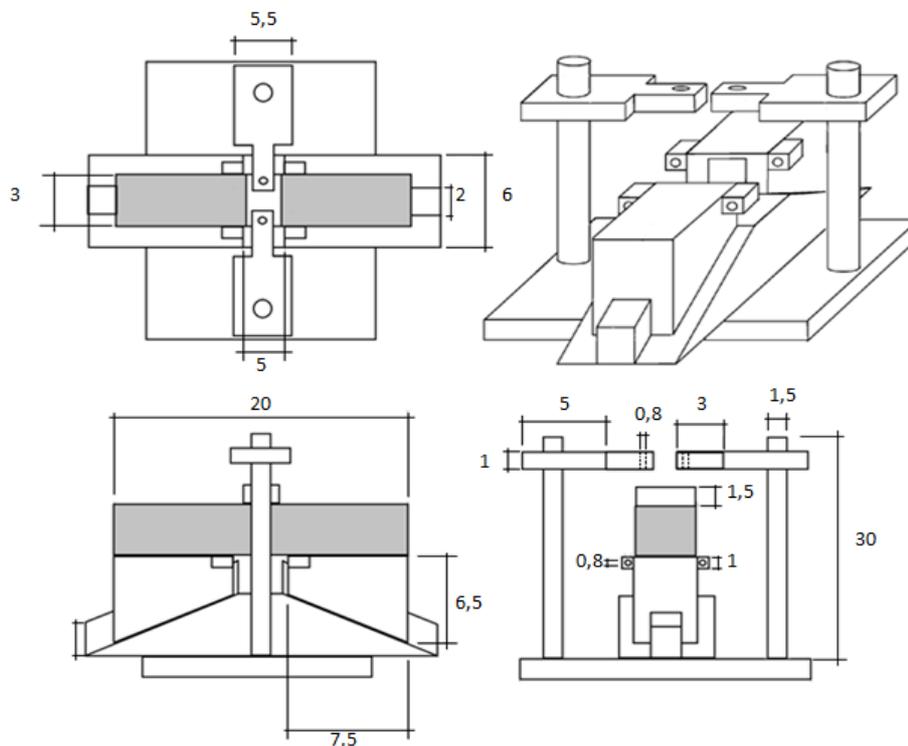


Figura 140. Dimensiones estimadas del dispositivo diseñado (cm).

4.3. Definición de las Características de Ensayo

4.3.1. Características de los Materiales a Ensayar y Geometría de las probetas

Los materiales a emplear durante el ensayo deben de cumplir unas condiciones de homogeneidad que permitan garantizar una evaluación fiable de su comportamiento mecánico. Es conveniente que el conjunto de probetas fabricadas para la ejecución de un mismo ensayo provengan del mismo acopio de áridos y la misma partida de ligante.

Por otra parte, la forma y dimensiones de las probetas a ensayar no deben presentar dificultades en su fabricación. Uno de los mayores inconvenientes de muchos de los ensayos existentes para la evaluación del comportamiento a fisuración es el tiempo consumido en la elaboración de las probetas o secciones de ensayo, y la dificultad de repetir las con características homogéneas. De esta forma, lo más productivo es llevar a cabo el ensayo sobre probetas con forma sencilla, sin ningún tipo de taladro (como por ejemplo las utilizadas en los ensayos de tracción DCT) o entalla (como la ejecutada en muchos de los ensayos para inducir el fenómeno), que puedan consumir un mayor tiempo de fabricación de las mismas, y además aumente su dificultad.

Además, las dimensiones de las probetas deben permitir una buena trabajabilidad, sin incurrir en tamaños demasiado grandes que incrementen el consumo de material a utilizar (aumentando su dificultad de transporte o manipulación, o un incremento de inversión en aspectos como la cantidad de material a adquirir o la cámara a emplear para su acondicionamiento), o que hagan que las dimensiones del prototipo de ensayo sean mayores (aumentando por regla general en estas situaciones el coste del dispositivo). Los elementos empleados para la fabricación de las probetas han de ser equipos de uso común en laboratorios de carreteras, de manera que su acceso sea fácil y que no haya que incurrir en ningún tipo de inversión específica.

4.3.2. Condiciones de Carga

Siempre que se desee evaluar el comportamiento de un material durante su etapa de diseño, es necesario someterlo a pruebas que determinen su respuesta ante solicitaciones que simulen en la medida de lo posible a las de su vida de servicio. En el caso de las mezclas bituminosas, las cargas aplicadas para simular dichos efectos deberán tener un carácter cíclico (con magnitudes por debajo del límite de resistencia a rotura del material), pudiendo presentar en ocasiones ciertos periodos de descanso que permitan la recuperación parcial del material, tal y como ocurre durante la vida de servicio real (puesto que el tráfico no pasa de forma constante). Por tanto, durante la ejecución del ensayo será necesario definir y adaptar en la medida de lo posible las condiciones de carga a aplicar a las ocurridas en el firme, con la salvedad de que se trata de un ensayo de laboratorio, y por tanto, su duración no debe ser demasiado dilatada en el tiempo (deberá de buscarse una solución de compromiso en la que las condiciones de carga sean adaptadas a una duración proporcional que permita un análisis efectivo del comportamiento de la mezcla, sin que ello suponga un ensayo de duración considerablemente larga).

4.3.2.1. Simulación de las Solicitaciones del Tráfico

Para la simulación de las cargas del tráfico en un ensayo de laboratorio es necesario atender a tres aspectos principales: la *forma de la carga*, la *amplitud* y la *frecuencia* (pudiendo ser incluidos los periodos de descanso). En base a estas consideraciones, la distribución de las cargas a aplicar para simular los efectos del tráfico deberá ser como la representada en la Figura 141. El paso de un vehículo por un punto cualquiera del firme provocará un número de aplicaciones de carga igual a su número de ejes (en el caso del ejemplo de la Figura 141 el vehículo 1 tiene dos ejes y el vehículo 2, tres), con periodos de descanso entre cada eje, y entre cada vehículo. Además, la aplicación de las cargas del ensayo deberá tener en cuenta periodos de descanso más largos que representen los intervalos de tiempo en los que el paso del tráfico disminuye considerablemente (como por ejemplo durante la noche). Por otra parte, también deberá de tenerse en cuenta que la amplitud de la tensión transmitida

por cada eje puede ser diferente, variando en función del peso y la superficie de contacto con el pavimento (en función del tipo de vehículo).

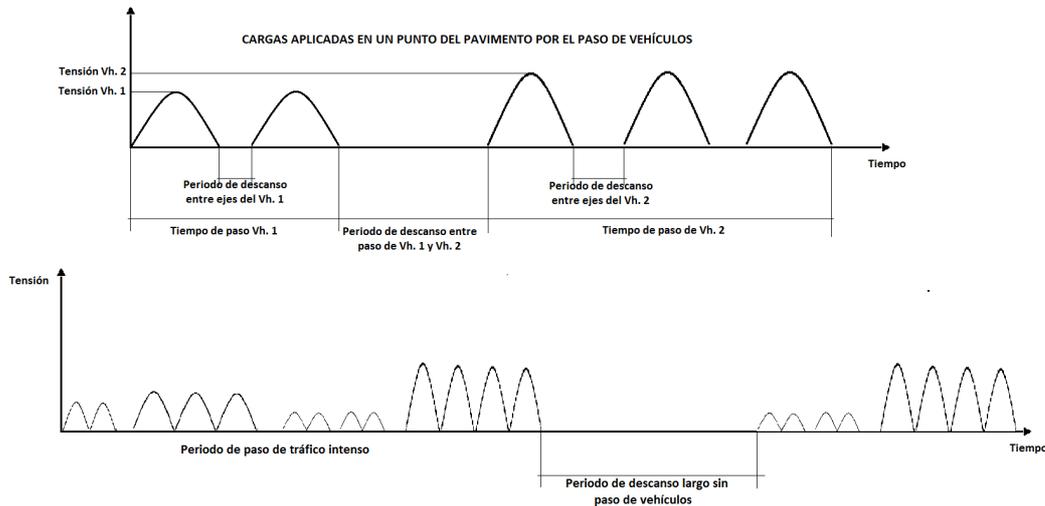


Figura 141. Esquema de las tensiones transmitidas sobre un punto del pavimento por el paso del tráfico.

Forma de la Carga

El paso de un vehículo por un punto "a" de un firme genera un aumento de presión de compresión creciente en dicho punto (conforme el eje del vehículo se va acercando, 1), hasta alcanzar un valor máximo (cuando el eje que provoca la tensión coincide verticalmente con el punto "a", 2), para después volver a disminuir el nivel de tensión hasta no verse afectado por el eje de carga (una vez que éste ha pasado, 3) (Figura 142). Así, el paso de dicha carga por el punto "a" provoca unos esfuerzos de cortante (cuando el eje se encuentra a cierta distancia del punto "a", tanto en su aproximación como en su alejamiento) y de flexión (cuando se encuentra situado justo en dicho punto).

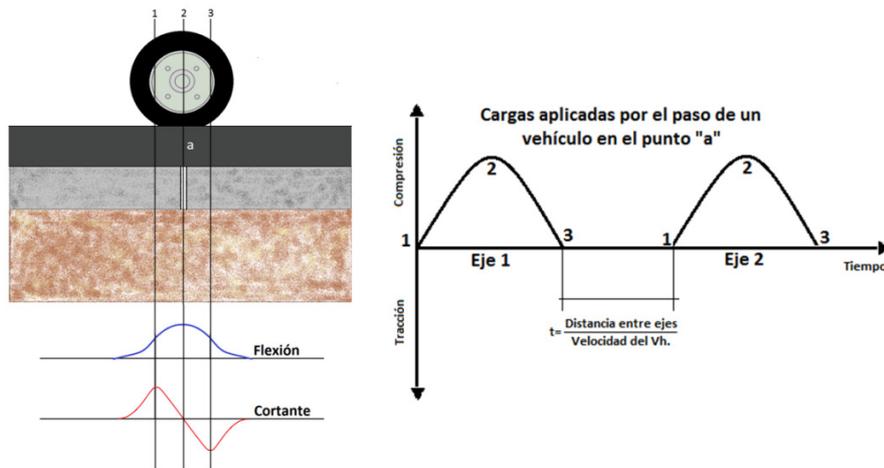


Figura 142. Forma de la carga aplicada sobre un punto del pavimento por el paso de un eje (Baek 2010).

Por tanto, la *forma de la carga* recibida por dicho punto "a" puede ser aproximada mediante una función senoverso (Figura 143, ya que la tensión transmitida por el eje únicamente es de compresión, y puede considerarse uniforme tanto en la carga, como en la descarga), la cual se repetirá tras haber transcurrido un cierto espacio de tiempo cuando vuelva a pasar el siguiente eje (del mismo vehículo o de otro vehículo que le siga). Así, entre cada aplicación de la carga podría incluirse un periodo de descanso que dependerá de la distancia entre ejes y velocidad del vehículo, y de la frecuencia de paso de vehículos por dicho punto. Destacar que muchos de los ensayos de laboratorio analizados durante el estudio del estado del arte aplican cargas con formas sinusoidales, sin embargo esta forma de aplicación de carga no resulta del todo adecuada debido a que el tráfico no induce esfuerzos de tracción sobre la mezclas.

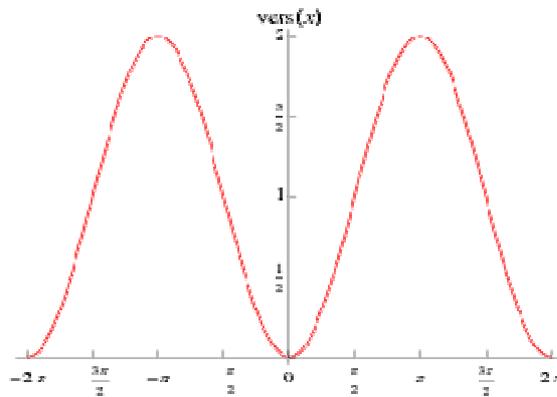


Figura 143. Función Senoverso.

Amplitud de Carga

La amplitud de la carga a aplicar para adaptar las tensiones transmitidas por el tráfico durante la ejecución de los ensayos dependerá de diversos factores entre los que destacan el peso transmitido por el eje, la superficie de contacto de la rueda con el pavimento, y el número de neumáticos que posee cada eje.

El paso de un vehículo sobre la superficie del pavimento, genera una tensión de contacto con 3 componentes principales: vertical, transversal y longitudinal (Yap 1988). De Beer et al. 1997, propusieron la *Ecuación 45* para determinar las tres componentes de la tensión de contacto transmitida al pavimento.

$$\sigma = k_1 + k_2 * \phi + k_3 * \left(\frac{l}{1000 * A} \right) \text{ [Ecuación 45]}$$

Donde σ es la tensión de contacto en kPa, ϕ es la presión de inflado del neumático en kPa, l es la carga del eje en kg, A la superficie de contacto en m^2 , y k_1 , k_2 y k_3 son coeficientes de regresión que dependen del tipo de vehículo y que siempre son números positivos.

A pesar de ello, los estudios llevados a cabo por Siddharthan et al. 1998 demostraron que las relaciones entre las presiones de contacto verticales, transversales y longitudinales son 10 : 1,6 : 0,8 aproximadamente, lo que significa que la componente vertical de tensión es mucho más importante. En el mismo estudio se demostró que la influencia de las tensiones

transversales en las deformaciones sufridas por el pavimento debido al tráfico es insignificante. De acuerdo con este hecho, se pueden obviar tanto la componente transversal como la horizontal a la hora de definir la tensión transmitida al pavimento por el paso del tráfico.

El peso vertical transmitido por eje dependerá del tipo de vehículo, así como de su capacidad de carga. No obstante, la carga por eje aplicada transmitirá un nivel de tensión u otro sobre el pavimento en función de la superficie de contacto que tenga sobre él. Tradicionalmente se ha definido la superficie de contacto rueda/pavimento de forma circular, con un área igual a la relación entre la carga del neumático y su presión (Figura 144). A pesar de ello, son muchos los estudios que han demostrado que la superficie de contacto rueda/pavimento se aproxima más a una forma rectangular independientemente del tipo de neumático (Fernando et al. 2006), con longitud variable (en función de la clase de vehículo, tipo de eje y de la presión de inflado del neumático), y ancho más o menos constante (igual al del neumático).

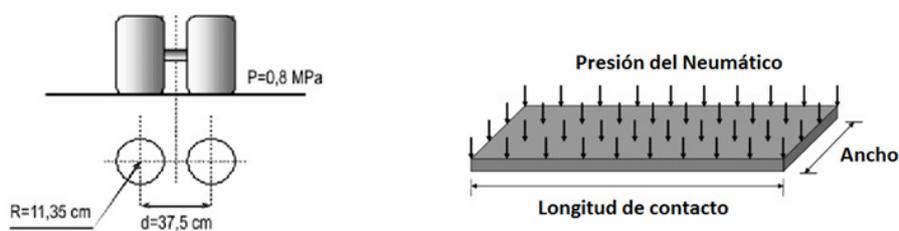


Figura 144. Superficie de contacto rueda/pavimento circular (izq.) y rectangular (dcha.).

Si no se conoce (ya que no ha podido ser determinada mediante estudios de campo), dicha longitud puede ser estimada según la *Ecuación 46* (Lytton et al., 2010), aunque es menos representativa ya que al introducir la presión de inflado de los neumáticos, estamos introduciendo una variable que ejerce influencia directa sobre la tensión transmitida al pavimento.

$$L = \frac{l}{\phi \cdot n} \text{ [Ecuación 46]}$$

Donde L es la longitud de contacto del neumático con el pavimento en cm, l es la carga del eje en kg, n es el número de neumáticos por eje, ϕ es la presión de inflado del neumático en kg/cm², y b es el ancho del neumático en cm.

Finalmente, para definir el nivel máximo de tensión aplicado por un eje sobre un punto “a” del pavimento (cuando se encuentra sobre su vertical), podemos utilizar la *Ecuación 47* (donde b y L vienen dados en m, y k=1 si el eje es simple; k=2 si es tipo tándem; k=3 si es Tridem; y k=4 si es Quadrem). En base a dicha ecuación, pueden definirse los valores de amplitud de carga a utilizar en los ensayos de laboratorio, de forma que conociendo la superficie sobre la que se aplica la carga (en función de la geometría del ensayo), se adapte la fuerza ejercida por el equipo de ensayo para obtener tensiones similares a las del tráfico.

$$\sigma = \frac{l \cdot 9,80665}{k \cdot n \cdot 1000} \cdot \frac{1}{b \cdot L} \text{ [Ecuación 47]}$$

No obstante, debemos de tener en cuenta que la aplicación de los valores de tensión calculados mediante la *Ecuación 47* son en superficie en capa de rodadura. Así, si lo que deseamos ensayar son mezclas para capas intermedias (o inferiores), deberíamos aplicar un coeficiente de reducción de carga, que vendrá dado por la disipación de tensiones generadas por las capas superiores (en función de su módulo de rigidez y su espesor).

Frecuencia de Carga

Tanto la frecuencia, como los periodos de descanso que deben ser aplicados durante el ensayo estarán definidos en función de la velocidad media alcanzada por los vehículos en la carretera (en función del tipo de vía), así como de la distancia media entre éstos, y entre sus ejes.

En base a la circulación del tráfico sobre el firme podemos considerar dos tipos de periodos de descanso, cortos y largos. Los periodos de descanso cortos pueden definirse como el tiempo transcurrido entre el paso de un vehículo y su consecutivo por el mismo punto del pavimento (el cual vendrá definido por la velocidad de circulación del vehículo y su distancia

de separación). Por su parte, los tiempos de descanso largos se definen como los periodos de tiempo transcurridos en los que la frecuencia de paso de vehículos es considerablemente baja (las noches). Está claro que podrían considerarse periodos de descanso entre el paso de cada eje dentro de un mismo vehículo, pero al ser tan pequeños, estos se consideran despreciables, y dicha distancia es más adecuada emplearla en la definición de la frecuencia del ensayo.

La frecuencia de aplicación de los ciclos de cargas dependerá de la distancia entre ejes de cada vehículo, así como de la velocidad del vehículo [Ecuación 48]. Por su parte, los periodos de descanso cortos dependerán de la distancia media entre vehículos y la velocidad de éstos [Ecuación 49], mientras que los periodos largos de descanso serán función de las horas de baja actividad de tráfico.

$$Frecuencia (Hz) = \frac{1}{Periodo (s)} = \frac{1}{\frac{Distancia\ entre\ ejes (m)}{Velocidad\ del\ Vehículo (\frac{m}{s})}} \quad [Ecuación\ 48]$$

$$Periodo\ de\ Descanso\ Corto (s) = \frac{Distancia\ entre\ Vehículos (m)}{Velocidad\ del\ Vehículo (\frac{m}{s})} \quad [Ecuación\ 49]$$

4.3.2.2. Simulación de las Solicitaciones Térmicas

Además de por el efecto de las cargas del tráfico, la fisuración por fatiga en firmes de carretera se ve afectada por los ciclos térmicos que terminan provocando una variación de los estados tensionales de la mezcla (Figura 145). Estos ciclos producen unos esfuerzos de tracción horizontales que unidos a los esfuerzos de cortante y flexión debidos a las cargas del tráfico, terminan provocando el fallo de la mezcla. De esta forma para el desarrollo del método de ensayo, además de la aplicación de cargas para simular los efectos del tráfico, sería conveniente tener en cuenta el efecto acentuador provocado por las tensiones térmicas.

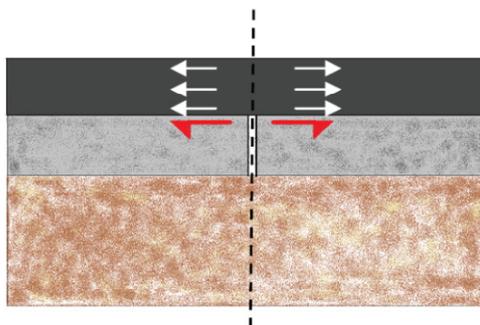


Figura 145. Tensiones de tracción en el pavimento provocadas por los cambios de temperatura.

La magnitud de estas tensiones vendrá determinada por diferentes variables como pueden ser las características de los materiales utilizados en la fabricación de las mezclas bituminosas (susceptibilidad térmica, coeficiente de dilatación, etc.), o la diferencia de las características de dilatación térmica entre las capas del firme. Por otra parte, la dependencia de la zona geográfica donde vaya a ser colocada la mezcla, y asociada a ella su climatología, tendrán un efecto fundamental en la magnitud de las tensiones producidas, así como de la frecuencia de los ciclos térmicos. Zonas donde las variaciones térmicas entre el día y la noche, o las estaciones de verano e invierno, son muy acusadas, tienen como consecuencia un aumento de las tensiones inducidas en el pavimento, y por tanto un mayor efecto de este tipo de solicitaciones.

La frecuencia de aplicación de estos ciclos tensionales es mucho menor que en el caso de las cargas del tráfico (de varias horas para ciclos diarios, y de meses para ciclos estacionales), pero la magnitud registrada en muchas ocasiones es considerablemente mayor. Además, el efecto de fisuración por fatiga debido a ciclos térmicos, se ve mucho más afectado por las bajas temperaturas que por las altas. Así, la modelización de este tipo de tensiones a nivel de laboratorio resulta bastante complicada, en primer lugar por la baja frecuencia de los ciclos tensionales (lo cual llevaría a ensayos de laboratorio que consumirían mucho tiempo), y en segundo debido a la gran variabilidad de la magnitud de

las tensiones transmitidas (dada la inestabilidad de los cambios de temperatura en función de la época del año, la hora del día, etc.).

Por tanto, para la modelización de las cargas térmicas a aplicar durante el ensayo una buena alternativa sería utilizar una carga de tracción constante (la cual sea base del efecto térmico), y aprovechando la simulación de las cargas transmitidas por el tráfico, inducir pequeños desplazamientos que motiven incrementos cíclicos de tensión por tracción que simulen los cambios de temperatura. No obstante, las tensiones térmicas no son el factor principal para el que son diseñados los firmes de carretera, siendo dicho factor el nivel de carga de tráfico que ha de soportar. Este hecho, unido a la dificultad de reproducir este tipo de ciclos tensionales y su gran variabilidad de magnitud, hacen que adoptar una solución que represente dichas tensiones de forma acentuadora a las inducidas por el tráfico, sea de interés.

4.3.3. Condiciones de Ensayo

Otro de los aspectos fundamentales a tener en cuenta durante la ejecución del ensayo son las condiciones de humedad, grado de envejecimiento, y temperatura, a las que van a estar sometidas las probetas. Dada la naturaleza de las mezclas bituminosas, la influencia de las condiciones de ensayo sobre su comportamiento mecánico es fundamental, así la definición de las condiciones óptimas de ensayo será clave para evaluar su respuesta ante el fenómeno de fisuración.

4.3.3.1. Temperatura

Debido a la naturaleza visco-elástica del material empleado como ligante, el comportamiento de las mezclas bituminosas depende en gran medida de la temperatura de trabajo a las que están sometidas. Independientemente de las tensiones producidas por los gradientes térmicos, en función de la temperatura a la que se lleve a cabo la aplicación de las cargas, el material se comportará de forma más elástica o más viscosa. Por tanto, deberemos tener en cuenta que para bajas temperaturas, las mezclas bituminosas ofrecen

un comportamiento rígido, con un tipo de rotura más frágil, mientras que a temperaturas superiores, el material admite mayores deformaciones plásticas antes de la rotura debido a su comportamiento más viscoso. Además, los procesos de fatiga y “healing”, que tanto tienen que ver en la respuesta de este tipo de materiales ante fenómenos de fisuración, también se ven afectados por la temperatura. En este sentido, las altas temperaturas favorecen el fenómeno de “healing” de las mezclas, aunque por otra parte también suelen acortar su vida de fatiga.

Así, la influencia del clima en la respuesta del pavimento ante la aparición de fisuras va a ser fundamental. Por este motivo es necesario, en la medida de lo posible, evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas para las condiciones de temperatura a las que se va a ver expuesta durante su vida de servicio. Por tanto, el empleo de una cámara térmica acondicionada a la temperatura óptima va a resultar imprescindible a la hora de llevar a cabo el ensayo.

Además, resultará muy importante definir los rangos de temperatura de ensayo en función de los valores de temperatura que se registren en la zona climática donde va a ser empleada la mezcla. Para la ejecución del ensayo deberá tenerse en cuenta la media de temperaturas en las horas laborales (que es cuando se concentra la mayor parte de aplicaciones de ejes de carga del tráfico), así como durante las diferentes estaciones del año. Por otra parte, los periodos de descanso largos tienen lugar normalmente durante la noche, de forma que dicho acondicionamiento deberá llevarse a cabo a la temperatura media nocturna, para las diferentes estaciones del año.

4.3.3.2. Humedad

Las condiciones de humedad del firme también influyen en el comportamiento a fisuración de las mezclas bituminosas. La presencia de agua en el seno de la mezcla, puede tener como consecuencia una pérdida de cohesividad de ésta (puede provocar la rotura de los enlaces químicos en el betún, así como disminuir su adhesividad con los áridos, Fromm 1974; Kanitpong & Bahia 2002; Majidzadeh & Brovild 1968), de forma que se fomente la aparición y/o propagación de fisuras. Dicha humedad, en zonas climáticas frías, ve

acentuado su efecto por la aparición de ciclos de hielo/deshielo, que contribuyen a generar tensiones de fatiga que fomentan el proceso de fisuración en la mezcla. Así, también resultará esencial determinar el comportamiento de la mezcla ante estas condiciones, de forma que durante el ensayo puedan evaluarse probetas con diferentes grados de humedad.

Como hemos podido observar en el Capítulo 2 en el estudio de los ensayos de evaluación del comportamiento a fisuración en mezclas bituminosas, casi ninguno de ellos (con la salvedad de aquellos que son realizados a la intemperie) tiene en cuenta el efecto de la humedad. Por tanto, resultaría interesante desarrollar un método de ensayo a nivel de laboratorio que contemple la influencia de la presencia del agua en la respuesta de la mezcla en la propagación de fisuras.

4.3.3.3. Envejecimiento

Finalmente, otro aspecto fundamental en la influencia de la respuesta de la mezcla ante la propagación de fisuras es su grado de envejecimiento. Las mezclas más envejecidas (debido a su exposición la acción del viento, la radiación solar, etc.), tienen un comportamiento más rígido, disminuyendo su capacidad para soportar los ciclos tensionales, volviéndose más propicias a la aparición del fenómeno de fisuración.

Debido a este hecho, resulta interesante determinar qué tipo de mezcla se comporta mejor ante la propagación de fisuras bajo condiciones de envejecimiento, de manera que pueda evaluarse su comportamiento a largo plazo. Para ello será necesario someter las probetas fabricadas a diferentes grados de envejecimiento, antes de ser ensayadas.

El envejecimiento de la mezcla está asociado a la pérdida de los componentes volátiles y la oxidación del betún, durante su fabricación y puesta en obra (envejecimiento a corto plazo), y durante su vida de servicio (envejecimiento a largo plazo). Dado que la reproducción de los factores que afectan a dicho envejecimiento como la radiación solar, la exposición al aire, las altas temperaturas, las heladas, etc., no son fáciles de reproducir en laboratorio,

para realizar el envejecimiento de las probetas fabricadas habrá que considerar otros procedimientos alternativos.

4.3.4. Instrumentación y Toma de Datos. Criterio de Fallo

Cuanta mayor información se obtenga de cada ensayo, más completo podrá ser el análisis sobre el comportamiento de la mezcla, y mejor se podrá definir su respuesta ante el fenómeno de fisuración. Así, será necesario llevar a cabo una correcta instrumentación del mismo y una toma de datos adecuada que permita obtener información suficiente para caracterizar cada una de las fases del proceso de fisuración (inicio, propagación y fallo).

Como se ha comentado en el apartado dedicado al diseño del prototipo, en el entorno de un “volumen representativo” del material a evaluar (donde aparecerá la fisura), se tomarán valores de las deformaciones verticales y horizontales producidas. De esta forma, en cada ciclo de aplicación de carga además de dichas deformaciones, se tomarán valores de la magnitud de la fuerza aplicada, del ángulo de fase entre la carga aplicada y las deformaciones producidas, así como el tiempo empleado en cada ciclo. Con ellos podrán determinarse parámetros fundamentales para analizar el comportamiento del material como el módulo de rigidez o la energía disipada en cada ciclo.

Para que la adquisición de estos datos sea efectiva, es necesario un número mínimo de los valores de medición tomados en cada ciclo. Por cada ciclo de carga es necesario determinar al menos 10 valores de cada uno de los parámetros medidos. Este hecho, cuando nos encontramos ante ensayos de fatiga largos, puede llevar al tratamiento de una gran cantidad de información que deberá de ser tratada y filtrada coherentemente, obteniendo la que mayor utilidad ofrezca. Por este motivo, tampoco resulta interesante llevar a cabo el registro de estos datos en cada ciclo del ensayo (por ejemplo, una buena medida podría ser la toma de uno de cada 100 ciclos, o 1000 en el caso de ensayos muy largos), u obtener un número de valores superior a 100 para cada ciclo de carga.

La instrumentación del ensayo puede complementarse con el registro de datos de propagación de la macro-fisura a través de la toma de imágenes o video del proceso de fisuración (o de forma menos precisa, pero más económica, mediante la observación visual y anotación del crecimiento de grieta). Para ello puede ser útil la colocación de un sistema métrico de referencia en la zona tensionada donde va a tener lugar la aparición de la macro-fisura. Otra alternativa es establecer un sistema de medición mediante filamentos adheridos a las caras de la probeta, que detecten y registren el crecimiento de fisuras conforme se vayan produciendo. Esta información permitirá correlacionar los datos registrados de deformación y fuerza, con el aspecto físico del material y su evolución del daño (velocidad de propagación de fisura).

Finalmente, es necesario establecer un criterio de fin de ensayo a partir del cual se determine el fin de vida de fatiga del material estudiado. Tradicionalmente, en la mayor parte de los ensayos de fatiga este criterio ha sido elegido en base a un porcentaje de caída de su módulo de rigidez inicial. En el caso de la fisuración por fatiga, este criterio no resulta efectivo puesto que muchos materiales con una mayor capacidad de deformación plástica pueden llegar a dicha caída del módulo antes de fisurar (o solo con la fase de micro-meso fisuración iniciada). Así será necesario definir un criterio de fallo que permita evaluar cada una de las etapas del proceso de fisuración en el material.

4.4. Evaluación del Comportamiento a Fisuración

Una vez diseñado el dispositivo de ensayo y definidas las características para su ejecución, hay que definir el tratamiento de datos a realizar para evaluar el comportamiento a fisuración por fatiga del material ensayado. Durante cada ciclo de ensayo se registran los valores de fuerza aplicada, desplazamiento horizontal y vertical a ambos lados de la probeta, los ángulos de fase entre ambos y la fuerza aplicada (entre la carga y el desplazamiento horizontal, y entre la carga y el desplazamiento vertical), así como el número de ciclos. A partir de dichos datos, y utilizando algunos de los fundamentos teóricos estudiados en el estado del arte, puede realizarse un análisis completo del comportamiento

del material durante el proceso de fisuración por fatiga. A continuación se describirán las fases a seguir para el estudio del comportamiento a fisuración de los materiales bituminosos evaluados:

- Definición de la ley de fisuración por fatiga.
- Cálculo del parámetro de daño medio.
- Determinación de los umbrales de daño a fisuración.

4.4.1. Enfoque Fenomenológico. Ley de Fisuración por Fatiga

Tradicionalmente, el comportamiento a fatiga de los materiales bituminosos se ha evaluado mediante un enfoque fenomenológico que relaciona la amplitud de las tensiones aplicadas sobre la mezcla con el número de repeticiones de cargas que causan su fallo por fatiga. Utilizando dicho enfoque, y adaptándolo al ensayo de fisuración por fatiga desarrollado en esta investigación, podemos definir el ciclo de fallo por fisuración (N_f), como el ciclo en el que se produce la propagación total de la superficie de fractura dominante a través del material.

En función de las condiciones de ensayo aplicadas y del tipo de material evaluado, el ciclo de fallo N_f obtenido variará. Así, tal y como se hace en los ensayos de fatiga, utilizando diferentes escalones de carga podrá definirse para cada mezcla una ley de fisuración por fatiga, que permita el diseño de materiales más resistentes ante este fenómeno.

En este mismo sentido, utilizando el concepto de límite de resistencia a fatiga establecido por Whöler en 1968, podrán definirse valores de carga que sirvan de referencia en el diseño a fisuración de mezclas bituminosas, bajo ciertas condiciones de ensayo. En base a dicho concepto se puede afirmar que para cada mezcla existe un nivel de carga (o de daño) por debajo del cual, el número de ciclos de fatiga no aumenta con la disminución de la carga de forma que el material tiende a tener una resistencia a fatiga “ilimitada” (considerablemente larga). Dicho límite puede ser muy útil en la optimización del diseño de mezclas bituminosas puesto que por ejemplo, podría definir un límite de espesor de capa, de manera que un

aumento de éste no proporcionaría una mejora significativa de la resistencia estructural de daños por fatiga del material, y por tanto supondría un gasto innecesario.

En los estudios desarrollados por Shen & Carpenter (Carpenter et al. 2003; Shen & Carpenter 2005; Shen & Carpenter 2007), los ensayos de fatiga realizados muestran claramente la existencia de un límite de resistencia a fatiga, que puede ser considerado como un nivel de energía o carga, a partir del cual la mezcla empieza a tener un cambio fundamental en su comportamiento a fatiga. Aplicando este concepto al ensayo desarrollado, para unas condiciones establecidas (frecuencia, temperatura, etc.), en cada tipo de material evaluado podrá determinarse cuáles son sus límites de resistencia a fisuración por fatiga LRFF. Así, podremos establecer unas condiciones de diseño óptimas en las que se evalúe qué material tiene unos límites de resistencia a fisuración más altos, de forma que sea necesario someterlo a cargas mayores para que se produzca su fallo ante esta patología.

El hecho de combinar la ley de fisuración por fatiga junto con el concepto de límite de resistencia a fisuración (LRFF), permite llevar a cabo una evaluación rápida y eficiente del comportamiento mecánico del material, de forma que se pueda optimizar su resistencia ante esta patología (Figura 146).

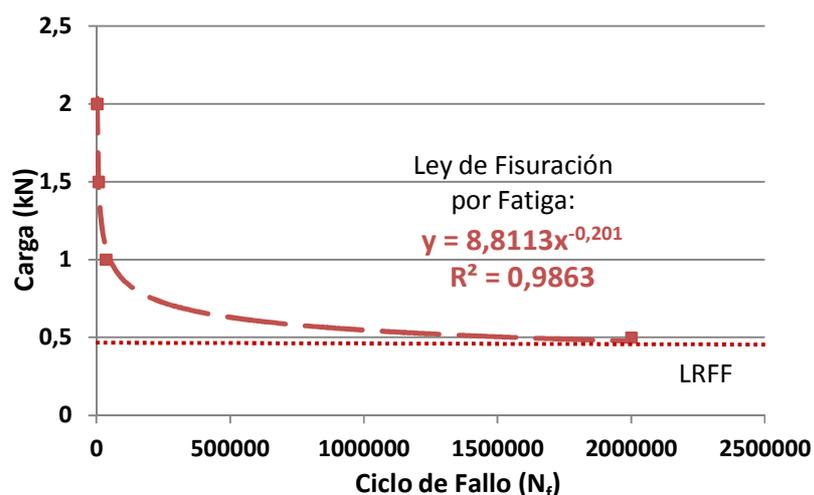


Figura 146. Ejemplo de ley de fisuración por fatiga.

4.4.2. Enfoque de la Energía Disipada. Parámetro de Daño Medio

Además de establecer un análisis fenomenológico, para terminar de definir completamente el comportamiento ante la fisuración por fatiga, es necesario cuantificar el daño real que se ha producido en el material debido a este fenómeno. Tradicionalmente, la cuantificación de este “daño” ha venido establecida en la mayoría de los ensayos existentes como la longitud de propagación de la macro-fisura para un número de ciclos determinados o un nivel de carga dado, o la cuantificación de las superficies de fractura aparecidas en el material. No obstante, como se ha demostrado, esta forma de cuantificación de daño no es del todo exacta puesto que el análisis visual impide el control de la aleatoriedad y dispersión del proceso de fisuración por fatiga. En este sentido, la forma más exacta de controlar la evolución real del daño producido durante el proceso de fisuración es mediante el seguimiento de la energía disipada, definida como la energía consumida por el sistema para causar un daño en el material.

El concepto de trabajo realizado sobre un sistema se define como la energía introducida en él, estando ésta definida por el área contenida bajo la curva carga/desplazamiento (Figura 147). Durante un proceso de carga-descarga, las curvas de descarga coinciden con las de carga si la energía aplicada es totalmente recuperada (típico de los materiales perfectamente elásticos capaces de recuperar toda la deformación inducida tras retirar la carga a la que están sometidos). Si ambas curvas no coinciden y recorren caminos diferentes (típico de materiales visco-elásticos), es debido a que se ha producido una pérdida de la energía introducida en el material, de forma que ésta es transportada fuera del sistema material (o como se expresa habitualmente “disipada”), por procesos externos en forma de trabajo mecánico, generación de calor, o daño. Este fenómeno es conocido como histéresis, y el cambio energético en cada uno de los ciclos de carga es la **energía disipada** (ω), la cual es igual al área comprendida dentro del lazo de histéresis (en la gráfica carga-desplazamiento).

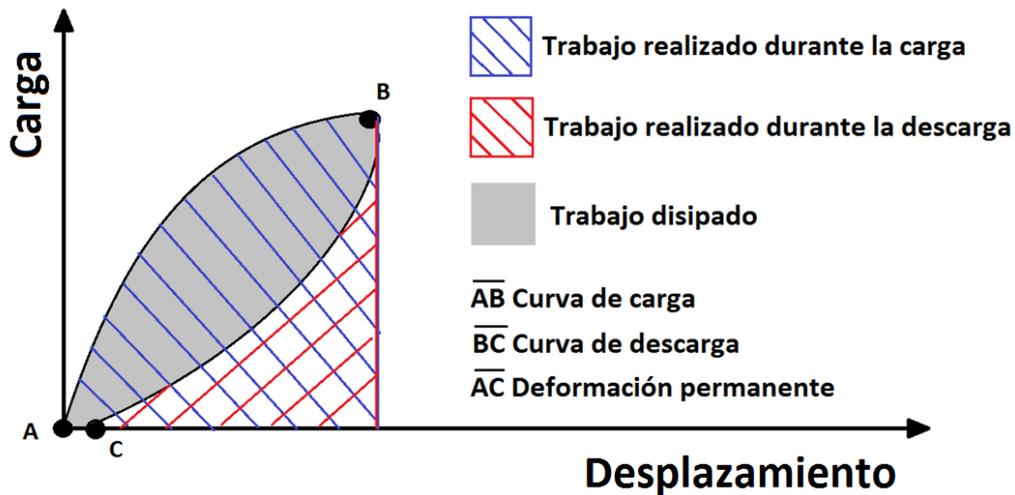


Figura 147. Concepto de trabajo realizado sobre un sistema.

En ensayos de fatiga (Figura 148), conforme se van aplicando ciclos de carga sobre el material y en función del tipo de carga aplicada, la energía disipada va variando (área contenida dentro del lazo de histéresis) debido a que en el material se está produciendo un daño (de forma que este parámetro nos permite evaluar en todo momento el estado del material). Dicho daño aparecerá reflejado en forma de deformaciones permanentes (que el material no puede recuperar), las cuales se muestran en el gráfico con un desplazamiento horizontal de los ciclos de carga; y en forma de fatiga la cual aparece reflejada en la variación del ángulo de fase entre la carga aplicada y el desplazamiento (variación de los ángulos “a”, “b” y “c”) (Di Benedetto et al. 2004).

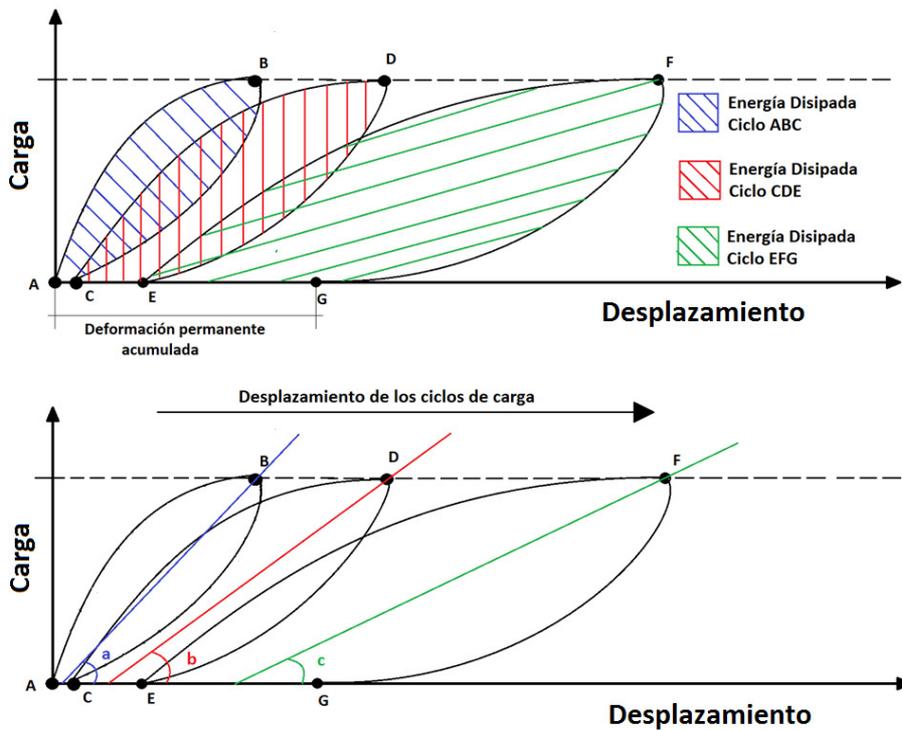


Figura 148. Evolución del daño en el material reflejado en los cambios de histéresis.

Así, para un nivel de carga dado, conforme va transcurriendo el ensayo la energía disipada en cada ciclo tiende a aumentar debido a que en él se produce un proceso de degradación. En base a estas consideraciones, podemos decir que evaluando la evolución de la energía disipada en cada ciclo de carga, obtendremos el estado real de daño del material de forma que podamos evaluar su comportamiento a fisuración. En la Figura 149 se muestra la evolución real de los ciclos de histéresis de una probeta sometida al ensayo desarrollado en esta tesis. Como se puede observar, en los primeros ciclos se producen deformaciones permanentes más considerables (debido a la aparición de deformaciones plásticas), y conforme el ensayo va transcurriendo se produce un incremento en la energía disipada por el material (un aumento del daño) y una variación en la inclinación del ciclo de histéresis.

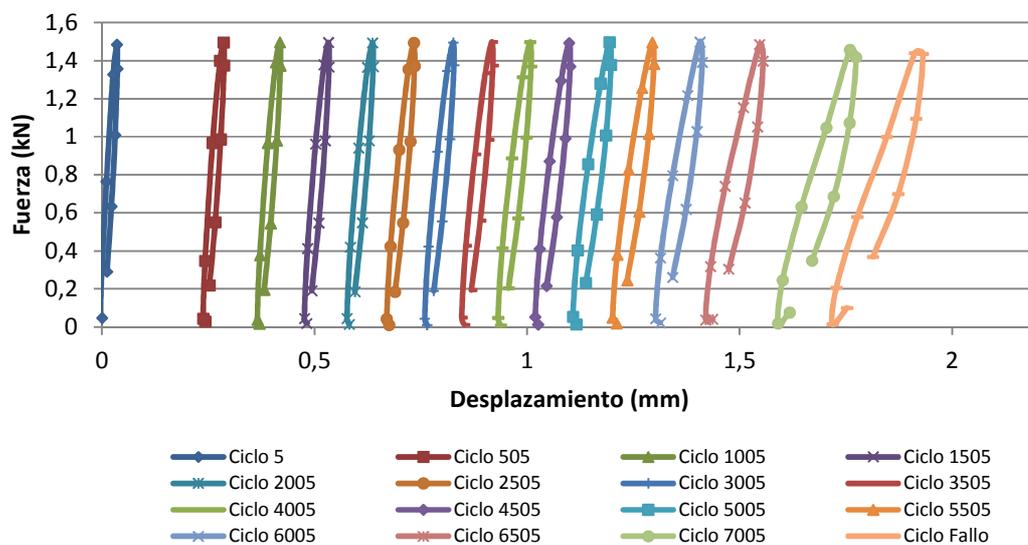


Figura 149. Evolución de los ciclos de histéresis en un ensayo real.

Para el cálculo de la energía disipada en cada ciclo de carga puede procederse de diferentes maneras. Una de ellas puede ser el empleo de la *Ecuación 16* para cargas cíclicas en materiales visco-elásticos lineales, definida en el estudio del estado del arte. No obstante, si se quiere llevar a cabo un cálculo con mayor precisión (puesto que no depende de la respuesta visco-elástica del material, y puede ser empleada bajo cualquier circunstancia y tipo de material evaluado), puede realizarse una interpolación paramétrica de los datos tomados durante el ensayo y utilizar un polinomio “spline” que aproxime el ciclo de histéresis, para posteriormente calcular el área contenida en el interior del lazo resultante. Cuanto más datos se tenga (puntos de carga/desplazamiento), más precisa será la interpolación paramétrica, y el polinomio utilizado se ajustará más a la forma real del lazo de histéresis. A pesar de ello, el empleo de una gran cantidad de datos por ciclo puede llevar a procesos de cálculos muy pesados que alarguen la determinación de la energía disipada y por tanto hay que buscar una solución que permita hacerlo de forma efectiva. Para llevar a cabo estas operaciones puede utilizarse cualquier programa de cálculo utilizado comúnmente en el ámbito de las matemáticas (Wolfram Mathematica, MatLAB, etc.).

El dispositivo de ensayo diseñado en esta tesis doctoral permite analizar tanto desplazamientos horizontales, como verticales a ambos lados de la probeta, de manera que puede obtenerse una medida global de toda la energía disipada en el volumen de estudio, con una evaluación más precisa del daño producido en el material. Así, la energía disipada total del sistema en cada ciclo de carga vendrá calculada como la energía disipada en dirección horizontal, más la disipada en dirección vertical:

$$\omega_i = \omega_{hi} + \omega_{vi} \text{ [Ecuación 50]}$$

Donde ω_i es la energía disipada en el ciclo i (en J/m^3), ω_{hi} es la energía disipada en el ciclo i en sentido horizontal (en J/m^3), y ω_{vi} es la energía disipada en el ciclo i en sentido vertical (en J/m^3).

Para ello, se ha llevado a cabo una programación del proceso mediante “Wolfram Mathematica 7”, en la que a partir de un archivo tipo Excel obtenido directamente del ensayo (en el que se encuentran registrados los ciclos, y valores de carga y desplazamiento por ciclo), se calcula la energía disipada en ambas direcciones para cada ciclo. A continuación se muestra un ejemplo de la programación utilizada para dicha tarea.

```
Needs["ExcelLink`"]  
  
Directory[]  
  
SetDirectory["C:\Tesis\EDisip"]  
  
ExcelSheet["EDis.P6B.xlsx"]  
  
ExcelSheets[]  
  
elementosciclo = 10; celdainicio = 3;  
ciclo = 0;  
datosA = Table[0, {i, elementosciclo}];  
datosB = Table[i, {i, elementosciclo}];  
datos = Join[datosA, datosB]
```

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

```
While[datos ≠ {},  
  ciclo = ciclo + 1;  
  rangoceldasC = "C" <> ToString[(ciclo - 1) elementosciclo + celdainicio] <>  
    ":" <> "C" <> ToString[ciclo elementosciclo + celdainicio - 1];  
  rangoceldasD = "D" <> ToString[(ciclo - 1) elementosciclo + celdainicio] <>  
    ":" <> "D" <> ToString[ciclo elementosciclo + celdainicio - 1];  
  rangoceldasE = "E" <> ToString[(ciclo - 1) elementosciclo + celdainicio] <>  
    ":" <> "E" <> ToString[ciclo elementosciclo + celdainicio - 1];  
  fuerza[ciclo] = ExcelRead[rangoceldasC];  
  desplhor[ciclo] = ExcelRead[rangoceldasD];  
  desplvert[ciclo] = ExcelRead[rangoceldasE];  
  datos = Join[fuerza[ciclo], desplhor[ciclo], desplvert[ciclo]];  
  (* Print[ciclo] *)  
]
```

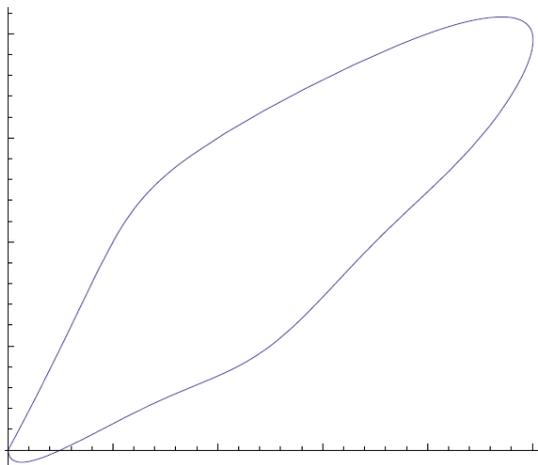
```
numciclos = ciclo - 1
```

```
ciclo = numciclos;  
histeresishorizontal =  
  Append[Table[{desplhor[ciclo][[i]], fuerza[ciclo][[i]]}, {i, elementosciclo}],  
    {desplhor[ciclo][[1]], fuerza[ciclo][[1]]}]  
histeresisvertical = Append[Table[{desplvert[ciclo][[i]], fuerza[ciclo][[i]]},  
  {i, elementosciclo}], {desplvert[ciclo][[1]], fuerza[ciclo][[1]]}]
```

```
n = elementosciclo + 1
```

```
nodos = Table[(i - 1) / (n - 1), {i, n}] // N
```

```
ParametricPlot[{xp[t], yp[t]}, {t, 0, 1}]
```



```

formSimpson[g_, a_, b_, m_] :=
Module[{h =  $\frac{b-a}{m}$  // N},  $\frac{h}{6} \left( g[a] + 2 \sum_{i=1}^{m-1} g[a+i h] + 4 \sum_{i=1}^m g\left[a + \frac{2i-1}{2} h\right] + g[b] \right)$ ]

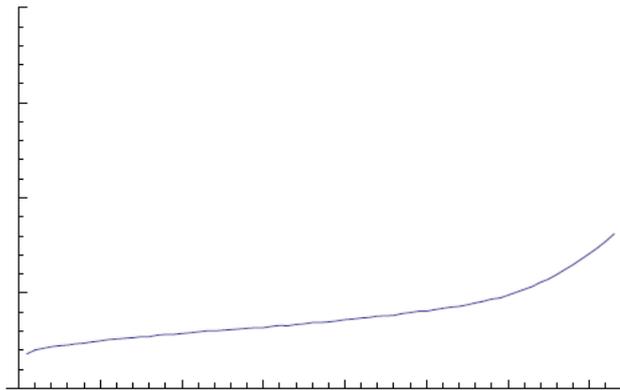
Manipulate[
histeresishorizontal =
Append[Table[{desplhor[ciclo][[i]], fuerza[ciclo][[i]]}, {i, elementosciclo}],
{desplhor[ciclo][[1]], fuerza[ciclo][[1]]}];
histeresisvertical = Append[Table[{desplvert[ciclo][[i]], fuerza[ciclo][[i]]},
{i, elementosciclo}], {desplvert[ciclo][[1]], fuerza[ciclo][[1]]}];
xphor = Interpolation[Table[{nodos[[i]], histeresishorizontal[[i, 1]]}, {i, n}],
InterpolationOrder → 3, Method → "Spline"];
yphor = Interpolation[Table[{nodos[[i]], histeresishorizontal[[i, 2]]}, {i, n}],
InterpolationOrder → 3, Method → "Spline"];
xpver = Interpolation[Table[{nodos[[i]], histeresisvertical[[i, 1]]}, {i, n}],
InterpolationOrder → 3, Method → "Spline"];
ypver = Interpolation[Table[{nodos[[i]], histeresisvertical[[i, 2]]}, {i, n}],
InterpolationOrder → 3, Method → "Spline"];
areahor[ciclo] =  $\frac{1}{2}$  formSimpson[
((∂t xphor[t]) yphor[t] - xphor[t] (∂t yphor[t])) /. t → # &, 0, 1, 11];
areaver[ciclo] =  $\frac{1}{2}$  formSimpson[
((∂t xpver[t]) ypver[t] - xpver[t] (∂t ypver[t])) /. t → # &, 0, 1, 11];
(* GraphicsRow[{ParametricPlot[{xphor[t], yphor[t]}, {t, 0, 1}],
ParametricPlot[{xpver[t], ypver[t]}, {t, 0, 1}]}] *)
(* Print["Área horizontal = ", areahor[ciclo],
"
Área vertical = ", areaver[ciclo]]; *)
GraphicsRow[{ListLinePlot[histeresishorizontal, PlotRange -> All],
ListLinePlot[histeresisvertical, PlotRange -> All]}]
, {ciclo, 1, numciclos, 1}]

Table[{areahor[ciclo], areaver[ciclo]}, {ciclo, numciclos}] // TableForm

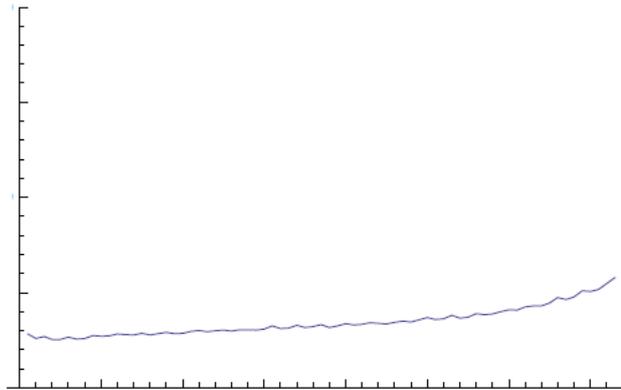
ListLinePlot[Table[areahor[ciclo], {ciclo, numciclos}], PlotRange → {0, 0.2}]

```

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas



```
ListLinePlot[Table[areaver[ciclo], {ciclo, numciclos}], PlotRange -> {0, 0.2}]
```



```
formTrapecios[lista_] :=
```

```
Module[{h = 1, m = Length[lista]},  $\frac{h}{2} \left( lista[[1]] + 2 \sum_{i=2}^{m-1} lista[[i]] + lista[[m]] \right)$ ]
```

```
formTrapecios[Table[areahor[ciclo], {ciclo, numciclos}]]
```

```
formTrapecios[Table[areaver[ciclo], {ciclo, numciclos}]]
```

Según el enfoque de la energía disipada, la mezcla bituminosa disipará más energía cuanto mayor daño se produzca en la probeta ensayada, o expresado de otra manera, para un mismo nivel de daño un material disipará más energía cuanto más resistente sea (puesto que necesitará introducir más energía para alcanzar dicho nivel de daño). A pesar de ello, la

energía disipada en un ciclo depende de la energía disipada en los ciclos de carga previos, lo que significa que es dependiente de su historial de carga (Eberik & Sucouglu 2002).

En cualquier material en el que se haya producido un daño, necesariamente debe haberse producido también un cambio en su energía disipada (Ghuzlan 2001). De hecho, únicamente la cantidad relativa de disipación de energía creada por cada ciclo de carga adicional (lo que excluye la energía disipada asociada a comportamientos pasivos como la energía térmica), puede provocar un daño adicional en la mezcla (Shen & Carpenter 2007).

En base a estas consideraciones, para poder analizar la evolución y cuantificación real del daño por fisuración que tiene lugar en la mezcla, es necesario utilizar el concepto de tasa de cambio de energía disipada (RDEC, Ratio of Dissipated Energy Change). Este concepto fue presentado inicialmente por Carpenter & Jensen 1997, posteriormente mejorado por Ghuzlan & Carpenter 2000, y finalmente aplicado y contrastado por Carpenter et al. 2003, y Shen & Carpenter 2005 y 2007, para el estudio de los procesos de daño por fatiga en mezclas bituminosas. La tasa de cambio de energía disipada viene definida en la *Ecuación 51*.

$$RDEC_{n+1} = \frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_n} \text{ [Ecuación 51]}$$

Donde ω_n es la energía disipada producida en el ciclo de carga n (en J/m³), y ω_{n+1} es la energía disipada producida en el ciclo de carga n+1 (en J/m³).

El uso de este parámetro permite eliminar la energía que es disipada sin producir daño en la mezcla (como la energía disipada en forma de calor), proporcionando un buen indicador del daño por fisuración causado en la mezcla de un ciclo de carga a otro. Comparando las gráficas de la energía disipada y de la RDEC por ciclo (Figura 150), se puede observar como en ambas existe una tendencia creciente, que se acentúa cuando se produce la macrofisura. No obstante, los valores obtenidos en la RDEC se ajustan más a la realidad del comportamiento del proceso de fisuración, ya que como muchos estudios han demostrado (Zhang et al. 2001a; Zhang et al. 2001b), las fisuras se propagan con un incremento discontinuo a “escalones” de diferentes tamaños (unas veces la fisura avanza más y otras

menos; unas veces se produce más daño y otras menos). En este sentido, la gráfica de RDEC muestra como se produce un incremento de la energía disipada de un ciclo a otro, pero este incremento no es lineal, sino que unas veces es mayor y otras menor (llegando a ser nulo o quasi-nulo cuando de un ciclo a otro no se produce daño por fisuración). Además, muestra cómo a partir de la formación de la macro-fisura siempre en cada ciclo de carga adicional se produce un daño por fisuración considerable.

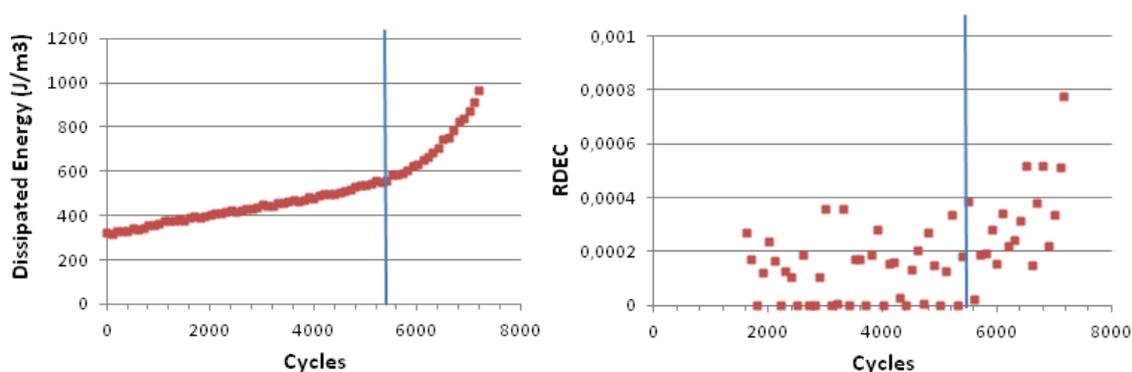


Figura 150. Comparación entre la energía disipada y el RDEC durante el desarrollo de un ensayo.

Utilizando este concepto, se puede afirmar que la forma más precisa de cuantificar la evolución del daño por fisuración sufrido por el material durante el ensayo es mediante la representación del RDEC acumulado (Ecuación 52, Figura 151). En base a esta cuantificación del daño por fisuración en función del número de ciclos de carga, desde esta investigación se propone un **parámetro de daño medio (γ)** asociado al proceso de fisuración de cada material y al nivel de carga asociado, que vendría definido por el valor del RDEC acumulado total, entre el número de ciclos hasta alcanzar el fallo por fisuración del material (N_f) [Ecuación 53].

$$RDEC \text{ Acumulado} = \sum_{i=1}^{N_f} RDEC_i \text{ [Ecuación 52]}$$

$$\gamma = \frac{RDEC \text{ Acumulado}}{N_f} \text{ [Ecuación 53]}$$

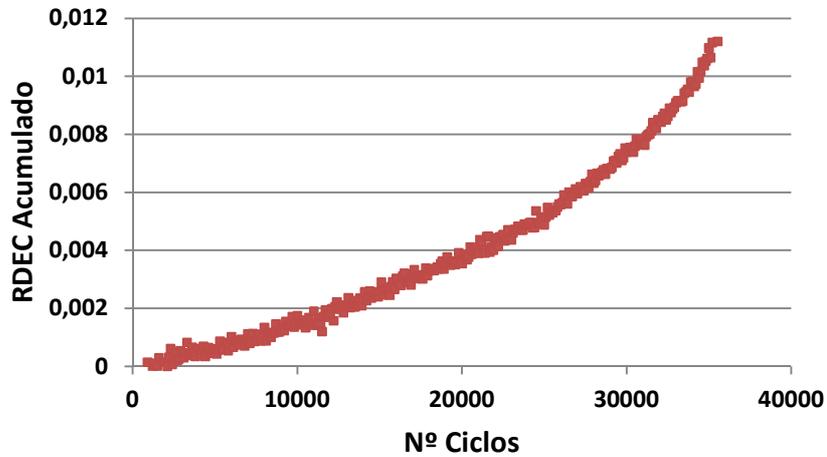


Figura 151. Evolución del RDEC acumulado en un ensayo.

En base a los valores del parámetro medio de daño obtenidos para cada nivel de carga, puede definirse la ley de daño a fisuración por fatiga (Figura 152), la cual se ajusta a una curva exponencial creciente conforme el nivel de carga aplicado en el ensayo aumenta. Mediante esta ley de daño puede determinarse qué materiales, y bajo qué condiciones, son más susceptibles de ser afectados por el fenómeno de fisuración por fatiga, de manera que pueda realizarse un diseño óptimo de la mezcla.

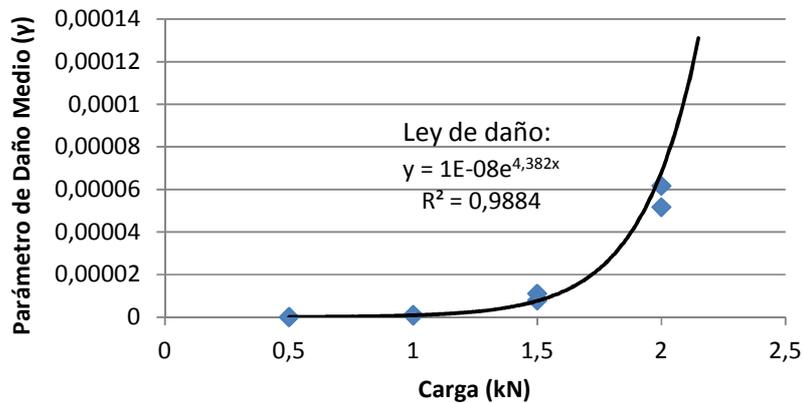


Figura 152. Evolución del parámetro de daño medio con respecto al nivel de carga aplicado.

4.4.3. Estudio de las Etapas del Proceso de Fisuración. Umbrales de Daño

Asociando los ciclos de carga del ensayo a cada una de las fases del proceso de fisuración, puede definirse el ciclo de inicio de fisura (N_i) como el ciclo en el que la mezcla ha agotado su capacidad de deformar plásticamente y comienza a aparecer el daño por fisuración mediante la formación de micro-fisuras; y el ciclo de inicio de macro-fisura (N_M) como el ciclo en el que aparece una superficie de fallo dominante en el material. En este sentido, el número de ciclos de carga contenido entre el ciclo de inicio de fisura y el ciclo de fallo por fisuración N ($N=N_f - N_i$), determinará la duración del proceso de propagación de fisura que ha tenido lugar en el material.

No obstante, mediante la observación de la degradación del material no resulta claro ni intuitivo establecer en qué ciclo se produce el inicio del proceso de fisuración N_i (debido a que el simple análisis visual imposibilita tener en cuenta la fase de formación de las micro-fisuras). Por otra parte, tampoco resulta preciso controlar la evolución del daño producido en el material de manera que la aleatoriedad y dispersión tridimensional del proceso, impiden hacer un seguimiento del desarrollo y coalescencia de las micro y meso-fisuras, así como del crecimiento real de la macro-grieta (la cual puede formarse por otra cara no visible de la probeta, o en el interior de ésta).

Debido a este hecho resulta necesario utilizar fundamentos teóricos que permitan aproximar una estimación de los ciclos N_i y N_M durante el ensayo. A continuación se presentan dos métodos para la definición de dichos ciclos. El primero de ellos se trata de una teoría ya consolidada y basada en los conceptos en términos de disipación de energía definidos por Hopman et al. 1989, Read 1996 y Rowe 1996. El segundo es una propuesta llevada a cabo desde esta investigación como alternativa al método anterior, aprovechando las ventajas que ofrece la configuración utilizada en el ensayo desarrollado, que permite un análisis del estado de los desplazamientos producidos en el volumen en el que tiene lugar el proceso de fisuración por fatiga.

4.4.3.1. Estudio del “Energy Ratio”

Hopman et al. 1989 propusieron el empleo del “Energy Ratio” para definir el número de ciclos necesarios para provocar en un ensayo de fatiga el inicio de una macro-fisura N_M . Así, en un ensayo a tensión controlada, la curva dibujada por el Energy Ratio (R_n) en función del número de ciclos revela un punto de inflexión N_M en el cuál se produce el inicio de la macro-fisura. Este concepto (definido por la Ecuación 54) fue utilizado por estos autores para establecer un criterio menos arbitrario que la reducción del módulo de rigidez un cierto porcentaje (dado que es muy complicado establecer cuál es el verdadero módulo de rigidez inicial de un material), en la evaluación del fallo por fatiga de un material (Rowe 1996).

$$R_{ni} = \frac{n_i \cdot \omega_0}{\omega_i} \text{ [Ecuación 54]}$$

Donde R_{ni} es el Energy Ratio en el ciclo i , “ n_i ” es el número del ciclo i , ω_0 es la energía disipada en el primer ciclo, y ω_i es la energía disipada en el ciclo i .

Posteriormente, los estudios llevados a cabo por Read 1996, demostraron que el inicio de la micro-fisuración de un material bituminoso tiene lugar cuando la curva del Energy Ratio se desvía de su línea de crecimiento inicial (N_i), mientras que la formación de la macro-fisura (al igual que establecieron Hopman et al. 1989), tiene lugar cuando dicha curva llega a su punto de inflexión (N_M). En la Figura 153 se muestran ambos puntos, definiéndose claramente las diferentes fases del proceso de fisuración en un ensayo.

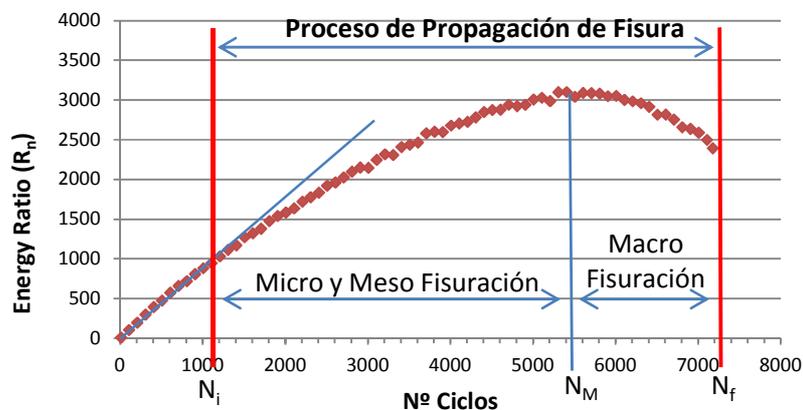


Figura 153. Evolución del Energy Ratio en función del número de ciclos.

El empleo de esta teoría basada en la energía disipada por el material, permite definir claramente el punto de inicio del proceso de fisura, el proceso de formación y coalescencia de micro y meso-fisuras, y la propagación de la macro-fisura. Así, el estudio del Energy Ratio delimitará cada una de las fases del proceso de fisuración durante el ensayo.

4.4.3.2. Estudio del “Displacement Ratio”

Dado que durante la ejecución de los ensayos de puesta a punto del dispositivo desarrollado se observó que la curva seguida por el Energy Ratio no siempre guarda la forma definida en el apartado anterior (y por tanto no siempre es posible estimar cada uno de los ciclos que delimitan las fases del proceso de fisuración), desde esta investigación se decidió definir un nuevo parámetro como alternativa en la estimación de N_i y N_M . Este parámetro ha sido denominado “Displacement Ratio” y tiene su fundamento en el concepto teórico del coeficiente de Poisson (ν).

Dicho coeficiente es una constante elástica que relaciona las deformaciones producidas en el sentido de aplicación de la carga con las producidas en un eje perpendicular a ésta. Así, el coeficiente de Poisson afirma que una carga aplicada sobre un cuerpo no solo provoca una deformación en la dirección en que es aplicada, sino que también tiene asociadas deformaciones en las otras direcciones del espacio.

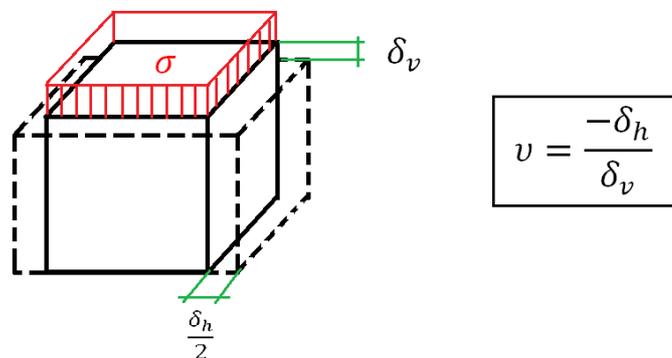


Figura 154. Definición del coeficiente de Poisson considerando desplazamientos en 2D.

Durante la ejecución del ensayo desarrollado en esta tesis, cada ciclo de carga provocará dentro del volumen representativo de estudio unos desplazamientos en su misma dirección de aplicación (vertical), pero a su vez, también tendrá asociados unos desplazamientos en la dirección perpendicular a ésta (horizontal). Conforme el proceso de fisuración se desarrolla dentro de dicho volumen, la magnitud de estos desplazamientos irá variando puesto que en el material se estará produciendo un daño debido al desarrollo de la fisura.

Aplicando el concepto del coeficiente de Poisson al método de ensayo desarrollado, puede definirse el parámetro “Displacement Ratio” que permita controlar la evolución del proceso de fisuración dentro del volumen representativo de material donde tiene lugar el fenómeno. Así, el Displacement Ratio se define como una relación adimensional entre la amplitud de los desplazamientos horizontales y la amplitud de los desplazamientos verticales, producidos dentro del volumen representativo de estudio en el que tiene lugar el proceso de fisuración [Ecuación 55].

$$\delta_i = \frac{\delta_{hi}}{\delta_{vi}} \text{ [Ecuación 55]}$$

Donde δ_i es el valor del Displacement Ratio en el ciclo i , δ_{hi} es la amplitud de los desplazamientos horizontales en el ciclo i , y δ_{vi} es la amplitud de los desplazamientos verticales en el ciclo i .

Tal y como ocurre en un firme real, durante la primera etapa del ensayo, en la probeta se produce un proceso de deformación plástica, que comienza en la zona superior donde es aplicada la carga cíclica (los desplazamientos medidos en sentido horizontal en la zona inferior del volumen son pequeños). Conforme se van repitiendo los ciclos de carga, la capacidad de deformar plásticamente de la mezcla va disminuyendo, y por tanto la amplitud de los desplazamientos verticales asociados (δ_v) también lo hace hasta convertirse en casi constante (cuando dicha capacidad se agota). Además, conforme se va agotando la capacidad de deformar plásticamente en la zona superior de la probeta, van apareciendo deformaciones plásticas horizontales crecientes en la zona inferior, que provocan el aumento de la amplitud de los desplazamientos medidos en este sentido (δ_h). De la misma

forma que en el caso de las deformaciones verticales, llega un punto en el que la capacidad del material de deformar plásticamente en sentido horizontal también se agota, y por tanto la amplitud de los desplazamientos medidos en esta dirección permanece más o menos constante (Figura 155). Dado que las mezclas bituminosas tienen mayor capacidad de soportar deformaciones a compresión que a tracción, los valores de los desplazamientos medidos en este sentido son superiores, de forma que durante esta etapa de deformaciones plásticas las medidas en la zona superior (δ_v) son mayores que en la zona inferior de la probeta (δ_h).

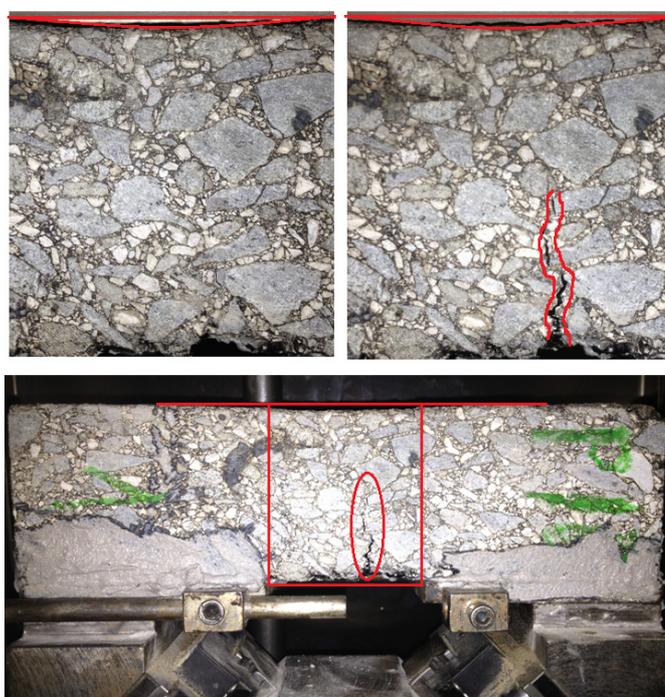


Figura 155. Deformaciones plásticas sufridas en la zona superior de la probeta sin fisurar, y aparición posterior de la fisura en el material con la permanencia de las deformaciones plásticas.

En base a estas consideraciones, el Displacement Ratio sufre un incremento inicial durante esta etapa de deformación plástica del material (ya que los valores de desplazamiento vertical medidos van disminuyendo, mientras que los de desplazamiento horizontal aumentan ligeramente), hasta que se estabiliza cuando el material agota su capacidad de deformar plásticamente (Figura 156).

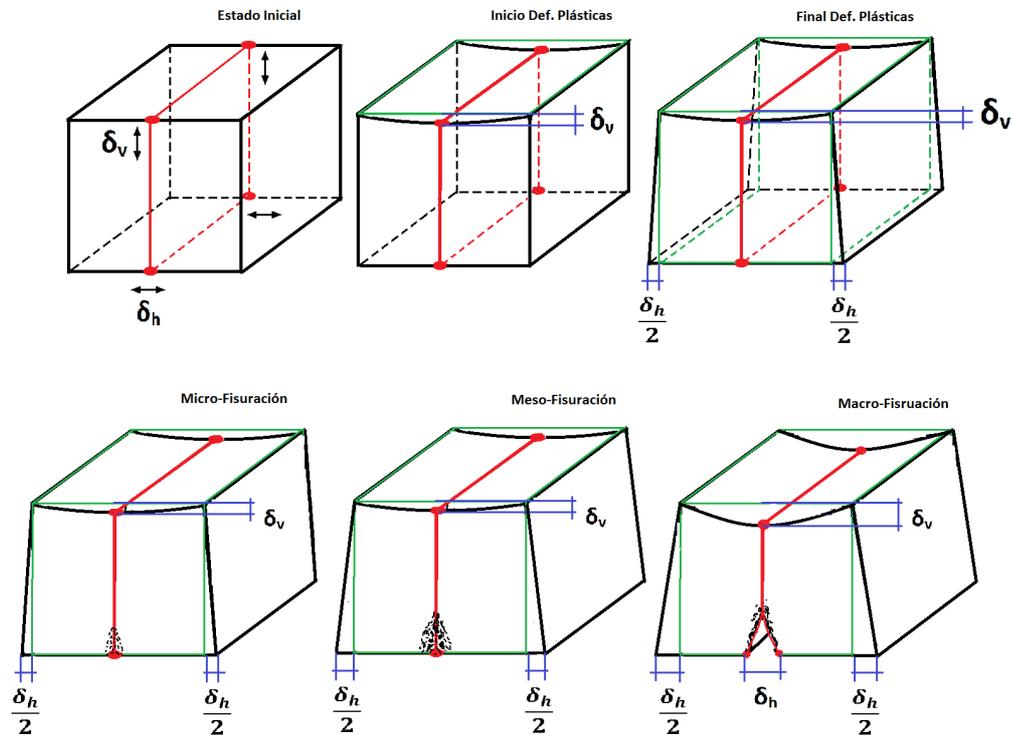


Figura 156. Evolución de los desplazamientos sufridos en el volumen de estudio debido al proceso de fisuración por fatiga.

A partir de este punto, el material empieza el proceso de fisuración, debido a que la energía introducida en el sistema tras la aplicación de cada ciclo de carga no puede ser disipada en forma de deformaciones plásticas, y entonces ha de hacerlo en forma de daño (aparición de micro-fisuras). Así, entramos en una segunda etapa del ensayo en la que una vez que el material ha agotado por completo su capacidad de deformar plásticamente, empiezan a aparecer en él micro-fisuras que conforme pasan los ciclos de carga van en aumento, y que tras su coalescencia forman meso-fisuras. En esta etapa, la amplitud de los desplazamientos horizontales y verticales registrados permanece quasi-constante, creciendo ligeramente debido a la aparición de las micro-fisuras (y el consecuente aumento de los desplazamientos horizontales). Como su aparición es creciente, el valor de los desplazamientos registrados irá en aumento, sobre todo en sentido horizontal, ya que es la zona que se encuentra traccionada y donde tiene lugar el inicio del proceso de fisuración. En este sentido, la

evolución del Displacement Ratio muestra una etapa en la que tras la subida provocada por las deformaciones plásticas, la curva se vuelve quasi-plana con un ligero crecimiento constante. Posteriormente, conforme las micro-fisuras empiezan a unirse formando meso-fisuras, la pendiente de esa curva vuelve a incrementarse, denotando que la amplitud de los desplazamientos horizontales se incrementa más severamente (debido al daño generado por las meso-fisuras).

Finalmente, en la última etapa del ensayo tras la coalescencia de las meso-fisuras, se produce la formación de la macro-fisura (visible en el lateral de la probeta), lo que provoca que la amplitud de los desplazamientos registrados durante el ensayo aumente de forma considerable (Figura 157). Dado que la configuración del ensayo desarrollado en esta investigación induce el inicio de la macro-fisura en la zona inferior de la probeta (con su posterior propagación hacia la superficie), los valores de desplazamiento horizontal medidos son mayores que los de desplazamiento vertical ($\delta_v < \delta_h$), los cuales también aumentan por la propia deflexión de la probeta. Debido a este hecho, el parámetro δ muestra en esta etapa un incremento de su valor que se prolonga durante todo el proceso de propagación de la macro-fisura, hasta el fallo del material (fin del proceso de fisuración).

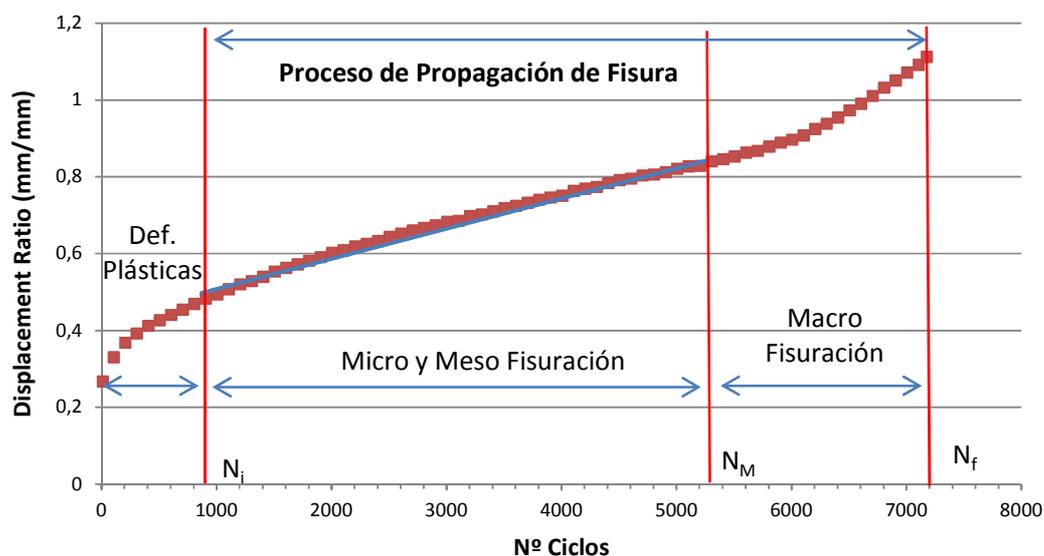


Figura 157. Evolución del Displacement Ratio en función del número de ciclos.

Este parámetro resulta más directo que el cálculo del Energy Ratio para la definición de las diferentes etapas dentro del proceso de fisuración, puesto que en el caso del Energy Ratio es necesario calcular la energía disipada en cada ciclo, y en el caso del Displacement Ratio se obtiene directamente de las medidas de desplazamiento realizadas sobre la probeta durante el ensayo.

4.4.3.3. Definición de los Umbrales de Daño a Fisuración

Una vez definidos los ciclos N_i y N_M , ya sea a partir del Energy Ratio o a través del Displacement Ratio, mediante el cálculo de la energía disipada acumulada para cada uno de estos ciclos [Ecuación 56], se pueden establecer los umbrales de daño del material (Figura 158). Como ya definieran algunos investigadores en sus estudios para evaluar el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas (Sangpetngam et al. 2003; Zhang et al. 2001a), en cada material existen unos valores de energía disipada que una vez rebasados, cualquier energía que se introduzca en el sistema de nuevo, provocara daños en el material. En base a ello, en esta investigación se han definido unos valores umbrales que marcarán la cantidad de energía que puede disipar un material sin que en él se presente daño por fisuración (también considerado como el límite de energía disipada de deformación plástica), la cantidad de energía que puede disipar sin que en él aparezca un daño estructural irrecuperable (basados en el fenómeno de “healing” que tiene lugar en las mezclas bituminosas, y considerando el hecho de que cualquier daño por debajo de esta energía puede ser recuperado tras un cierto periodo de descanso), o la cantidad de energía necesaria para provocar su fallo total por fisuración (considerando fallo total como la propagación del daño estructural en toda la sección del material analizado). Así, cuanto mayores sean los umbrales de daño del material, más resistente será ante el daño de fisuración por fatiga.

$$\omega = \sum_{i=1}^{N_i; N_M; N_f} \omega_i \text{ [Ecuación 56]}$$

Donde ω es la energía disipada acumulada (J/m^3), en el ciclo de inicio del proceso de fisuración N_i , en el ciclo de inicio de la macro-fisura N_M , o en el ciclo de fallo N_f .

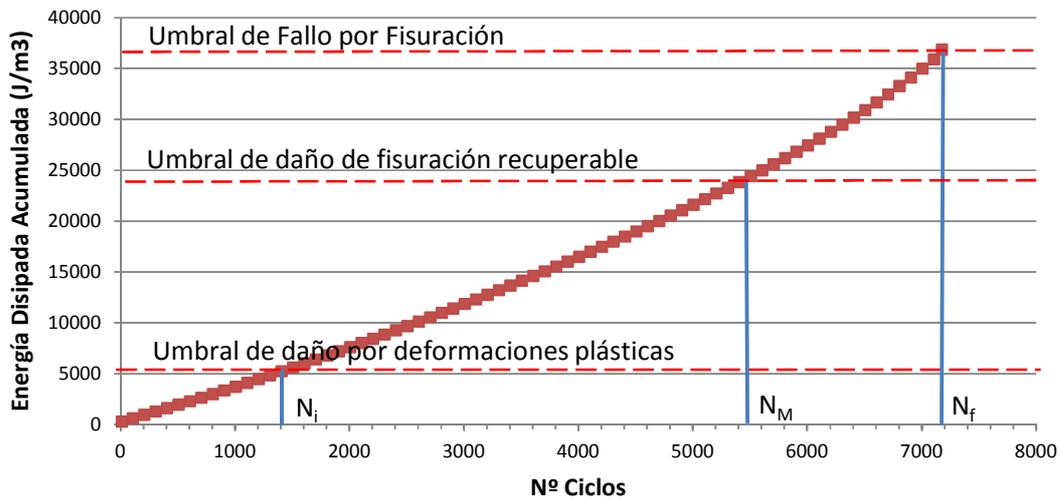


Figura 158. Umbrales de daño a partir del cálculo de la energía disipada acumulada.

La determinación de los umbrales de daño nos permitirá llevar a cabo un análisis en profundidad del proceso de fisuración desarrollado en el material, de forma que en base a su energía disipada acumulada podamos establecer la resistencia de la mezcla al inicio de una fisura, las características de ductilidad y tenacidad durante su propagación y su resistencia a este proceso, o la energía necesaria para causar su fallo a fisuración por fatiga. La gran ventaja de estos umbrales, es que no se trata de un análisis fenomenológico basado en el número de ciclos, sino que está basado en la energía disipada por el material, la cual nos permitirá comparar con mayor precisión el comportamiento de materiales de diferentes características y bajo diferentes condiciones de ensayo.

En base a dicho concepto, variando los escalones de carga aplicados en cada ensayo, pueden establecerse las curvas umbrales de cada material, de forma que se defina su comportamiento a fisuración en función de la carga aplicada. En el ejemplo mostrado en la Figura 159 puede observarse como a cargas inferiores la capacidad de deformar

plásticamente del material aumenta, así como su resistencia a la propagación de micro-meso fisuras. No obstante, una vez iniciada la macro-fisura la resistencia del material es más o menos similar independientemente del nivel de carga aplicado.

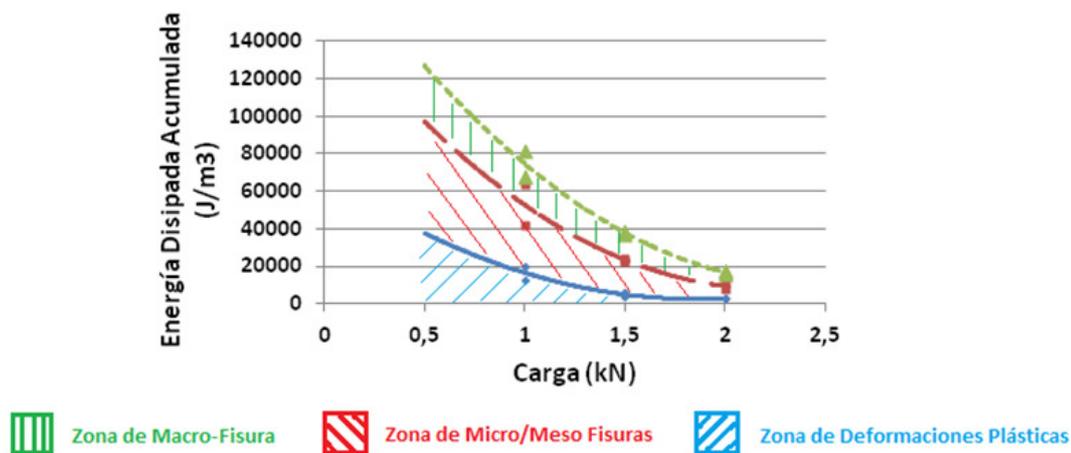


Figura 159. Ejemplo de los umbrales de daño de una mezcla bituminosa para diferentes niveles de carga.

4.5. Validación del Método de Ensayo

Finalmente, tras diseñar el dispositivo a utilizar, y definir las características de ensayo, así como el método de evaluación del comportamiento a fisuración del material, la última etapa de la metodología define el procedimiento de validación del método de ensayo desarrollado para evaluar el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas.

Para ello, será necesario seleccionar los materiales adecuados y definir un plan de ensayos que permita cumplir con dichos objetivos de validación. A continuación se definen los materiales, así como los ensayos a realizar en cada una de las etapas del proceso de validación.

4.5.1. Materiales

Durante el estudio de validación del método de ensayo desarrollado en esta tesis doctoral se utilizarán diferentes tipos de mezclas bituminosas compuestas por varios tipos de materiales. Las tipologías de mezclas seleccionadas para el estudio fueron dos cuyo empleo se encuentra muy extendido en las carreteras de nuestro país, en concreto mezclas tipo AC y tipo BBTM. Las mezclas AC son de tipo hormigón bituminoso (Asphalt Concrete, EN 13108-1), con granulometría cerrada y un esqueleto mineral continuo. El espesor de extendido de este tipo de materiales suele estar comprendido entre los 5-10 cm, ofreciendo buena capacidad portante para disipar las cargas transmitidas por el tráfico (buena resistencia mecánica a compresión debida al gran rozamiento interno de sus partículas minerales), así como ante esfuerzos tangenciales y a tracción. Por su parte, las mezclas BBTM (Bétons Bitumineux Très Minces, EN 13108-2) son microaglomerados discontinuos para capa de rodadura, con un esqueleto mineral principalmente compuesto por árido grueso y una fuerte cohesión ya que suelen fabricarse con un betún modificado. Suelen extenderse en espesores reducidos (2-3,5 cm), tanto en rehabilitaciones superficiales de firmes deteriorados, como en carreteras de nueva construcción, presentando una buena macrotextura superficial gracias a la discontinuidad en su granulometría.

En base a estas consideraciones, las mezclas empleadas durante los estudios de validación del método de ensayo fueron 3, una mezcla AC 22 S, una AC 16 S y una BBTM 11A. Los respectivos esqueletos minerales utilizados en la fabricación de estas mezclas se muestran en las Figuras 160, 161 y 162.

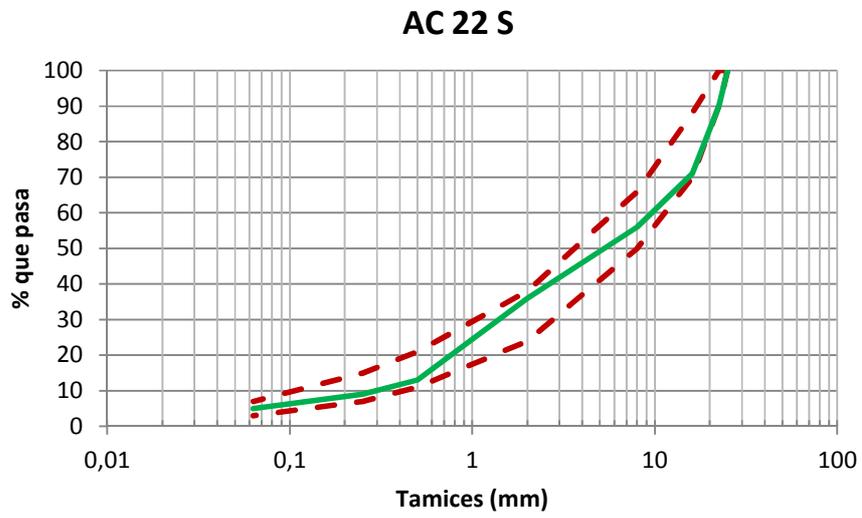


Figura 160. Granulometría de la mezcla AC 22 S.

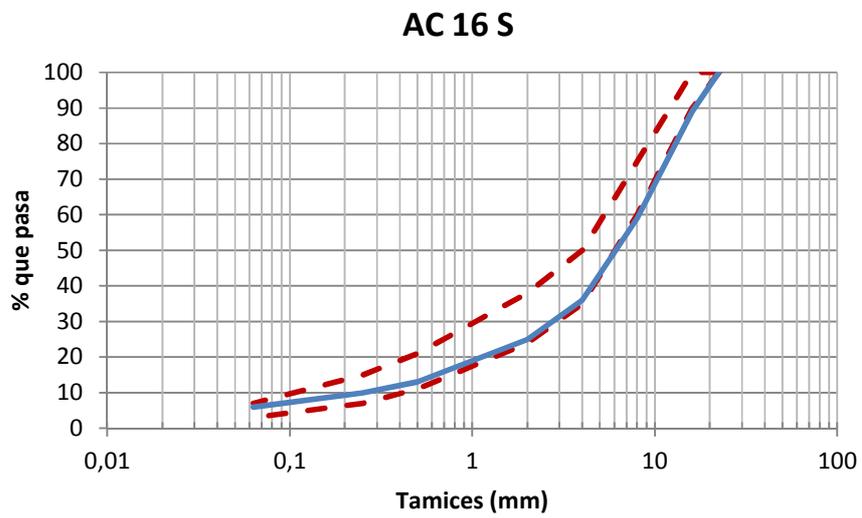


Figura 161. Granulometría de la mezcla AC 16 S.

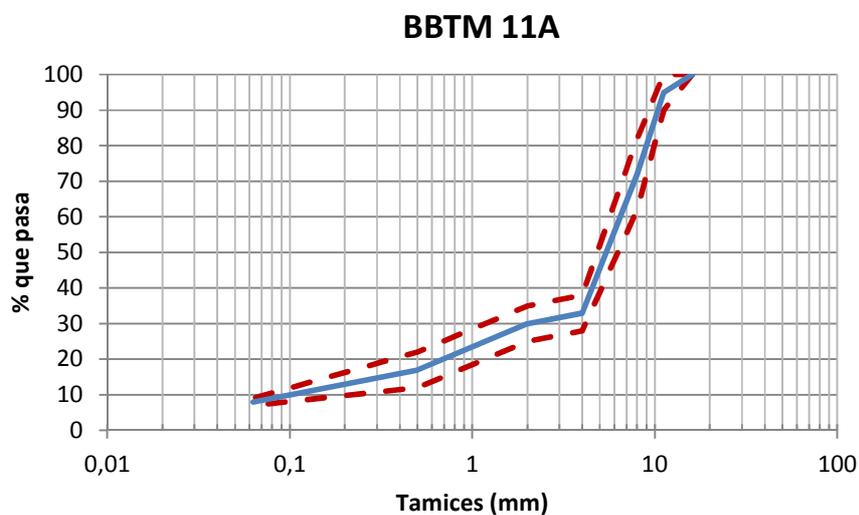


Figura 162. Granulometría de la mezcla BBTM 11A.

Por su parte, la naturaleza de los áridos seleccionada varía en función del tipo de mezcla. Así, en la fabricación de la mezcla AC 22 S se emplea únicamente árido calizo (tanto para la fracción gruesa como para la fina), mientras que en la fabricación de las mezclas AC 16 S y BBTM 11A se utiliza árido ofítico en la fracción gruesa y calizo en la fracción fina. Las características de los áridos vienen recogidas en las Tablas 6, 7 y 8. El filler seleccionado para la fabricación de las mezclas es de aportación, utilizando para ello un material de tipo carbonato con una densidad aparente de $0,7520 \text{ gr/cm}^3$ (según UNE-EN 1097-6) en las mezclas AC, y cemento de densidad aparente $0,7 \text{ gr/cm}^3$ (según UNE-EN 1097-6) en la mezcla BBTM 11A.

Capítulo – 4: Metodología

Árido Grueso Calizo		
Proporción de Partículas Trituradas (UNE-EN 933-5)	100	
Forma del Árido Grueso. Índice de Lajas. (UNE-EN 933-3)	5,1	
Resistencia a la Fragmentación (Coef. Los Ángeles, UNE-EN 1097-2)	20,3	
Resistencia al Pulimento (CPA, Anexo D UNE 146130)	-	
Limpieza. Contenido de Impurezas (Anexo C UNE 146130)	0,477	
Densidad Relativa y Absorción (UNE-EN 1097-6)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Absorción del agua tras inmersión (%)
	2,748	0,81
Árido Fino Calizo		
Equivalente de Arena (UNE-EN 933-8)	53,3	
Densidad Relativa y Absorción (UNE-EN 1097-6)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Absorción del agua tras inmersión (%)
	2,79	0,77

Tabla 6. Propiedades de los áridos utilizados en la fabricación de la mezcla AC 22 S.

Árido Grueso Ofítico		
Proporción de Partículas Trituradas (UNE-EN 933-5)	100	
Forma del Árido Grueso. Índice de Lajas. (UNE-EN 933-3)	14,7	
Resistencia a la Fragmentación (Coef. Los Ángeles, UNE-EN 1097-2)	14,1	
Resistencia al Pulimento (CPA, Anexo D UNE 146130)	54,5	
Limpieza. Contenido de Impurezas (Anexo C UNE 146130)	0,04	
Densidad Relativa y Absorción (UNE-EN 1097-6)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Absorción del agua tras inmersión (%)
	2,84	0,52
Árido Fino Calizo		
Equivalente de Arena (UNE-EN 933-8)	53,3	
Densidad Relativa y Absorción (UNE-EN 1097-6)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Absorción del agua tras inmersión (%)
	2,7	0,9

Tabla 7. Propiedades de los áridos utilizados en la fabricación de la mezcla AC 16 S.

Árido Grueso Ofítico		
Proporción de Partículas Trituradas (UNE-EN 933-5)	100	
Forma del Árido Grueso. Índice de Lajas. (UNE-EN 933-3)	20	
Resistencia a la Fragmentación (Coef. Los Ángeles, UNE-EN 1097-2)	11	
Resistencia al Pulimento (CPA, Anexo D UNE 146130)	52	
Limpieza. Contenido de Impurezas (Anexo C UNE 146130)	0,04	
Densidad Relativa y Absorción (UNE-EN 1097-6)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Absorción del agua tras inmersión (%)
	3,14	1,00
Árido Fino Calizo		
Equivalente de Arena (UNE-EN 933-8)	78,0	
Densidad Relativa y Absorción (UNE-EN 1097-6)	Densidad Aparente (g/cm ³)	Absorción del agua tras inmersión (%)
	2,74	0,84

Tabla 8. Propiedades de los áridos utilizados en la fabricación de la mezcla BBTM 11A.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

El ligante a utilizar en la fabricación de las mezclas AC 22 S y AC 16 es un betún convencional de penetración B 35/50, mientras que en la mezcla tipo BBTM 11A se emplean diferentes tipos de betún a fin de observar la influencia de este componente en la resistencia a fisuración por fatiga de la mezcla. Así, se utilizará un betún modificado con polímeros tipo SBS (BM3c), un betún de alta viscosidad modificado con polvo de neumático por vía húmeda (BMAVC), un betún convencional de penetración B 50/70, y un betún convencional de penetración B 50/70 modificado con polvo de neumático por vía seca al 1,5 % de adición sobre el peso total de la mezcla. Las características de los ligantes y del polvo de neumático utilizado aparecen en las Tablas 9 y 10, respectivamente.

	B 35/50	B 50/70	BM3c	BMAVC
Penetración 25 °C (UNE-EN 1426)	44 mm/10	68 mm/10	54	54
Punto de Reblandecimiento (UNE-EN 1427)	58,2 °C	48,1 °C	68,1 °C	69,5 °C
Punto de Fragilidad Fraass (UNE-EN 12593)	-14 °C	-12 °C	-17 °C	- 15 °C
Recuperación Elástica a 25 °C (NLT 329)	-	-	73 %	80 %

Tabla 9. Propiedades de los ligantes utilizados en la fabricación de las mezclas.

Polvo de Neumático Fuera de Uso (PNFU)						
Propiedades Específicas						
Densidad		1,15 g/cm ³				
Color		Negro				
Morfología del Grano		Irregular				
Contenido en agua		< 0,75%				
Contenido en materiales textiles		< 0,5% en peso				
Contenido en materiales ferromagnéticos		< 0,1% del peso del caucho				
Granulometría	Tamiz (mm)	0,6	0,5	0,25	0,125	0,063
	% que pasa	100	74	19	2	0
Composición						
		Mín. (%)		Máx. (%)		
Extracto Cetónico		7,5		17,5		
Caucho Natural (NR)		21,0		42,0		
Polímeros (NR/SBR)		50,0		55,0		
Azufre		-		5,0		
Negro de Carbono		20,0		38,0		
Cenizas		-		18,5		

Tabla 10. Características del polvo de neumático utilizado en la fabricación de las mezclas.

El contenido de betún utilizado en la fabricación de cada una de las mezclas fue determinado en base a las consideraciones establecidas en el PG-3 basadas en los resultados obtenidos en los ensayos de de sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12) y rodadura (UNE-EN 12697-22). Dicho contenido de ligante, así como las características de densidad y huecos, y los resultados obtenidos en cada uno de estos ensayos, se expresan en la Tabla 11.

Ensayo	AC 16 S	AC 22 S	BBTM 11A BM3c	BBTM 11A BMAVC	BBTM 11A B50/70 1,5% PNFU
Contenido de Betún sobre mezcla, %	4,9	4,4	4,75	4,75	5
Densidad Aparente, kg/m ³ (UNE-EN 12697-6)	2493	2485	2783	2506	2669
Huecos de Aire, % (UNE-EN 12697-8)	4,1	4,7	7,1	4,0	4,0
Huecos del Árido (UNE-EN 12697-8)	16,1	14,5	19,8	15,9	18
Sensibilidad al Agua, ITSR % (UNE-EN 12697-12)	91,9	95,8	96,8	90,5	99,1
Rodadura, WTS mm/10 ³ ciclos (UNE-EN 12697-22)	0,076	0,090	0,05	0,078	0,026

Tabla 11. Características mecánicas de las mezclas empleadas en el estudio.

4.5.2. Plan de Ensayos

El plan de ensayos propuesto para la validación del método de ensayo UGR-FACT tiene por objeto:

- Demostrar la repetibilidad del método, de manera que se garantice una evaluación fiable del comportamiento a fisuración del material ensayado.
- Validar el fundamento teórico de los dos parámetros aportados por este método de ensayo (“Displacement ratio” y “Parámetro de daño medio”).
- Garantizar la sensibilidad de los resultados en función de las condiciones de ensayo (carga, frecuencia, temperatura, etc.), así como de los materiales testados (tipo de esqueleto mineral, naturaleza del árido, y tipo de ligante). En este sentido, los resultados obtenidos deben permitir diferenciar la respuesta de la mezcla a fisuración en base a dichas variables, de manera que se garantice que el método de

ensayo UGR-FACT es adecuado para llevar a cabo un buen diseño a nivel de laboratorio de este tipo de materiales.

4.5.2.1. Análisis de la Repetibilidad del Método de Ensayo UGR-FACT

A la hora de evaluar el comportamiento mecánico de un material mediante cualquier método de ensayo, puede ocurrir que los resultados obtenidos en varias pruebas realizadas bajo las mismas condiciones no coincidan. Este hecho es debido a errores que se comenten durante la preparación de los materiales o en la toma de las medidas, y que determinan la precisión del método de ensayo.

En base a esta condición, cuando se evalúa una determinada característica de algún material a nivel de laboratorio, el valor que se obtiene en el ensayo es en realidad un valor que se encuentra dentro de un intervalo en el cual es probable que se encuentren los valores de la característica que estamos evaluando. En función de la precisión del método de ensayo utilizado, dicho intervalo será más o menos amplio, y por tanto, la forma de evaluar la característica del material será más o menos adecuada.

Los conceptos empleados habitualmente para medir la precisión de un método de ensayo son la repetibilidad y la reproducibilidad. La repetibilidad indica el grado de acuerdo entre resultados mutuamente independientes de un ensayo, obtenidos utilizando el mismo método, en idénticos materiales, en el mismo laboratorio, por el mismo operador, usando el mismo equipo y en un corto intervalo de tiempo. Por otra parte, la reproducibilidad indica el grado de acuerdo entre resultados mutuamente independientes de un ensayo obtenidos con el mismo método, en idénticos materiales, en diferentes laboratorios, con diferentes operadores y utilizando distintos equipos.

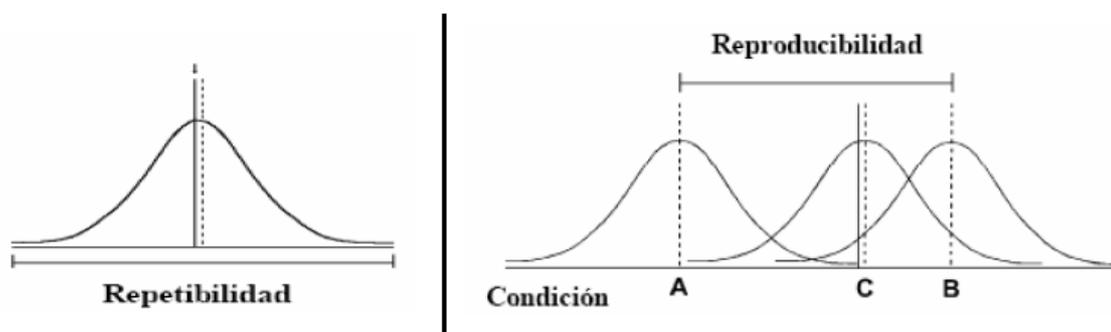


Figura 163. Conceptos de repetibilidad y reproducibilidad.

La obtención de una alta repetibilidad y reproducibilidad resultan fundamentales para poder garantizar que los resultados obtenidos con el UGR-FACT son fiables a la hora de evaluar el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas. Dado que para la evaluación de la reproducibilidad es necesaria la colaboración de varios laboratorios, laborantes y equipos, en esta investigación solo se llevará a cabo el estudio de la repetibilidad del ensayo.

El valor de repetibilidad “ r ” es el valor por debajo del cual se espera que se encuentre, con una probabilidad del 95%, la diferencia absoluta entre dos valores individuales del resultado de un ensayo, obtenidos en condiciones de repetibilidad. En este sentido, cuanto mayor es la precisión de un ensayo, más pequeño es el valor de repetibilidad “ r ”.

El estudio de la repetibilidad debe iniciarse realizando un experimento diseñado estadísticamente, el cual debe comprender un muestreo aleatorio y representativo de las condiciones de ensayo y materiales a evaluar. En el caso del método de ensayo UGR-FACT, para la definición del experimento se seleccionarán varios tipos de mezclas y materiales representativos (de común uso en las carreteras españolas), así como diferentes condiciones de ensayo, de manera que tenga una variedad representativa de ensayos tanto en términos de materiales como de condiciones. El plan de ensayos a realizar durante dicho experimento se muestra en la Tabla 12.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

Tipo de Mezcla	Materiales	Amplitud de Carga (kN)	Frecuencia (Hz)	Temperatura de Ensayo (°C)	Distancia entre apoyos (mm)	Nº de probetas ensayadas
AC 22 S	Árido calizo; betún B50/70	0,5	5	20	50	2
AC 22 S	Árido calizo; betún B50/70	1,0	5	20	50	3
AC 22 S	Árido calizo; betún B50/70	1,5	5	20	50	3
AC 22 S	Árido calizo; betún B 35/50	2,0	5	20	50	3
AC 16 S	Árido grueso ofítico; Árido fino calizo; betún B 35/50	1,0	5	20	50	2
AC 16 S	Árido grueso ofítico; Árido fino calizo; betún B 35/50	1,5	5	20	50	2
AC 16 S	Árido grueso ofítico; Árido fino calizo; betún B 35/50	2,0	5	20	50	2
BBTM 11A	Árido grueso ofítico; Árido fino calizo; betún BMAVC	0,75	5	20	0	2
BBTM 11A	Árido grueso ofítico; Árido fino calizo; betún BMAVC	1,0	5	20	0	2
BBTM 11A	Árido grueso ofítico; Árido fino calizo; betún BM3c	0,75	5	20	0	2

Tabla 12. Plan de ensayos para el estudio de la repetibilidad del ensayo UGR-FACT.

La ejecución de los ensayos no se realizará de forma consecutiva para evitar que los datos observados sean contaminados por el efecto de otras variables no conocidas (como por ejemplo el desgaste de alguna pieza del dispositivo o la descalibración del marco dinámico y dispositivos de medida utilizados) y que por tanto no puedan ser controladas.

Una vez realizado el experimento y obtenidos los resultados del ensayo, se procede a calcular la repetibilidad del método “r” para lo cual es necesario determinar previamente la media de los resultados obtenidos, su desviación, y a partir de ellos la desviación estándar

relativa (DER) o coeficiente de variación del ensayo (Cv), que es el cociente de la desviación entre la media. A partir de dichos datos, “r” se define según la *Ecuación 57* (donde n es el número de ensayos realizados):

$$r = 2,8 \cdot \sqrt{\frac{DER^2}{n}} \text{ [Ecuación 57]}$$

En base a los resultados obtenidos para estos parámetros en cada uno de los ensayos, se determinará la variabilidad de los resultados obtenidos en las diferentes pruebas y se valorará la precisión del método de ensayo desarrollado.

4.5.2.2. Evaluación de los Parámetros de Ensayo “Displacement Ratio” y “Parámetro de Daño Medio”

Una vez definida la repetibilidad del método de ensayo desarrollado, el siguiente paso será analizar el fundamento teórico de los parámetros definidos en el UGR-FACT, Displacement Ratio y Parámetro de Daño Medio. Al tratarse de dos nuevos parámetros aportados por esta investigación para el análisis del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, es necesario llevar a cabo un estudio que soporte su fundamento teórico.

El parámetro Displacement Ratio ha sido definido como alternativa al parámetro ya existente Energy Ratio, para poder diferenciar cada una de las fases del proceso de fisuración, de manera que permita estimar los ciclos N_i y N_M . Mediante el Energy Ratio no siempre es posible estimar dichos ciclos, y además su cálculo es más trabajoso puesto que hay que definir la energía disipada en el ensayo para poder determinarlo. El concepto teórico del Displacement Ratio se fundamenta en los desplazamientos verticales y horizontales producidos dentro del volumen representativo de material donde tiene lugar el proceso de fisuración. Así, su cálculo se realiza de manera directa dividiendo la amplitud de los desplazamientos horizontales producidos en cada ciclo entre la amplitud de los verticales.

Por otra parte, el parámetro de Daño Medio ha sido definido para cuantificar el daño producido en el material evaluado a causa del proceso de fisuración. Se basa en los conceptos teóricos de la tasa de cambio de energía disipada aportados por Carpenter y Shen (RDEC) y su valor acumulado (RDEC Acumulado), y pretende ser un parámetro de cuantificación de daño más preciso que otros comúnmente utilizados como son la evolución del módulo de rigidez o de la energía disipada por el sistema. Así, el parámetro de daño medio pretende definir un valor de daño por fisuración asociado a un material, de manera que se pueda optimizar su diseño.

Para poder evaluar la validez del Displacement Ratio y del parámetro de Daño Medio, se proponen la ejecución de diferentes ensayos con el método UGR-FACT en los que además del cálculo de estos parámetros a partir de los datos del ensayo, se utiliza una cámara de fotos de alta definición para el análisis visual de la evolución del daño del material. A pesar de que este análisis no es del todo preciso (puesto que únicamente puede analizarse el daño producido en una de las caras de la probeta y no se puede apreciar el daño a escala microscópica), la valoración del daño producido mediante imágenes puede contribuir a validar la efectividad de ambos parámetros.

A partir de las imágenes tomadas, y mediante un tratamiento digital de las mismas, puede definirse el área de fractura aparecida en cada una de ellas, de manera que se cuantifique gráficamente la evolución del daño por fisuración producido en el material (medido en mm^2). Realizando un análisis correlativo entre los cálculos realizados y de los datos tomados de las imágenes puede evaluarse la relación de los parámetros Displacement Ratio y Daño Medio con el estado de deterioro "real" del material (o al menos, real en una de las caras del material). Además, durante el ensayo también se calculan otros parámetros como el Energy Ratio o el módulo de rigidez con los que comparar los resultados y validar la aptitud de los definidos en esta investigación.

La Tabla 13 recoge el plan de ensayos a realizar para la validación de los parámetros Displacement Ratio y Daño medio. El tipo de mezcla a utilizar será una BBTM 11A, en la que

se modificará el ligante empleado en su fabricación (BM3c, B50/70, B50/70+1,5% PNFU por Vía Seca, BMAVC) y algunas de las condiciones de ensayo.

Tipo de Mezcla	Betún	Amplitud de Carga (kN)	Frecuencia (Hz)	Temperatura de Ensayo (°C)	Distancia entre apoyos (mm)
BBTM 11A	BM3c	0,5	5	20	0
BBTM 11A	BM3c	0,75	5	20	0
BBTM 11A	BM3c	1,0	5	20	0
BBTM 11A	B50/70	0,5	5	20	0
BBTM 11A	B50/70	0,75	5	20	0
BBTM 11A	B50/70	1,0	5	20	0
BBTM 11A	BMAVC	0,5	5	20	0
BBTM 11A	BMAVC	0,75	5	20	0
BBTM 11A	BMAVC	1,0	5	20	0
BBTM 11A	B50/70+1,5% PNFU	0,5	5	20	0
BBTM 11A	B50/70+1,5% PNFU	0,75	5	20	0
BBTM 11A	B50/70+1,5% PNFU	1,0	5	20	0

Tabla 13. Plan de ensayos para la evaluación de los parámetros displacement ratio y daño medio

4.5.2.3. *Análisis de la Sensibilidad de UGR-FACT a las Condiciones de Ensayo*

Otro de los aspectos clave a la hora de validar la eficacia de un método de ensayo es evaluar la sensibilidad de sus resultados a los cambios producidos en las condiciones utilizadas durante el mismo. Es decir, cómo afectan las condiciones de ensayo a los resultados obtenidos en el material testado, de manera que puedan definirse unas condiciones óptimas para llevar a cabo la evaluación del comportamiento a fisuración de la mezcla bituminosa. Además, el método de ensayo debe poseer la sensibilidad necesaria a los cambios de condiciones de tal forma que permita evaluar la respuesta de los materiales ensayados ante diversas situaciones.

Las condiciones de ensayos más importantes a considerar en el UGR-FACT son la amplitud de carga aplicada, la frecuencia, la temperatura de ensayo y la distancia inicial entre apoyos. En base a estas circunstancias, desde esta investigación se propone llevar a cabo un plan de ensayos que permita determinar cómo y en qué grado afectan dichas condiciones de ensayo al comportamiento a fisuración por fatiga de las mezclas bituminosas.

Para ello, el plan de ensayos contempla la evaluación del comportamiento a fisuración de una mezcla AC 16 S y una AC 22 S, bajo diferentes condiciones de ensayo (variando en todas ellas la amplitud de carga aplicada). La Tabla 14 recoge las diferentes pruebas para evaluar

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

la sensibilidad del método UGR-FACT a las condiciones de ensayo. Una vez finalizados los ensayos y evaluado el comportamiento a fisuración por fatiga de las mezclas, se analizará la influencia de las condiciones de ensayo en la respuesta del material.

Tipo de Estudio	Tipo de Mezcla	Amplitud de Carga (kN)	Frecuencia (Hz)	Temperatura de Ensayo (°C)	Distancia entre apoyos (mm)
Influencia de la Frecuencia de Ensayo	AC 22 S	1,0	5	20	50
	AC 22 S	1,5	5	20	50
	AC 22 S	2,0	5	20	50
	AC 22 S	1,0	1	20	50
	AC 22 S	1,5	1	20	50
	AC 22 S	2,0	1	20	50
	AC 22 S	1,0	5	20	15
	AC 22 S	1,5	5	20	15
	AC 22 S	2,0	5	20	15
	AC 22 S	1,0	1	20	15
	AC 22 S	1,5	1	20	15
	AC 22 S	2,0	1	20	15
	AC 16 S	1,0	5	20	50
	AC 16 S	1,5	5	20	50
	AC 16 S	2,0	5	20	50
	AC 16 S	1,0	1	20	50
	AC 16 S	1,5	1	20	50
	AC 16 S	2,0	1	20	50
Influencia de la Temperatura de Ensayo	AC 16 S	1,0	5	40	50
	AC 16 S	1,5	5	40	50
	AC 16 S	2,0	5	40	50
	AC 16 S	1,0	5	20	50
	AC 16 S	1,5	5	20	50
	AC 16 S	2,0	5	20	50
	AC 16 S	1,0	5	3	50
	AC 16 S	1,5	5	3	50
AC 16 S	2,0	5	3	50	
Influencia de la Distancia entre Apoyos	AC 22 S	1,0	5	20	50
	AC 22 S	1,5	5	20	50
	AC 22 S	2,0	5	20	50
	AC 22 S	1,0	5	20	15
	AC 22 S	1,5	5	20	15
	AC 22 S	2,0	5	20	15
	AC 22 S	1,0	1	20	50
	AC 22 S	1,5	1	20	50
	AC 22 S	2,0	1	20	50
	AC 22 S	1,0	1	20	15
	AC 22 S	1,5	1	20	15
	AC 22 S	2,0	1	20	15
	AC 16 S	1,0	5	20	50
	AC 16 S	1,5	5	20	50
	AC 16 S	2,0	5	20	50
	AC 16 S	1,0	5	20	15
	AC 16 S	1,5	5	20	15
	AC 16 S	2,0	5	20	15

Tabla 14. Plan de ensayo para el estudio de la sensibilidad a las condiciones de ensayo del método UGR-FACT.

4.5.2.4. Análisis de la Sensibilidad de UGR-FACT a los Materiales Evaluados

Durante el diseño a nivel de laboratorio de mezclas bituminosas se seleccionan los materiales que van a componer la mezcla (tipo de árido y tipo de ligante) así como las proporciones de los mismos. En este sentido, cualquier ensayo de laboratorio que pretende ser utilizado en el diseño de mezclas asfálticas debe ser sensible a los cambios en la composición de sus materiales, y por tanto, desde esta investigación se decidió evaluar la sensibilidad del UGR-FACT ante diferentes materiales.

Para la validación de la sensibilidad del UGR-FACT a los materiales utilizados en la fabricación de la mezcla se proponen dos estudios, uno centrado en la influencia de naturaleza de los áridos en el comportamiento a fisuración de la mezcla, y otro centrado en la influencia del tipo de ligante.

Influencia de la Naturaleza del Árido

Para evaluar la influencia de la naturaleza del árido se realizará un análisis comparativo del comportamiento a fisuración por fatiga de las mezclas AC 16 S y AC 22 S fabricadas con áridos gruesos de diferente naturaleza (en la AC 16 se utilizó árido ofítico y en la AC 22 S árido calizo). Dada la gran influencia ejercida por el mortero (mezcla de áridos fino y betún) sobre el comportamiento a fisuración por fatiga de la mezcla, esta variable permanecerá constante de manera que pueda estudiarse únicamente la influencia de la naturaleza del árido grueso.

El plan de ensayos a realizar para evaluar la respuesta a fisuración de cada una de las mezclas evaluadas viene recogido en la Tabla 15. Dicho plan contempla diferentes niveles de amplitud de carga, distintas frecuencias y distintas temperaturas.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

Tipo de Mezcla	Amplitud de Carga (kN)	Frecuencia (Hz)	Temperatura de Ensayo (°C)	Distancia entre apoyos (mm)	
AC 22 S	0,5	5	20	50	
	1,0	5	20	50	
	1,5	5	20	50	
	2,0	5	20	50	
	1,0	1	20	50	
	1,5	1	20	50	
	2,0	1	20	50	
	1,0	5	20	15	
	1,5	5	20	15	
	2,0	5	20	15	
	1,0	5	3	50	
	1,5	5	3	50	
	2,0	5	3	50	
	AC 16 S	0,5	5	20	50
		1,0	5	20	50
1,5		5	20	50	
2,0		5	20	50	
1,0		1	20	50	
1,5		1	20	50	
2,0		1	20	50	
1,0		5	20	15	
1,5		5	20	15	
2,0		5	20	15	
1,0		5	3	50	
1,5		5	3	50	
2,0		5	3	50	

Tabla 15. Plan de ensayos para la evaluación de la influencia del árido en el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas.

Influencia del Tipo de Ligante

De la misma forma que en el caso anterior, para definir la influencia del tipo de ligante en el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas es necesario que el método de ensayo UGR-FACT sea lo suficientemente sensible como para distinguir el comportamiento de materiales de idéntica composición, en los que únicamente se varíe el tipo de betún.

Para ello se empleará una mezcla tipo BBTM 11A de idénticas características (ver apartado anterior), en la que únicamente se modifica el tipo de ligante. Dado el auge en los últimos años de los betunes modificados con polvo de neumático fuera de uso (PNFU), así como su

tendencia a ser empleados como ligantes en la fabricación de mezclas anti-fisuras (debido a su influencia en la mejora del comportamiento elástico y menor susceptibilidad térmica de la mezcla), se decide evaluar el comportamiento de mezclas con PNFU tanto por vía húmeda como por vía seca. Este hecho supone una buena oportunidad tanto para evaluar el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas con PNFU como para evaluar la sensibilidad del método de ensayo UGR-FACT a los cambios en el tipo de ligante y validar su empleo en el diseño de mezclas.

La Tabla 16 muestra el plan de ensayos para evaluar el comportamiento a fisuración de dos mezclas tipo BBTM 11A fabricadas con un betún de alta viscosidad modificado con PNFU por vía húmeda, y con un betún convencional B50/70 modificado con PNFU al 1,5% sobre mezcla por vía seca. Además, los resultados se compararán con los de dos mezclas BBTM 11A de referencia, una fabricada con un betún de alta prestaciones modificado con polímeros SBS y otra fabricada con un betún convencional B 50/70.

Tipo de Mezcla	Betún	Amplitud de Carga (kN)	Frecuencia (Hz)	Temperatura de Ensayo (°C)	Distancia entre apoyos (mm)
BBTM 11A	BM3c	0,5	5	20	50
BBTM 11A	BM3c	0,5	5	20	0
BBTM 11A	BM3c	0,75	5	20	0
BBTM 11A	BM3c	1,0	5	20	0
BBTM 11A	B50/70	0,5	5	20	0
BBTM 11A	B50/70	0,75	5	20	0
BBTM 11A	B50/70	1,0	5	20	0
BBTM 11A	BMAVC	0,5	5	20	0
BBTM 11A	BMAVC	0,75	5	20	0
BBTM 11A	BMAVC	1,0	5	20	0
BBTM 11A	B50/70+1,5% PNFU	0,5	5	20	0
BBTM 11A	B50/70+1,5% PNFU	0,75	5	20	0
BBTM 11A	B50/70+1,5% PNFU	1,0	5	20	0

Tabla 16. Plan de ensayos para la evaluación de la influencia del ligante en el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Introducción

Durante el desarrollo de este capítulo se exponen y analizan el conjunto de resultados obtenidos en cada una de las fases de la investigación llevada a cabo para el desarrollo del método de ensayo UGR-FACT. Siguiendo el mismo orden establecido en la metodología, en primer lugar se presentan los resultados relativos a la fabricación del prototipo de ensayo diseñado en el capítulo anterior. En esta sección se describirán las principales características del dispositivo de ensayos fabricado.

En segundo lugar se describen los resultados obtenidos en los estudios realizados para la definición de las condiciones de ensayo a utilizar durante la ejecución del UGR-FACT. En este apartado se definirán las características de los materiales a utilizar para ejecutarlo, así como las condiciones de carga, frecuencia, temperatura, humedad, envejecimiento, y características de ensayo (toma de datos y criterio de fallo), más apropiadas para optimizar la evaluación del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas.

Finalmente, combinando los pasos a seguir en los dos últimos apartados de la metodología en los que se recoge la evaluación del comportamiento a fisuración de los materiales bituminosos y la validación del método de ensayo, se mostrarán los resultados concernientes al plan de ensayos ejecutado durante esta investigación para validar el método de ensayo UGR-FACT. Así, en primer lugar se mostrarán las características de repetibilidad del ensayo, posteriormente los obtenidos en la evaluación de los parámetros del ensayo, así como de su sensibilidad a las condiciones de ensayo y a los materiales evaluados.

5.2. Fabricación del Prototipo de Ensayo

Tratando de reproducir lo más fielmente las condiciones de diseño, sus dimensiones, y teniendo en cuenta la optimización en los costes de fabricación del prototipo, y las

características de la cámara térmica y de la prensa donde iba a ser colocado, se llevó a cabo la fabricación del dispositivo de ensayo. Tal y como se definió en la fase de diseño, el dispositivo fabricado está compuesto por una *base* (Figura 164a), dos *apoyos deslizantes* (Figura 164b) y un *cabezal de aplicación de carga* (Figura 164c). Todos los componentes están fabricados en acero inoxidable (a excepción de una parte de los apoyos deslizantes que contienen carcasas de plástico), y el conjunto total del dispositivo tiene una masa de 17,05 kg que permite dotarlo de la estabilidad suficiente para la evaluación de probetas de diferentes tamaños y espesores, sin que se produzcan cabeceos o movimientos residuales.

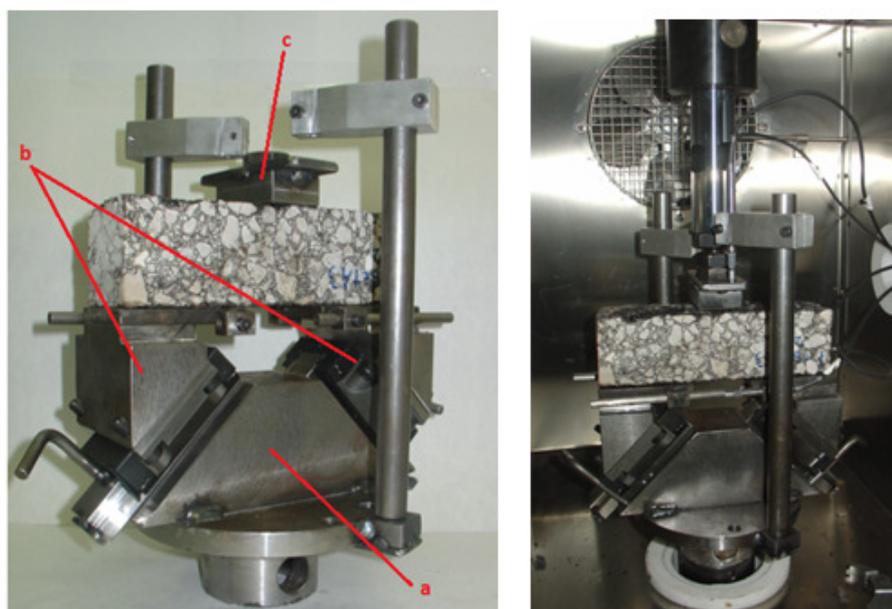


Figura 164. Imagen del dispositivo de ensayo fabricado.

La base está formada por el sistema de apoyo y unión del prototipo a la prensa (con forma circular), sobre la que se encuentra soldada la plataforma de deslizamiento de los apoyos de la probeta, compuesta por dos planos inclinados y un par de raíles que permiten el desplazamiento de los apoyos sin riesgo de cabeceos ni movimientos residuales (que puedan inducir errores en las medidas de deformación tomadas, Figura 165). Además, unidos a la base mediante rosca se encuentran los dos vástagos verticales sobre los que se

colocan dos piezas regulables que permitirán la colocación de los sensores de medida de las deformaciones verticales en la zona superior de la probeta.



Figura 165. Imagen de alzado, planta y perfil, del dispositivo fabricado.

Los raíles son de fácil fabricación y colocación sobre la plataforma mediante su atornillado (Figura 166), de manera que se trata de dos componentes desmontables que pueden ser sustituidos en caso de degradación por el uso repetido de ensayos. Además, otra de las ventajas de disponer de piezas desmontables es que sobre una misma base (elemento más costoso económicamente puesto que es el más pesado y el que dota de estabilidad al conjunto del dispositivo), podrían llevarse a cabo modificaciones para variar el ángulo de inclinación del ensayo si se considerara conveniente.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

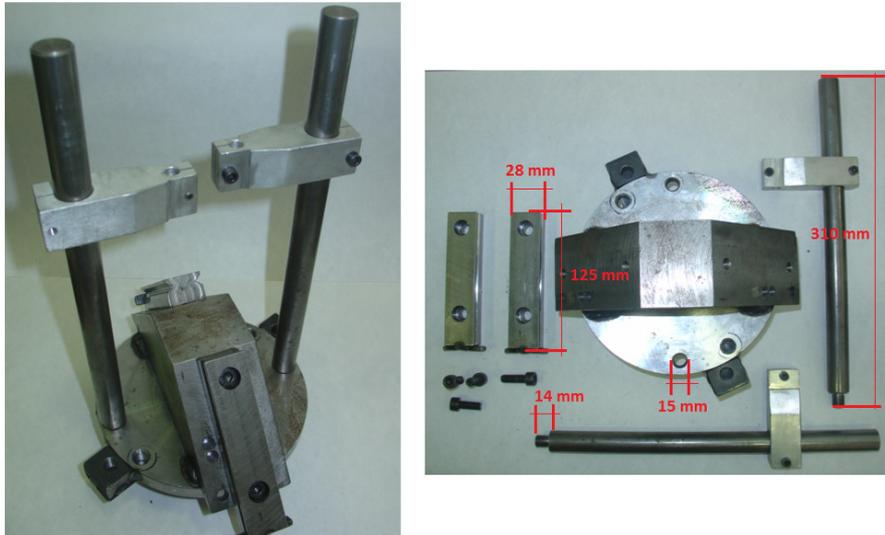


Figura 166. Detalle general de la base y de cada uno de sus componentes desmontados.

Por otra parte, cada uno de estos raíles consta de un tope final soldado para evitar la salida de los apoyos, así como de un sistema de perno y puntos de fijación, para posicionar los apoyos deslizantes (en función la distancia de separación entre apoyos que se desee utilizar en el ensayo) durante la adhesión de la probeta al prototipo antes de ser llevado a cabo el ensayo (Figura 167).

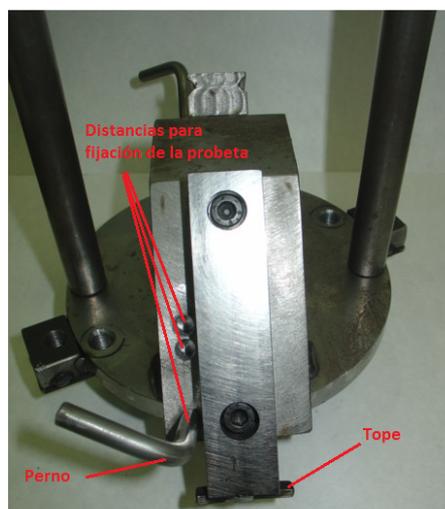


Figura 167. Detalle del sistema de perno y puntos de fijación, y del tope al final del carril para evitar la salida del apoyo.

Finalmente, la base también la componen dos vástagos verticales (desmontables), sobre los que se colocarán los medidores de la zona superior de la probeta para el control de las deformaciones verticales (Figura 168). Ambos vástagos constan de un cabezal con tornillos regulables que permiten fijarlo en la altura y posición deseadas para poder llevar a cabo las medidas de deformación (pudiendo ajustarse a diferentes espesores de probeta). Además el prototipo fue fabricado con 3 zonas diferentes de posicionamiento de dichos vástagos, para que en función del tamaño y tipo de probeta a utilizar, los medidores de deformación pudieran situarse correctamente sobre el cabezal de aplicación de carga (Figura 166).

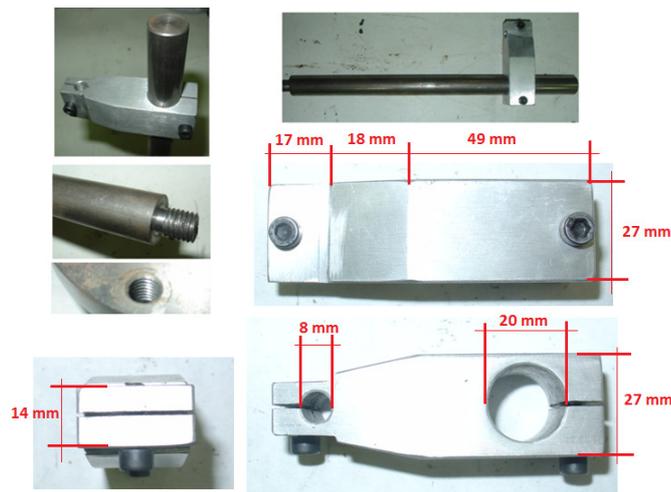


Figura 168. Detalle de los vástagos y de las piezas de posicionamiento de los LVDT verticales.

Tal y como se planificó en la etapa de diseño del dispositivo, los apoyos deslizantes permiten movimientos de deformación de la probeta tanto en sentido horizontal como en vertical (reproduciendo dentro del volumen de estudio los esfuerzos de flexión y cortante debidos a las cargas del tráfico, así como de tracción por el peso de los elementos de apoyo, simulando el efecto acentuador de las retracciones térmicas). Estos elementos deslizantes están formados por dos carros con engranaje de bolas (de forma que se minimiza el rozamiento, permitiendo la transmisión de las cargas de forma efectiva) que se adaptan a la

forma de los carriles situados en la base, sobre los que se incorporan dos plataformas de apoyo en las que se fijará la probeta a ensayar (Figura 169).



Figura 169. Detalle de la colocación de los carros sobre la base.

Dichas plataformas de apoyo constan de dos piezas principales (Figura 170), una de conexión al carro (desmontable, y también adaptable en función del ángulo de inclinación), y otra de apoyo de la probeta (también desmontable, para facilitar el despegue de la probeta una vez finalizado el ensayo, y para poder colocar probetas de diferentes tamaños).

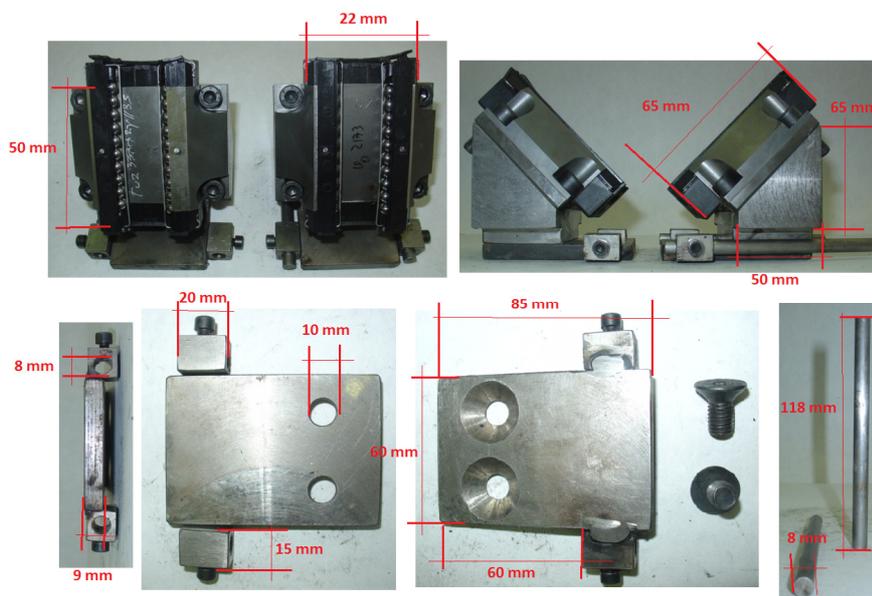


Figura 170. Detalle de los apoyos deslizantes y de cada una de las piezas que los forman.

Además, sobre los apoyos horizontales se colocarán dos elementos auxiliares (uno a cada lado, formados por un pasador y un tornillo) que permitirán la fijación de los medidores de deformaciones horizontales, de manera que las medidas se lleven a cabo en la zona inferior de la probeta donde dichas deformaciones van a ser más acentuadas (para el posicionamiento de los medidores horizontales se emplean dos varillas de acero para fijar la medición Figura 171).



Figura 171. Detalle de colocación de los LVDT horizontales (izq.) y de la varilla de acero utilizada para ello (dcha.).

La distancia de separación entre los apoyos deslizantes puede variar en función del tipo de desperfecto (punto crítico) de la capa base que se quiera simular (junta, bache, fisura, etc.). En la Figura 172 aparecen los diferentes posicionamientos posibles para el inicio del ensayo 0 mm (pero con una discontinuidad en la base, lo que simularía una base ya fisurada), 15 mm (que simularía la presencia de una junta o una pre-fisura) o 50 mm (que simularía la presencia de un bache o socavón).

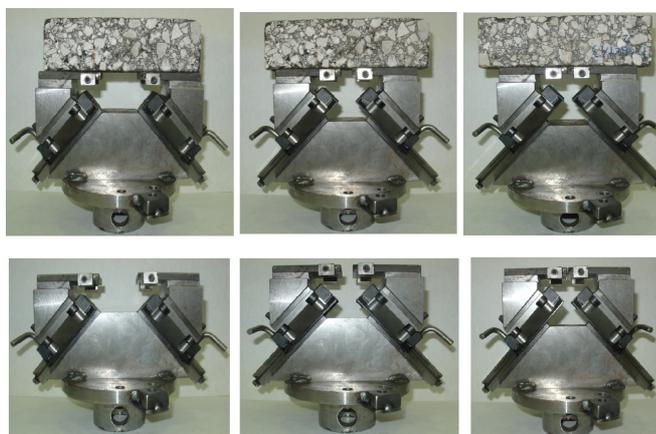


Figura 172. Posicionamientos de los apoyos posibles para la ejecución del ensayo.

El cabezal de aplicación de carga es un elemento independiente del cuerpo del dispositivo que va unido a la zona superior o travesaño de la prensa, y estará compuesto por una pieza de acero con el suficiente espesor para evitar su deformación durante la aplicación de la carga (y así evitar inducir errores diferenciales por deformaciones propias, independientes a las de la probeta), que proporcione una superficie plana sobre la que puedan colocarse los medidores de deformación verticales (Figuras 173 y 174).

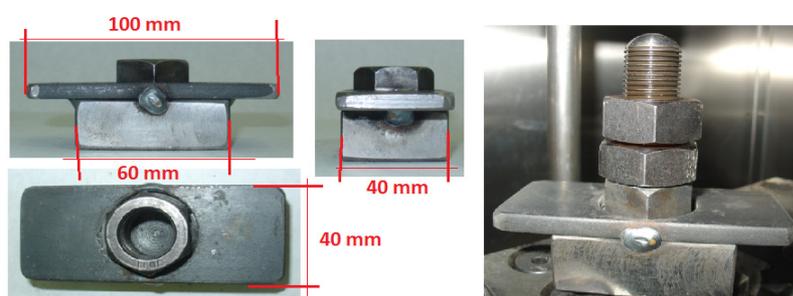


Figura 173. Detalle del cabezal de aplicación de carga.



Figura 174. Detalle de posicionamiento de los LVDT para medición de deformaciones verticales sobre el cabezal de carga.

Además, dicha pieza debe ser fácilmente adaptable al marco de ensayos donde vaya a ser empleado, al igual que el conjunto del prototipo formado por el cuerpo y los apoyos

deslizantes. En el caso del prototipo aquí desarrollado, y en base a las características del marco utilizado, se empleó un sistema de tornillos y pasadores (Figura 175).



Figura 175. Detalle del sistema de unión del dispositivo a la prensa.

La adhesión de la probeta a las plataformas colocadas sobre los apoyos deslizantes se llevará a cabo mediante el empleo de una resina epoxi de dos componentes para fijar materiales pétreos y metálicos (Figuras 176 y 177). Este material (de común uso en laboratorios de carreteras) permite un fijado de garantía entre el acero y la mezcla bituminosa, y es fácil de limpiar una vez terminado el ensayo (para ello se puede introducir en una estufa a unos 45 °C de temperatura durante unos 30 minutos, y después retirar con la ayuda de un destornillador).



Figura 176. Preparación de la resina epoxi empleada para la fijación de la probeta.

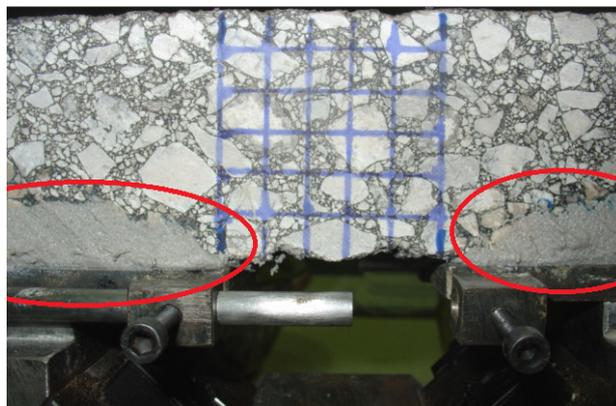


Figura 177. Detalle de la fijación de la probeta a los apoyos.

5.3. Definición de las Características del Método de Ensayo

Una vez fabricado el dispositivo con el que llevar a cabo la ejecución del método de ensayo, se definen las características del mismo, de forma que éstas permitan evaluar el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas bajo las condiciones que mejor reproduzcan las de su vida de servicio (cargas de tráfico, velocidad, temperatura, etc.).

El método de ensayo UGR-FACT tiene como objetivo principal inducir sobre una probeta de mezcla bituminosa el desarrollo de un proceso controlado de fisuración por fatiga, a partir de la simulación de las sollicitaciones reales a las que está sometido el material durante su vida de servicio. Para ello, el ensayo se realiza a temperatura controlada en el interior de una cámara climática (para poder evaluar la respuesta del material ante diferentes estados visco-elásticos o elásticos), aplicando cargas cíclicas verticales a tensión controlada en forma de seno-verso (únicamente de compresión, simulando las inducidas por el tráfico a su paso, ya que éstas no producen cargas de tracción-compresión como las sinusoidales), sobre probetas prismáticas de dimensiones adaptables según las necesidades del estudio.

Dada la gran variedad de vehículos, tipos de ejes, frecuencias de paso, climas, etc. resulta imposible adaptar unas condiciones que representen todo el rango de sollicitaciones a las que puede estar sometida una mezcla bituminosa durante su vida de servicio en el firme.

Por tanto, es necesario determinar una serie de valores de referencia para algunas de estas variables, de forma que las condiciones de ensayo simulen de la mejor forma posible (pero generalizada) las características de servicio reales. En este sentido será necesario establecer valores de la amplitud de tensión máxima a aplicar en cada ciclo de carga, su frecuencia, la existencia o no de periodos de descanso, la temperatura a la que llevar a cabo el ensayo, etc. Además, en función del tipo de material que se desee ensayar, también será necesario definir unas características de probeta óptimas acordes con la geometría del ensayo, de manera que éstas sean fáciles de fabricar y manejar, y que proporcionen unas condiciones de homogeneidad entre cada ensayo.

A continuación se describen las características generales, así como los parámetros y condiciones de ensayo más adecuados a utilizar durante la ejecución del ensayo desarrollado en esta tesis doctoral. Los valores establecidos en este capítulo pretenden ser una referencia para llevar a cabo una evaluación lo más realista posible del comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas. No obstante, las características del ensayo podrán adaptarse según las necesidades y las condiciones bajo las que se desee analizar la respuesta del material.

5.3.1. Características de las Probetas

La determinación de las dimensiones óptimas de las probetas a utilizar durante el ensayo se definió en base a las consideraciones geométricas establecidas en el capítulo de metodología. Para la evaluación de *materiales simples* formados por un único tipo de mezcla bituminosa, se utilizarán probetas prismáticas obtenidas a partir del corte con sierra de placas fabricadas previamente mediante el compactador de segmento de rodillo de dimensiones 408 x 256 mm (en base a la norma EN 12697-33). La obtención de probetas de ensayos a partir de una probeta principal garantiza una mayor homogeneidad de la mezcla ensayada, ya que todo el material proviene de la misma muestra, y ha sido fabricado y compactado en las mismas condiciones.

Con el objetivo de obtener un mayor aprovechamiento del material, y un ahorro en el tiempo de elaboración, las dimensiones de las probetas de ensayo han de ser optimizadas para aprovechar al máximo el tamaño de las placas fabricadas con el compactador de segmento de rodillo. Así, de cada placa se obtendrán hasta 6 probetas prismáticas para la ejecución del ensayo a fisuración (Figura 178). Tras el recorte de los bordes de la probeta se obtienen probetas prismáticas de 200 x 60 mm (eliminando 24 mm en cada lado de mayor longitud, y 28 mm a cada lado de menor, anulando así las posibles imperfecciones en los bordes de las probetas). Los espesores de las probetas de ensayo variarán en función del espesor de la probeta principal fabricada en el compactador de segmento de rodillo, de forma que pueden obtenerse probetas desde los 40 mm hasta los 80 mm de espesor (permitiendo evaluar diferentes tipos de mezclas, densas, semi-densas, micro-aglomerados, etc.). La elección de un espesor u otro se adaptará en función del grosor de capa utilizado en el extendido de las mezclas a evaluar, de manera que si la mezcla a ensayar es un micro-aglomerado para capa de rodadura tipo BBTM deberán usarse 40 mm, mientras que si se trata de un hormigón bituminoso para capa intermedia tipo AC podrá emplearse entre 60-80 mm de espesor (en función también del tamaño máximo de árido de la mezcla, de forma que el espesor ha de estar entre 2,5 y 5 veces el tamaño máximo del árido).

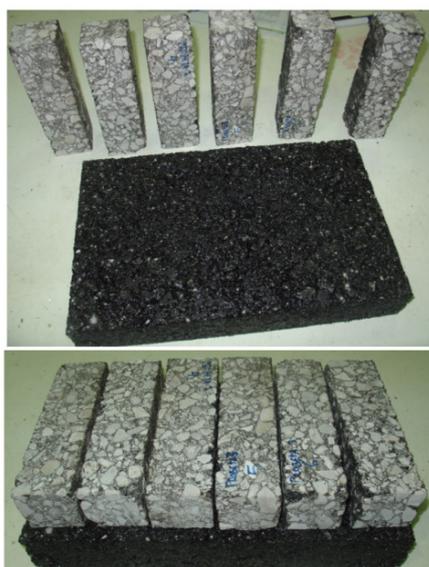


Figura 178. Detalle de la fabricación de probetas prismáticas para la ejecución del ensayo.

Este tipo de probeta garantiza, además de una gran homogeneidad en la muestra ensayada, un sistema de fabricación fácil, rápido, y en el que se minimiza la inversión económica (tanto de material, como del equipamiento de laboratorio a utilizar). No obstante, resulta fundamental que el aserrado de las probetas sea lo más preciso posible, sin zonas en las que exista escasez de material (por posibles desprendimientos durante el aserrado), sobre todo en la zona del volumen objeto de estudio (puesto que provocarían zonas de debilidad en la probeta que induzcan un fallo prematuro de la misma).

Por su parte, para el estudio de *sistemas complejos* la forma de las probetas a utilizar será la misma que en el caso de las compuestas por materiales simples, pero su espesor aumentará dado que es necesario evaluar más de un tipo de material (Figura 179). Así, utilizando el compactador de segmento de rodillo se fabricarán probetas en diferentes tongadas (compuestas por el mismo tipo de mezcla bituminosa o no), utilizando una capa de adherencia (a partir de un riego de emulsión por ejemplo), y la posibilidad de añadir o no un sistema anti-reflexión de fisuras para su evaluación (geotextil, geomalla, etc.). Para la obtención de las probetas, se procederá de la misma forma, mediante el aserrado de probetas prismáticas (teniendo en cuenta en todo caso los tipos de material ensayado a la hora de definir el ancho de las mismas).



Figura 179. Detalle de probeta compuesta por un micro-aglomerado BBTM 11A en capa de rodadura, un geotextil para retardar la propagación de la fisura, y una mezcla semidensa AC16 S.

Otra posibilidad, si se desea evaluar el comportamiento a fisuración de la mezcla bajo condiciones de compactación reales, puede ser la extracción de testigos en forma de placas de un firme de carretera, y su posterior aserrado con las dimensiones prismáticas de las probetas.

Por su parte, para facilitar el análisis de la propagación y evolución de la macro-fisura formada durante el proceso, puede dibujarse en los laterales de la probeta un sistema de referencia a modo malla con tamaño de 1 cm^2 (Figura 180). Este sistema de referencia resulta muy útil para definir la velocidad de avance de la macro-grieta en el material.

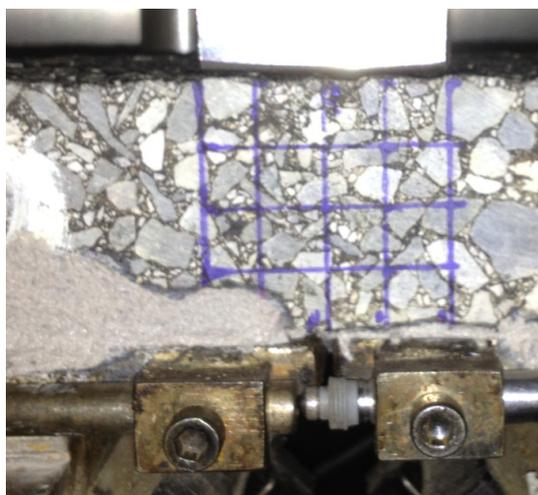


Figura 180. Detalle de la malla de referencia dibujada en el lateral de la probeta.

Finalmente, hemos de decir que las probetas fabricadas, sean del tipo que sean, deberán dejarse secar tras su aserrado hasta pesada constante a temperatura ambiente. Además, las que vayan a ser ensayadas en un plazo superior a 2 días desde su secado, deberán ser acondicionadas a $5 \text{ }^\circ\text{C}$ en una cámara climática, siendo almacenadas sin apilarlas, y apoyadas por su superficie mayor (para evitar que se vean alteradas por envejecimiento, o sufran ningún tipo de daño).

5.3.2. Amplitud de Carga

La manera más representativa de adaptar la amplitud de la tensión transmitida por un eje sobre el pavimento a un ensayo de laboratorio es mediante el empleo de los datos obtenidos en estaciones de aforo de tráfico en las que se recojan el porcentaje de vehículos de cada clase, el número y tipo de ejes más comunes, el número de neumáticos que los componen, el peso transmitido por cada eje en los diferentes tipos de vehículos, y la superficie de contacto rueda/pavimento más común en dicho “eje tipo”. A pesar de ello, resulta de enorme dificultad llevar a cabo estudios de tráfico tan detallados que permitan analizar todo el conjunto de variables que influyen en la adaptación de la amplitud de carga a aplicar en el ensayo para simular el efecto del paso del tráfico. Independientemente de estas dificultades, desde esta investigación se ha llevado a cabo la recopilación de datos de aforos principalmente de EE.UU, así como de algunos otros países en los que las características del tráfico son más parecidas a las de nuestro país, a partir de los cuales se han establecido ciertos valores de referencia a utilizar durante el ensayo presentado en esta tesis doctoral.

Debido a la complejidad de diseño de un ensayo en el que en cada ciclo de carga se apliquen magnitudes variables (simulando la carga transmitida por cada tipo de eje y vehículo), lo más acertado para adaptar las cargas del tráfico es definir valores estándar fijos a aplicar en cada ciclo. Se seguirá la siguiente secuencia en la definición las tensiones de referencia:

- Determinación de un “vehículo tipo” que sirva como referencia del tráfico que circula por las carreteras del país o región para el que se evalúa el comportamiento de la mezcla sometida al ensayo.
- Definir los ejes más representativos en dicho “vehículo tipo”, así como el número de neumáticos de los que suelen estar compuestos.
- Determinación del peso asociado cada uno de dichos tipos ejes.
- Determinación de las superficies de contacto de la rueda sobre el pavimento más comunes, en base al ancho del neumático y a su longitud de contacto.

- Cálculo de las tensiones de referencia transmitidas por ejes estándar.

A continuación, se expone el estudio seguido para el cálculo de la amplitud las tensiones de referencia a aplicar en el método de ensayo UGR-FACT.

5.3.2.1. Definición del Vehículo Tipo

Basándonos en la clasificación de vehículos pesados de la Federal Highway Administration (FHWA 2001), podemos definir 13 clases diferentes de vehículos en función de sus características (Tabla 17), de las cuales solo se considerarán para el diseño del firme las clases 4 a 13, considerados vehículos pesados (debido a que los turismos no tienen efectos significantes en las tensiones aplicadas sobre el pavimento).

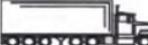
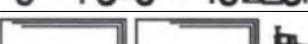
Clase de Vehículo	Descripción	Esquema
4	Autobuses	
5	Camiones sin remolque con 2 ejes	
6	Camiones sin remolque con 3 ejes	
7	Camiones sin remolque con 4 o más ejes	
8	Camiones con remolque (Trailer) con 4 o menos ejes	
9	Camiones con remolque (Trailer) con 5 ejes	
10	Camiones con remolque (Trailer) con 6 o más ejes	
11	Camiones multi remolque (Trailer) con 5 o menos ejes	
12	Camiones multi remolque (Trailer) con 6 ejes	
13	Camiones multi remolque (Trailer) con 7 o más ejes	

Tabla 17. Clasificación de vehículos pesados según la FHWA 2001.

Utilizando como ejemplo los datos de aforo de la Long Term Pavement Performance (Hajek et al. 2005; LTPP 2011) mostrados por las Figuras 181 y 182, podemos definir como “vehículo tipo” la clase 9, formada por trailers de 5 ejes (con dos ejes tándem o uno tridem).

Lo normal es que los aforos de tráfico no sean tan detallados como para distinguir entre clases de vehículos pesados, sino que suelen hacerlo entre vehículos ligeros y pesados en general. Así, si se desea hacer una adaptación particular de la amplitud de carga a algún país en concreto, en caso de no disponer de estos datos deberá obviarse este paso, definiendo un vehículo pesado estándar.

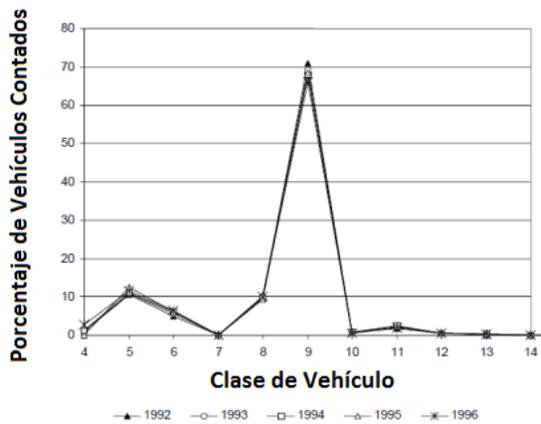


Figura 181. Porcentaje de vehículos de cada clase en datos de aforos de diferentes años en EE.UU. (LTPP 2011)

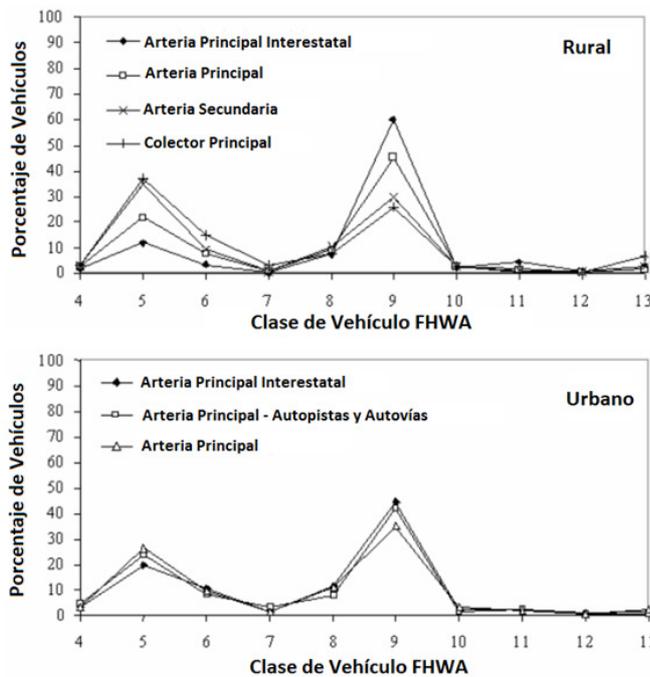


Figura 182. Distribución porcentual por clase de vehículos en los principales tipos de vías de EE.UU tanto en ámbito urbano, como rural. (Hajek et al. 2005)

5.3.2.2. Definición del Tipo de Eje y Número de Neumáticos

Otra cuestión clave a analizar a la hora de definir la magnitud de la tensión transmitida al pavimento por el paso de un eje de tráfico es el tipo de eje asociado a los vehículos de referencia y el número de neumáticos del que se compone cada eje (en función de dicho número, el peso del eje se encontrará más o menos repartido entre apoyos, y el área sobre el que se aplica la carga será mayor o menor, y por tanto la tensión variará).

En la base de datos de la LTPP en la Tabla 18 se recogen el número medio de ejes (el cual se puede determinar dividiendo el número total de un tipo de eje específico medido para una clase, entre el número total de vehículos de esa clase) de cada tipo (simple, tándem, tridem y quadrem), y el tipo de neumático (simple o doble), para cada clase de vehículo pesado en EE.UU.

Clase de Vehículo	Media de Nº de Ejes				Tipo de Neumático			
	Simple	Tándem	Tridem	Quadrem	Simple	Tándem	Tridem	Quadrem
4	1,62	0,39	0,00	0,00	Simple	Simple	Simple	Simple
5	2,00	0,00	0,00	0,00	Simple	Simple	Simple	Simple
6	1,02	0,99	0,00	0,00	Simple	Doble	Doble	Doble
7	1,00	0,26	0,83	0,00	Simple	Doble	Doble	Doble
8	2,38	0,67	0,00	0,00	Doble	Doble	Doble	Doble
9	1,13	1,93	0,00	0,00	Doble	Doble	Doble	Doble
10	1,19	1,09	0,89	0,00	Doble	Doble	Doble	Doble
11	4,29	0,26	0,06	0,00	Doble	Doble	Doble	Doble
12	3,52	1,14	0,06	0,00	Doble	Doble	Doble	Doble
13	2,15	2,13	0,85	0,00	Doble	Doble	Doble	Doble

Tabla 18. Número medio de ejes y tipo de neumático utilizado, en función de la clase de vehículo. (LTPP 2011)

Se puede decir que para un “vehículo tipo” de la clase 9, su paso por un punto del firme supone la aplicación de 3 ejes de carga (1 un eje simple y 2 ejes tándem), con la carga distribuida sobre neumáticos dobles. No obstante, al igual que en el caso anterior, este dato tampoco resulta del todo imprescindible para la adaptación de las cargas del tráfico a los ensayos de laboratorio. De esta forma, si se disponen de estos datos podrán definirse una

serie de ejes con características específicas que ayudarán a la adaptación más detallada de las cargas del tráfico, de lo contrario, deberán tomarse ejes estándar generalizados para cualquier tipo de vehículo pesado.

5.3.2.3. Definición del Peso por Eje

Dado que este parámetro de carga resulta imprescindible en el cálculo de tensiones, su determinación es la más importante a la hora de realizar una adaptación realista de la magnitud de tensiones aplicadas sobre el firme por el tráfico. La determinación del peso por eje de cada tipo de vehículo suele hacerse mediante el empleo de sensores de peso dinámico (WIM, Weigth in Motion) (Figura 183).



Figura 183. Instrumentos de medición de aforos de peso dinámicos. (Marcobal 2012)

La Figura 184 muestra, según datos de la LTPP, las frecuencias normalizadas de cargas por tipo de eje (simple, tándem o tridem) para las carreteras de EE.UU, sin diferenciar la clase de vehículo.

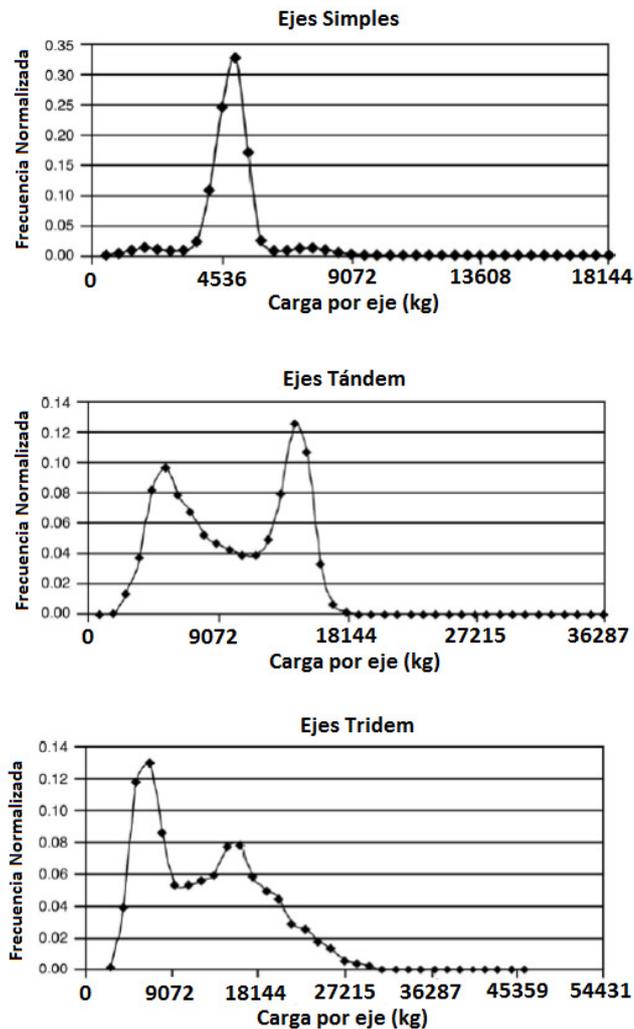


Figura 184. Frecuencia normalizada de las cargas por eje transmitidas en función del tipo de eje en EE.UU. (LTPP 2011)

Como se puede observar, los valores de carga más representativos varían en función del tipo de eje. En el caso de los ejes simples, tenemos que el rango de cargas característico se encuentra entre los 4000 y los 6000 kg, estando el valor más frecuente en torno a los 5000 kg. Por su parte, para los ejes tipo tándem, los valores más representativos de carga se encuentran comprendidos en un rango mayor entre los 4000 y los 17000 kg, debido a que este tipo de ejes es empleado en la zona de carga tanto de los camiones rígidos sin remolque, como de los trailers de mayor capacidad. Finalmente, en el caso de los ejes tipo tridem, el rango representativo de cargas se encuentra definido entre los 5000 y los 25000

kg, siendo también bastante amplio debido al mismo motivo que en el caso de los ejes tipo tándem.

Dado que las distribuciones de cargas por tipo de eje es uno de los parámetros que más varía de un país a otro, resulta necesario disponer de aforos de cargas por eje para poder adaptar bien las cargas a aplicar en el ensayo de laboratorio. Como referencia a nivel Europeo mostramos la Figura 185, en la que se recogen la distribución porcentual de ejes en función de la carga transmitida, para cada tipo de eje, en Francia (Balay & Brosseaud 2010).

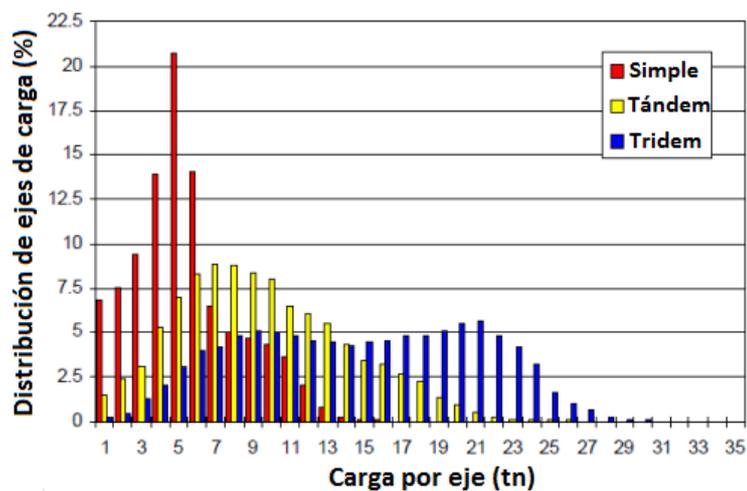


Figura 185. Distribución porcentual de la carga por eje según el tipo de eje en Francia. (Balay & Brosseaud, 2010)

El rango representativo de carga para los ejes simples en Francia es similar al de EE.UU, estando definido entre los 2000 y los 7000 kg, y siendo la carga más común la misma para ambos países (5000 kg). Además, en lo que a ejes tipo tándem se refiere, la distribución de cargas entre Francia y EE.UU difiere considerablemente (en este caso no aparecen dos picos de frecuencia), encontrado en el caso del país europeo una carga media de 8000 kg para este tipo de ejes (y un rango de cargas representativas entre los 4000 y los 13000 kg). En los ejes tipo tridem Franceses, al igual que ocurre en la distribución estadounidense, existen dos valores de carga representativos (estando estas comprendidas dentro de un rango

entre los 5000 y los 24000 kg). No obstante dichos valores no coinciden en magnitud, siendo algo superiores los Franceses, estando en torno a los 9000 kg para los vehículos de menor tamaño, y a los 21000 kg para los de mayor.

Por otro lado, para los países en los que no se disponga de aforos dinámicos precisos que permitan diferenciar entre tipos de ejes, lo que suele hacerse es definir un valor medio estándar de carga por eje, sin distinguir entre tipo de eje ni clase de vehículo (Figura 186). Así por ejemplo en países Europeos como España o Francia dicho valor se encuentra estimado en 13000 kg, mientras que en EE.UU se utiliza un valor de 18 kip, que equivalen a unos 8164,7 kg (Corté & Goux 2007; AASHTO 1993).

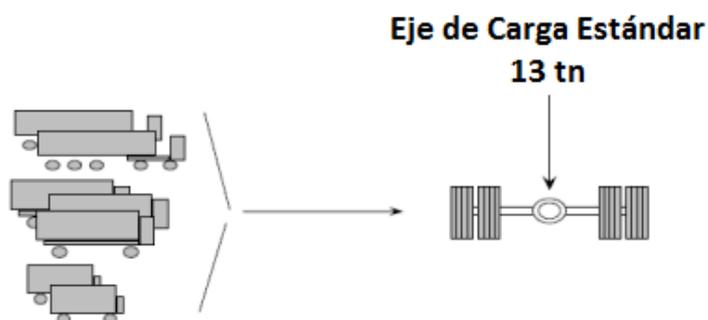


Figura 186. Consideración de eje de carga estándar para cualquier tipo de vehículo pesado. (Balay & Brosseaud, 2010)

5.3.2.4. Definición de la Superficie de Contacto Rueda/Pavimento

La carga por eje aplicada transmitirá un nivel de tensión u otro sobre el pavimento en función de la superficie de contacto que tenga sobre él. Así, la superficie de contacto rueda/pavimento resulta clave para definir las tensiones que provocan los esfuerzos de flexión y cortante en el firme, pero a pesar de ello es el parámetro más complicado de controlar.

Estudios desarrollados afirman que la longitud de contacto de la huella del neumático sobre el pavimento aumenta con el peso transmitido por el eje, y disminuye con la presión de inflado del neumático (Douglas et al., 2008). Dichos estudios determinan que un incremento

del 25% en el peso del eje puede llegar a traducirse en un 9% de aumento de la longitud de contacto de la rueda sobre el pavimento, mientras que una disminución del 20% de la presión de inflado del neumático se traduce en un aumento entre el 6 y el 16% de la longitud de contacto rueda/pavimento. Se demuestra por tanto, que existe una fuerte relación entre la carga del eje y la longitud de contacto de la rueda con el pavimento, de manera que aunque la carga del eje aumente, al aumentar también la superficie de contacto, la tensión transmitida al pavimento se atenúa. Así, las tensiones transmitidas al pavimento por un mismo camión cargado son, aunque algo mayores, del mismo orden de magnitud que las transmitidas para ese mismo camión en vacío (Figura 187), ya que a pesar de disminuir su carga por eje, la superficie de contacto rueda/pavimento también disminuye (De Beer et al., 2004). Por otra parte, la presión de inflado del neumático jugará un papel clave ya que a mayor presión, menor superficie de contacto con el firme existirá (para un mismo peso por eje), y el valor de las tensiones para una misma carga de eje aumentará.

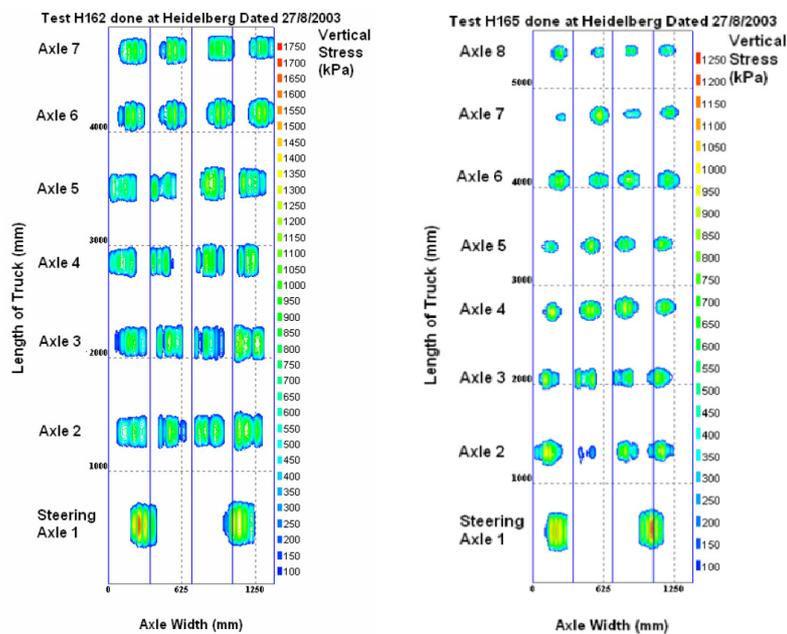


Figura 187. Magnitud de las tensiones verticales de un mismo camión cargado (izq.) y en vacío (dcha.). (De Beer et al., 2004)

Dado que no existen demasiados estudios que determinen directamente la superficie de contacto rueda pavimento, partiendo de la *Ecuación 46*, y conociendo el ancho de neumático y su presión de inflado, puede determinarse la longitud de contacto de la rueda con el pavimento, y con ésta calcular dicha superficie. En este sentido, en la base de datos de la LTPP se muestran valores representativos de los vehículos pesados en EE.UU del ancho de neumático entre los 20,0 y 22,2 cm, y de la presión de inflado de 8,444 kg/cm² (LTPP 2011). Un estudio desarrollado en Suráfrica (en el que se midió la presión de más de 65.000 neumáticos) demostró que la presión de inflado media de los neumáticos de los ejes tractores de los vehículos pesados es de 8,668 kg/cm² (850 kPa), mientras que la media para el resto de neumáticos es de 7,892 kg/cm² (774 kPa), de forma que la presión de inflado en los ejes motores suele ser en torno a un 10-13% superior al del resto de los neumáticos (Figura 188, De Beer et al., 2004).

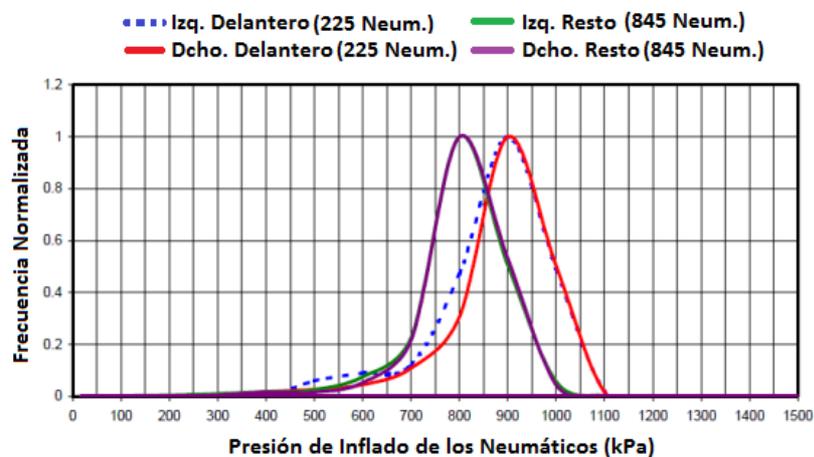


Figura 188. Diferencia en la presión de inflado de los ejes tractores y el resto de ejes. (De Beer et al., 2004)

En los países en los que no se dispongan de estudios de estos parámetros pueden utilizarse las recomendaciones de algunos fabricantes. Así, podemos decir que las presiones de inflado óptimas varían entre los 6,144 y los 9,171 kg/cm² en función del tipo de vehículo

pesado (Michelin 2009), mientras que la medida de ancho de neumático suministrada para éstos puede variar entre los 20,0 y 45,5 cm (Goodyear 2012).

Por otra parte, en base a la teoría estadística del modelo de Gompertz, en EE.UU se desarrolló un estudio en el que se determinó la longitud mínima (L_1) y máxima (L_2) de huella de neumático para diferentes tipos de ejes y clases de vehículos (LTPP 2011). Dichos datos vienen recogidos en la Tabla 19.

Tipo de Vehículo	Longitud L1 (cm)	Longitud L2 (cm)
Ejes simples Clases 4, 5, 6 y 7	8,7376	42,339
Ejes simples Clases 8, 9, 10, 11, 12 y 13	3,934	17,254
Ejes Tándem Clases 4 y 5	3,360	31,585
Ejes Tándem Clases 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13	1,514	15,438
Ejes Tridem Clases 4 y 5	-	-
Ejes Tridem Clases 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13	2,118	22,098
Ejes Quadrem Clases 4 y 5	-	-
Ejes Quadrem Clases 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13	1,590	14,757

Tabla 19. Longitud de contacto rueda/pavimento máxima y mínima representativa según el tipo de eje y la clase de vehículo. (LTPP 2011)

5.3.2.5. Determinación de las Tensiones de Referencia

Muchos estudios asumen una tensión de contacto uniforme igual a la presión de inflado del neumático. A pesar de ello, estudios recientes han demostrado que las tensiones de contacto verticales no son uniformes y tienen un valor pico entorno a 2,5 veces la presión de inflado, de manera que el uso de presiones de contacto uniformes iguales a las presiones de inflado de la rueda pueden sobre estimar la vida de servicio de los pavimentos (De Beer et al. 1997; Ford & Yap 1990; Marshek et al. 1986; Myers et al. 1999; Tielking 1994; Yap 1998). Por otra parte, de acuerdo con los estudios llevados a cabo por Ford & Yap 1990, la variación de la presión de inflado del neumático afecta principalmente a las tensiones de contacto en la zona central del área de contacto. Posteriormente Yap 1998 certificó que a mayor presión de inflado, mayor era la tensión de contacto en la zona central (sin afectar a las tensiones en las otras zonas), mientras que Myers et al. 1999 demostraron que las tensiones de contacto verticales y transversales son mayores en los neumáticos más anchos.

Independientemente de la presión de inflado del neumático, mediante el empleo de los datos analizados en los puntos anteriores, e introduciéndolos en la *Ecuación 47*, podemos definir las tensiones de referencia a aplicar durante la evaluación de mezclas bituminosas en laboratorio, para simular las amplitudes de carga transmitidas por el tráfico. Dada la cantidad y variabilidad de los parámetros analizados en función del tipo de vía, país, etc., resulta muy complicado establecer un valor de amplitud de tensión específico para cada caso. De esta forma, en función de las condiciones de tráfico que se deseen analizar durante el ensayo, se deberán utilizar unos valores u otros a la hora de definir las amplitudes de carga a utilizar. A modo de ejemplo, en la Tabla 20 se muestran algunos valores de referencia calculados a partir de dichos datos, para unas condiciones genéricas:

Clase de Vehículo FHWA	Tipo de Eje	Carga por eje (kg)	Rangos de Tensión (kPa)
4,5,6 y 7	Simple	4000-6000	10,4 - 171,7
8, 9, 10, 11, 12 y 13	Simple	4000-6000	25,8 -190,5
4 y 5	Tándem	4000-17000	13,9 - 632,44
6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13	Tándem	4000-17000	28,5 - 1403,6
6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13	Tridem	5000-25000	35,6 - 2064,1

Tabla 20. Rangos de tensión de referencia a aplicar durante ensayos de fatiga en mezclas bituminosas en función de la clase de vehículo y tipo de eje.

Así por ejemplo, si queremos evaluar el comportamiento a fatiga de una mezcla bituminosa a nivel de laboratorio, que va a ser sometida en su mayoría al paso de ejes de un vehículo de clase 9 (ya que se trata del vehículo de mayor frecuencia de paso por dicha vía), un rango de las tensiones representativas aplicadas serían (Tabla 21):

Tipo de Eje	Nº de Neumáticos	Ancho de Neumático (cm)	Rango de Long. de Contacto (cm)	Carga (kg)	Rango de Tensiones por neumático (kPa)	Rango de Tensiones por eje (kPa)*
Simple	2	20	3,93-17,254	5000	72,45-318,07	72,45-318,07
Tándem	4	22,2	1,514-15,438	16000	58,88-600,45	117,77-1200,91
Tridem	4	22,2	2,118-22,0198	17000	29,24-304,03	87,73-912,09

Tabla 21. Valores de tensión de referencia al paso de un vehículo de clase 9 de la FHWA.

*considerando que toda la carga del eje se aplica en un punto medio del eje.

No obstante, estos valores de tensión son los aplicados en rodadura, pero si lo que deseamos evaluar es el comportamiento de mezclas bituminosas en capas inferiores (intermedia o base), deberemos de multiplicar el valor obtenido en rodadura por ciertos coeficientes de amortiguación (debido a que dicha tensión llega disipada por la acción de las capas superiores). En este sentido, puede utilizarse diferentes teorías más o menos precisas, que permiten el cálculo de la disipación de la carga en función de la profundidad en el interior del pavimento (Alhvin & Ulrey 1962; Boussinesq 1885; Burmister 1942; Burmister 1943; Burmister 1965). Además, deberá de tenerse en cuenta la tensión aplicada en función del espesor de la probeta, ya que si no es el mismo que el utilizado en el firme, la respuesta del material ante la carga aplicada va a ser diferente. De esta forma, si el espesor de la probeta es menor, también deberá aplicarse un coeficiente de reducción a la carga aplicada.

5.3.2.6. *Determinación del Rango de Carga a Aplicar en UGR-FACT*

En base a la geometría del ensayo y las dimensiones del dispositivo fabricado, y a partir de los rangos de tensiones de referencia a aplicar, en este punto se definen los intervalos de carga a utilizar durante la ejecución del ensayo, de manera que las cargas aplicadas reproduzcan de una forma más o menos fiel las solicitaciones a las que las mezclas están sometidas durante su vida de servicio.

El área de aplicación de carga corresponde a la superficie de contacto del cabezal de carga con la probeta la cual es de 0,0024 m² (0,04 m x 0,06 m). Utilizando dicho área de contacto, y los rangos de tensiones de referencia, en la Tabla 22 se recogen los intervalos de carga a utilizar durante el estudio del comportamiento a fisuración por fatiga en el ensayo:

Tipo de Eje	Rango de Tensiones por eje (kPa)	Rango de Carga a Aplicar (kN)	Valor Medio (kN)
Simple	72,45-318,07	0,2-0,8	0,5
Tándem	117,77-1200,91	0,3-3,0	1,7
Tridem	87,73-912,09	0,2-2,2	1,2

Tabla 22. Rango de cargas de ensayo de referencia.

En base a estos datos, podemos decir que unos escalones de carga representativos para optimizar la evaluación del comportamiento de las mezclas mediante el método de ensayo UGR-FACT pueden ser los comprendidos entre: **0,25 kN; 0,5 kN; 0,75 kN; 1,0 kN; 1,25 kN; 1,5 kN; 1,75 kN y 2 kN.**

5.3.3. Frecuencia de Ensayo. Periodos de Descanso

Tal y como hemos definido, el otro aspecto fundamental para la adaptación de las cargas del tráfico a los ensayos de laboratorio es la definición de la frecuencia de carga y la duración de los periodos de descanso (Figura 189). Para ello es necesario definir las distancias entre ejes, así como tener en cuenta la velocidad de los vehículos y la distancia de separación entre ellos.

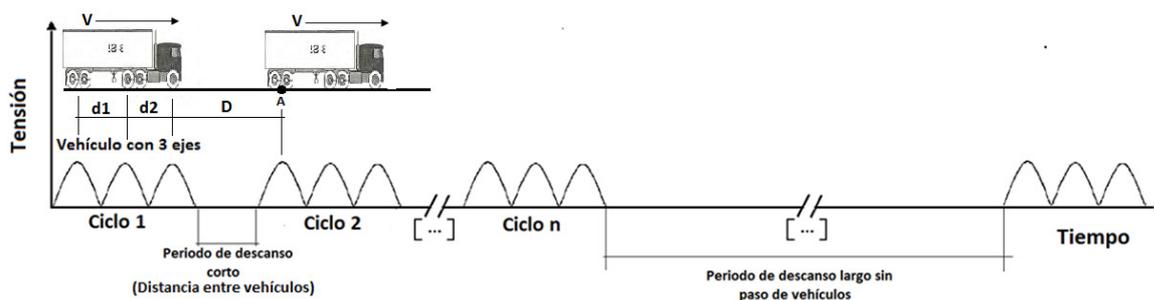


Figura 189. Esquema de frecuencia de paso y periodos de descanso debido a la circulación de vehículos sobre el pavimento.

En este sentido, existen clasificaciones detalladas de las distancias medias entre ruedas según las clases de vehículos (Tabla 23), como la basada en los datos del Departamento de Transportes de Texas (Lee & Souny-Slitine 1998), o más simplificada, como la que recoge las distancias medias entre ejes de las diferentes modalidades de vehículos (Lytton et al. 2010).

Capítulo – 5: Análisis de Resultados

Clase de Vehículo	Intervalos de distancia entre ruedas (m) TxDOT						Distancias medias entre ejes (m)
	A-B	B-C	C-D	D-E	E-F	F-G	
4	6,40-12,19	1,04-1,83	-	-	-	-	9,114
5	3,99-6,37	-	-	-	-	-	6,004
6	1,85-6,37	1,04-1,43	-	-	-	-	6,309
7	1,85-6,07	6,16-18,29	-	-	-	-	4,785
8	1,85-6,07	5,03-12,19	1,04-1,43	-	-	-	4,206
9	1,85-7,62	1,85-12,19	1,04-1,43	1,04-1,43	-	-	5,913
10	1,85-6,70	1,04-1,43	3,17-12,19	1,04-1,43	1,04-1,43	-	6,187
11	1,85-5,17	3,38-7,01	1,85-5,47	3,38-7,01	-	-	5,395
12	1,85-5,17	3,38-7,01	1,04-1,43	1,85-5,47	3,38-7,01	-	5,486
13	1,85-5,17	1,04-1,83	3,38-7,01	1,04-1,83	1,85-5,47	3,38-7,01	5,395

Tabla 23. Distancias entre ejes en función de la clase de vehículo.

Considerando algunas de estas distancias entre ejes y diferentes velocidades (para dos regímenes de aplicación de las cargas, a velocidad elevada y a velocidad lenta) y utilizando la *Ecuación 48*, podemos definir diferentes rangos de frecuencias de aplicación de la carga durante el ensayo (Tabla 24).

Distancia entre ejes (m)	Velocidad elevada				Velocidad media				Velocidad lenta			
	3	5	12	18	3	5	12	18	3	5	12	18
Velocidad (km/h)	120	120	120	120	80	80	80	80	45	45	45	45
Periodo (s)	0,090	0,150	0,360	0,540	0,135	0,225	0,540	0,810	0,240	0,400	0,960	1,440
Frecuencia (Hz)	11,11	6,66	2,77	1,85	7,41	4,44	1,85	1,23	4,17	2,50	1,04	0,69

Tabla 24. Frecuencias a aplicar durante los ensayos de laboratorio para reproducir las condiciones del tráfico.

Por su parte, la distancia media entre vehículos (D) podemos considerarla en base a la distancia marcada para mantener la seguridad vial. Dicha distancia podemos establecerla en

función de la velocidad a la que vaya el vehículo, siendo medio metro de distancia (0,5 m) por kilómetro de velocidad (de manera que si un coche va a 120 km/h, la distancia de seguridad ha de ser de 60 m). Por otra parte, las distancias de seguridad también han de tener en cuenta las condiciones de la calzada, la climatología, los tiempos de percepción y reacción, así existe una regla denominada regla del cuadrado que consiste en eliminar la última cifra de la velocidad y elevar al cuadrado el número que queda (así para 120 km/h la distancia de seguridad será de $12^2= 144$ m), mientras que en el caso de calzadas mojadas la distancia obtenida de esta regla deberá multiplicarse por 2.

En base a las distancias entre los vehículos (D), y a la *Ecuación 49*, podemos definir la duración de diferentes tiempos de descanso de corta duración para la ejecución del ensayo (Tabla 25):

		Seco	Húmedo		Seco	Húmedo
Distancias entre vehículos (m)	50	100	200	30	36	72
Velocidad (km/h)	100	100	100	60	60	60
Tiempo de Descanso (s)	1,85	3,70	7,41	1,80	2,16	4,32

Tabla 25. Periodos de descanso cortos a aplicar durante los ensayos de fatiga de mezclas bituminosas.

Según algunos investigadores, la vida de fatiga no aumenta significativamente para periodos de descanso superiores a 10 veces el tiempo de carga durante los ensayos en laboratorio (Raithby & Sterling 1972; Bonnaure et al. 1982; Verstraeten et al. 1982). En este sentido, las frecuencias y periodos de descanso aquí definidos permiten cumplir con dicho criterio, tal y como se recoge en la Tabla 26, donde se muestra una relación de los periodos óptimos de descanso a utilizar durante los ensayos en función de la frecuencia de ensayo.

Frecuencias (Hz)	11,11	7,41	6,66	4,44	4,17	2,77	2,50	1,85	1,23	1,04	0,69
Tiempos Máximos Óptimos de descanso (s)	0,9	1,35	1,50	2,25	2,40	3,60	4,00	5,40	8,10	9,60	14,4

Tabla 26. Periodos óptimos de descanso en función de la frecuencia de ensayo utilizada.

Además de la distancia entre vehículos y ejes, la frecuencia de paso de vehículos en las diferentes horas del día y épocas del año, también influirán en los periodos de descanso del firme que permitirán la recuperación de las mezclas. El volumen de tráfico rodado varía bastante en función de la época del año y hora del día (Lytton et al. 2010), pero pretender modelizar las variaciones estacionales en un ensayo de laboratorio es muy ambicioso, así durante la ejecución del ensayo deberemos establecer periodos largos de descanso en relación a la distribución diaria de tráfico. La Figura 190 recoge la distribución horaria de tráfico diario en una autovía de EE.UU (NCHRP 2004). En base a los datos presentados, el tiempo mínimo de descanso largo a utilizar durante un ensayo de fatiga para poder adaptar las condiciones de carga transmitidas por el tráfico deberá ser de en torno a las 10 horas.

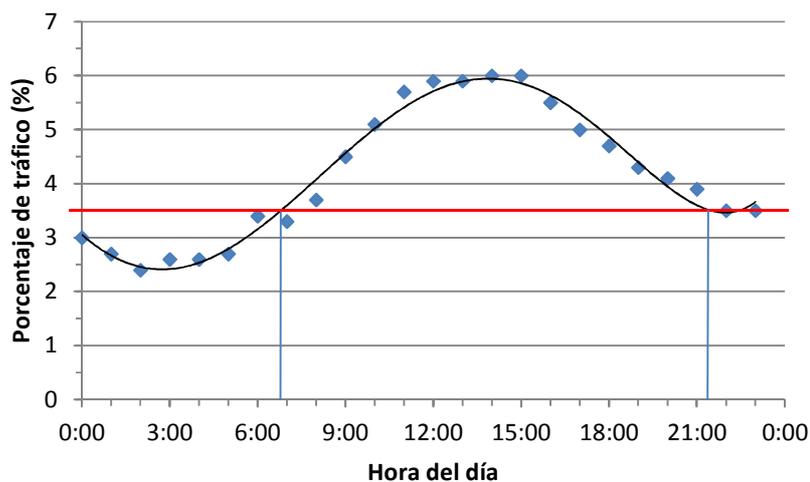


Figura 190. Datos de la distribución horaria de tráfico en un aforo de EE.UU. (NCHRP 2004)

A partir de los valores calculados en este apartado podemos decir que las frecuencias de carga no deberán exceder de los 12 Hz ya que las velocidades de los vehículos pesados en las carreteras y sus distancias entre ejes no permiten alcanzar frecuencias de aplicación de carga mayores. En función de las distancias entre ejes más comunes, las frecuencias de

ensayo para velocidades de tráfico altas, medias y bajas, podrían establecerse en torno a **5 Hz, 3 Hz y 1 Hz**, respectivamente.

Por otro lado, los periodos de descanso cortos se establecerán en función de la velocidad de los vehículos, así como de la distancia de separación entre los mismos. A pesar de ello, no se recomienda el empleo de periodos cortos de descanso superiores a 8 segundos. Los periodos largos de descanso, vendrán dados en función de la distribución del volumen de tráfico a lo largo del día, estableciendo un tiempo mínimo de en torno a las 9 horas.

5.3.4. Temperatura de Ensayo

La temperatura de acondicionamiento del ensayo deberá estar en consonancia con las que va a soportar la mezcla durante su vida de servicio. El estudio en estas condiciones resulta fundamental ya que la respuesta de este tipo de materiales ante la aplicación de cargas será más viscosa o más elástica en función de esta variable de ensayo, y por tanto es esencial conocer su comportamiento a fisuración en los diferentes estados. En este sentido, la posibilidad de evaluar el comportamiento del material a diferentes temperaturas permitirá definir la susceptibilidad térmica en el proceso de inicio y propagación de las fisuras.

En España, las temperaturas máximas y mínimas, así como su media anual, por regiones para el año 2009 vienen recogidas en las Figuras 191 y 192 (INE 2011). En ambas figuras se observa que las temperaturas medias anuales varían desde el entorno de los 20 °C para las provincias más calurosas, hasta el entorno de los 10 °C en el caso de las más frías. Por otra parte, las variaciones térmicas pico de máximas y mínimas más acusadas se encuentran en el entorno de los 45 °C, mientras que los valores máximos de temperatura registrados se sitúan en torno a los 42 °C, y los mínimos en torno a los -15 °C.

Capítulo – 5: Análisis de Resultados

Región	Estación	2008	2009	Región	Estación	2008	2009
Noroeste	Coruña, A	15,1	15,1	Ebro	Huesca (Pirineos)	13,9	14,8
	Lugo (Las Rozas)	12,0	12,3		Logroño (Agoncillo)	13,8	14,6
	Ourense	14,9	15,4		Pamplona (Aeropuerto de Noain)	13,0	13,7
	Pontevedra	14,5	14,7		Teruel	12,0	12,9
Cantábrica	Bilbao (Aeropuerto)	14,8	15,1		Vitoria (Aeropuerto de Foronda)	11,5	12,2
	Oviedo	13,2	13,2	Zaragoza (Aeropuerto)	15,5	16,4	
	San Sebastián (Igueldo)	13,4	13,5	Cataluña	Aeropuerto Barcelona (El Prat)	16,5	16,7
	Santander (Parayas aeropuerto)	14,4	14,8		Girona (Costa Brava)	14,3	19,9
Duero	Ávila	11,1	12,2		Lleida	15,1	16,0
	Burgos (Villafria)	10,8	11,3		Tortosa	17,7	18,5
	León (Virgen del Camino)	10,8	11,4	Levante	Castellón	17,8	18,2
	Palencia (Autilla del Pino)	10,4	11,3		Valencia	18,3	18,8
	Salamanca (Matacán)	11,6	12,8	Sureste	Alicante	17,4	18,8
	Segovia	12,1	13,1		Murcia	18,9	19,4
	Soria	10,6	11,7	Guadalquivir	Cádiz	18,6	19,1
	Valladolid	12,2	13,4		Córdoba (Aeropuerto)	18,2	18,9
	Zamora	12,7	13,9		Granada (Base aérea)	15,5	16,3
	Central	Albacete (Los Llanos)	14,4		15,2	Jaén	16,9
Ciudad Real		15,4	16,6	Sevilla (San Pablo)	19,6	20,4	
Cuenca		13,4	14,5	Costa Sur	Almería (Aeropuerto)	19,0	19,2
Guadalajara		10,9	13,7		Huelva	18,2	18,8
Madrid (Retiro)		14,9	16,0		Málaga (Aeropuerto)	19,0	19,2
Toledo	15,8	16,7	Balears	Palma de Mallorca (CMT)	18,2	18,4	
Extremadura	Badajoz (Talavera la Real)	16,9		17,9	Canarias	Palmas, Las (Gando)	20,8
	Cáceres	16,0	17,1	Santa Cruz de Tenerife		21,7	21,9
Territorios del Norte de África	Ceuta	18,5	19,0				
	Melilla	19,1	19,6				

Figura 191. Temperaturas medias anuales en España en los años 2008 y 2009. (INE 2011)

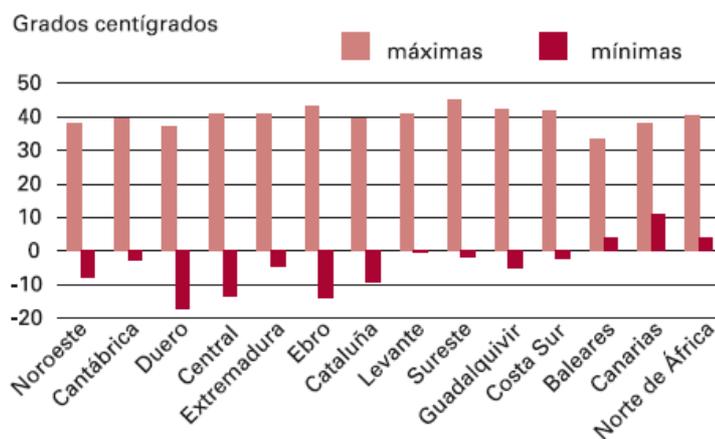


Figura 192. Temperaturas máximas y mínimas en España en el año 2009. (INE 2011)

A pesar del gran rango de variabilidad de temperaturas, incluso dentro de una misma región para diferentes estaciones del año (e incluso en diferentes años), debemos tener en cuenta que los rangos a estudiar durante el ensayo no pueden ser demasiados, ya que se

multiplicaría el número de probetas a ensayar para definir el comportamiento de la mezcla. Además, deberíamos también tener en cuenta situaciones especiales donde la variabilidad de temperaturas sea diferente, como las mezclas que vayan a ser utilizadas en zonas de alta montaña, o en zonas desérticas. Si se desconoce la zona climática donde va a ser empleada la mezcla, lo ideal es definir su respuesta a fisuración en función de tres condiciones térmicas de trabajo (fría, templada, y cálida), que analicen diferentes estados del material (rígido, semi-rígido, y deformable). En base a los datos obtenidos en las Figuras 191 y 192, para nuestro país, dichas condiciones térmicas pueden establecerse en torno a temperaturas de **-5 °C, 20 °C y 40 °C**.

De esta forma, mediante el acondicionamiento del ensayo con cámara térmica podrá analizarse el comportamiento de la mezcla a fisuración en función de su temperatura media de servicio. Así, la probeta deberá acondicionarse a la temperatura de ensayo dos horas antes de ensayarla, manteniendo dicha temperatura durante todo el ensayo. Además, si va a analizarse la influencia de los periodos largos de descanso, tras un primer tramo de aplicación de cargas, posteriormente deberá ser acondicionada a la temperatura de dicho periodo (media nocturna) sin aplicación de carga, antes de volver a ensayarla (de nuevo a la temperatura de ensayo).

Además de la temperatura del aire, habrá que considerar otros factores como las condiciones de viento y las horas de radiación solar a las que están expuestas. Ambas condiciones climáticas afectan directamente a la temperatura real a la que está trabajando el firme. A pesar de ello, tener en cuenta dichos factores durante la realización del ensayo, dificultaría mucho su acondicionamiento y su ejecución.

5.3.5. Humedad

Como hemos comentado en el capítulo anterior, la acción del agua puede tener consecuencias negativas en el comportamiento a fisuración de las mezclas bituminosas, disminuyendo tanto la adhesividad árido/ligante, como la cohesividad interna de la mezcla,

de forma que facilite la aparición y desarrollo del proceso. Así, resulta muy interesante llevar a cabo ensayos en los que se evalúe la influencia de este elemento en el comportamiento de la mezcla, sobre todo en climas en los que las precipitaciones están presentes durante la mayor parte del año, puesto que son las condiciones de servicio normales a las que va a estar sometido el material.

Para adaptar esta humedad al ensayo, será necesario acondicionar de la probeta en inmersión durante un determinado periodo de tiempo previo a la realización del mismo (en función del tamaño de la probeta, hasta su saturación). En este sentido, una forma de facilitar la temperatura de acondicionamiento de la probeta, será ajustar la temperatura del baño donde vaya a llevarse a cabo su inmersión para que coincida con la temperatura de ejecución del ensayo (siempre y cuando no sea inferior a 0 °C). Para el tamaño de probeta utilizado en el ensayo con 24 horas de inmersión. Además, para temperaturas de ensayo que no puedan alcanzarse con el baño, se realizará la inmersión a temperatura ambiente, y después se acondicionará la probeta en la cámara térmica 2 horas antes del ensayo, recubierta con un film de plástico para evitar que pierda su humedad.

A modo de ejemplo, en la Tabla 27 se recogen algunas de las condiciones de inmersión más comunes, utilizadas en ensayos que evalúan la susceptibilidad al agua de mezclas bituminosas (AENOR 2009; DGC 2000; Hunter & Ksaibati 2002). En este sentido, se puede llevar a cabo un análisis comparativo de la resistencia a fisuración del material en condiciones de humedad y en seco, de manera que pueda evaluarse la influencia de la presencia de agua en el comportamiento a fisuración de cada tipo de mezcla bituminosa.

Norma	Acondicionamiento	Tiempo de Acondicionamiento	
AASHTO T-182 (Static Immersion Test)	Baño con agua a 25 °C	16-18 horas	
NCHRP 192 (Lottman Test)	Al vacío saturadas de agua a 60 mmHg	30 minutos	
	Ciclo hielo/deshielo	-18 °C	15 horas
		60 °C	24 horas
NCHRP 274 (Tunnickliff and Root Conditioning)	Baño con agua a 60 °C	24 horas	
AASHTO T-283 (Modified Lottman Test)	Baño con agua a 0 °C, -18 °C	16-18 horas	
	Baño con agua a 60 °C	24 horas	
AASHTO T-165 (Immersion-Compression Test)	Baño con agua a 49 °C/60 °C	4 días/ 1 día	
NLT 162 (Inmersión-Compresión)	Baño con agua a 49 °C	4 días	
UNE-EN 12697-12 (Sensibilidad al Agua)	Baño con agua a 40 °C	3 días	

Tabla 27. Condiciones de inmersión para la evaluación de la humedad en el comportamiento mecánico de mezclas bituminosas.

5.3.6. Envejecimiento

De la misma forma que la temperatura a la que se lleva a cabo el ensayo, o de las condiciones de humedad del material, el estado de envejecimiento de la mezcla también afecta a su comportamiento a fisuración. El envejecimiento propiciará la pérdida de parte de las propiedades del ligante, de forma que su respuesta ante la aplicación de los ciclos de carga del ensayo no va a ser la misma. Así, evaluando probetas con diferente grado de envejecimiento (se ensayaran probetas del mismo tipo, bajo las mismas condiciones de carga y ensayo, pero unas sometidas a envejecimiento, otras sin envejecer) puede analizarse como va a ser su comportamiento a largo plazo ante el fenómeno de fisuración.

Alguno de los procesos de envejecimiento de mezclas bituminosas más utilizados en laboratorio vienen recogidos en la Tabla 28 (Bell et al. 1994b):

Norma	Tipo de Envejecimiento	Simulación de años de servicio	Acondicionamiento
Low-Pressure Oxidation Cell	Largo plazo	5-10 años	Introducir la probeta en una cámara de oxidación a baja presión durante 5 días a 180 °C
Pressure-Oxidation Aging	Largo Plazo	-	Introducir la probeta en una cámara de oxidación a presión con oxígeno durante 2-7 días a 180 °C
Extended Mixing	Corto Plazo	-	Llevar a cabo el envejecimiento de la mezcla en un RTFO antes de su compactación

Tabla 28. Acondicionamientos para simulación de envejecimiento a nivel de laboratorio. (Bell et al. 1994b)

Otro procedimiento consiste en someter a las probetas a envejecer a un acondicionamiento previo a su ensayo, de entre 15 y 90 días a una temperatura determinada (entre 80 y 163 °C) en una estufa de corriente de aire, de forma que estén expuestas a la presencia de aire y a una temperatura severa, durante un periodo de tiempo prolongado (Miró Recasens 1994). Una vez finalizado dicho periodo, las probetas se dejarán a enfriar a temperatura ambiente, para después ser acondicionadas a la temperatura de ensayo.

5.3.7. Instrumentación y Toma de Datos. Criterio de Fallo

Para la instrumentación de la probeta y el registro de los datos del ensayo se dispondrá de 4 LVDT's (Linear Variable Differential Transformer), en ambos sentidos (horizontal y vertical) y

en ambas caras de la probeta, de manera que pueda llevarse a cabo una toma de datos completa para el volumen representativo a estudiar donde tendrá lugar el proceso de fisuración. Además, eventualmente podrá utilizarse una cámara fotográfica de alta definición que permita controlar mediante imágenes la degradación del material.

Durante cada ciclo de aplicación de carga, además de la de la fuerza aplicada, se registrarán las deformaciones horizontales (en la zona inferior de la probeta) y verticales (en la zona superior) producidas en un entorno cercano a la zona tensionada donde aparecerá y se desarrollará la fisura (tomando la medida de dichas deformaciones a ambos lados de la probeta con las que se obtendrá una media las producidas en el volumen representativo de estudio, Figura 196). Además, se tomarán medidas del ángulo de fase entre la carga aplicada y las deformaciones producidas, así como el tiempo empleado en cada ciclo y el número de éstos (Figura 193).

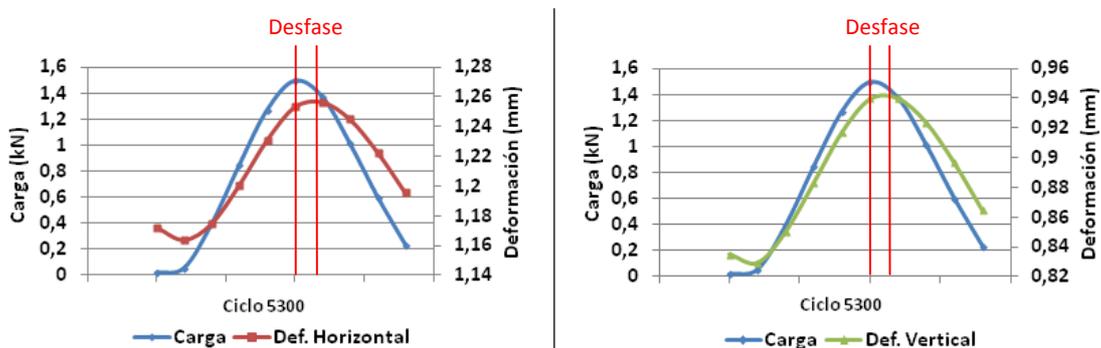


Figura 193. Ejemplo de registro de datos en cada ciclo.

La frecuencia de toma de medidas se hará cada 100 ciclos de carga, pudiéndose adaptar a cada 10 o cada 1000 en función de si se prevé un cambio en las propiedades del material muy rápido o muy lento (para no perder información del proceso de fisuración producido, o no saturar de datos poco útiles la información del ensayo). En cada ciclo se tomarán como mínimo 10 medidas (aunque lo preferible es tomar 100), de manera que pueda registrarse la evolución de la carga y las deformaciones producidas.

A partir de los valores registrados, puede determinarse la energía disipada por el material dentro del volumen de estudio con una alta precisión puesto que se controlan las deformaciones producidas tanto en sentido vertical, como en horizontal, a ambos lados de la probeta. Aplicando la teoría de estudio de fatiga de materiales basada en conceptos de disipación de energía (Ghuzlan 2001; Pronk & Hopman 1991; Van Dijk & Visser 1977; Shen et al. 2006), se evaluará el daño sufrido por el material durante el proceso de fisuración en el volumen representativo de estudio (permitiendo controlar su aleatoriedad y distribución tridimensional, Figura 194), ya que el simple análisis visual de la propagación de la macro grieta no es del todo efectivo (puesto que imposibilita tener en cuenta las fase de formación, desarrollo y coalescencia de las micro y meso-fisuras). De esta forma, el ensayo desarrollado permite obtener información detallada y realizar un análisis completo de cada una de las fases del proceso (inicio, propagación y fallo).

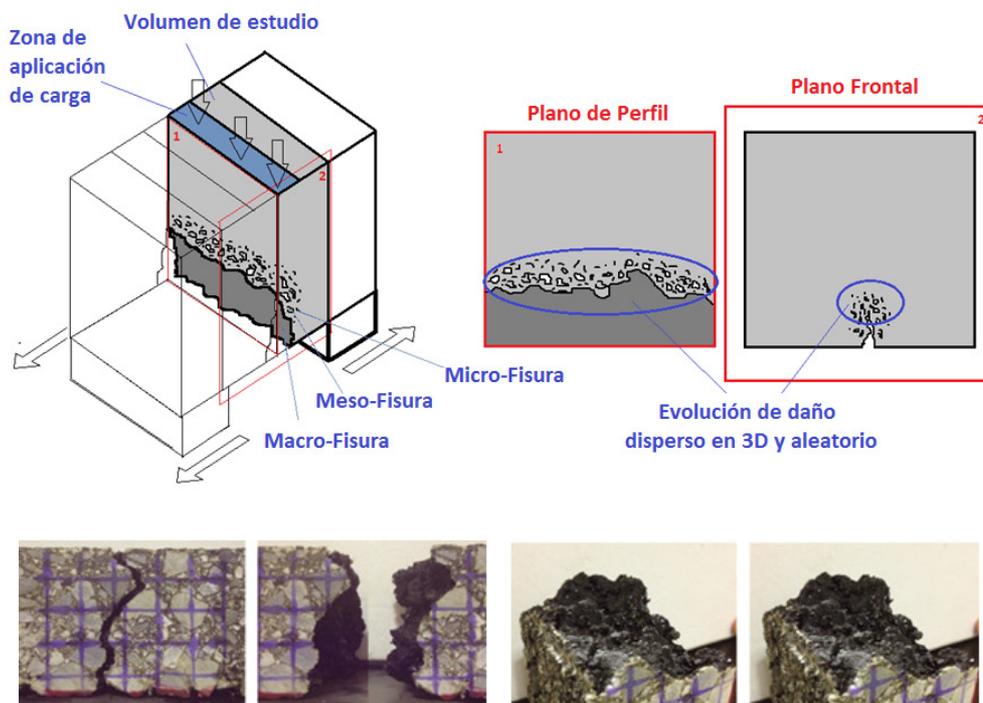


Figura 194. Detalle de la propagación del daño por fisuración en el volumen representativo de estudio, y de la aleatoriedad y dispersión del proceso en 3D.

A pesar de su aleatoriedad, eventualmente, dicho estudio detallado del daño producido en el material a través del análisis de la energía disipada, puede ser correlacionado mediante la toma de imágenes que permitan verificar visualmente el estado de degradación del mismo (Figura 195).

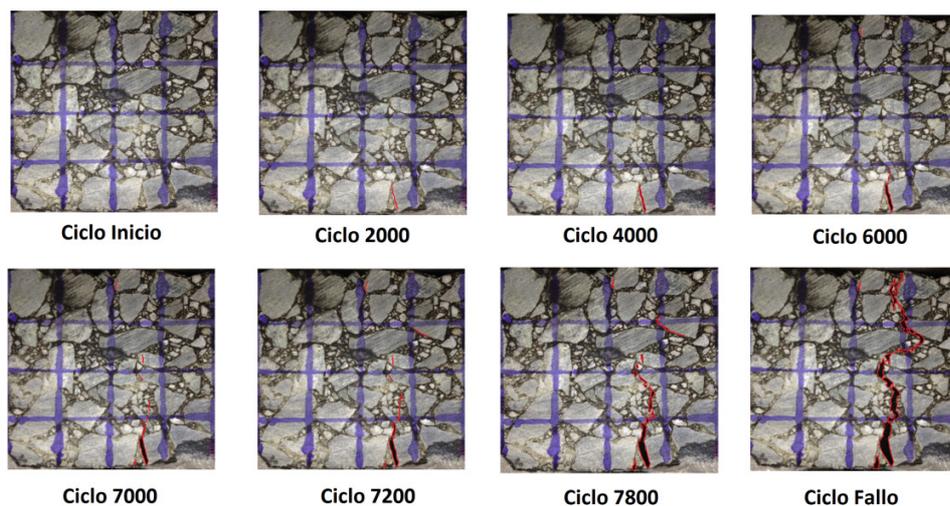


Figura 195. Control de la evolución del daño a fisuración producido en el material mediante imágenes.

Finalmente, el **criterio de fin de ensayo** seleccionado para el método UGR-FACT ha sido la propagación total de la macro-fisura a través de la probeta (Figura 196), provocando su fallo y separación en dos piezas (el mismo al seleccionado en ensayos de índole similar como el empleado en el de fatiga a tracción indirecta EN 12697-24, anexo E). A pesar de ello, si el número de ciclos de carga alcanza los 2.000.000, el ensayo también se dará por concluido considerando que el valor de carga aplicado se encuentra por debajo del límite de resistencia a fisuración por fatiga. Este criterio de fin de ensayo permite evaluar cada una de las tres fases que comprende el proceso de fisuración (inicio, propagación y fallo), de forma que resulta muy útil para analizar el comportamiento mecánico de la mezcla.

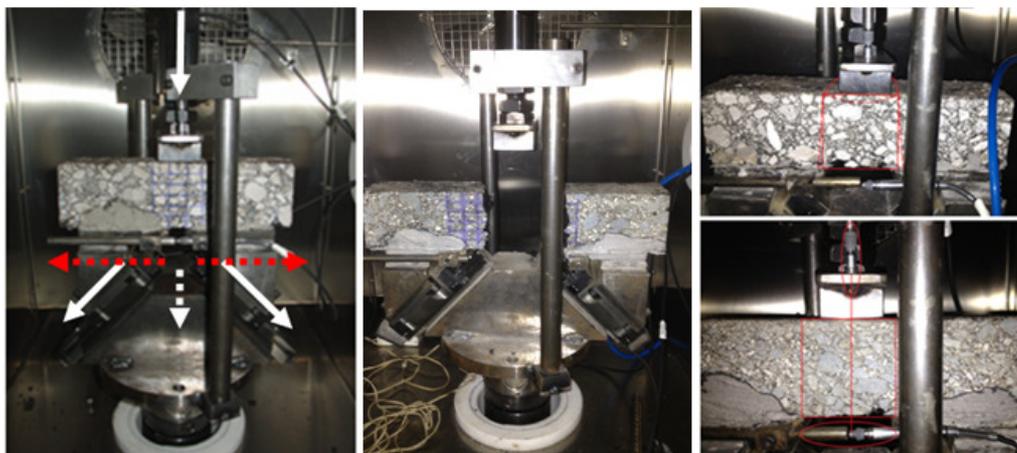


Figura 196. Detalle de la ejecución del ensayo, el final, y la zona de colocación de los LVDT que analiza el volumen representativo de estudio.

No obstante, en ocasiones cuando la macro-fisura se encuentra muy desarrollada al final del ensayo (cuando la probeta se encuentra a punto de fracturarse en dos piezas), el comportamiento del material se vuelve más inestable y la respuesta en términos de energía disipada ofrecida por el mismo no es del todo fiable. En dicha fase, suele ocurrir que el ángulo de fase entre la carga aplicada y los desplazamientos (el cual guarda relación directa con el desarrollo del daño producido en el material), cae de forma considerable (Figura 197). Así, este punto podría contemplarse como otro posible criterio para considerar el fin del ensayo desarrollado (N_f^*). Aunque menos evidente que la fractura total de la probeta en dos piezas, este criterio podría contribuir a eliminar las diferencias de resultados en los últimos ciclos del ensayo debidos a las inestabilidades provocadas por la fase final del proceso (en los que la probeta está a punto de romper, pero unas lo hacen de forma más brusca y otras de forma más suavizada). Además este criterio no tendrá en cuenta el espesor de la probeta ensayada, y por tanto, resultará más fiable a la hora de fijar el fallo por fisuración del material. Como contra prestación está que el cálculo de dicho ángulo de fase no suele ser fácil de obtener y no todos los softwares y equipos de ensayos permiten determinarlo de manera precisa.

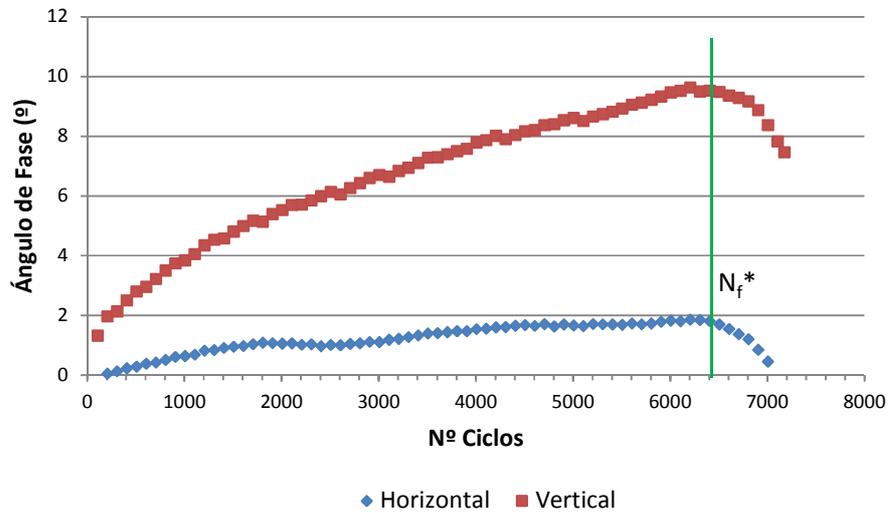


Figura 197. Evolución del ángulo de fase entre la carga y los desplazamientos verticales y horizontales del volumen de estudio.

5.4. Validación del Método de Ensayo UGR-FACT

5.4.1. Análisis de la Repetibilidad

En las Tablas 29-32 se presentan los resultados de los ensayos llevados a cabo para el estudio de la repetibilidad del método de ensayo UGR-FACT. La repetibilidad de los resultados obtenidos se muestran en torno a los dos parámetros fundamentales que marcarán el análisis de resultados del ensayo, el ciclo de fallo N_f (que determinará la base del análisis fenomenológico y la ley de fisuración por fatiga) y la energía disipada acumulada (que definirá la cantidad de energía disipada por el material hasta provocar su fallo, y en base a ella el parámetro y umbrales de daño).

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

AC 22 S								
Condiciones de Ensayo	Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Media	Desviación Típica	Coef. Variación Cv	r
2,0 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	455	485	515	485	30,00	0,0616	9,99
	ED Acumulada (J/m ³)	8198	9619	6977	8264	1322,41	0,1600	25,86
1,5 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	1395	1230	1375	1333	90,05	0,0675	10,92
	ED Acumulada (J/m ³)	8203	10649	14423	11091	3133,29	0,2825	45,67
1,0 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	12805	17960	17105	15957	2762,70	0,1731	27,99
	ED Acumulada (J/m ³)	21039	43200	43247	35828	12807,99	0,3575	57,79
0,5 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	88790	91615	-	90203	1997,58	0,0221	4,38
	ED Acumulada (J/m ³)	82625	74192	-	78408	5963,13	0,0761	15,06

Tabla 29. Resultados de repetibilidad de la mezcla AC 22 S.

AC 16 S							
Condiciones de Ensayo	Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Media	Desviación Típica	Coef. Variación Cv	r
2,0 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	2160	1455	1808	498,51	0,02758	54,61
	ED Acumulada (J/m ³)	17646	15882	16765	1247,65	0,0744	14,73
1,5 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	8285	7175	7730	784,89	0,01015	20,10
	ED Acumulada (J/m ³)	39029	36875	37953	1522,98	0,0401	7,95
1,0 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	35200	33805	34503	986,41	0,0286	5,66
	ED Acumulada (J/m ³)	67604	81683	74644	9955,34	0,01334	26,40

Tabla 30. Resultados de repetibilidad de la mezcla AC 16 S.

BBTM 11A BMAVC							
Condiciones de Ensayo	Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Media	Desviación Típica	Coef. Variación Cv	r
1,0 kN; 5 Hz; 20 °C; 0 mm	N _f	3400	3700	3550	212,13	0,0598	11,83
	ED Acumulada (J/m ³)	29020	30706	29863	1192,11	0,0399	7,90
0,75 kN; 5 Hz; 20 °C; 0 mm	N _f	11500	11765	11632	187,38	0,0161	3,19
	ED Acumulada (J/m ³)	47032	52081	49557	3570,36	0,0720	14,26

Tabla 31. Resultados de repetibilidad de la mezcla BBTM 11A con BMAVC.

BBTM 11A BM3c							
Condiciones de Ensayo	Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Media	Desviación Típica	Coef. Variación Cv	r
0,75 kN; 5 Hz; 20 °C; 0 mm	N _f	7000	8000	7500	707,11	0,0943	18,66
	ED Acumulada (J/m ³)	32898	30317	31607	1824,92	0,0577	11,43

Tabla 32. Resultados de repetibilidad de la mezcla BBTM 11A con BM3c.

En base a estos resultados podemos afirmar que el valor del Cv se puede considerar dentro de los valores de precisión exigidos en los ensayos de carreteras los cuales suelen ser del orden del 10-15% (Miró Recasens, 1994). A pesar de que existe algún valor puntual en el que dicho coeficiente ronda el 30%, la gran mayoría de los valores medidos (85%) se encuentra por debajo de dicho intervalo.

En cuanto a los resultados de variabilidad en términos fenomenológicos y de energía disipada se observa que no guardan una relación definida entre sí, de manera que valores de repetibilidad altos en base al ciclo de fallo no tienen porqué corresponder con valores de repetibilidad altos en términos de energía disipada. No obstante, en términos generales los valores de repetibilidad r obtenidos en cada una de las mezclas en ambos enfoques son bastante buenos, estando la media de los mismos en torno al 16% en el caso del ciclo de fallo y en torno al 18% en el caso de la energía disipada acumulada.

Durante el desarrollo de la investigación se ha visto que la repetibilidad podría verse mejorada si se afinan los instrumentos empleados en la ejecución del método, y que no tienen nada que ver con las características del ensayo desarrollado, como la célula de carga utilizada, la precisión de los medidores LVDT, o la precisión a la hora de determinar la energía disipada y el ángulo de fase. En otros términos, se puede observar una cierta tendencia en el aumento de la precisión del ensayo desarrollado conforme disminuye el valor de carga aplicado. Este hecho es debido a que los valores elevados de carga provocan una respuesta a fatiga más inestable en el material. Así, será necesario definir qué rangos de carga provocan una evaluación más estable de cada material. Además, las características de repetibilidad del ensayo se ven bastante afectadas en función del estado de fabricación de las probetas utilizadas, de manera que deben tener una compactación homogénea y las caras deben de estar regularmente aserradas.

En definitiva, podemos decir que el método de ensayo UGR-FACT es un ensayo con una precisión aceptable, por lo que en principio puede ser aceptado como procedimiento de medida para los ensayos que se han previsto realizar. No obstante, se podría seguir trabajando afinando el rango de valores de carga a utilizar, así como ciertos aspectos

mecánicos como la célula de carga, aparatos de medición, etc., acordes con la precisión requerida por el dispositivo de ensayo.

5.4.2. Evaluación de los Parámetros de Ensayo

En este apartado se estudian en profundidad los parámetros definidos en el método de ensayo UGR-FACT: Displacement Ratio y Parámetro de Daño Medio. Para ello, se evaluó el comportamiento mecánico a fisuración de diferentes mezclas con el método de ensayo UGR-FACT y se utilizó una cámara digital de alta resolución para controlar la degradación sufrida por el material durante el ensayo. A partir de las imágenes obtenidas, se determinó la evolución del área de fractura, de manera que ésta pudiera correlacionarse con los datos obtenidos en el ensayo. Como criterio general se tomará el valor de 5 mm² de área de fractura medida sobre la imagen para considerar la macro-fisura como iniciada, de forma que las imágenes en las que el área de fractura detectada esté comprendida entre 0-5 mm² se considerará aún estado de micro-meso fisuración.

Las mezclas ensayadas son del tipo BBTM 11A, fabricadas con distintos ligantes (BM3c, BMAVC, B50/70 + 1,5% PNFU VS, B50/70). A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada una de estas mezclas.

BBTM 11A BM3c

Las Figuras 198, 199 y 200 muestran la evolución del daño a fisuración por fatiga sufrido por la mezcla BBTM 11A BM3c bajo diferentes niveles de amplitud de carga (0,5 kN; 0,75 kN; 1 kN). Como se puede observar se trata de una fisuración bastante ramificada alrededor de la grieta de fallo principal.

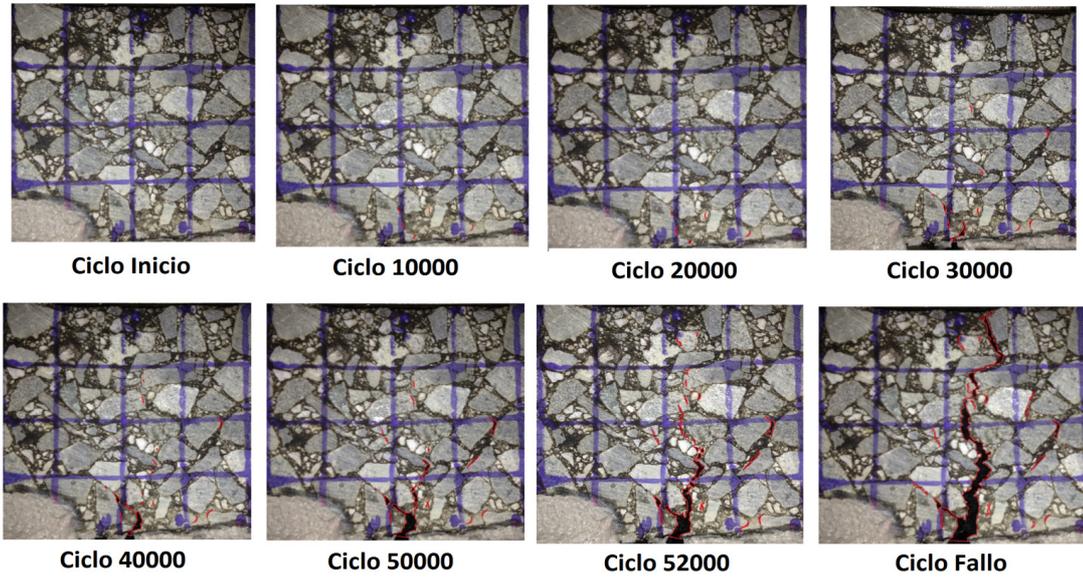


Figura 198. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BM 3c ensayada a 0,5 kN.

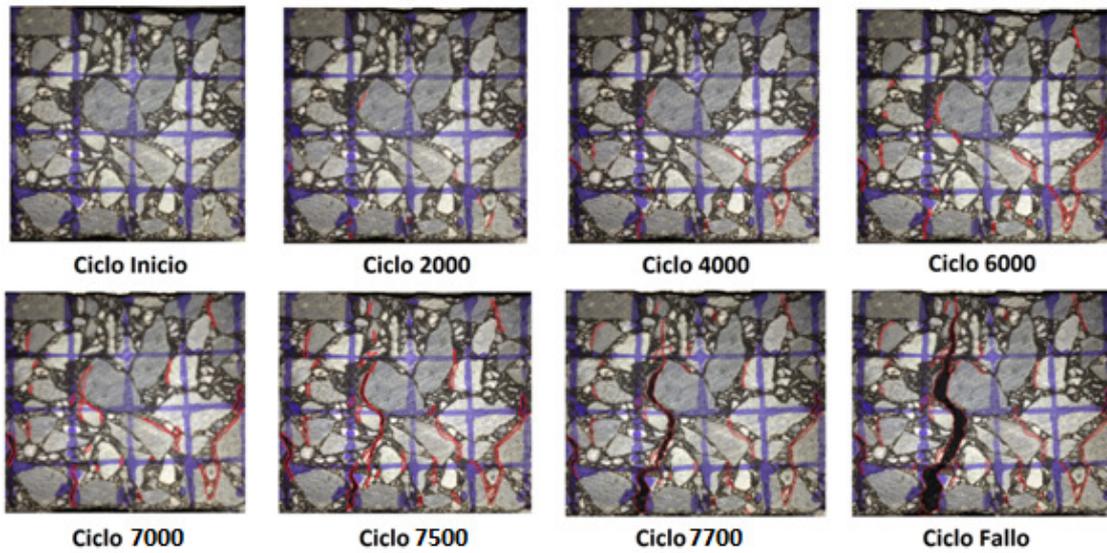


Figura 199. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BM 3c ensayada a 0,75 kN.

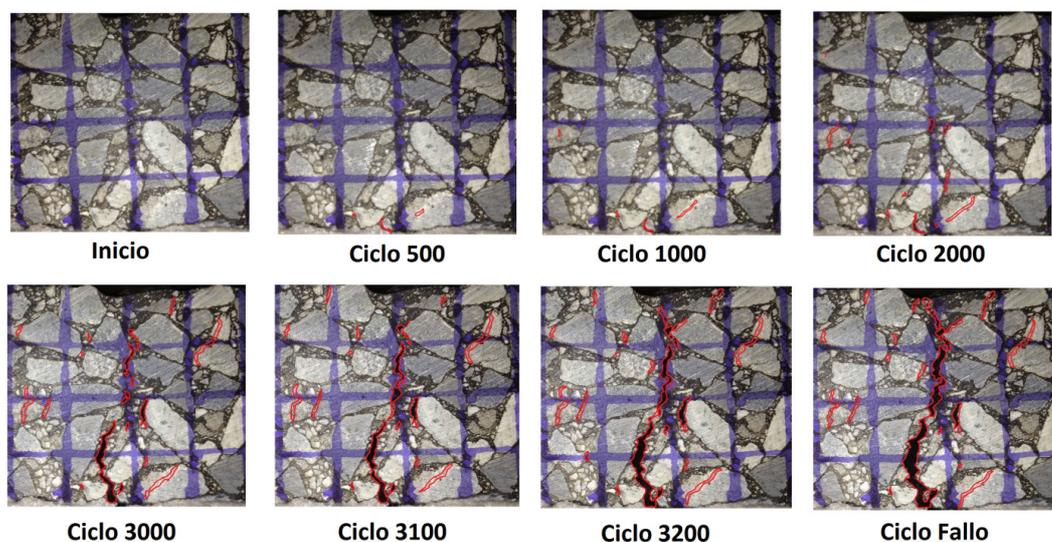


Figura 200. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BM 3c ensayada a 1,0 kN.

En la Figura 201 se muestran los valores de Energy Ratio obtenidos en dichos ensayos en comparación con la evolución del daño sufrido (en términos de macro-fisura). Como se puede observar, la tendencia mostrada por las curvas de Energy Ratio no es la misma que la definida por Rowe et al. 1996 en sus estudios, y por tanto hacen imposible determinar el inicio de la fase de micro-fisuración ni la de macro-fisuración.

La Figura 202 muestra los valores de Displacement Ratio obtenidos en dichos ensayos y su comparación con la evolución de la macro-fisura. En este caso, la tendencia de las curvas es más estable, mostrándose todas iguales a la definida en el capítulo anterior. De esta forma, a partir de los dos cambios de curvatura puede estimarse el ciclo de inicio de micro-fisuración N_i (una vez terminadas las deformaciones plásticas), así como el ciclo de inicio de la macro-fisura N_M . Además, tal y como se observa en la figura, los ciclos estimados coinciden con las mediciones realizadas del daño sufrido por la probeta a través de las imágenes tomadas durante el ensayo. Así, podemos afirmar que en el caso de la mezcla BBTM 11A BM3c el parámetro Displacement Ratio calculado a partir de los desplazamientos producidos en el volumen, tiene correlación con el daño a fisuración fotografiado en las imágenes.

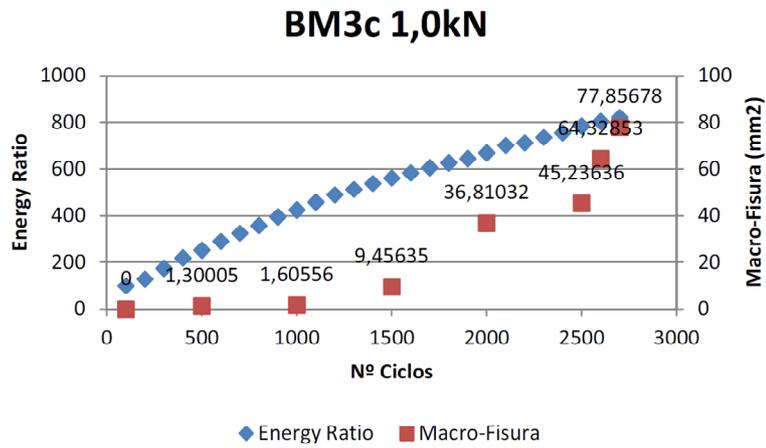
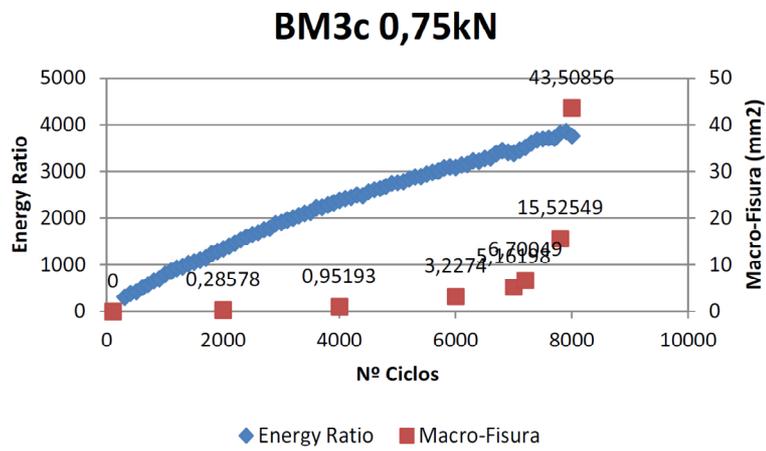
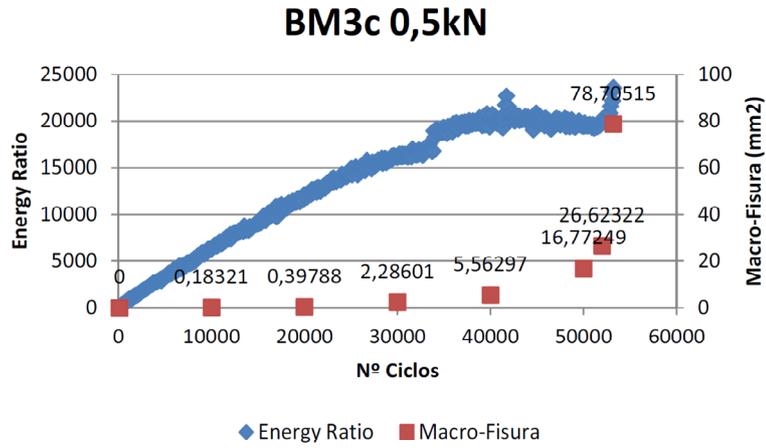
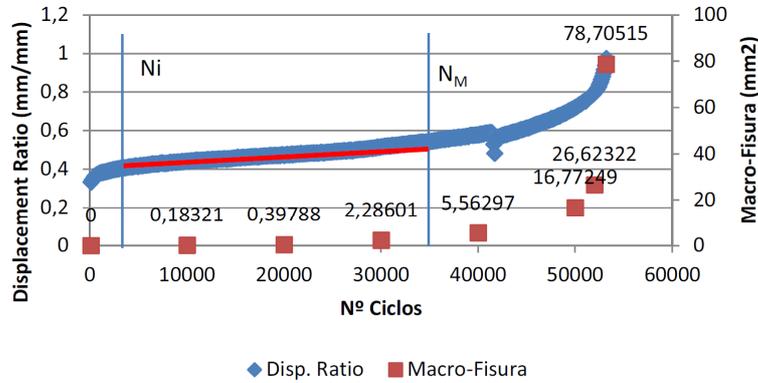
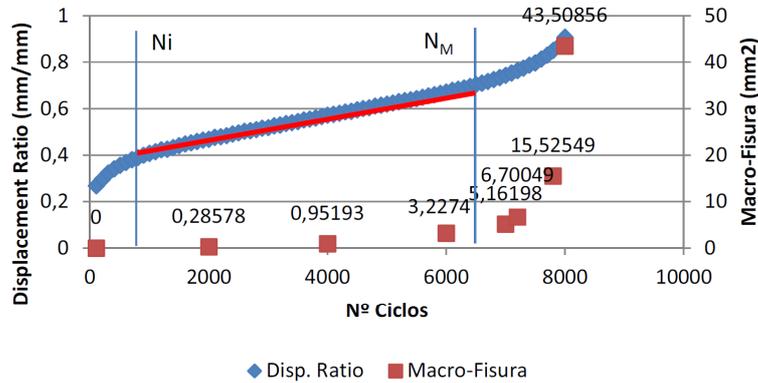


Figura 201. Comparativa Energy Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A BM3c.

BM3c 0,5kN



BM3c 0,75kN



BM3c 1,0kN

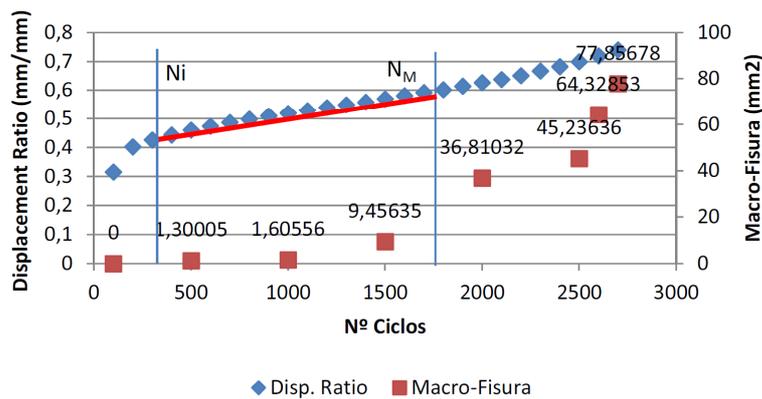


Figura 202. Comparativa Displacement Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A BM3c.

En la Figura 203 se muestran las gráficas de regresión lineal obtenidas durante los diferentes ensayos llevados a cabo (0,5 kN; 0,75 kN; y 1,0 kN), en las que se asocia el incremento de daño de macro-fisuración (medido a través de las imágenes) con el incremento de RDEC Acumulado, el incremento de Energía Disipada Acumulada, y el porcentaje de caída del módulo de rigidez. Como se puede observar, los datos de área de fractura obtenidos a partir de las imágenes tomadas durante los ensayos muestran una baja correlación lineal con los parámetros calculados (RDEC, Energía Disipada y Módulo de Rigidez) a partir de los valores medidos mediante la instrumentación de la probeta. Este hecho es debido a que mediante las imágenes solo es posible auscultar una de las caras de la probeta (dejando sin valorar el daño que se está produciendo en las otras caras, así como en el interior del volumen), y por tanto nos es posible que exista una buena correlación con los datos tomados por los LVDT's, puesto que estos controlan lo ocurrido en el volumen completo.

No obstante, en base a los resultados obtenidos, podemos observar que los datos calculados de energía disipada (RDEC Acumulado y Energía Disipada Acumulada) tienen un coeficiente de correlación superior al obtenido en términos de módulo de rigidez. Así, podemos decir que el cálculo de la energía disipada y en concreto del RDEC Acumulado, se aproxima mejor que el módulo de rigidez en la cuantificación del daño a fisuración producido en la probeta. En base a ello podemos decir que el empleo del parámetro de daño medio (calculado a partir del RDEC Acumulado), es una buena referencia para caracterizar el comportamiento a fisuración por fatiga de la mezcla (más precisa que el módulo de rigidez, utilizado de forma tradicional en muchos ensayos de fatiga).

Además, podemos destacar que la regresión en términos de energía disipada (RDEC Acumulado y Energía Disipada Acumulada), es linealmente inversa con respecto al incremento de daño por macro-fisuración (rectas con pendiente negativa), lo que indica que a mayores crecimientos de grieta menores serán los valores medidos para estos parámetros, lo cual no tendría sentido a menos que en los parámetros calculados no estuviera presente el daño a deformaciones plásticas sin fisuración. Así, el cálculo del RDEC

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

no permite obtener únicamente la energía asociada al daño por fisuración, sino que también tiene asociado la energía debido a las deformaciones plásticas sufridas en el material. Además, en base a ello se puede intuir que la energía necesaria para provocar el daño a deformaciones plásticas y/o micro-fisuraciones imperceptibles al ojo humano es mayor que la necesaria para provocar el daño a fisuración. De verificarse esta condición, se podría mejorar el diseño a fisuración de los materiales bituminosos, mejorando su resistencia a deformaciones plásticas y micro-fisuración.

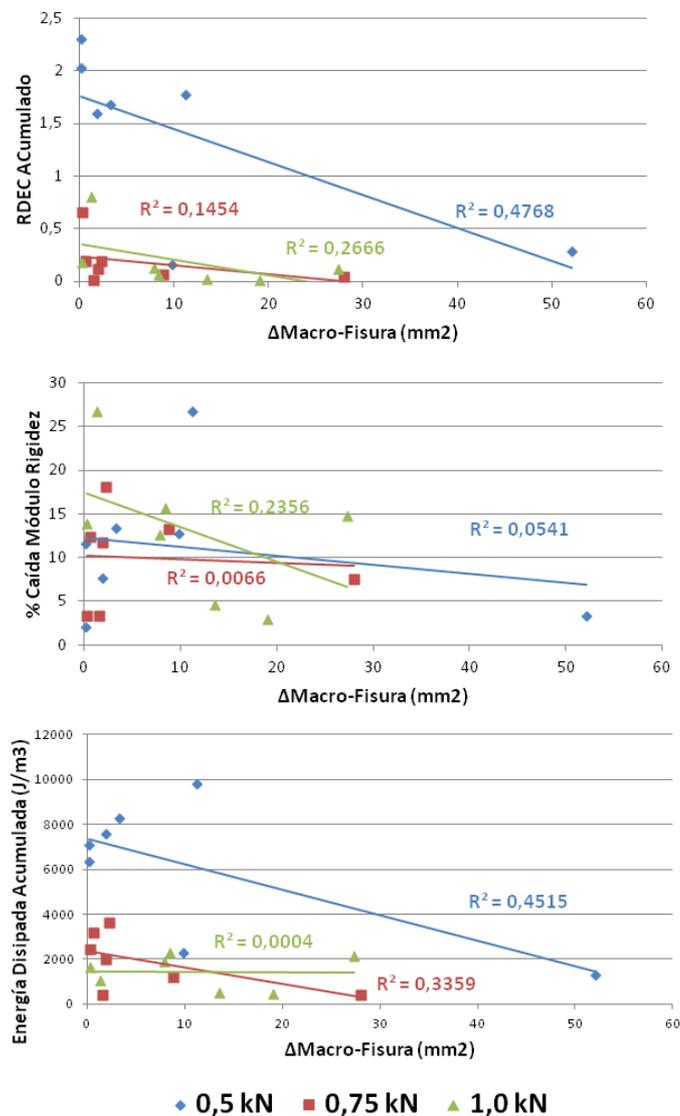


Figura 203. Regresión lineal entre el daño a macro fisuración el módulo de rigidez y la energía disipada, para la mezcla BBTM 11A BM3c ensayada a 0,5 kN, 0,75 kN y 1,0 kN de amplitud de carga.

BBTM 11A B50/70

De la misma forma que en el caso anterior, a continuación se recoge el estudio de los parámetros Displacement Ratio y Parámetro de Daño medio en la mezcla BBTM 11A B50/70. Las Figuras 204, 205 y 206 recogen las imágenes con la evolución del daño a fisuración sufrida por la mezcla ante varios niveles de carga.

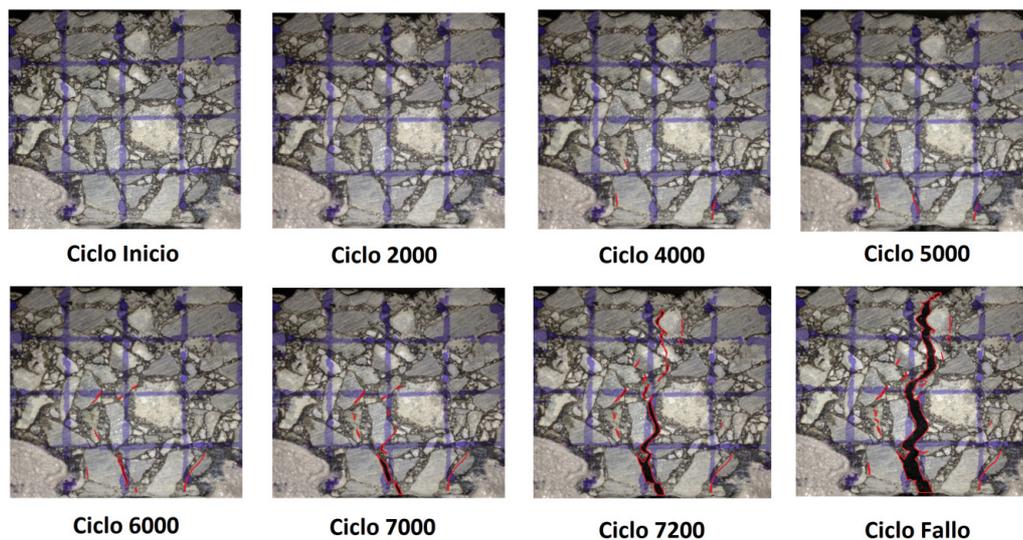


Figura 204. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70 ensayada a 0,5 kN.

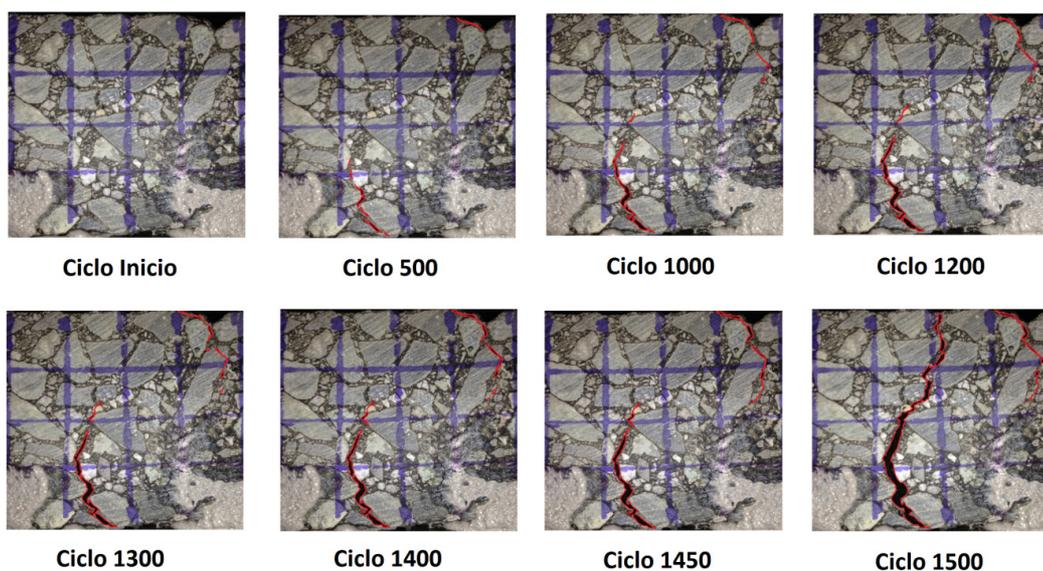


Figura 205. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70 ensayada a 0,75 kN.

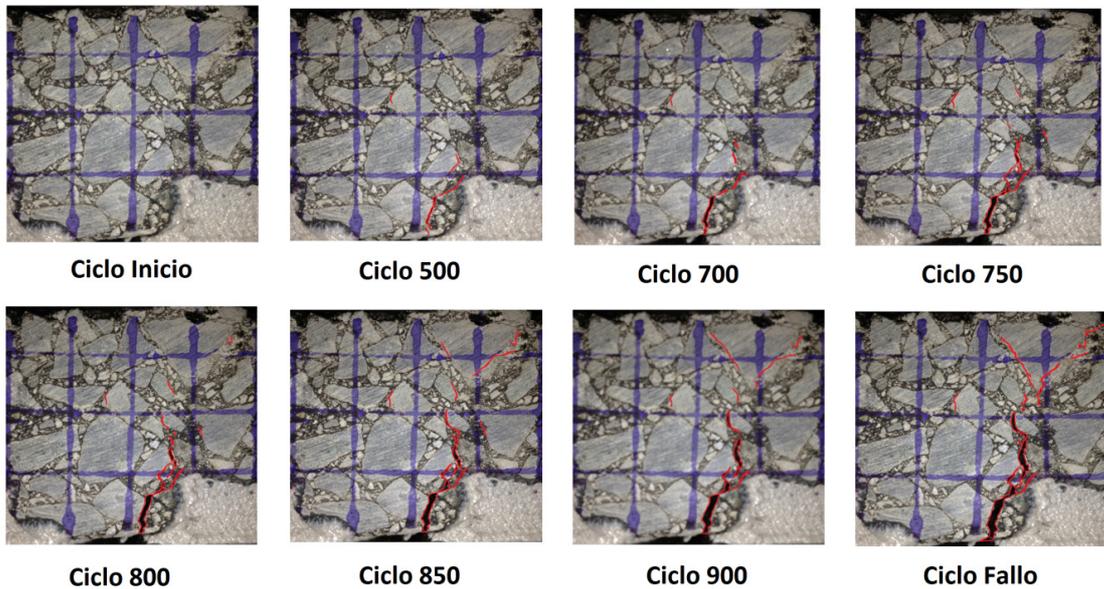


Figura 206. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70 ensayada a 1,0 kN.

A continuación se aportan los datos de Energy y Displacement Ratio calculados para la mezcla BBTM 11A B50/70 (Figuras 207 y 208). Como se puede observar, de nuevo no es posible definir los ciclos N_i y N_M a partir del Energy Ratio, mientras que en el caso del Displacement Ratio si (las curvas vuelven a tener una tendencia bien definida). Además, mientras que el Energy Ratio no muestra una correspondencia marcada con la evolución del daño a fisuración obtenido a través de las imágenes, cada una de las etapas del parámetro Displacement Ratio si se corresponden con el estado de degradación del material mostrado.

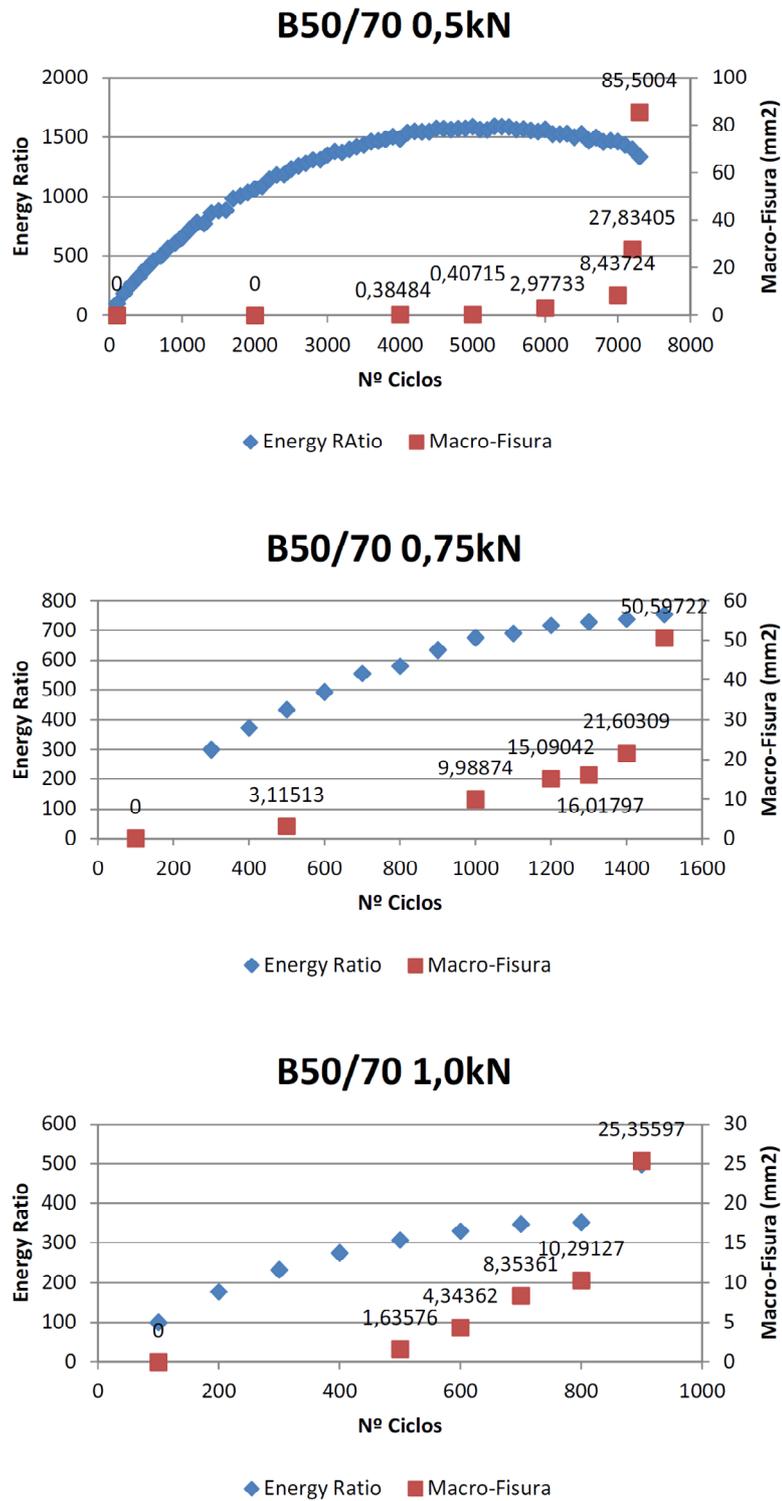


Figura 207. Comparativa Energy Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A B50/70.

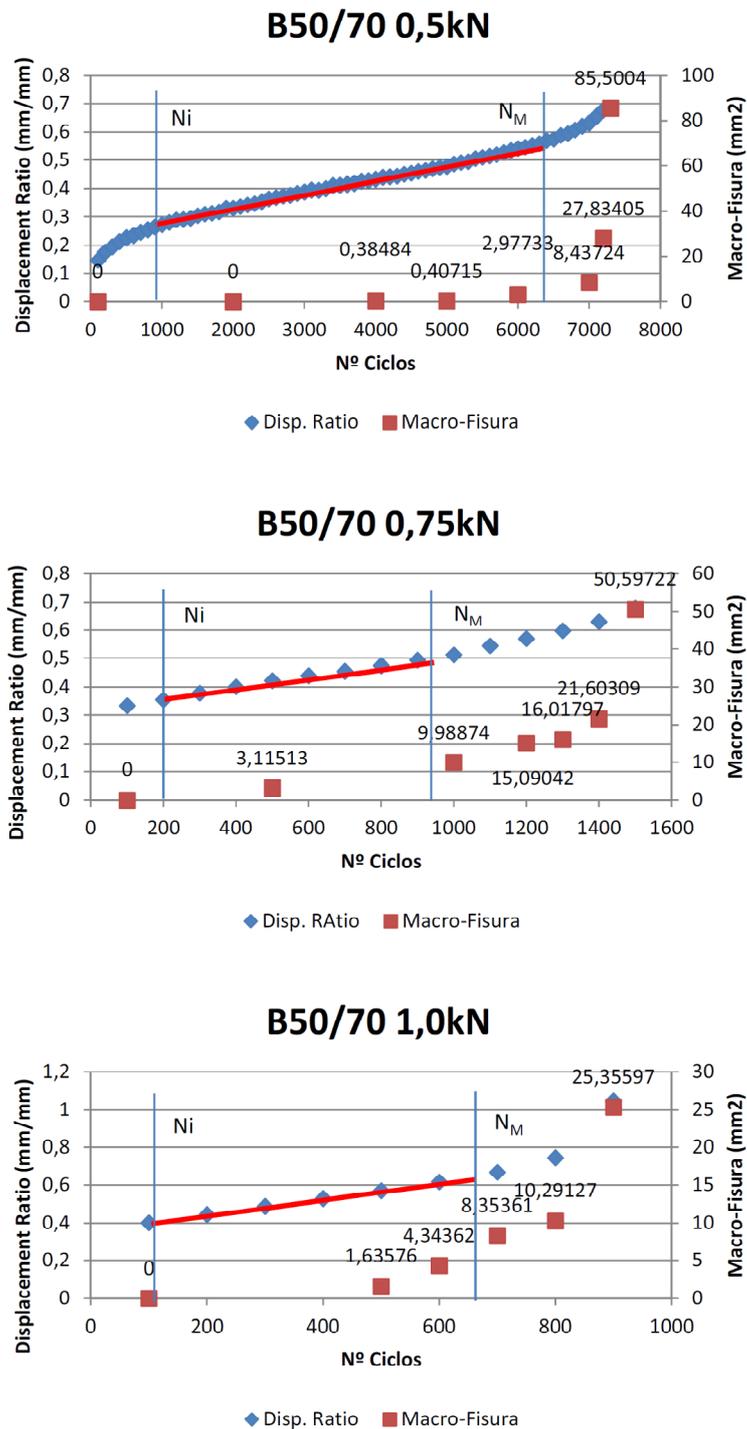


Figura 208. Comparativa Displacement Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A B50/70.

Con respecto a la relación entre los parámetros de daño calculados (RDEC, módulo de rigidez y energía disipada acumulada) y el daño a macro fisuración obtenido mediante el área de fractura, podemos decir que de nuevo, la correlación lineal entre el daño medido y el daño observado en las imágenes no es buena (Figura 209). Este hecho refuerza la teoría planteada durante el estado del arte, en la que se descarta como forma de evaluación del comportamiento del material el seguimiento de la grieta en una de las caras de la probeta.

Tal y como ocurriera en el caso de la mezcla fabricada con BM3c, la aproximación del daño producido en el material mediante el cálculo de su energía disipada tiene una mayor correlación con el estado de daño observado en el mismo a través de las imágenes (a pesar de que por regla general, ambas son bastante bajas). En este sentido también vuelve a ocurrir que la correlación lineal entre la energía disipada y el daño a macro-fisuración medido visualmente es negativa, lo que refuerza la teoría de que el material consume más energía durante la fase inicial de deformaciones plásticas y micro fisuración, que una vez iniciada la superficie de fallo dominante a fractura.

Esto puede ocurrir debido a que el material conforme se desarrolla la macro-fisura se vuelve más débil, y por tanto un incremento de ésta tiene asociada una menor cantidad de energía disipada (puesto que al oponer menos resistencia, se necesita una menor cantidad de energía para dañarlo). Así, para un diseño eficiente de mezclas bituminosas será interesante hacer hincapié en retardar al máximo posible la fase de inicio de macro-fisura.

A pesar de que en ocasiones las aproximaciones de daño obtenidas mediante el estudio de la energía disipada acumulada son mejores que las obtenidas mediante el RDEC acumulado, ambas se presentan mejor que el estudio de la evolución de la rigidez del material. Por tanto la elección de una u otra para la determinación del parámetro característico de daño medio sufrido por el material serviría.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

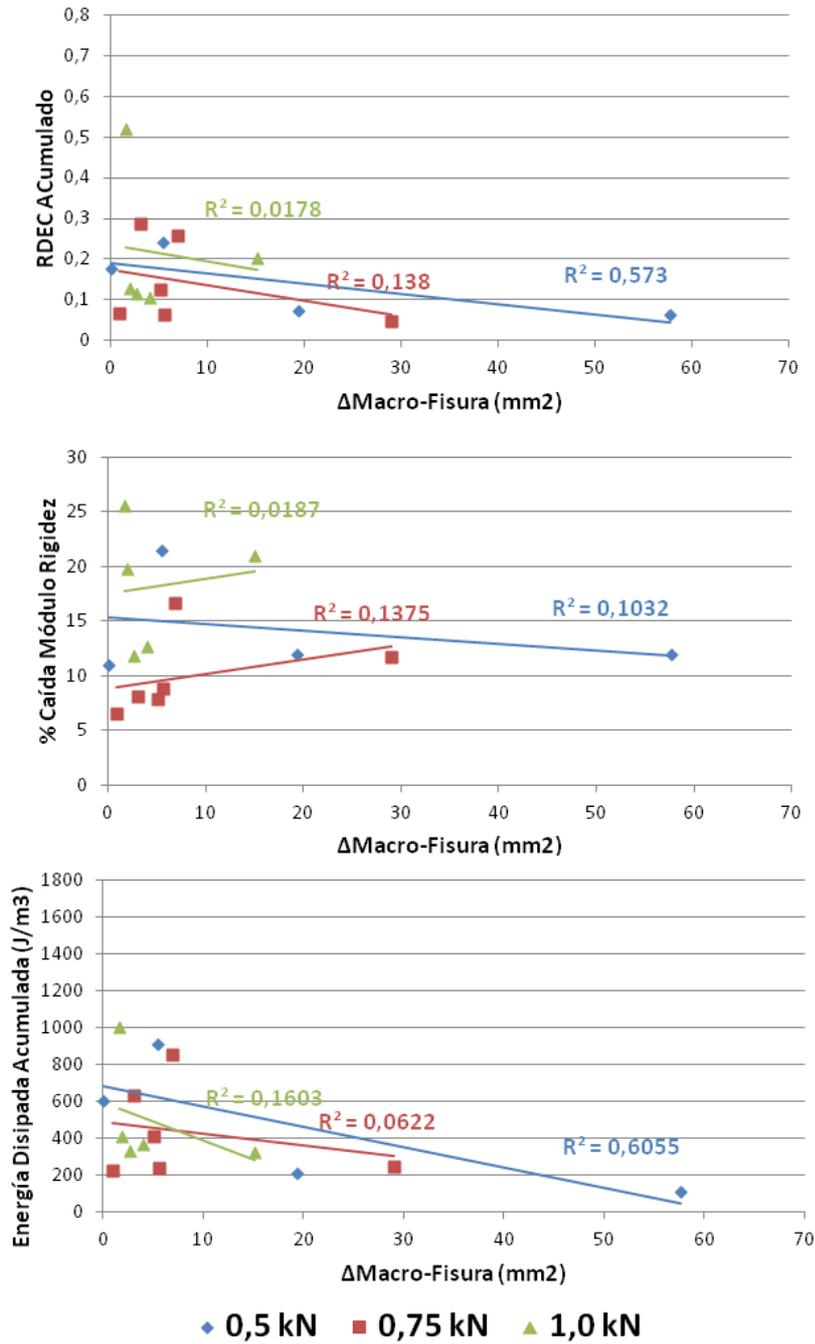


Figura 209. Regresión lineal entre el daño a macro fisuración, el módulo de rigidez y la energía disipada, para la mezcla BBTM 11A B50/70 ensayada a 0,5 kN, 0,75 kN y 1,0 kN de amplitud de carga.

BBTM 11A BMAVC

Las Figuras 210, 211 y 212 muestran la evolución del daño a fisuración por fatiga sufrido por la mezcla BBTM 11A BMAVC bajo diferentes niveles de carga (0,5 kN; 0,75 kN; 1,0 kN). De la misma forma que en el caso del betún modificado con polímeros, el daño a fisuración aparecido se encuentra bastante ramificado en torno a la superficie de fallo dominante.

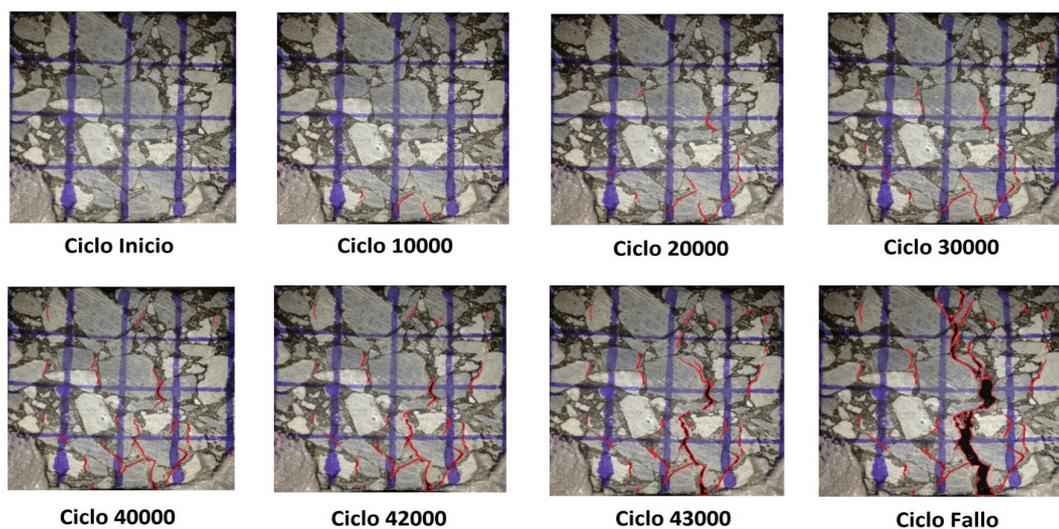


Figura 210. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BMAVC ensayada a 0,5 kN.

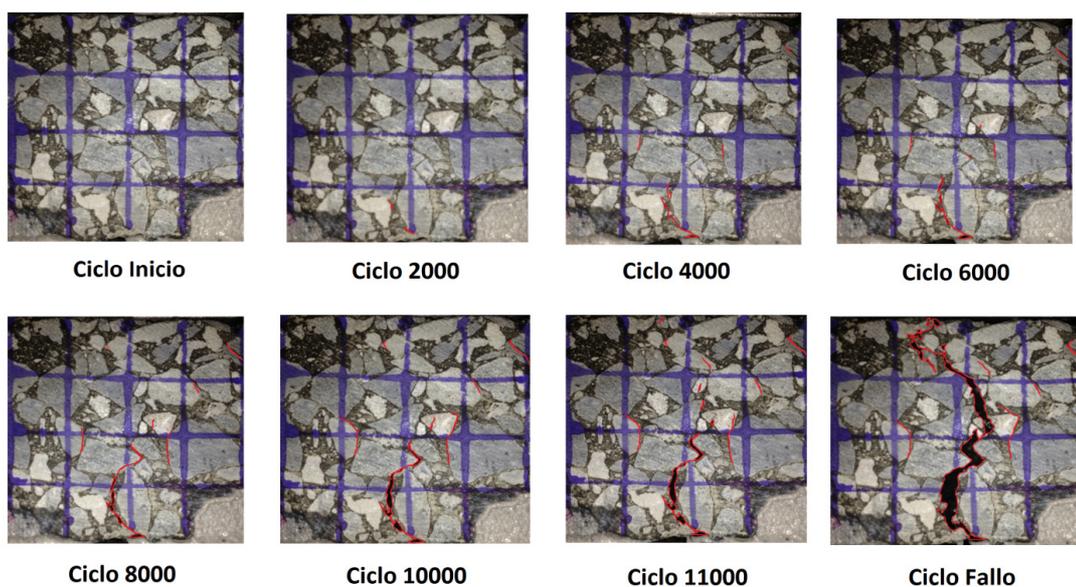


Figura 211. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BMAVC ensayada a 0,75 kN.

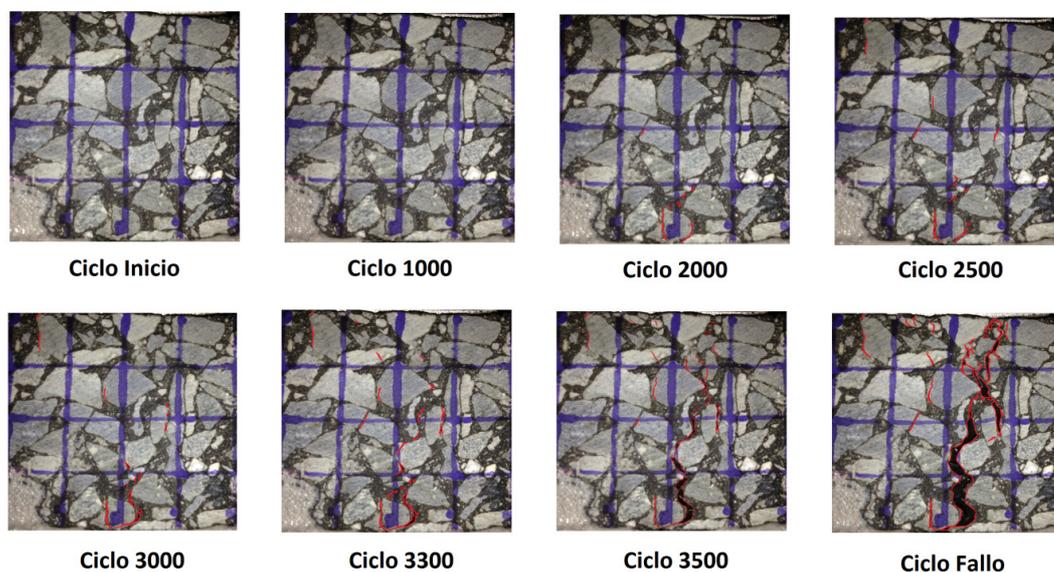


Figura 212. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A BMAVC ensayada a 1,0 kN.

Las Figuras 213 y 214 muestran los valores de Energy y Displacement Ratio calculados durante los ensayos. Al igual que en los dos casos de estudio anteriores, tampoco es posible estimar los ciclos de inicio de micro-fisuración y macro-fisuración a través del parámetro Energy Ratio. La tendencia marcada por la curva de este parámetro es creciente constantemente, sin presentar un acusado cambio de pendiente ni un punto de inflexión. El parámetro Displacement Ratio vuelve a mostrar la tendencia esperada en la que se pueden diferenciar las tres del proceso de fisuración: una etapa inicial de deformaciones plásticas, una segunda etapa en la que se desarrollan las micro y meso fisuras, y una tercera en la que se desarrolla una superficie de fallo dominante en forma de macro-fisura.

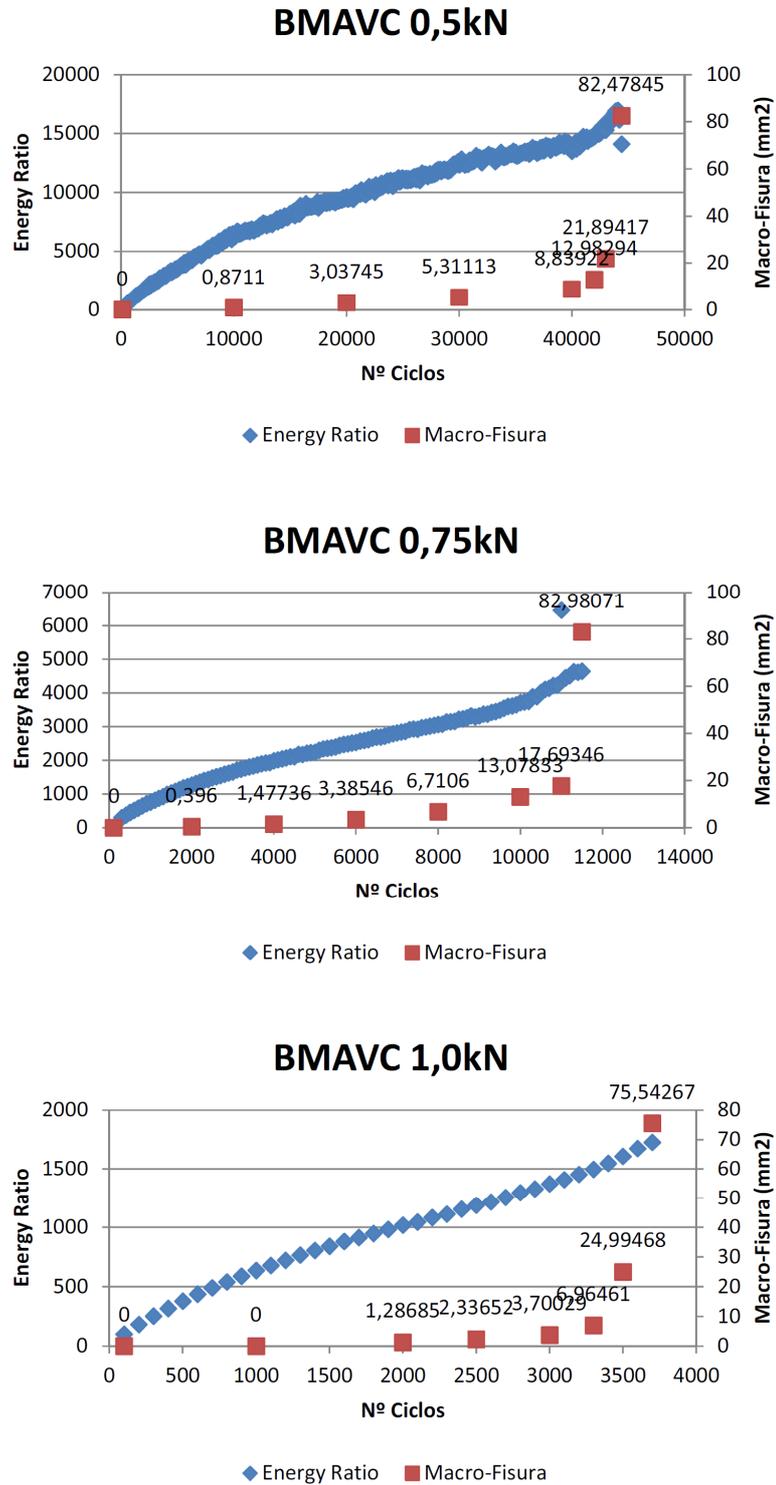


Figura 213. Comparativa EnergyRatio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A BMAVC.

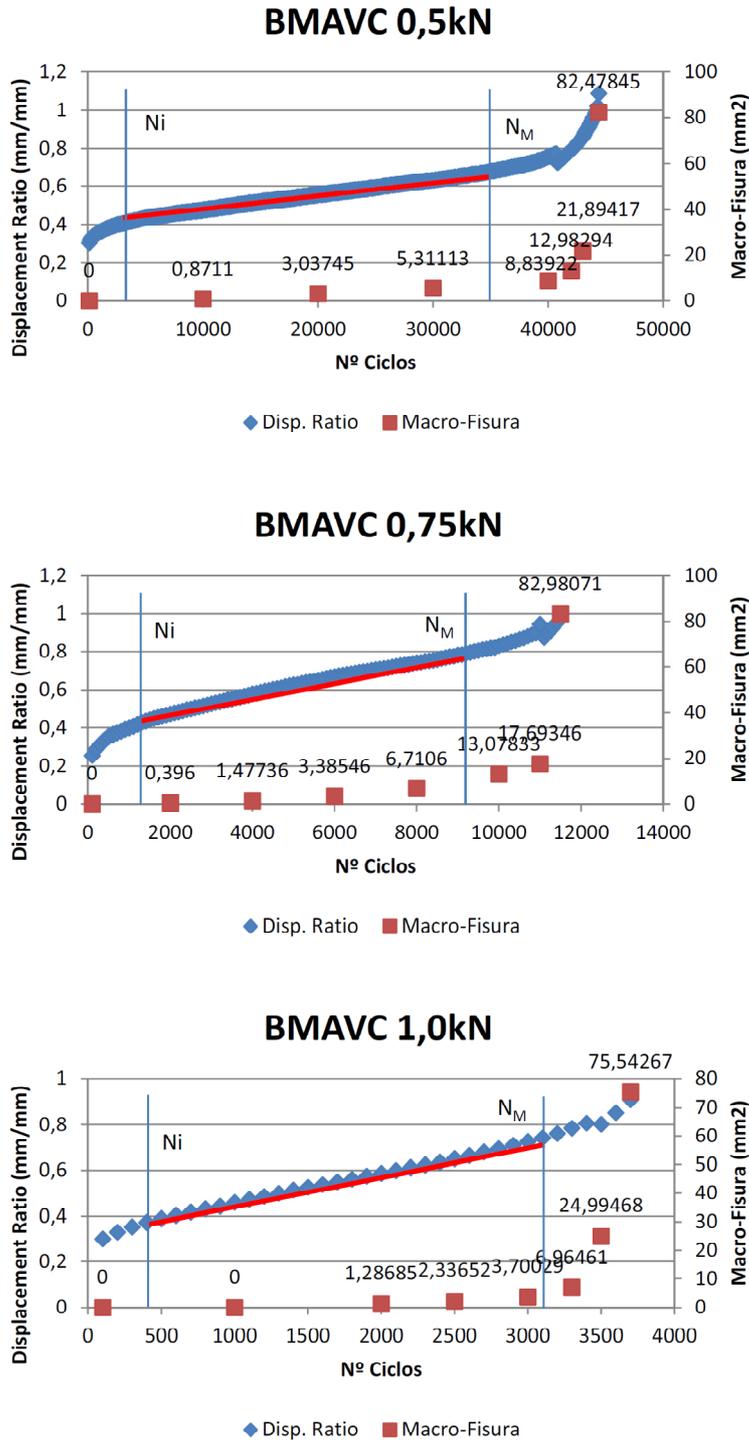


Figura 214. Comparativa Displacement Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A BMAVC.

En la Figura 215 aparecen las gráficas de regresión obtenidas para cada uno de los parámetros calculados durante el ensayo con respecto al daño observado. De la misma forma que en los casos anteriores, la cantidad de incremento de área de fractura en la cara de la probeta no tiene una correspondencia directa con la caída del módulo de rigidez o la energía disipada (puesto que con la inspección visual únicamente estamos valorando el daño producido en una cara del material, y con el estudio del módulo de rigidez o la energía disipada, analizamos el daño del volumen completo de material estudiado). Así, la evaluación del comportamiento a fisuración de un material a través de su análisis visual en una única cara no permite hacer una buena estimación del daño real producido en el material.

En base a los resultados obtenidos en los diferentes ensayos llevados a cabo, la aproximación de dicho daño mediante el estudio de la energía disipada se muestra como el análisis más preciso. En el caso de la mezcla BBTM 11A BMAVC de nuevo la correspondencia del RDEC acumulado y la energía disipada acumulada muestran una mayor correlación con el daño observado que la caída del módulo de rigidez. Por todo ello, la definición a partir del RDEC del parámetro de daño medio como valor de diseño a fisuración de estos materiales parece acertada.

Una vez más la pendiente negativa de las rectas de regresión de daño obtenidas en términos de energía disipada muestran que la energía necesaria para dañar la mezcla es mayor durante la fase de deformaciones plásticas y micro-fisuración.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

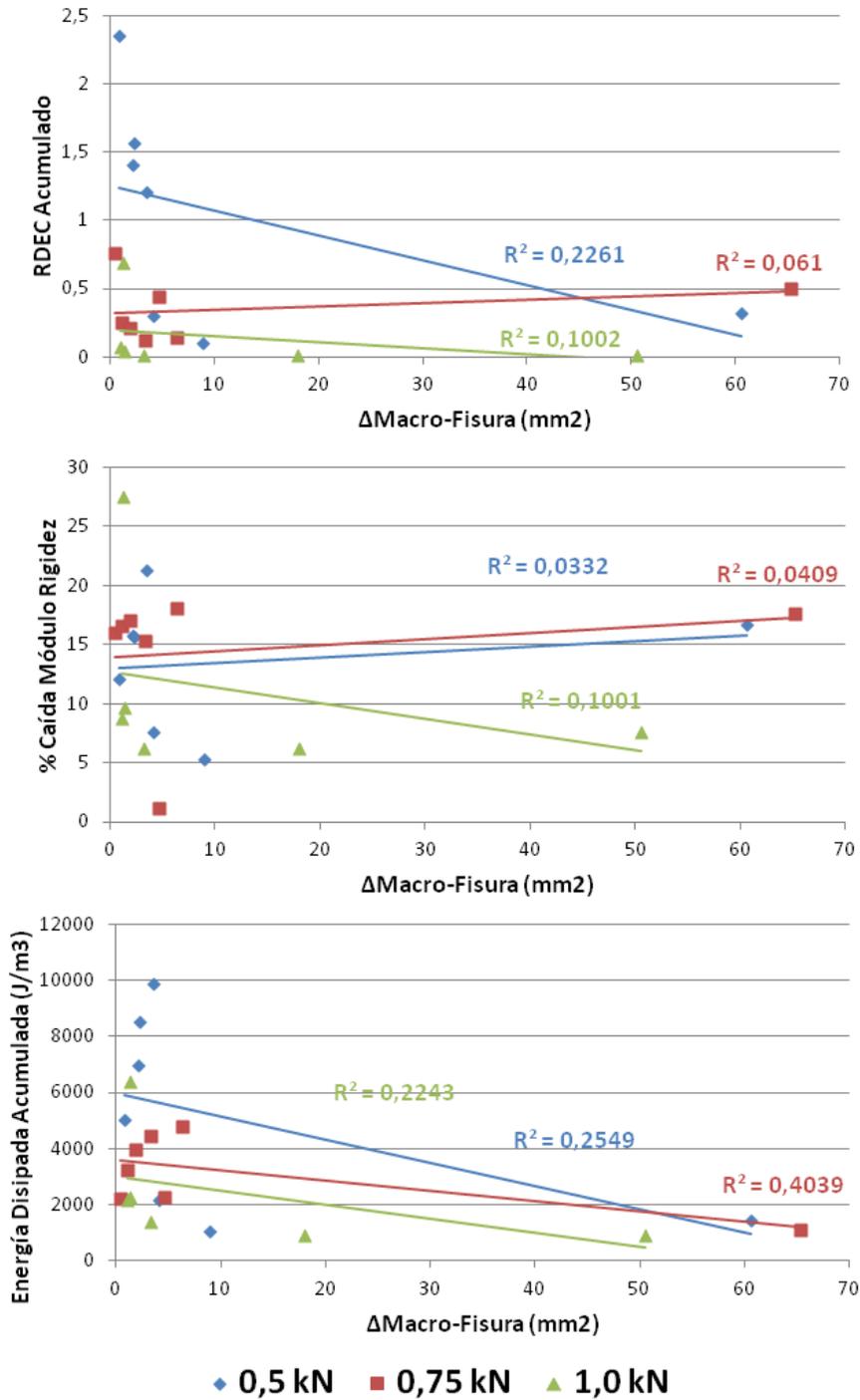


Figura 215. Regresión lineal entre el daño a macro fisuración, el módulo de rigidez y la energía disipada, para la mezcla BBTM 11A BMAVC ensayada a 0,5 kN, 0,75 kN y 1,0 kN de amplitud de carga.

BBTM 11A B50/70 + 1,5% PNFU

Como última etapa en el estudio y análisis de los parámetros del ensayo se presentan los resultados obtenidos en la evaluación del comportamiento a fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70 + 1,5% PNFU. Las Figuras 216, 217 y 218 muestran la degradación sufrida por este material ante diferentes amplitudes de carga. A diferencia de las mezclas en las que se utilizó betunes modificados por vía húmeda, la propagación de fallo aparece mucho más unificada sin presentar apenas ramificaciones.

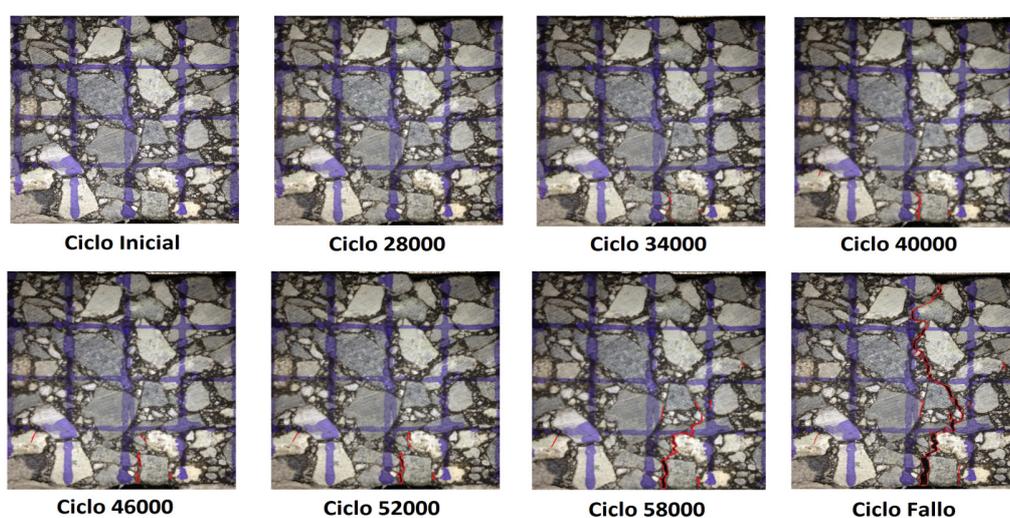


Figura 216. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5% PNFU ensayada a 0,5 kN.

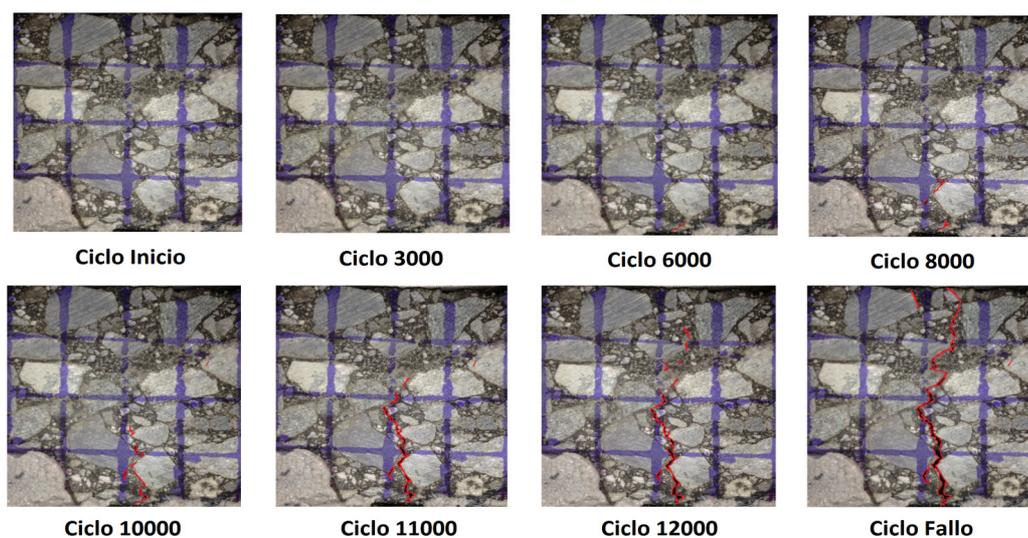


Figura 217. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5% PNFU ensayada a 0,75 kN.

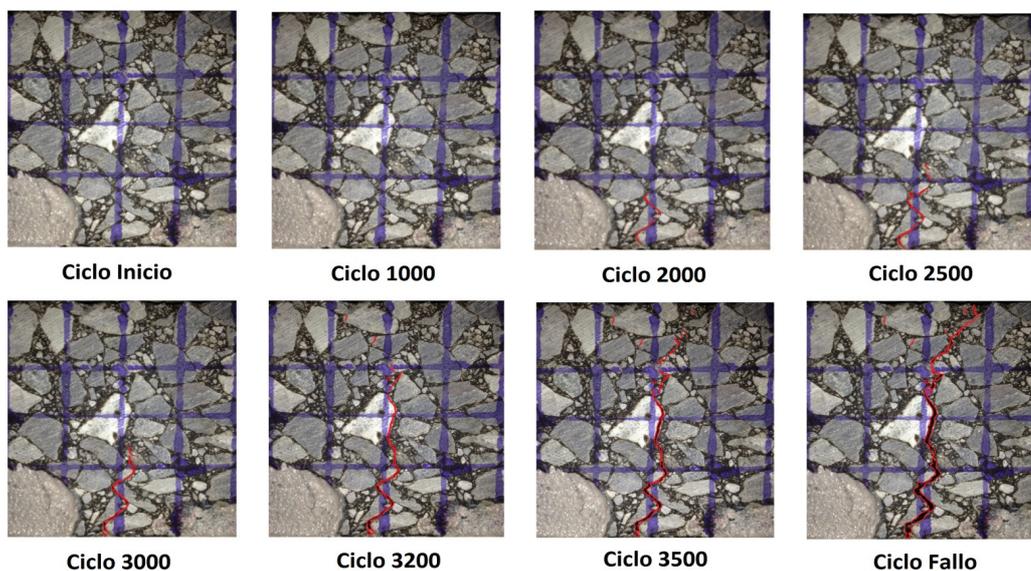


Figura 218. Evolución del daño a macro-fisuración de la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5% PNFU ensayada a 1,0 kN.

Analizando los valores de Energy Ratio obtenidos en los ensayos llevados a cabo con esta mezcla podemos observar que para dos de los tres niveles de carga si es posible estimar los ciclos N_i y N_M (Figura 219). Por otra parte, su coincidencia con lo observado visualmente a través de las imágenes puede considerarse aceptable y coincidente con la obtenida a partir del Displacement Ratio (Figura 220). Dada esta coincidencia, podría considerarse que ambos parámetros estiman de manera bastante aproximada los límites de cada una de las etapas del proceso de fisuración por fatiga. A pesar de ello, como hemos venido demostrando en los ensayos expuestos en este apartado, el parámetro Energy Ratio es mucho más inestable, y no siempre su curva presenta la tendencia definida que permite establecer los ciclos de inicio de micro y macro-fisuración.

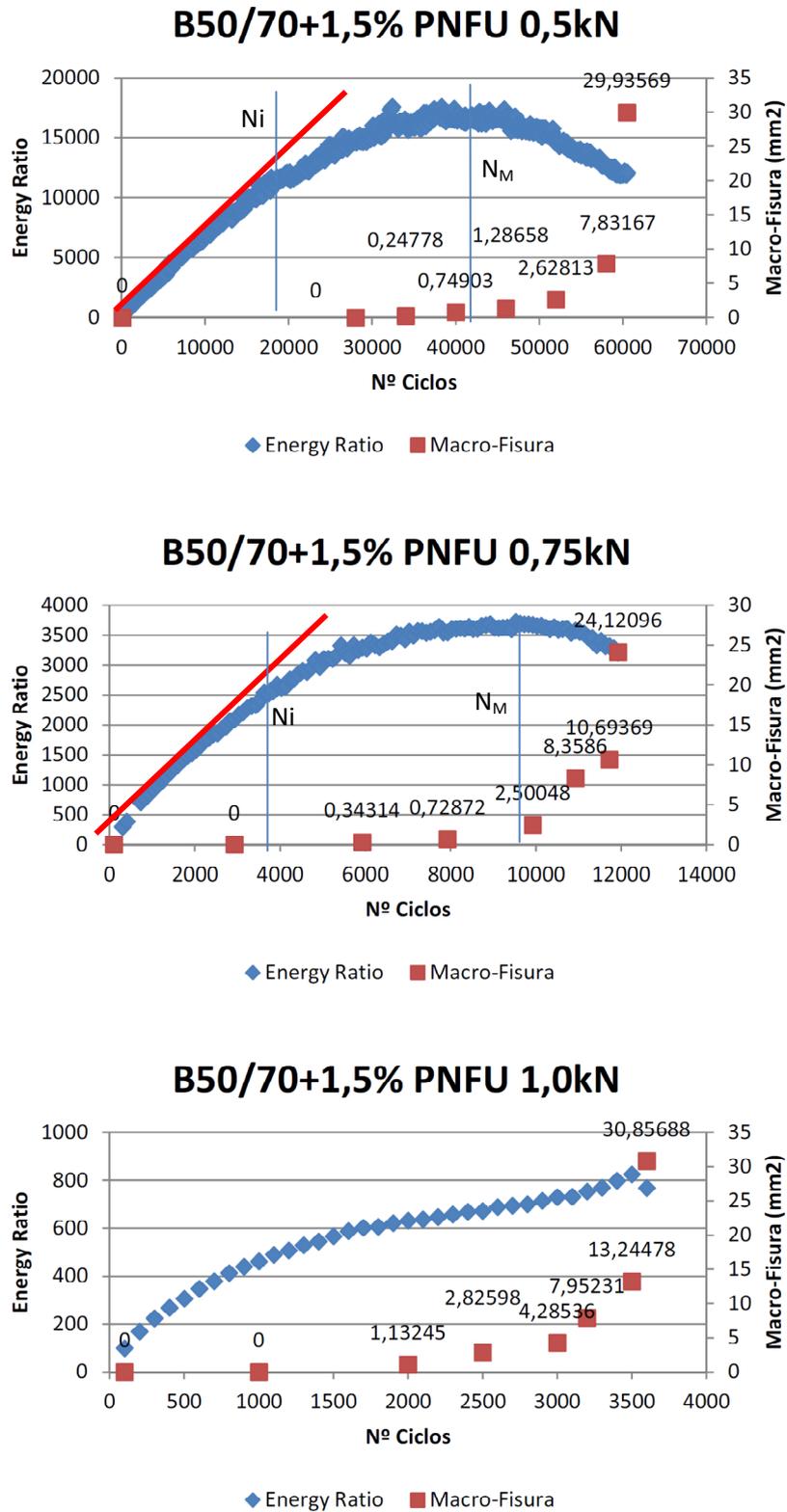
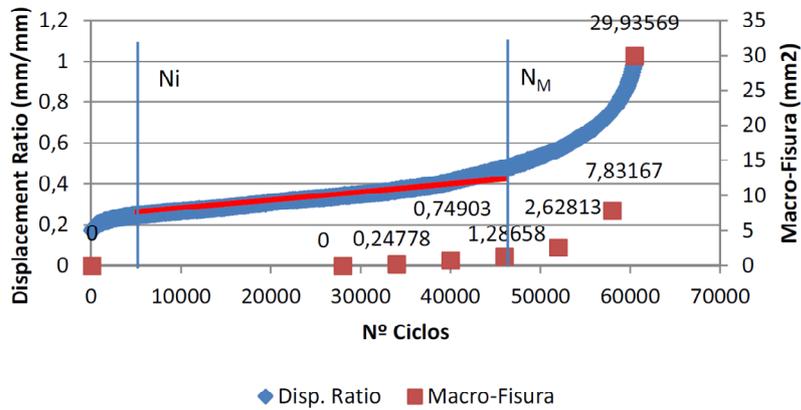
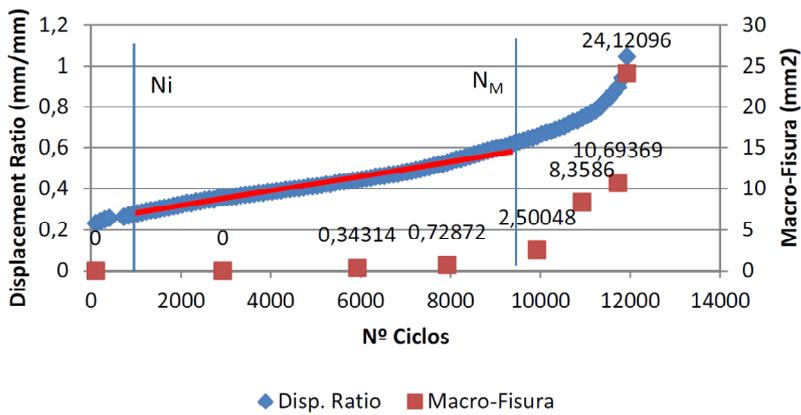


Figura 219. Comparativa Energy Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5% PNFU.

B50/70+1,5% PNFU 0,5kN



B50/70+1,5% PNFU 0,75kN



B50/70+1,5% PNFU 1,0kN

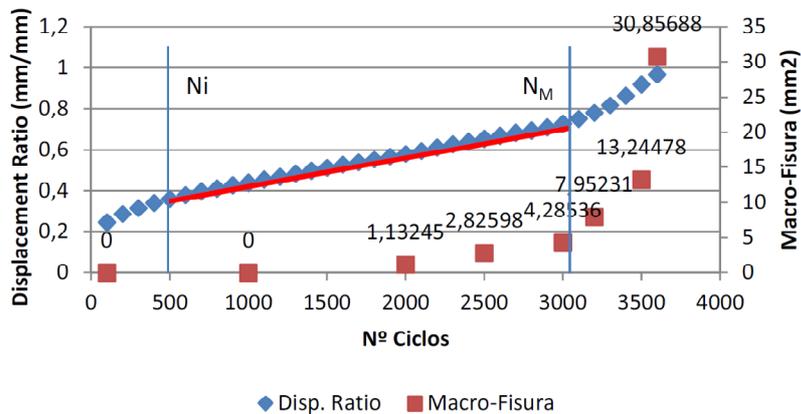


Figura 220. Comparativa Displacement Ratio vs. evolución macro-fisura en la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5% PNFU.

Analizando los resultados obtenidos en la Figura 221, podemos observar que en este caso la relación del daño a fisuración medido mediante las imágenes y el módulo de rigidez aumenta. En esta ocasión algunos de los valores de correlación obtenidos son superiores a los obtenidos en términos de energía disipada. Este hecho se puede achacar al tipo de rotura provocado en el material, menos ramificada y más “limpia”, lo cual evidentemente proporcionará una relación más directa entre su rigidez y el crecimiento del área de fractura. No obstante el análisis de la energía disipada sigue aproximándose mejor al daño de macro-fisuración obtenido a través de las imágenes.

Dejando aparte este aspecto, podemos decir que la tendencia mostrada en las gráficas es la misma que en los ensayos anteriores, con una baja correlación lineal entre el daño medido y el daño observado, y con una regresión lineal negativa en el caso de los parámetros de energía disipada. En este sentido, los estudios llevados a cabo mediante el análisis de las imágenes permiten observar que las mayores tasas de disipación de energía se llevan a cabo durante las fases de deformaciones plásticas y micro-fisuras. Una vez iniciada la macro-fisura, el material opone una menor resistencia ante esta patología produciendo su fallo en un corto periodo de tiempo. Este hecho apunta que el diseño de los materiales bituminosos ante la aparición de fisuras es más efectivo retardando lo máximo posible la etapa de deformaciones plásticas, o lo que es lo mismo diseñando materiales más elásticos. Durante los ensayos realizados, se ha comprobado que un incremento de la rigidez del material resulta positivo, aunque hay que tener en cuenta que una vez iniciada la macro-fisura el material se comporta de manera más frágil produciéndose una degradación más rápida.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

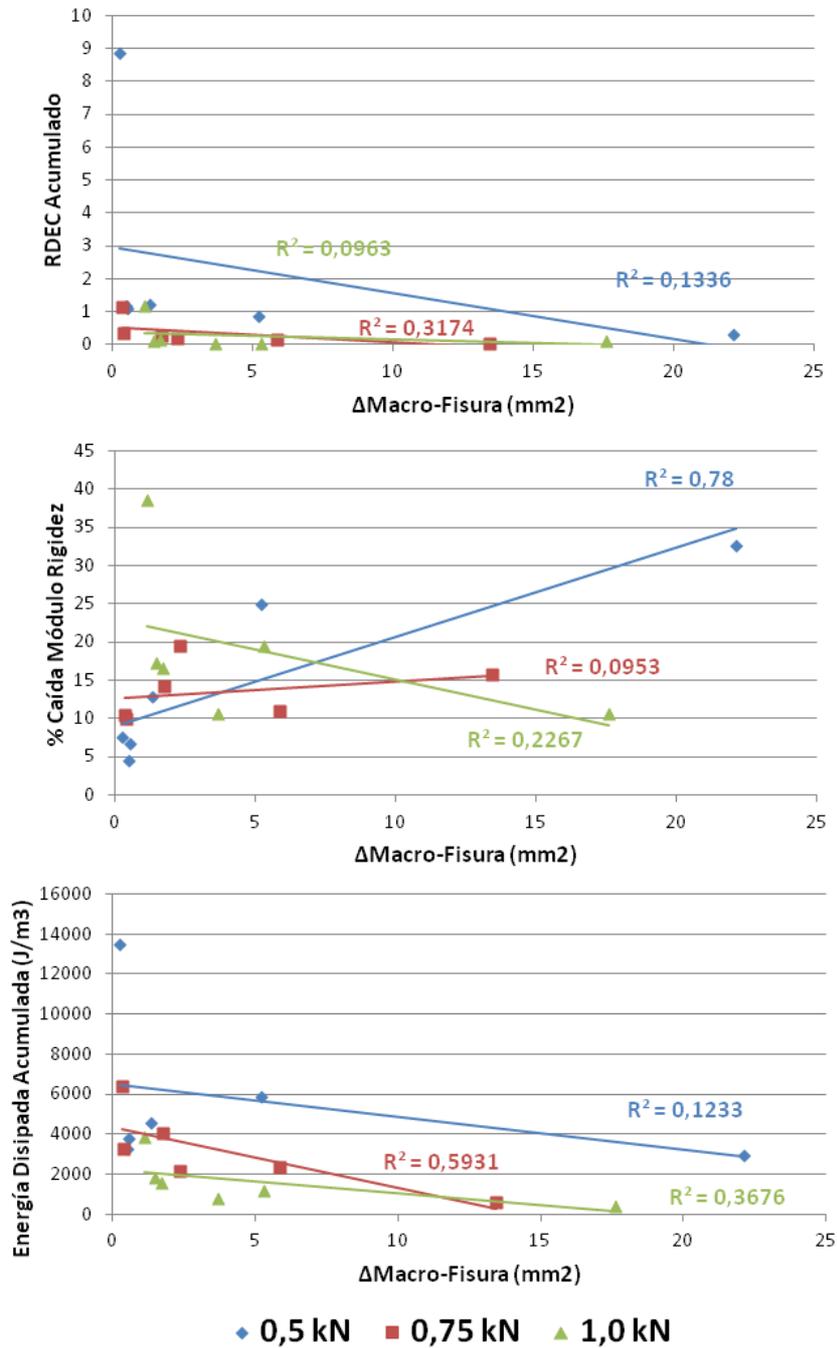


Figura 221. Regresión lineal entre el daño a macro fisuración, el módulo de rigidez y la energía disipada, para la mezcla BBTM 11A B50/70+1,5%PNFU ensayada a 0,5 kN, 0,75 kN y 1,0 kN de amplitud de carga.

5.4.3. Análisis de la Sensibilidad a las Condiciones de Ensayo

Durante este apartado se presentarán los resultados obtenidos durante la evaluación de la sensibilidad del método UGR-FACT frente a las condiciones de ensayo aplicadas. Dada las características del método de ensayo desarrollado, las principales condiciones de ensayo son la amplitud de carga, la frecuencia, la temperatura y la distancia entre apoyos. Así, en los que sigue se llevará a cabo un análisis del comportamiento mecánico de mezclas bituminosas en base a estas características, determinando su influencia en la respuesta a fisuración del material.

Debido al hecho que las cargas aplicadas por el tráfico son el aspecto fundamental para el que se diseñan las mezclas bituminosas, y que analizar la respuesta a fisuración por fatiga de una mezcla bajo diferentes escalones de carga permite evaluar su comportamiento mecánico de forma sencilla (relacionando la amplitud de las tensiones con el número de repeticiones de cargas que causan su fallo por fisura), la amplitud de carga será una condición de ensayo común en cada uno de los estudios realizados para evaluar la sensibilidad del método UGR-FACT a las variaciones de dichas condiciones.

5.4.3.1. Frecuencia

Uno de los aspectos que ejerce mayor influencia en el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas es la velocidad de aplicación de la carga, que en términos de ensayo se conoce como frecuencia, y que relacionándola con las cargas sufridas por el firme durante su vida de servicio se asocia a la velocidad de circulación de los vehículos.

Para evaluar la influencia que este parámetro ejerce sobre el comportamiento de las mezclas bituminosas y la sensibilidad del método de ensayo UGR-FACT al mismo, se estableció un plan de trabajo en el que se analizó el comportamiento de dos mezclas tipo AC (AC 16 S y AC 22 S), ensayándolas bajo las mismas condiciones pero variando la frecuencia entre 1 y 5 Hz (pretendiendo reproducir velocidades rápidas y lentas de circulación de tráfico, tal y como se analizó en el segundo apartado de este capítulo). Así, se

evaluó el comportamiento de ambas mezclas bajo diferentes escalones de amplitud de carga (2 kN; 1,5 kN; 1 kN) a una temperatura de 20 °C y con una distancia inicial entre apoyos de 50 mm.

La Figura 222 muestra los resultados obtenidos tras la ejecución de los diferentes ensayos en términos fenomenológicos de ciclo de fallo (N_f). Como se puede observar en ambas mezclas, un descenso en la velocidad de aplicación de la carga provoca que el fallo del material a fisuración por fatiga se produzca antes. Así, la vida de fisuración por fatiga y el límite de resistencia a fisuración de los materiales evaluados descienden considerablemente al disminuir la frecuencia de ensayo de 5 Hz a 1 Hz. Este hecho muestra la sensibilidad del método UGR-FACT ante esta condición de ensayo, de manera que su empleo podrá tener en cuenta la velocidad de aplicación de la carga a la hora de evaluar el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas.

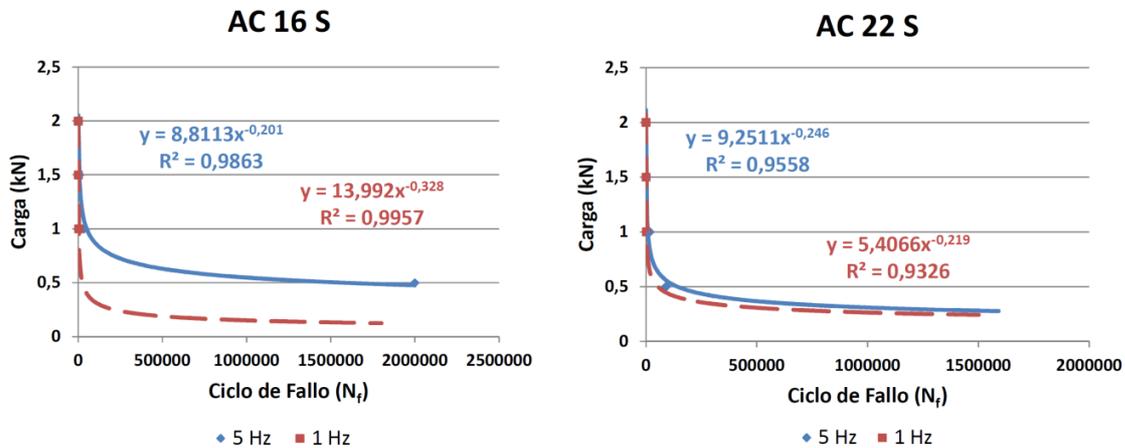


Figura 222. Ley de fisuración por fatiga de las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 1 Hz y 5 Hz.

Por su parte, la energía disipada en cada ciclo dentro del volumen representativo de estudio sigue la misma tendencia en el caso de los ensayos realizados a 5 Hz que en los realizados a 1 Hz (Figura 223). En este sentido, conforme se aumenta el valor de la carga aplicada en el ensayo, y conforme van transcurriendo los ciclos de carga, mayor es la energía disipada en

cada ciclo. Este hecho es debido a que se va produciendo un estado de daño progresivo en el material que va provocando un aumento de la energía disipada, y a que conforme se disminuye el nivel de carga aplicado, la energía total introducida en el sistema es menor (provocando un menor daño y por tanto es menor la que se disipa).

Además, podemos destacar que a menor frecuencia de ensayo mayor es la energía disipada en cada ciclo, debido a la naturaleza visco-elástica de las mezclas bituminosas, que provoca que para un mismo nivel de carga, una aplicación más lenta de la misma tenga como consecuencia mayores deformaciones. Así, una velocidad de circulación lenta de tráfico (frecuencia) acentúa la aparición de fisuras en el firme puesto que agota antes su capacidad de deformar plásticamente, teniendo como consecuencia el desarrollo del proceso de fisuración.

Por su parte, los valores de RDEC acumulado muestran como las mezclas que mayor resistencia ofrecen a fisuración por fatiga acumulan una mayor cantidad de daño (Figura 224), lo que coincide con los resultados obtenidos en el análisis de imagen del apartado anterior en el cual se mostró que las fases en las que disipan una mayor cantidad de energía (daño) son la fase de deformaciones plásticas y de micro fisuración, y que las mezclas en las que dichas fases dura más son las más resistentes.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

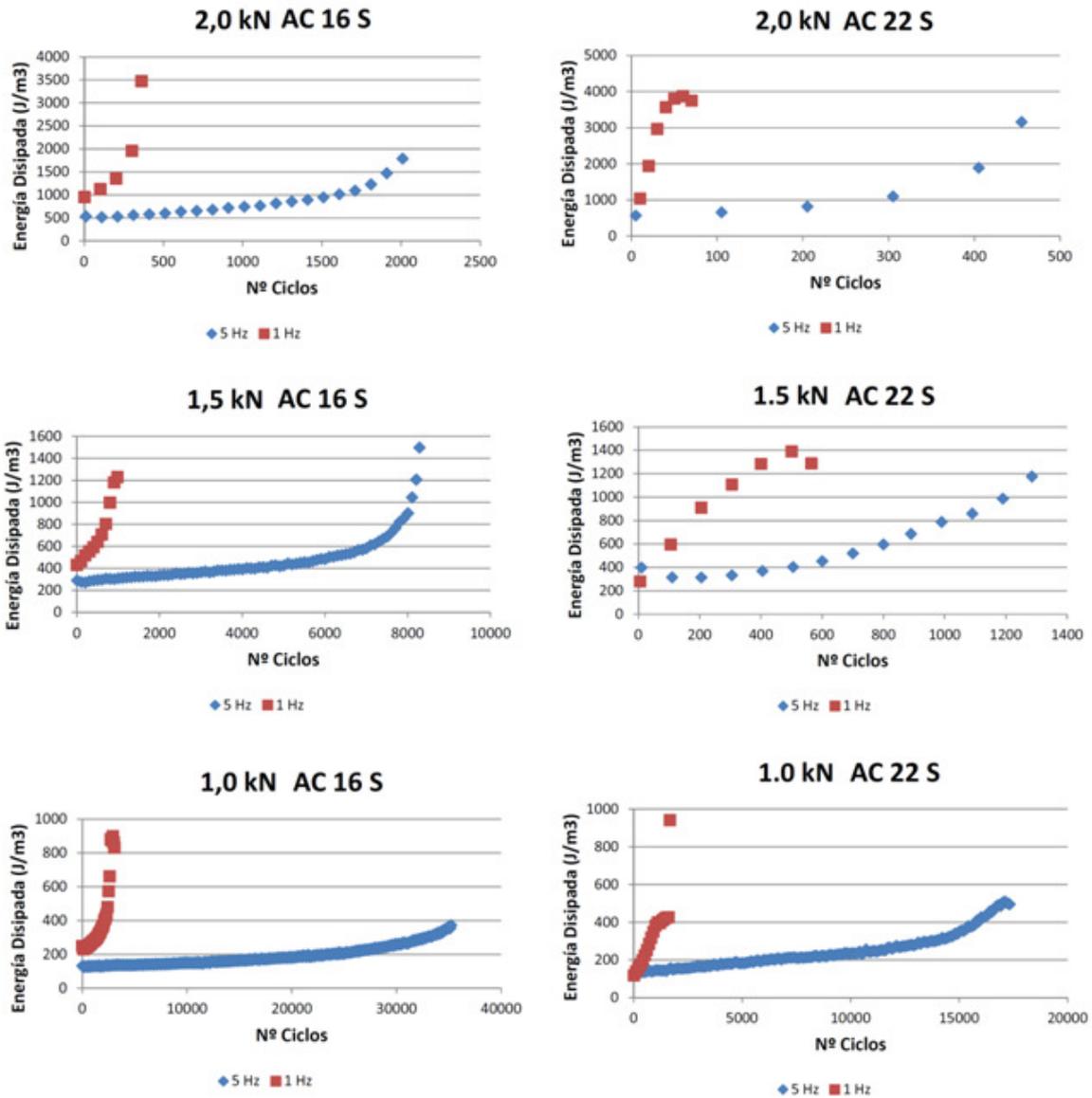


Figura 223. Energía Disipada por las mezclas AC 16 y AS 22 ensayadas a 1 Hz y 5 Hz.

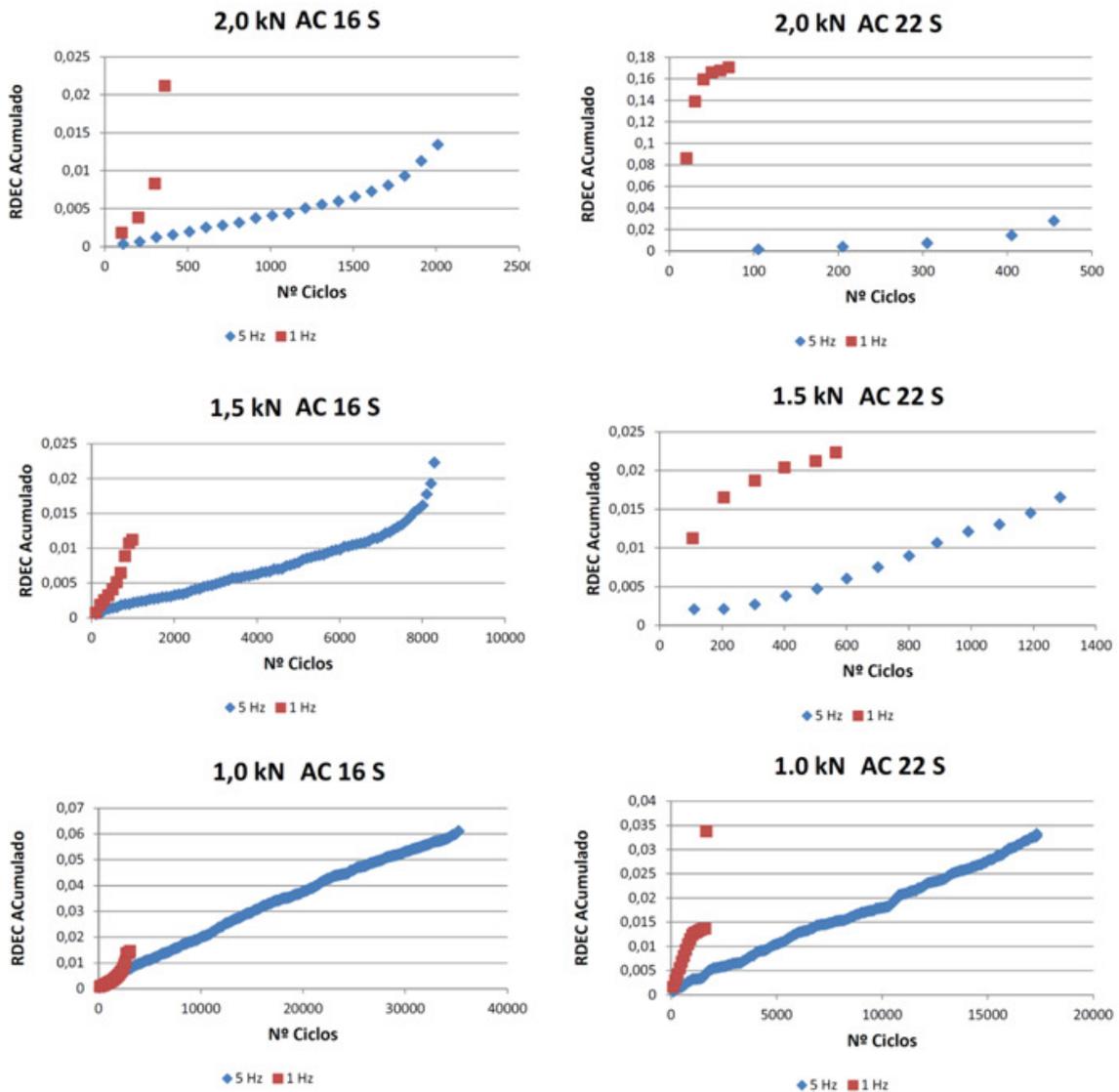


Figura 224. Valores de RDEC acumulado obtenidos por las mezclas AC 16 y AC22 ensayadas a 1 Hz y 5 Hz.

En la Figura 225 aparecen los valores obtenidos en el parámetro de daño medio para cada tipo de mezcla en función de la amplitud de carga utilizada en el ensayo y de la frecuencia. Mediante el estudio de este parámetro de diseño se puede observar claramente el efecto de las bajas frecuencias de ensayo en el deterioro a fisuración del material. Así, para un

mismo nivel de carga, el daño a fisuración sufrido por el material en cada ciclo de aplicación es superior a bajas frecuencias. Destacar también el ajuste del daño sufrido con el incremento de carga a una curva exponencial, lo cual indica que conforme se incrementa el peso de las cargas transmitidas por el tráfico, la resistencia a fisuración de la mezcla descenderá considerablemente.

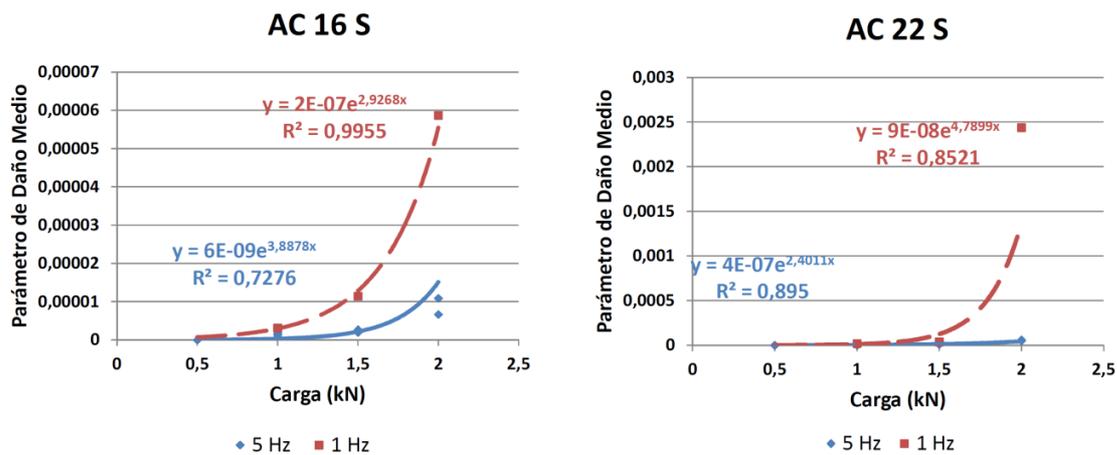


Figura 225. Estudio del parámetro de daño medio para las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 1 Hz y 5 Hz.

Con objeto de profundizar en la influencia de la respuesta a fisuración en función de la frecuencia de ensayo, se llevó a cabo el análisis de los valores de Energy Ratio y Displacement Ratio para la estimación de cada una de las etapas del proceso de daño (Figuras 226 y 227). Ambos parámetros muestran una tendencia similar independientemente de la frecuencia de ensayo utilizada. No obstante, aunque que por regla general los valores de Energy Ratio obtenidos muestran una tendencia normal, en algunos de los ensayos llevados a cabo no resulta apreciable el punto de inflexión que marca el inicio de la macro-fisura en el material (N_M).

En relación a los valores de Displacement Ratio, éstos si guardan la tendencia mostrada habitualmente, de manera que pueden diferenciarse los valores N_i y N_M . Además, debido a la naturaleza visco-elástica de los materiales evaluados, el valor inicial del Displacement Ratio es dependiente de la velocidad de aplicación de la carga (frecuencia), pudiendo

afirmar que velocidades de aplicación de carga más lentas provocan un incremento del Displacement ratio, lo cual se traduce en una disminución de la resistencia a fisuración por fatiga de la mezcla. Esto demuestra la sensibilidad del parámetro definido en esta tesis a los cambios de frecuencia, lo cual supone una ventaja.

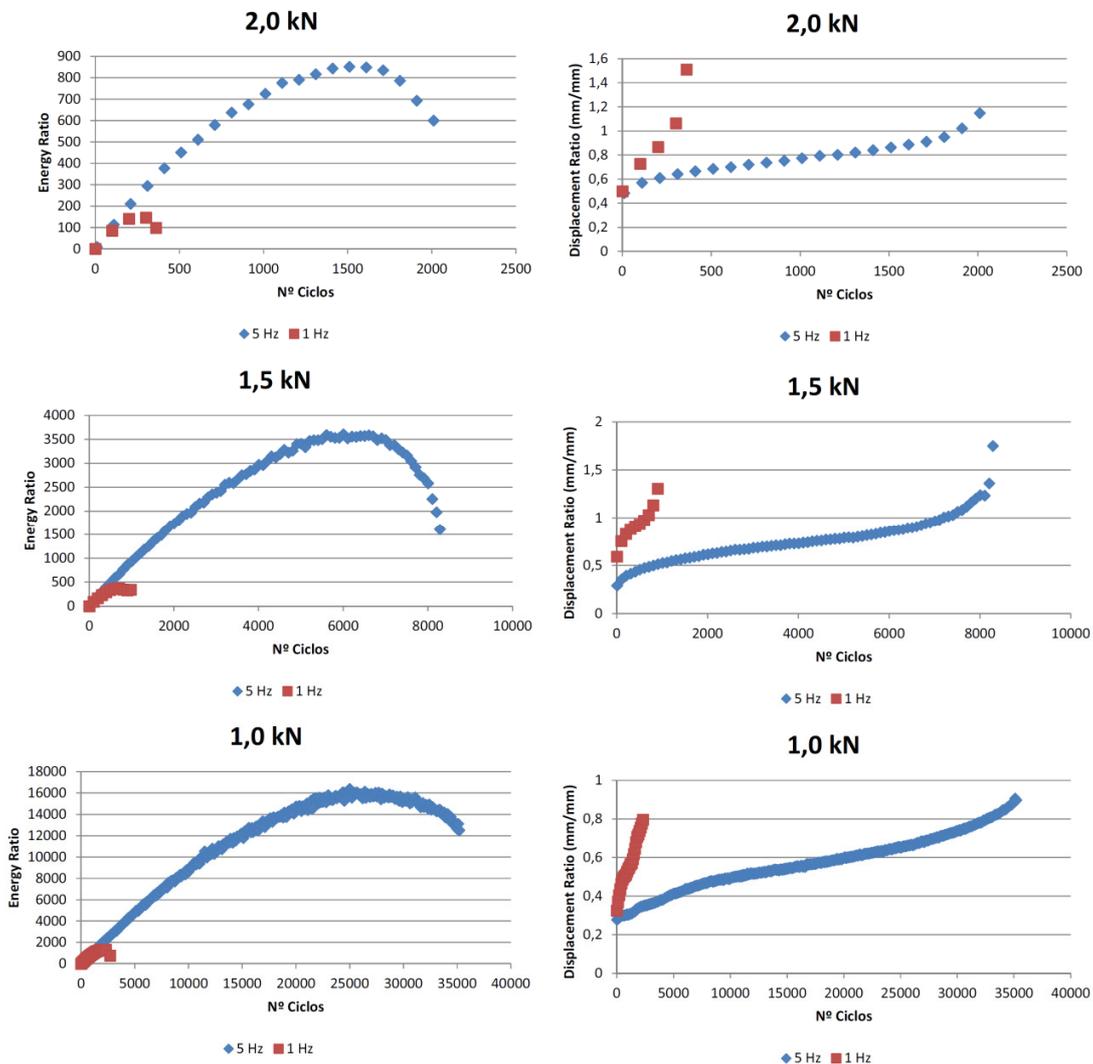


Figura 226. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos en los ensayos llevados a cabo con la mezcla AC 16 S.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

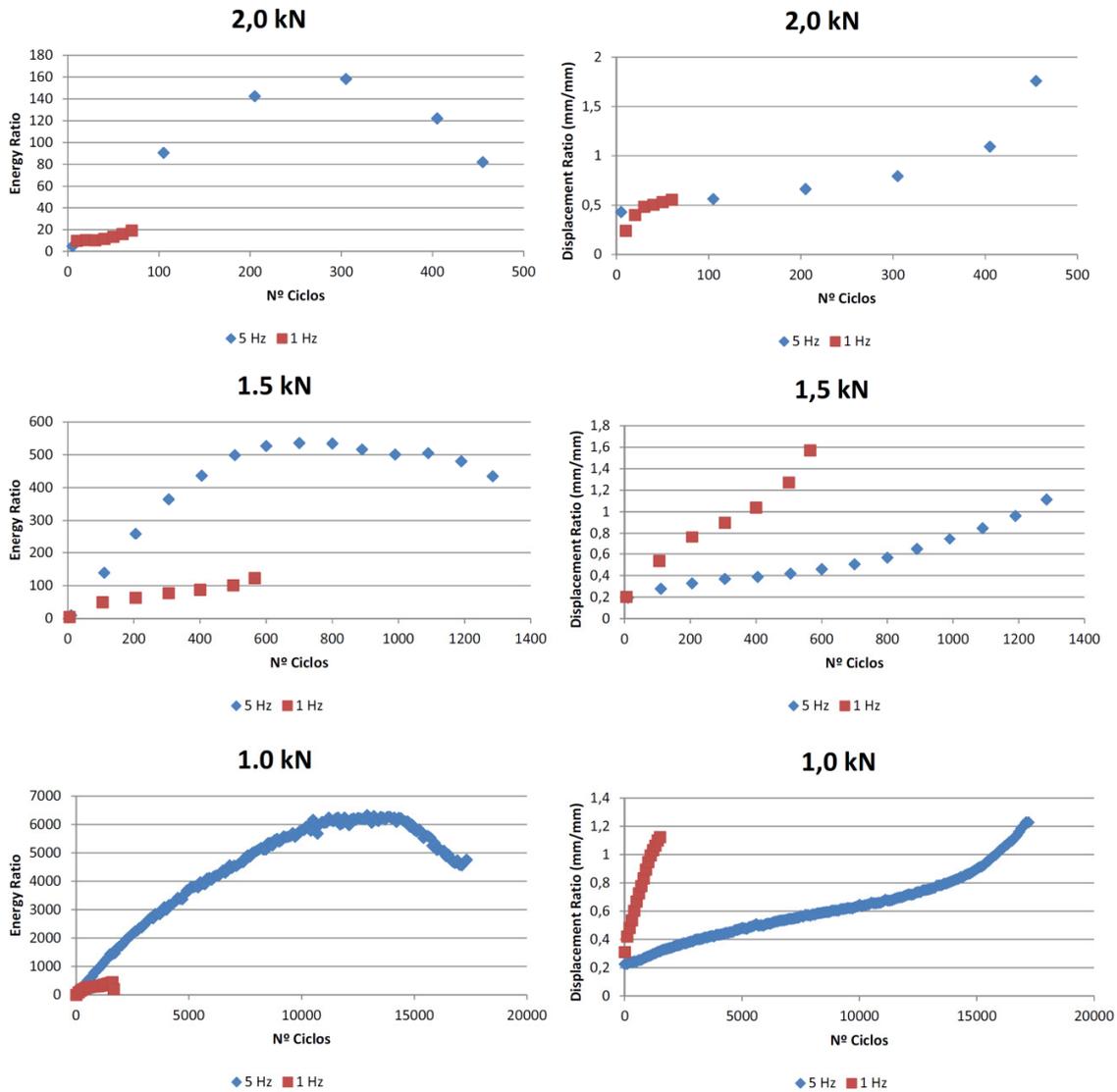


Figura 227. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos en los ensayos llevados a cabo con la mezcla AC 16 S.

La Tabla 33 muestra algunos de los valores obtenidos para los ciclos N_i y N_M a través de los mismos, así como la dispersión entre ellos. Como se puede observar, cuando los valores de Energy Ratio muestran una tendencia normal, ambos métodos son prácticamente coincidentes a la hora de definir el inicio de la macro-fisura. No obstante, el inicio en sí del proceso de fisuración con la aparición de micro-fisuras (N_i) presenta mayores dispersiones (lo que pone de manifiesto la dificultad de definir cuándo exactamente un material

comienza a fisurar). Una futura línea de investigación que ayude a clarificar qué parámetro es más preciso permitiría mejorar el estudio de esta patología en mezclas bituminosas.

Tipo de Mezcla	Condiciones de Ensayo	Ciclo	Energy Ratio	Displacement Ratio	Media	Desviación Típica	Coef. De Variación Cv
AC 16 S	2 kN; 1 Hz	N _i	100	100	100	0	0
		N _M	250	250	250	0	0
	2 kN; 5 Hz	N _i	400	200	300	141	0,46
		N _M	1550	1600	1575	39	0,02
	1,5 kN; 1 Hz	N _i	200	200	200	0	0
		N _M	700	600	650	71	0,11
	1,5 kN; 5 Hz	N _i	1900	1500	1700	283	0,17
		N _M	6000	6600	6300	424	0,07
	1 kN; 1 Hz	N _i	700	400	550	212	0,38
		N _M	2100	2300	2200	140	0,06
1 kN; 5 Hz	N _i	9200	7200	8200	1414	0,17	
	N _M	25600	25300	25450	212	0,01	
AC 22 S	2 kN; 5 Hz	N _i	100	100	100	0	0
		N _M	300	300	300	0	0
	1,5 kN; 5 Hz	N _i	300	200	250	71	0,28
		N _M	700	800	750	71	0,09
	1 kN; 5 Hz	N _i	2400	2300	2350	71	0,03
		N _M	10900	7000	8900	2758	0,31

Tabla 33. Estimación de los ciclo N_i y N_M a partir de los valores de Energy y Displacement Ratio.

En la Figura 228 se recogen los valores de energía disipada acumulada obtenidos en los diferentes ensayos. Conforme se disminuye el nivel de carga aplicado la energía disipada acumulada aumenta, lo que indica la influencia de la amplitud de carga en el comportamiento a fisuración por fatiga de los materiales bituminosos. Así, cuanto más pequeña es la carga recibida en cada ciclo, más energía en conjunto es necesario introducir en el sistema para provocar el fallo por fisura del material. Por tanto, podemos decir que niveles de carga de tráfico menores alargarán la vida del firme retrasando la aparición de fisuras (el descenso de la carga tiene un efecto positivo en la respuesta de la mezcla aumentando su vida de fisuración por fatiga).

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

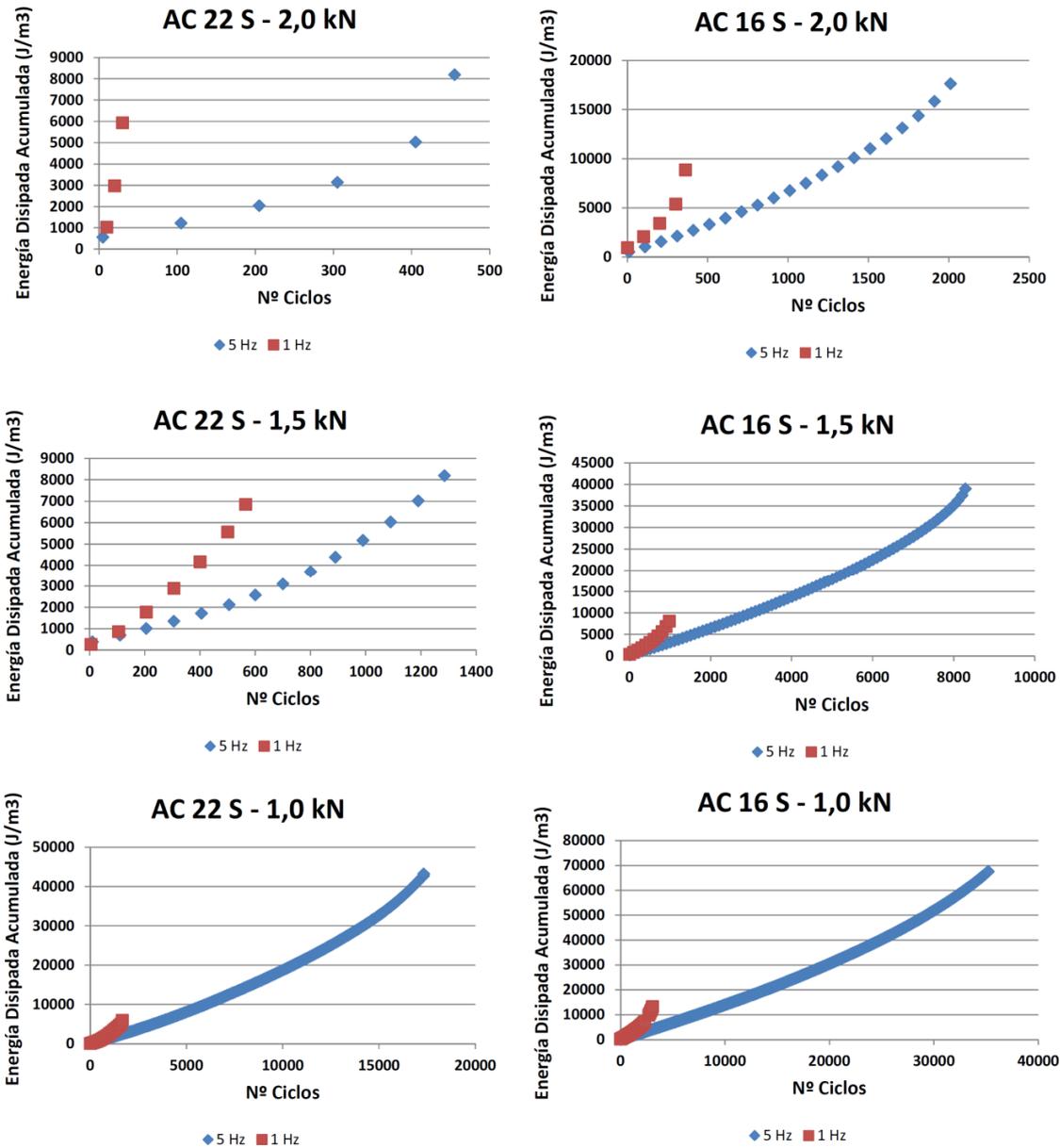


Figura 228. Valores de energía disipada acumulada obtenidos en los diferentes ensayos llevados a cabo para las mezclas AC 16 S y AC 22 S.

En los ensayos llevados a cabo con ambas mezclas, los valores de energía disipada acumulada a bajas frecuencia, permanecen casi constantes independientemente del nivel de amplitud de carga aplicado. Este hecho pone de manifiesto que la influencia de la velocidad de carga en el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas es

tan importante como la amplitud de las mismas. Además, independientemente del nivel de carga aplicado y de la mezcla analizada, los valores de energía disipada acumulada en las pruebas realizadas a 1 Hz son inferiores a los de las pruebas realizadas a 5 Hz, lo que indica que las bajas frecuencias influyen negativamente en el comportamiento a fisuración por fatiga del material. Este hecho implica que los materiales bituminosos ofrecen menos resistencia a la aparición de fisuras de fatiga cuando los ciclos de carga recibidos son más duraderos en el tiempo.

Utilizando la energía disipada acumulada y a partir de los ciclos N_i y N_M definidos a través del parámetro Displacement Ratio se establecen los umbrales de daño (asociados a cada uno de los ciclos característicos N_i , N_M y N_f), para cada una de las mezclas en función del nivel de carga y frecuencia (Figura 229). Conforme se disminuye el nivel de carga, los umbrales de daño van aumentando, lo cual indica que el proceso de fisuración tarda más en desarrollarse (puesto que es necesario introducir más cantidad de energía al sistema para deteriorar al material). De la misma forma, el área contenida entre los umbrales aumenta, y por tanto podemos decir que la velocidad de propagación de las micro y meso fisuras disminuye cuando decrece la carga. A pesar de ello, una vez aparecida la macro-fisura (umbral en el que se considera que el daño provocado es irreparable), su velocidad de propagación se ve menos afectada por el nivel de carga, siendo ésta más o menos constante y menor para cualquier nivel. Esto coincide con el estudio de fisuración mediante imágenes expuesto en el apartado anterior, en el cual se demostró la cantidad de energía disipada una vez iniciada la macro-fisura es menor que la disipada durante la fase de deformaciones plásticas y micro/meso fisuración.

Se observa que a bajas velocidades de aplicación el nivel de carga no ejerce tanta influencia en el comportamiento de la mezcla, los umbrales de daño del material evaluado a 1 Hz son más estables en relación al nivel de carga aplicado que en el caso de las pruebas realizadas a 5 Hz. Así, a pesar de que la disminución de la amplitud de carga aplicada sigue ejerciendo un efecto positivo en la resistencia a fisuración por fatiga del material, en el caso de los ensayos realizados a 1 Hz resulta menos apreciable.

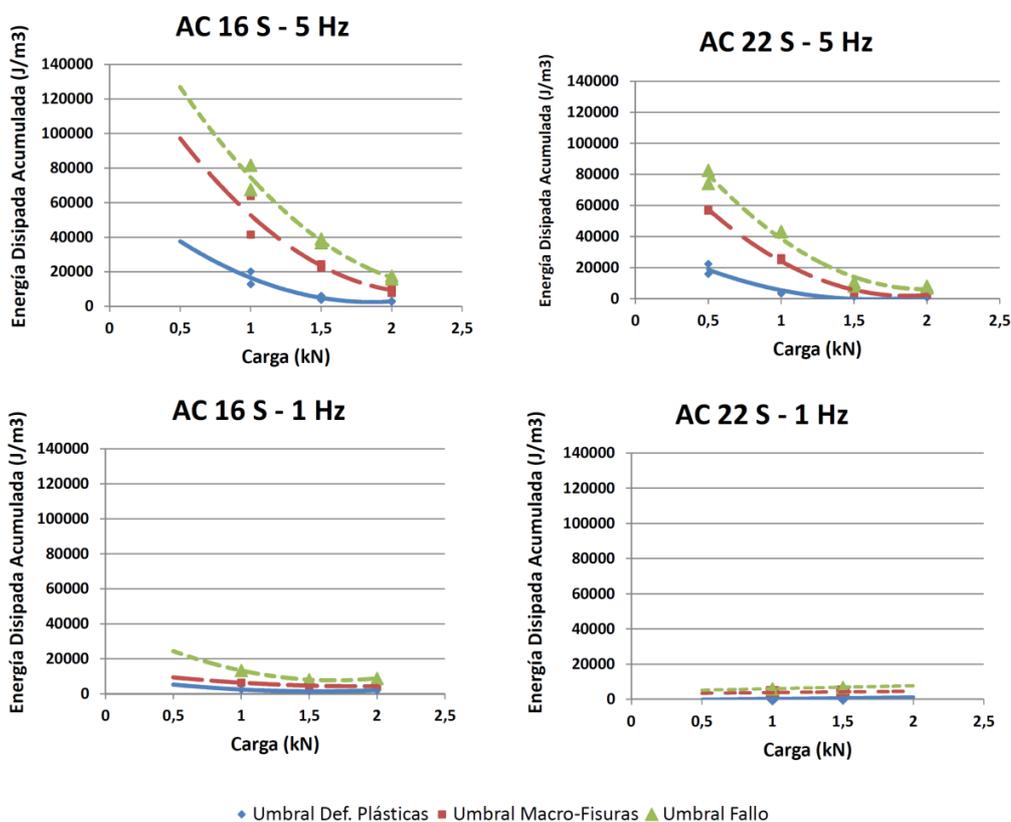


Figura 229. Umbrales de daño a fisuración obtenidos en diferentes niveles de carga para las mezclas AC 16 S y AC 22 S en ensayos realizados a 1 Hz y 5 Hz.

5.4.3.2. Temperatura

Otra de las condiciones de ensayo que ejercen una influencia fundamental sobre el comportamiento mecánico de la mezcla es la temperatura de servicio, siendo por tanto necesario evaluar su influencia en el comportamiento a fisuración por fatiga del material. Para ello se analizará el comportamiento de una mezcla AC 16 S, bajo las mismas condiciones de ensayo, pero variando la temperatura de acondicionamiento. Así, se llevó a cabo la evaluación de la mezcla con diferentes niveles de carga (2 kN; 1,5 kN; 1 kN; 0,5 kN), a distintas temperaturas (3 °C, 20 °C y 40 °C), pero manteniendo fijas la frecuencia (5 Hz) y la distancia de separación entre apoyos (50 mm).

La Figura 230 muestra el análisis fenomenológico del comportamiento a fisuración de la mezcla estudiada en relación al nivel de carga aplicado y el ciclo de fallo (N_f), para cada una de las temperaturas de ensayo utilizadas. En ella se demuestra que la temperatura de servicio a la que va a estar sometido el material juega un papel importante en su comportamiento a fisuración. Así, a temperaturas de 3 °C el material ofrece una resistencia superior que a 20 °C (subiendo su límite de resistencia a fisuración por fatiga desde los 0,5 kN hasta los 0,8 kN), y mucho mayor que a 40 °C (cuyo límite de resistencia a fisuración por fatiga se considera nulo, lo cual asegura la aparición de fisuras en el material para los niveles carga utilizados). Además, los resultados obtenidos ponen de manifiesto la sensibilidad del método de ensayo UGR-FACT a las variaciones de temperatura en el acondicionamiento, permitiendo ofrecer una evaluación precisa de mezclas bituminosas en base a este aspecto.

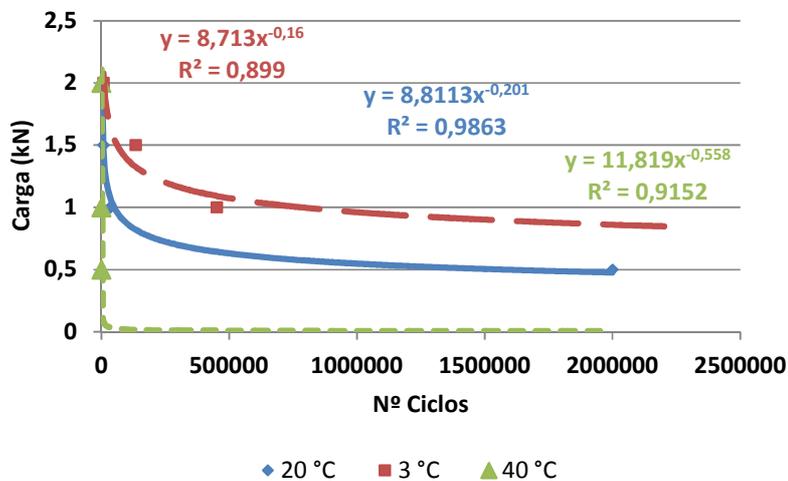


Figura 230. Leyes de fisuración por fatiga de la mezcla AC 16 S a diferentes temperaturas.

La Figura 231 muestra los valores de energía disipada en el volumen representativo de estudio en las pruebas realizadas a diferentes temperaturas. Como se puede observar la energía disipada por el material a 3 °C en cada ciclo, e independientemente de la amplitud

de carga aplicada, es mucho menor que a 20 °C, y que a 40 °C. El hecho de que el material se comporte de manera más elástica (puesto que aumenta su rigidez debido a la bajada de la temperatura) permite retrasar el desarrollo del proceso de fisuración por fatiga (ya que se recupera más cantidad de la energía introducida en el sistema por las cargas, sin que esta se disipe en forma de daño). Dado que el material se encuentra en un estado más rígido, la fase inicial de deformaciones plásticas se prolonga en el tiempo, al igual que la de microfisuración. No obstante, una vez iniciada la macro-grieta, ésta se propaga a mayor velocidad a través de la probeta (como se puede observar en el incremento casi vertical de la energía disipada).

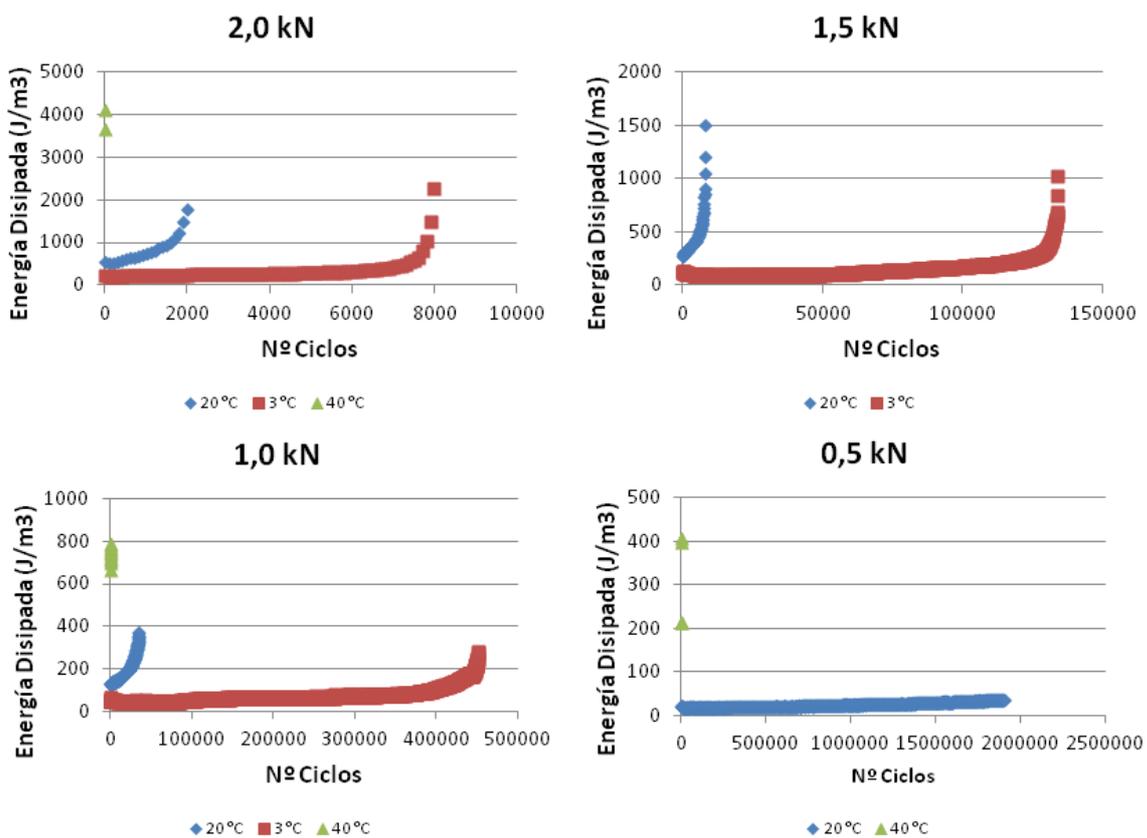


Figura 231. Valores de energía disipada durante la evaluación del comportamiento a fisuración de la mezcla AC 16 S a diferentes temperaturas.

Las pruebas realizadas a 40 °C muestran una resistencia muy inferior de la mezcla ante el fenómeno de fisuración. El hecho de que en la mezcla se produzca un comportamiento más viscoso debido a las altas temperaturas provoca que alcance su límite de deformaciones plásticas de manera casi inmediata, y que aparezca una superficie de fractura que se propague a gran velocidad (sobre todo en cargas altas, con las que ni siquiera se alcanzaron los 100 primeros ciclos). Para cargas inferiores, el fallo del material se produce también de forma muy prematura, pero en este caso, en lugar de aparecer una superficie de fallo dominante aparecen varias, y no solo de forma ascendente, sino también descendente (Figura 232). Dado que la resistencia del material disminuye de forma considerable a estas temperaturas, el daño producido en cada ciclo es tan grande, que la energía disipada es mucho mayor que en los estudios realizados a 20 °C y 3 °C.



Figura 232. Detalle del daño por fisuración ramificado y con aparición en ambas direcciones (ascendente y descendente), en mezcla AC 16 S ensayada a 40 °C.

El comportamiento ofrecido por la mezcla estudiada con respecto a la temperatura refuerza la hipótesis planteada en el apartado anterior por la cual el diseño de mezclas bituminosas anti-fisuras debe centrarse en un aumento de su resistencia a deformaciones plásticas y micro-fisuras, de manera que se retarde al máximo el inicio de la macro-grieta. Así, a temperaturas altas en las que la mezcla alcanza rápido su capacidad de deformar plásticamente, el fallo por fisuración ocurre de manera muy prematura, mientras que a bajas temperaturas cuando la mezcla se comporta de forma elástica, el material muestra una resistencia superior ante las mismas condiciones de carga.

Destacar que los resultados mostrados en el ensayo realizado a 3 °C y 1 kN se han visto alterados por un problema en la cámara de acondicionamiento, estando la probeta sometida a condiciones de humedad mayores que en el resto de los casos (se formó una placa de hielo en el interior de la cámara y gran cantidad de agua de condensación). A pesar de ello, este hecho propició información sobre la pérdida de resistencia a fisuración de los materiales debido a la presencia de agua (ya que la probeta fracturó antes de lo previsto, apareciendo también algunos escalones en la energía disipada por el material, diferentes a la tendencia mostrada en condiciones de seco), cuyo estudio puede postularse como una futura línea de investigación. En la Figura 233 aparecen los detalles de la placa de hielo, del agua condensada en diferentes puntos del equipo, y de la diferencia de color debido a la humedad retenida de la probeta ensayada con respecto a una seca (de color más claro).



Figura 233. Detalle de los problemas de humedad surgidos durante el ensayo de la mezcla AC 16 S acondicionada a 3 °C. Diferencia de color entre la mezcla afectada por la humedad (abajo) y una seca (arriba).

Los valores de RDEC acumulado vuelven a poner de manifiesto que la mayor parte de la energía disipada se produce durante las fases de deformaciones plásticas y micro-fisuración

(Figura 234). Por ello, los ensayos llevados a cabo a bajas temperaturas muestran una acumulación de daño mayor que los ejecutados a altas. Este hecho es debido a que el material cuando se comporta de manera más rígida prolonga la etapa de deformaciones plásticas y micro-fisuración (incrementando el estado de daño interno hasta que termina fallando), mientras que cuando se comporta de manera viscosa se fractura de forma fácil disipando menor cantidad de energía.

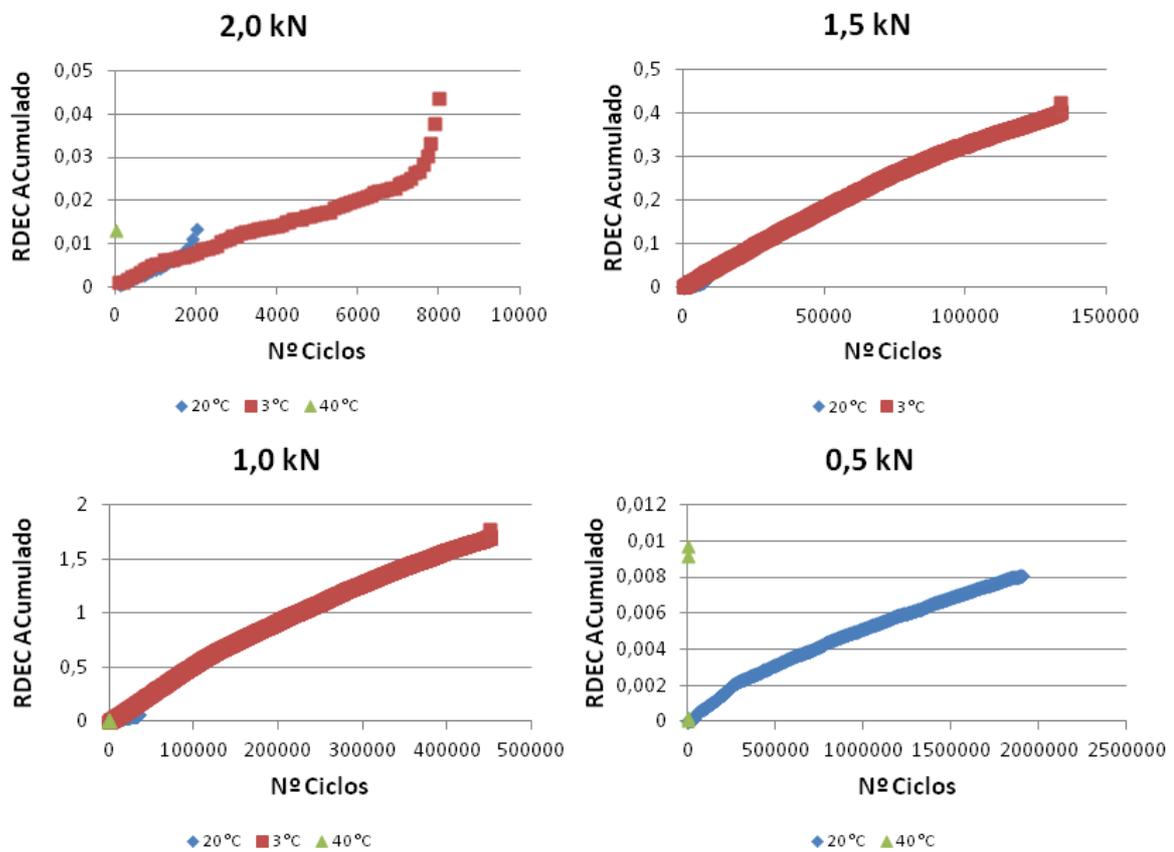


Figura 234. Valores de RDEC acumulado obtenidos en la evaluación de la mezcla AC 16 S a diferentes temperaturas.

La Figura 235 muestra los valores del parámetro de daño medio a diferentes temperaturas. Cuanto mayor es la temperatura de servicio mayor es el daño causado en la mezcla para un mismo nivel de carga. Así, el daño medio a fisuración por fatiga sufrido por el material a 40 °C es muy superior al sufrido a 20 °C o 3 °C, los cuales resultan más similares a pesar de las

notables diferencias en sus vidas de fatiga. Este hecho puede ser debido a que la mezcla evaluada a 3 °C a pesar de que tarda más tiempo en desarrollar la fisura, se encuentra en un estado de micro-fisuración interno que hace que el daño sufrido por la misma sea igual al de la probeta en la que ha aparecido la superficie de fallo dominante de manera más prematura. En este sentido, dado que el objeto de las pruebas aquí realizadas únicamente ha sido evaluar la sensibilidad del método UGR-FACT a los cambios en la temperatura de ensayo, resultaría interesante estudiar como futura línea de investigación si un descenso más acusado en las temperaturas provoca un estado de rigidez que no sea tan favorable y una fragilidad excesiva que termine produciendo un colapso del material.

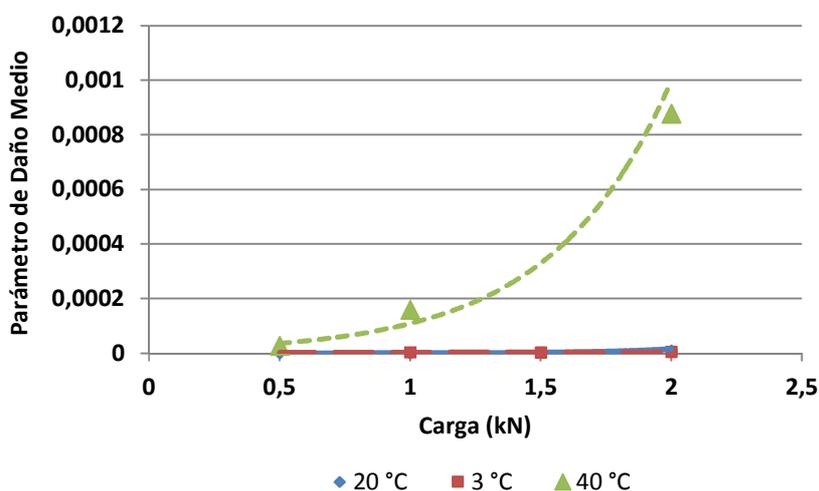


Figura 235. Parámetro de daño medio de la mezcla AC 16 S a diferentes temperaturas de ensayo.

Por su parte, los valores de Energy y Displacement Ratio también se ven afectados por la temperatura de ensayo (Figura 236), de manera que a bajas temperaturas permiten observar de forma más clara las diferentes fases del proceso de fisuración (deformaciones plásticas, micro/meso fisuración y macro-fisuración), y a altas los valores no muestran diferencias entre etapas (debido a la alta viscosidad, que provoca deformaciones plásticas tan grandes que tienen de por sí asociadas fracturas en el material, Figura 237). En este sentido hemos de desatacar la sensibilidad mostrada por el Displacement Ratio a los cambios sufridos en la temperatura de ensayo y el nivel de carga, de forma que conforme

menor es la temperatura y mayor la carga de ensayo, más acusadas son sus curvas crecientes.

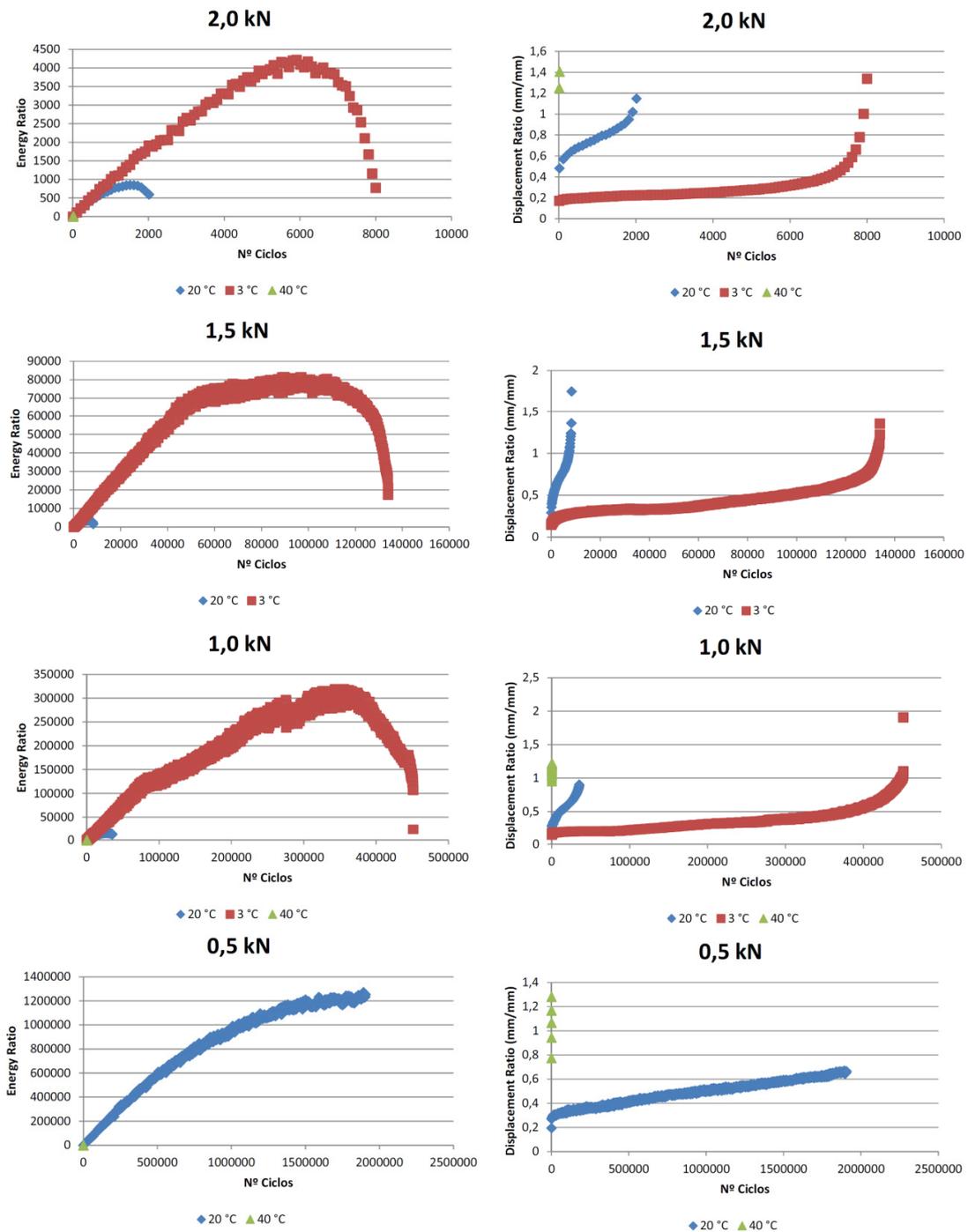


Figura 236. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos en la evaluación de la mezcla AC 16 S a diferentes temperaturas.



Figura 237. Detalle de las fracturas (ascendentes y descendentes) asociadas a las deformaciones plásticas sufridas por la mezcla AC 16 S ensayada a 40 °C.

A partir de los valores obtenidos en el Displacement Ratio se estimaron los ciclos de inicio de los procesos de micro-fisuración y macro-fisuración, a partir de los cuales se definieron los umbrales de daño de energía disipada acumulada en función de la temperatura. Como se puede observar en la Figura 238, a mayor temperatura de ensayo y mayor amplitud de carga aplicada, menor energía es necesaria para provocar el fallo a fisuración del material. En este punto hemos de destacar que en la mezcla ensayada a 1 kN y 3 °C (la cual se vio alterada por presencia de humedad durante el acondicionamiento), a pesar de tener una vida de fisuración por fatiga mucho más larga, la energía necesaria para provocar su fallo es ligeramente superior que en la mezcla ensayada a 1,5 kN (lo que demuestra que la presencia de agua en el material debilita su resistencia a fisuración).

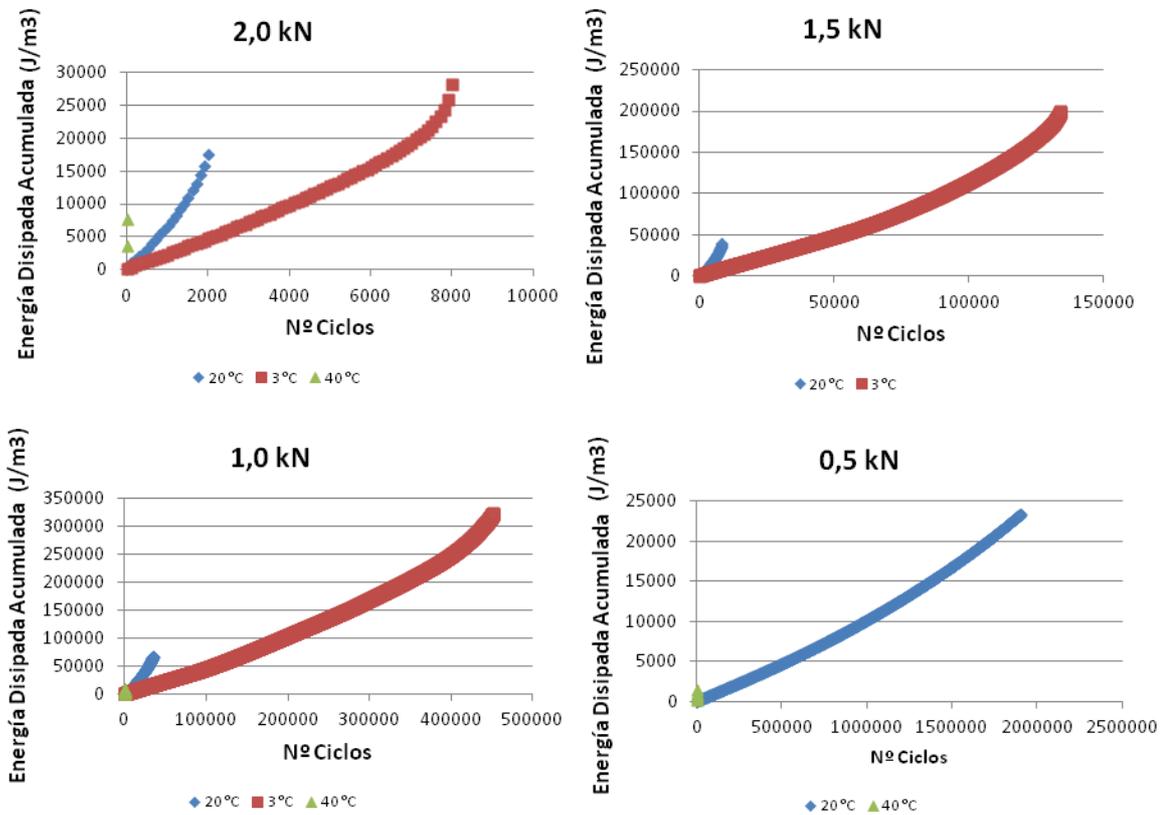


Figura 238. Valores de energía disipada acumulada de la mezcla AC 16 S ensayada a diferentes temperaturas.

Los valores umbrales de daño con respecto a la temperatura varían de forma considerable (Figura 239). Destacar que a bajas temperaturas la energía necesaria para producir daño en las diferentes etapas del proceso aumenta considerablemente debido al comportamiento más elástico del material. Además, para las amplitudes de carga más elevadas el comportamiento de la mezcla es menos dependiente de la temperatura. Los valores umbrales con las pruebas llevadas a 40 °C no fueron posibles de determinar debido a la escasez de datos por la corta duración del ensayo.

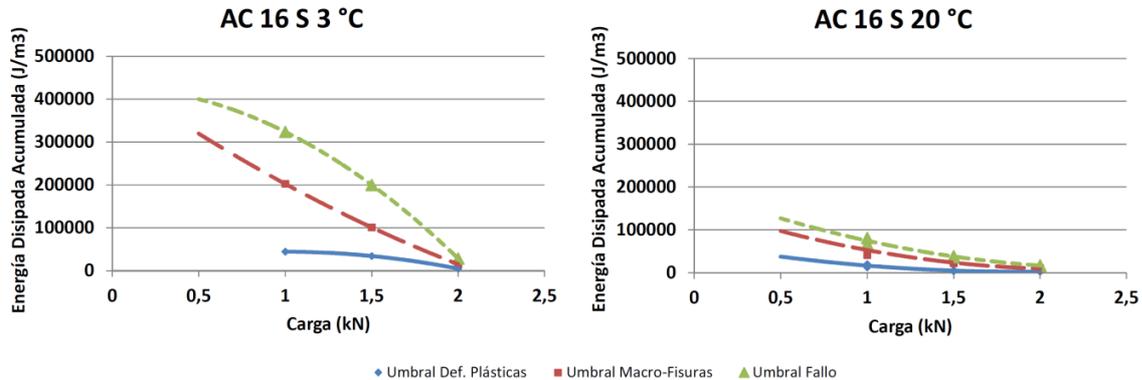


Figura 239. Umbrales de daño a fisuración por fatiga de la mezcla AC 16 S ensayada a 3 °C y 20 °C.

5.4.3.3. Distancia entre Apoyos

Finalmente, como último objetivo del plan de ensayos establecido para la evaluación de la sensibilidad del método de ensayo UGR-FACT a las condiciones de ensayo, se decidió analizar la influencia de la distancia inicial entre apoyos en el comportamiento a fisuración de la mezcla. La respuesta del material bituminoso no es la misma en función de si la capa se encuentra situada sobre un defecto estructural de mayores dimensiones como un bache (separación de 50 mm) o sobre uno menor como por ejemplo una junta (separación 15 mm). Así, es interesante evaluar su comportamiento mecánico ante diferentes situaciones, además de valorar qué configuración de ensayo es más efectiva. Para ello, en esta fase las mezclas AC 16 S y AC 22 S se sometieron a varias pruebas en las que utilizando diferentes amplitudes de carga (2 kN; 1,5 kN; 1 kN), y dejando constantes la temperatura (20 °C) y la frecuencia (5 Hz), se modificó la distancia inicial de separación entre apoyos a 15 mm y 50 mm. En el caso de la mezcla AC 22 S, también se analizó la influencia de esta distancia a 1 Hz de frecuencia.

La Figura 240 muestra la relación entre el nivel de carga aplicado durante el ensayo y el ciclo de fallo (N_f) para cada una de las mezclas ensayadas ante las diferentes configuraciones. Como se puede observar la diferencia de distancias entre apoyos no tiene una influencia tan

significativa como la de la temperatura o la frecuencia, sobre el comportamiento a fisuración por fatiga de la mezcla.

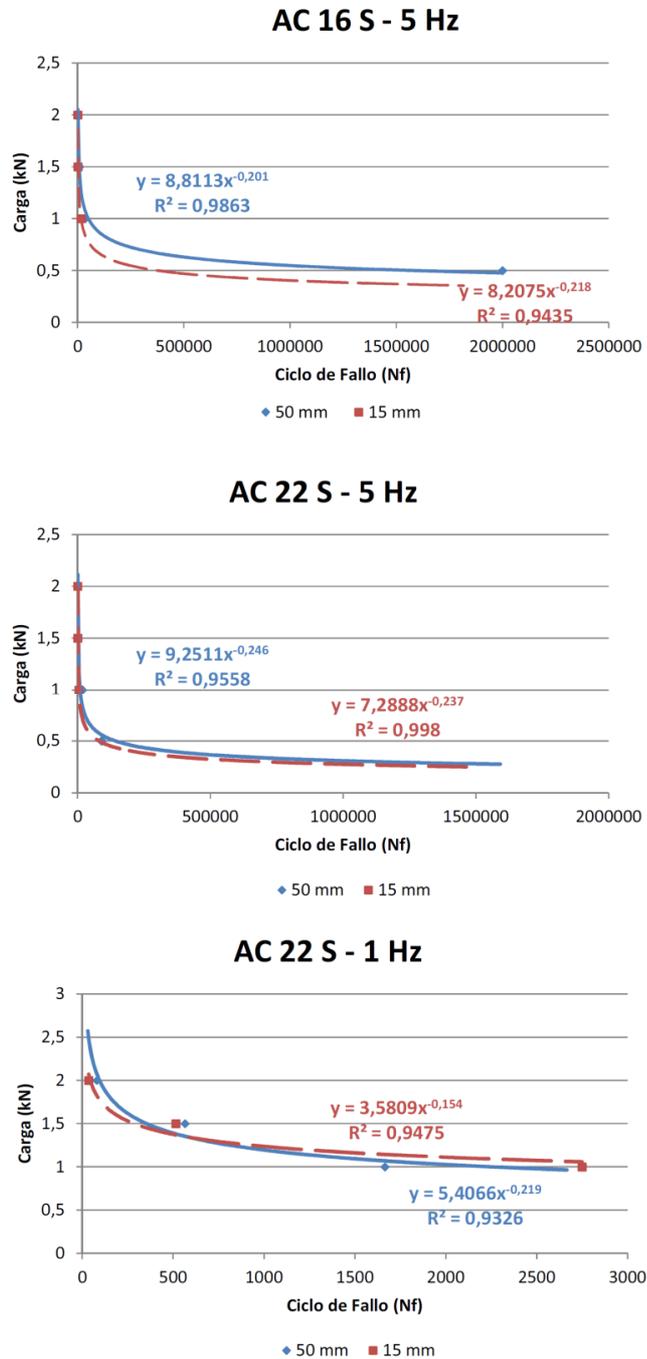


Figura 240. Leyes de fisuración por fatiga de las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 15 mm y 50 mm de distancia de separación entre apoyos.

No obstante, una disminución de la distancia entre apoyos provoca un ligero descenso en la vida de fatiga de los materiales evaluados, lo que coincide con los estudios llevados a cabo por Goacolou y Marchand 1982, en los que se describe las diferentes posibilidades de progresión de una fisura bajo carga del tráfico y el despegue de la interfaz. Así, en firmes donde existe una excelente adherencia entre capas, ambas trabajan conjuntamente produciéndose una propagación más vertical, rápida y limpia de la fisura. En cambio, en firmes donde existe una deficiencia de adherencia entre capas (como un socavón o bache), éstas trabajan por separado, provocando una fisura menos rectilínea, más desdoblada y ramificada, aunque retrasa el proceso de reflexión y por tanto, el ciclo de fallo del material. En base a ello podemos decir que cuando la separación entre apoyos es de 15 mm la propagación de la fisura para un mismo nivel de carga suele ser más rápida y vertical, que en el caso de la separación entre apoyos de 50 mm, en la cual se retrasa el desarrollo de la misma (Figura 241).



Figura 241. Detalle de la propagación más rectilínea y vertical de la fisura cuando el ensayo se lleva a cabo a una distancia de 15 mm.

Por otra parte, la energía disipada por ciclo de carga en los ensayos realizados con 15 mm de separación entre apoyos es muy similar a la mostrada por la energía disipada en los ensayos realizados a 50 mm, con valores del mismo orden, lo que indica que la distancia de separación entre apoyos no ejerce una influencia destacada sobre el comportamiento de la mezcla (Figuras 242 y 243). Además, también se cumple que a menor velocidad de carga

mayor es la energía disipada por el material, y por tanto mayor daño se produce en él. Así, podemos decir que para una distancia de separación entre apoyos de 15 mm, la tendencia marcada por el ensayo es también la misma que en los ensayos realizados a 50 mm.

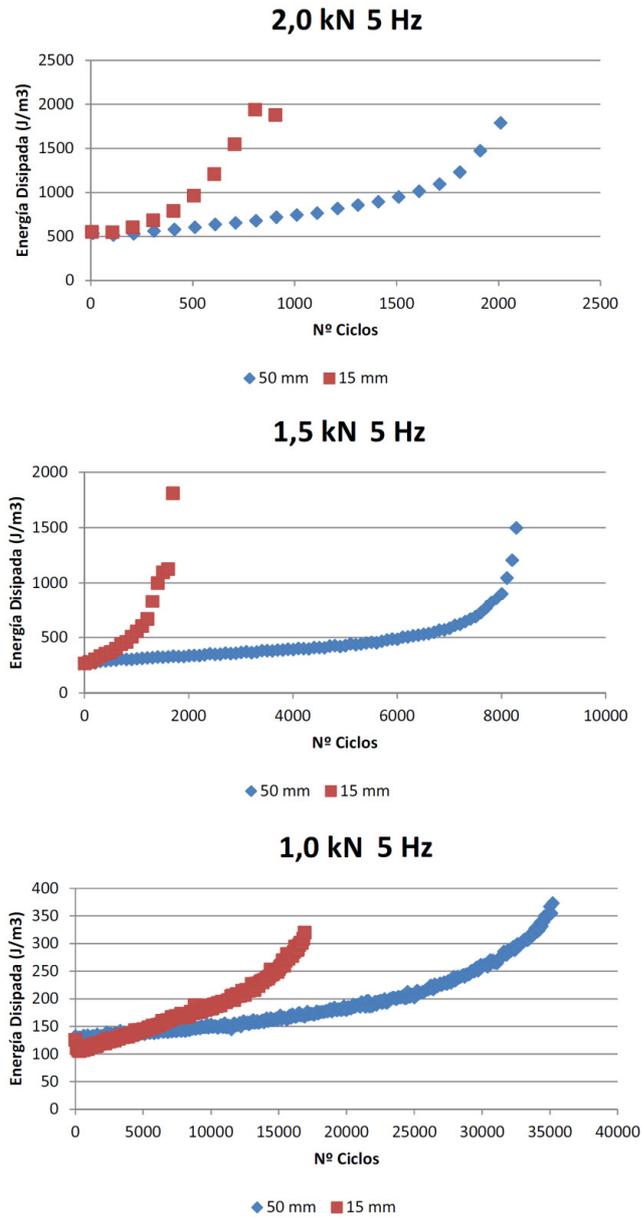


Figura 242. Energía disipada por la mezcla AC 16 S ensayada con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm, y diferentes niveles de carga.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

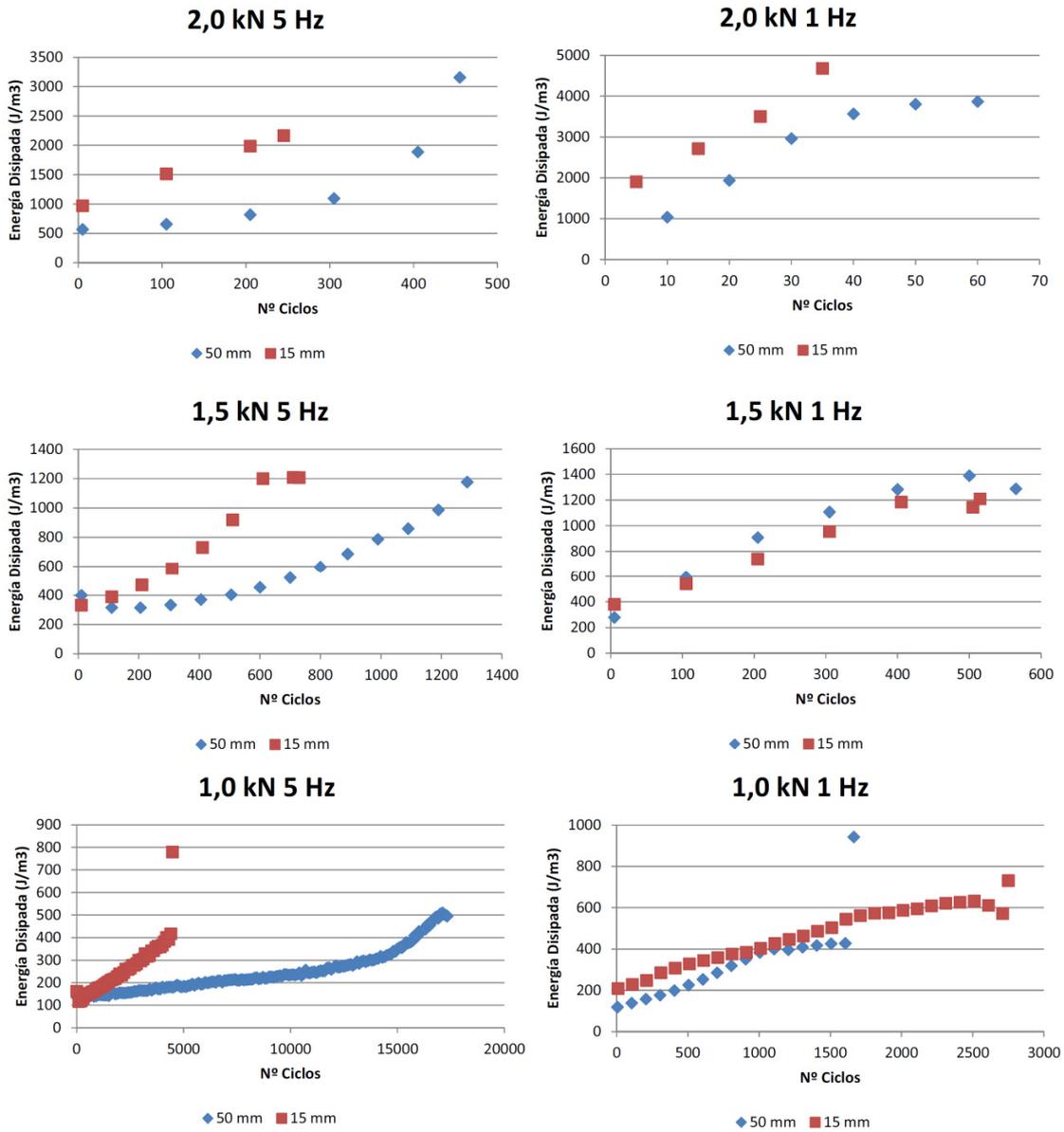


Figura 243. Energía disipada por la mezcla AC 22 S ensayada con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm, y diferentes niveles de carga.

Los valores de RDEC acumulado para cada uno de los ensayos llevados a cabo vienen recogidos en las Figuras 244 y 245. La influencia de la distancia entre apoyos en el daño producido en la mezcla no es demasiado significativa, llegándose en la mayoría de los casos

estudiados a niveles de daño muy similares entre los obtenidos con una distancia de 15 mm y los obtenidos con una distancia de 50 mm

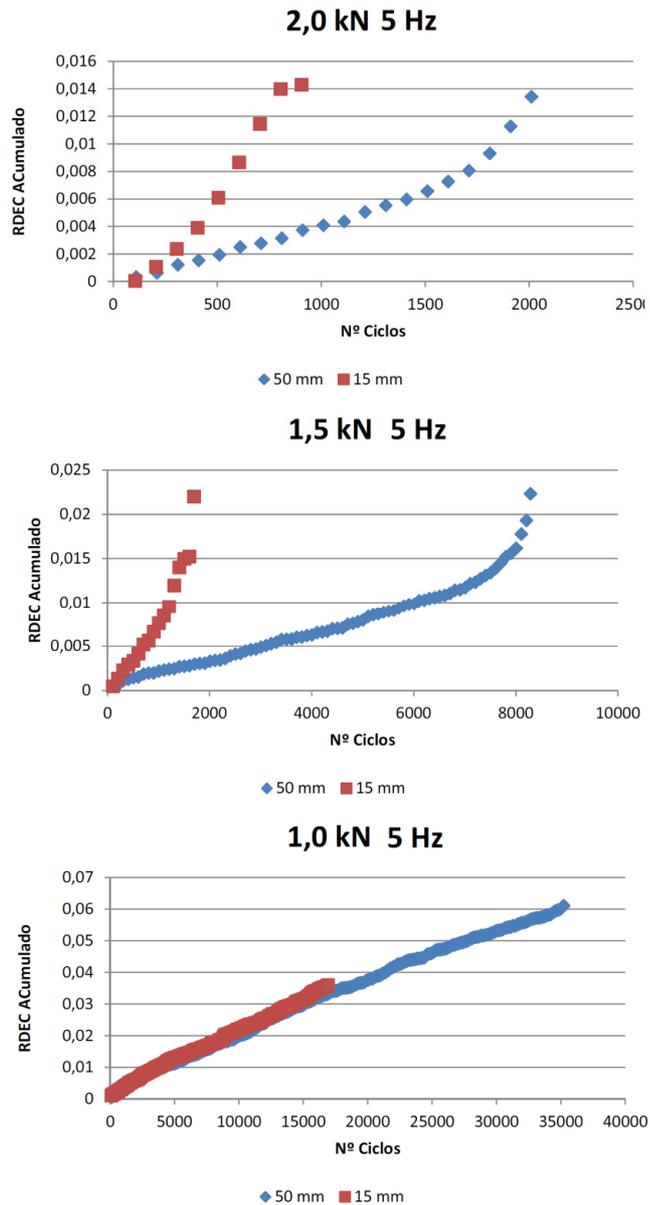


Figura 244. Resultados de RDEC acumulado de la mezcla AC 16 S ensayada a 15 mm y 50 mm de separación entre apoyos.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

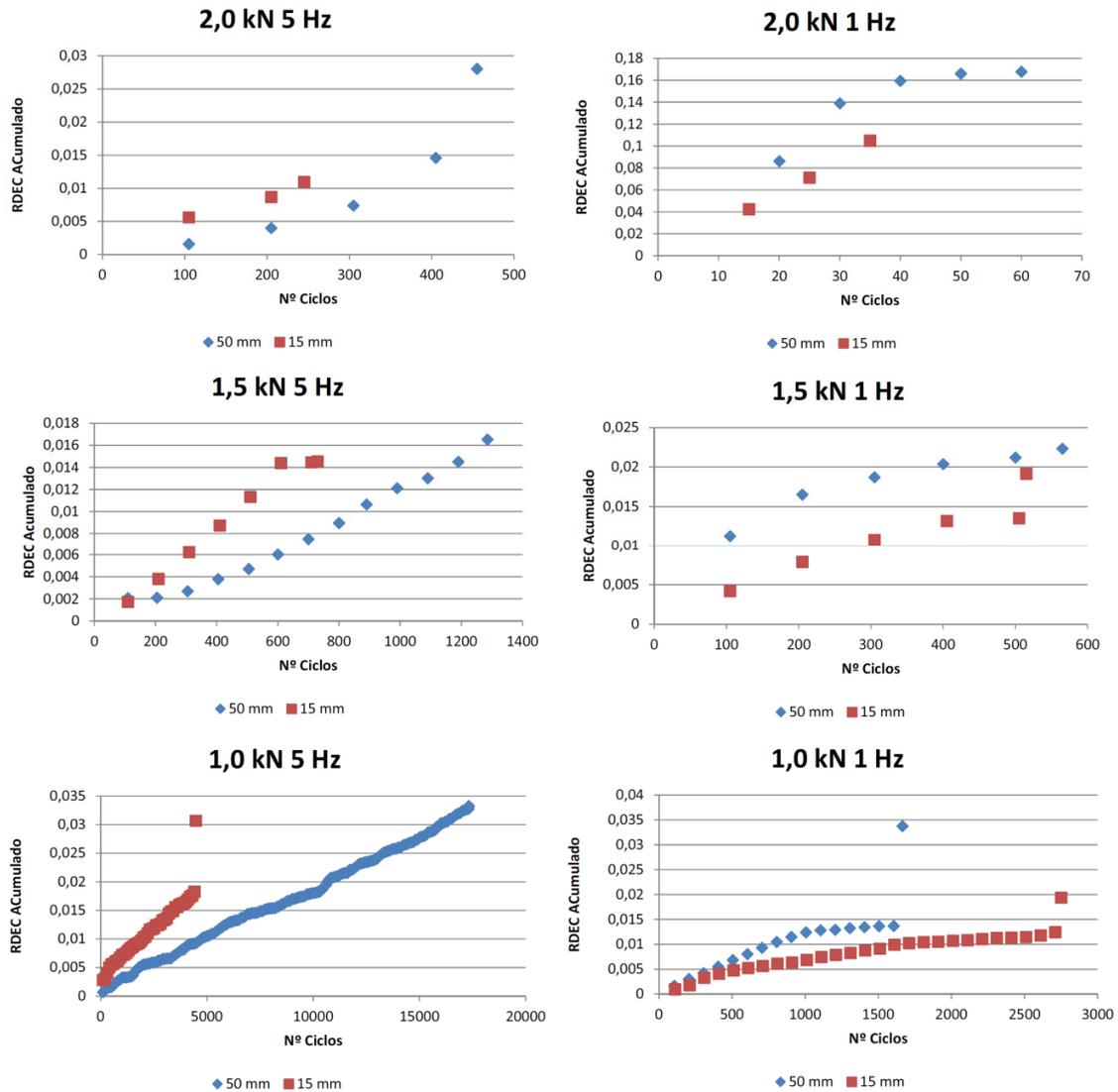


Figura 245. Energía disipada por la mezcla AC 22 S ensayada con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm, y diferentes niveles de carga.

. No obstante, dado que el proceso de fisuración suele desarrollarse a mayor velocidad en el caso de la configuración de 15 mm, el daño asociado al material aumenta ligeramente (Figura 246). A pesar de ello, podemos decir que las diferencias en el parámetro de daño medio, independientemente del tipo de mezcla, no son demasiado significativas (lo que pone de manifiesto la menor influencia de este aspecto en el comportamiento a fisuración de la mezcla).

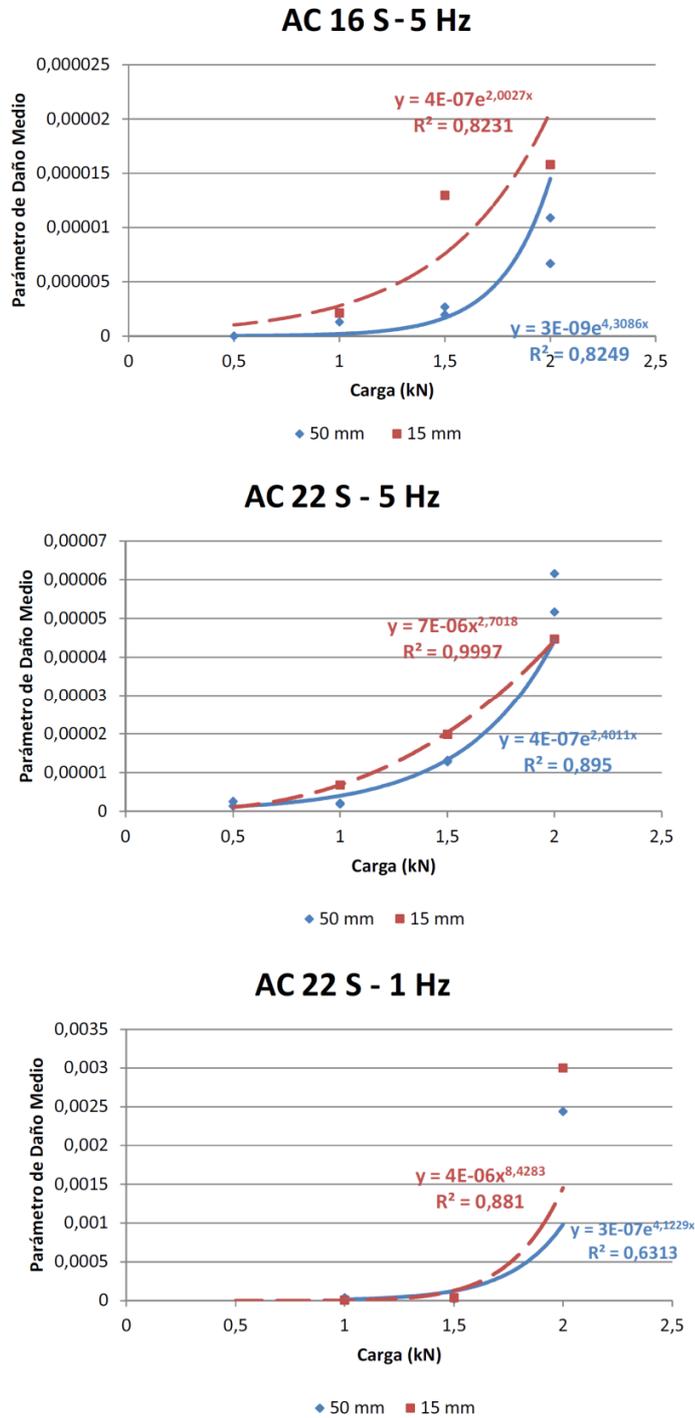


Figura 246. Parámetros de daño medio obtenidos para diferentes niveles de carga en las mezclas AC 16 S y AC 22 S, ensayadas a 15 mm y 50 mm de separación entre apoyos.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

En cuanto a los valores obtenidos en los parámetros Energy Ratio y Displacement Ratio (Figuras 247, 248 y 249), podemos afirmar que la diferencia de distancia inicial entre apoyos tampoco induce variaciones considerables. La tendencia de las curvas obtenidas suele ser la habitual, exceptuando las de Energy Ratio para valores inferiores de frecuencia, en las cuales no es posible discernir las fases del proceso de fisuración. Así, podemos destacar la mayor estabilidad de resultados obtenidos con el parámetro definido en esta investigación para las diferentes condiciones de ensayo evaluadas en este apartado.

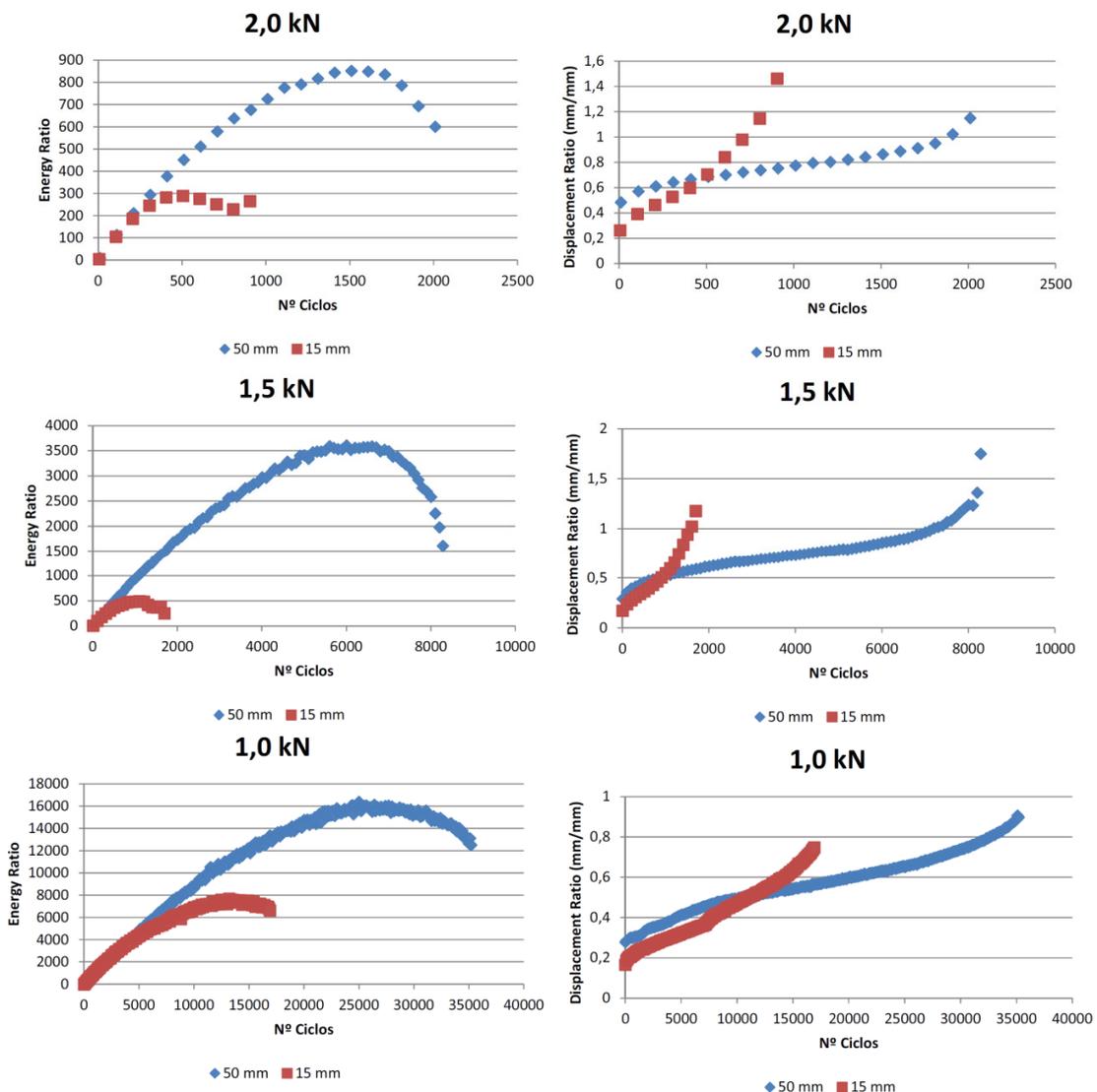


Figura 247. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos durante los ensayos de la mezcla AC 16 S con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm.

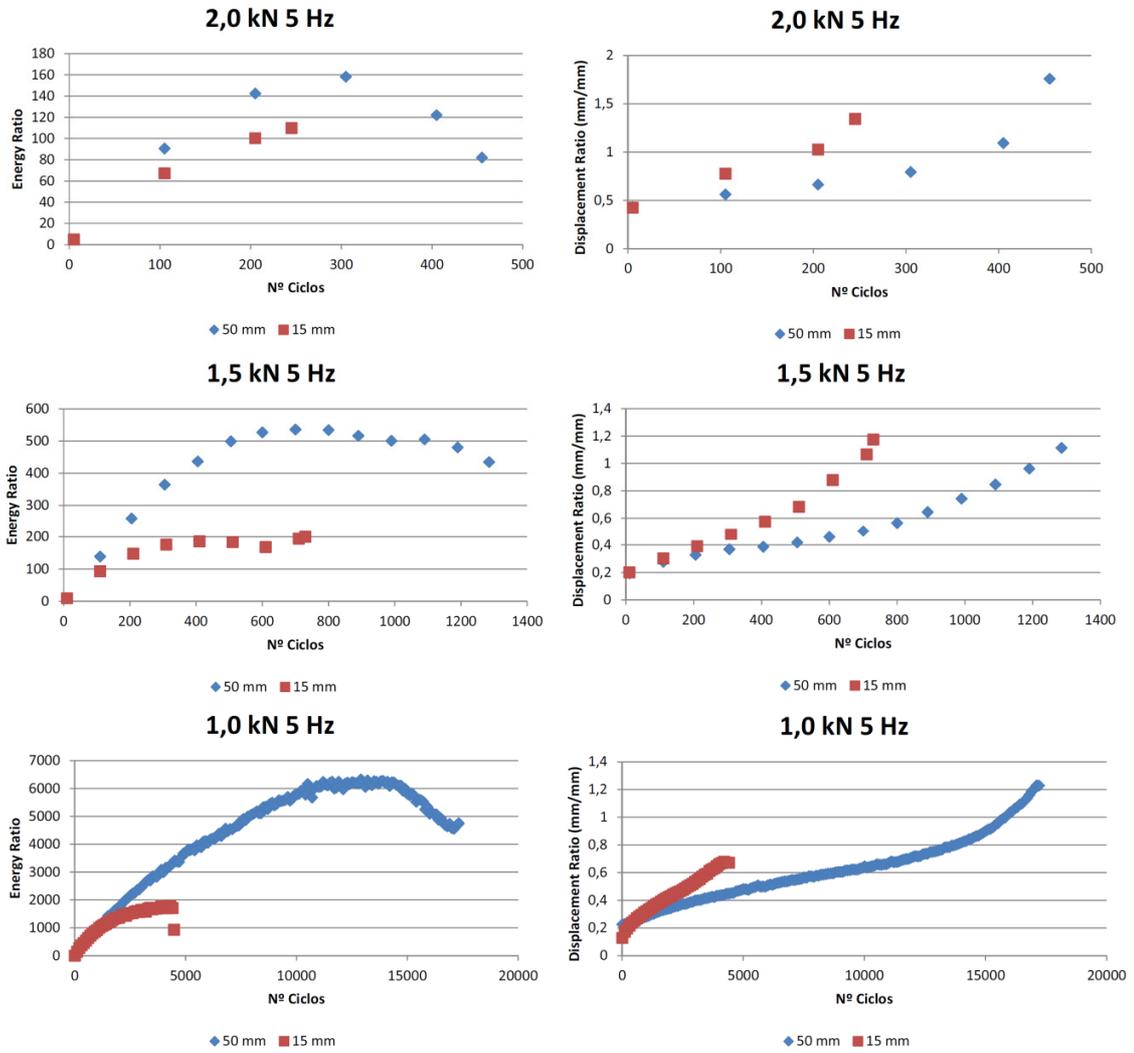


Figura 248. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos durante los ensayos de la mezcla AC 22 S con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm, y una frecuencia de 5 Hz.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

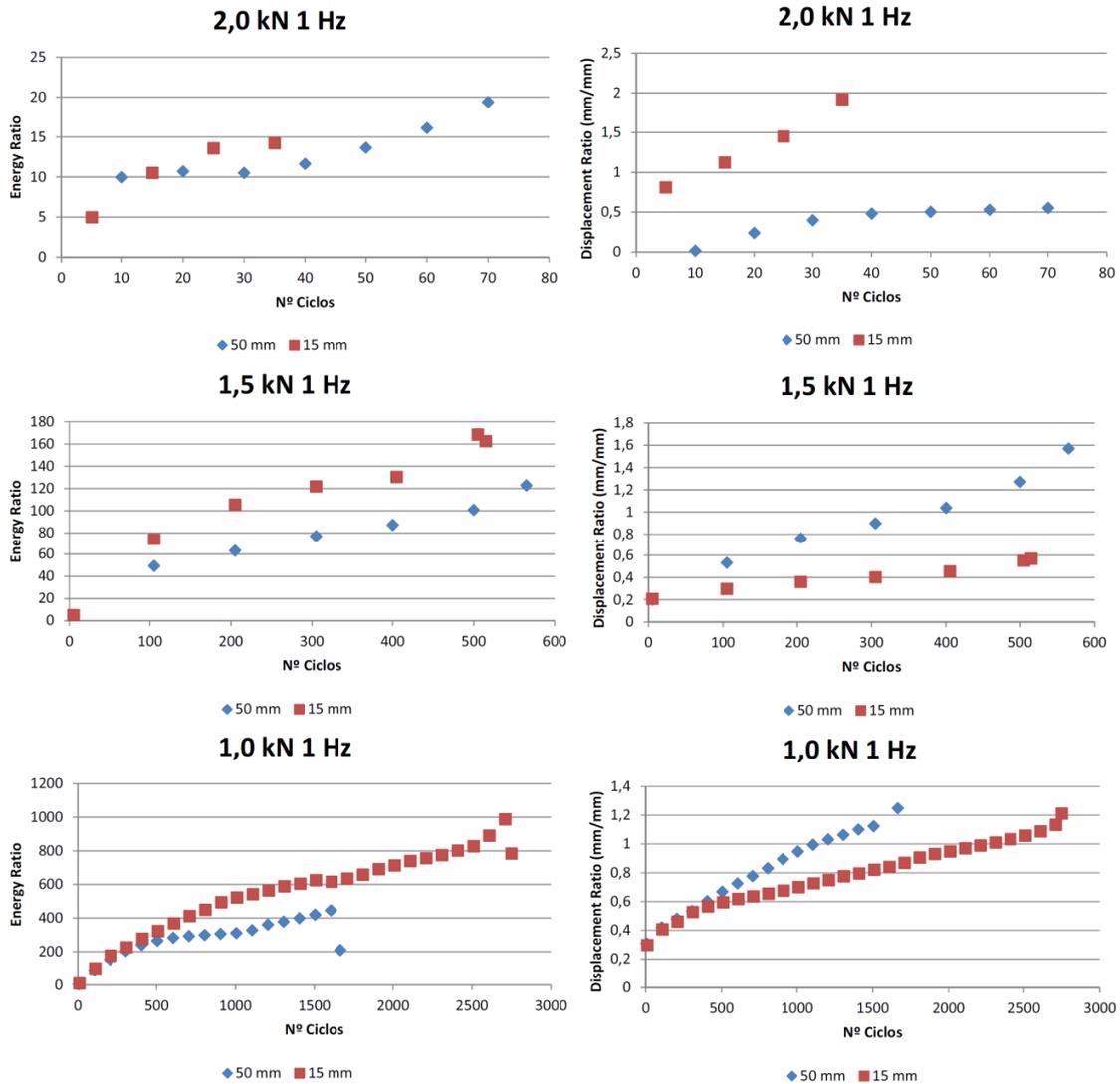


Figura 249. Valores de Energy y Displacement Ratio obtenidos durante los ensayos de la mezcla AC 22 S con una distancia de separación entre apoyos de 15 mm y 50 mm, y una frecuencia de 1 Hz.

La energía disipada acumulada vuelve a mostrar la tendencia de las otras pruebas en las que cuanto menor es la carga aplicada, mayor es la energía necesaria para provocar el fallo a fisuración de la mezcla (Figuras 250 y 251). Evaluando la influencia de la distancia entre apoyos en el comportamiento de las mezclas estudiadas, hemos de destacar que a pesar de disipar una cantidad similar de energía por ciclo, por regla general la energía acumulada necesaria para provocar el fallo del material con una configuración de 15 mm es menor que

en el caso de 50 mm. Este hecho es debido a que la mezcla actúa de manera más solidara con los apoyos transmitiéndose en mayor medida los desplazamientos de éstos, y provocando una aceleración del proceso de fisuración por fatiga, de forma que es necesario introducir menor cantidad de ciclos de carga para provocar su fallo. No obstante, de todas las variables analizadas en este estudio experimental, la distancia de separación entre apoyos es la que menor influencia ejerce en el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas.

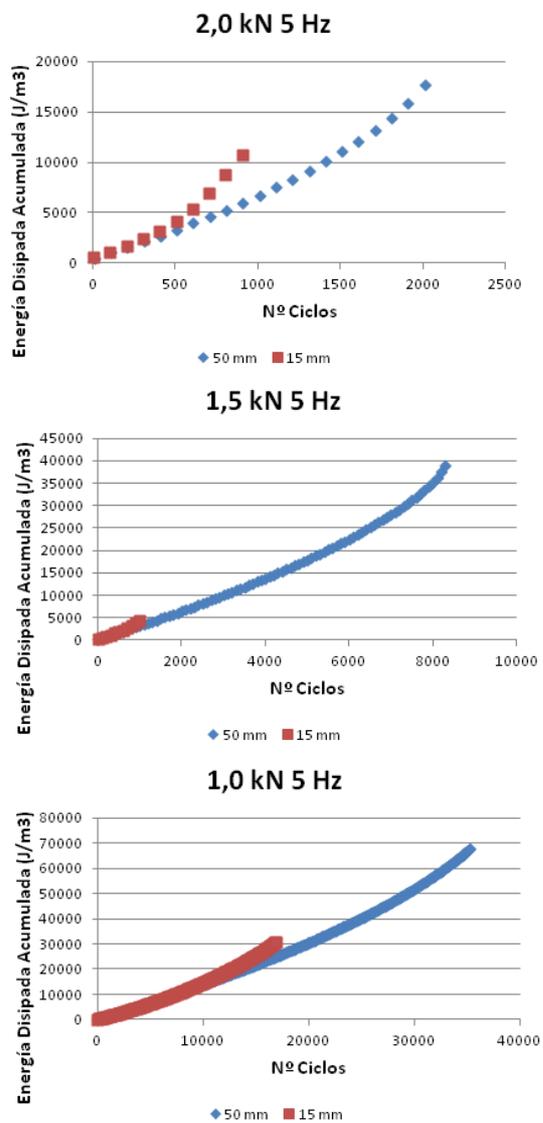


Figura 250. Energía disipada acumulada por la mezcla AC 16 S durante los ensayos realizados con 15 mm y 50 mm de separación entre apoyos.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

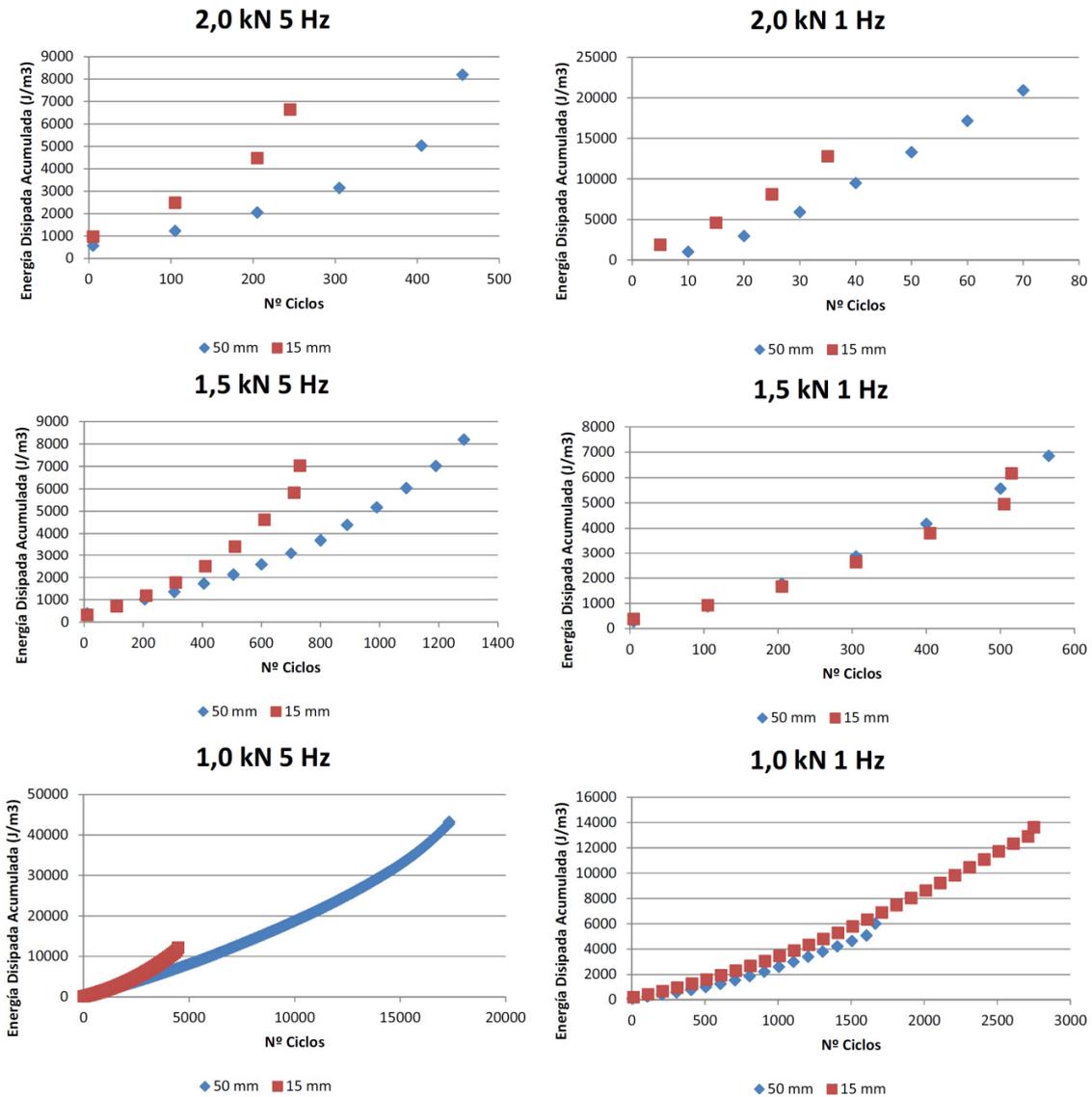


Figura 251. Energía disipada acumulada por la mezcla AC 22 S durante los ensayos realizados con 15 mm y 50 mm de separación entre apoyos.

Finalmente, analizando los umbrales de daño obtenidos en los ensayos realizados (Figura 252), se puede observar como una disminución en la distancia de separación entre apoyos conlleva un descenso en la resistencia a fisuración en cada una de las etapas del proceso. Además, independientemente del tipo de mezcla, conforme se incrementa el nivel de carga

aplicado en el ensayo, la influencia de la distancia entre apoyos es menos significativa, lo que implica que para niveles altos de carga, la influencia del tipo de defecto situado bajo la capa de mezcla bituminosa se hace menos significativa.

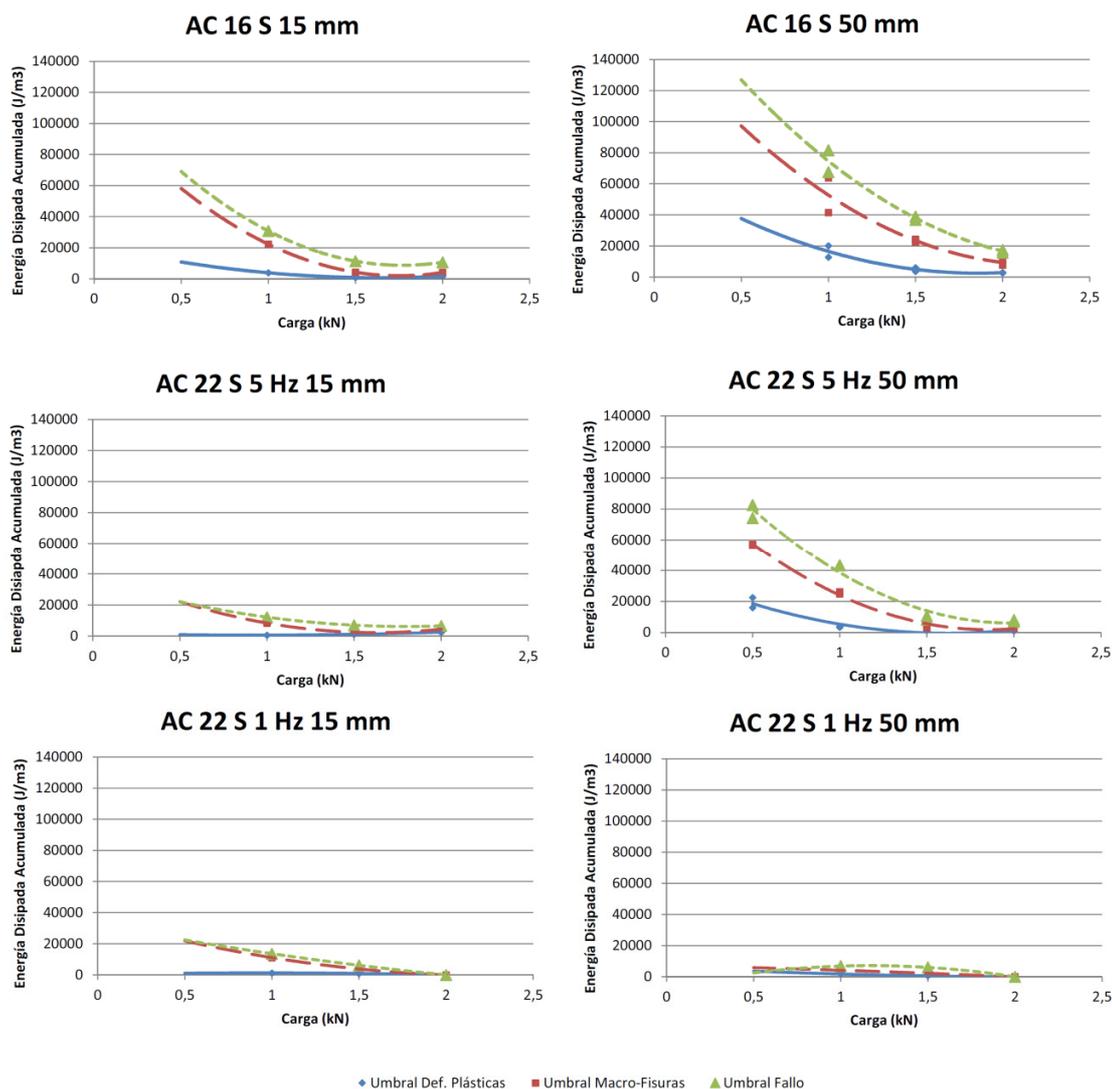


Figura 252. Valores umbrales de daño a fisuración obtenidos para las mezclas AC 16 S y AC 22 S en ensayos realizados con 15 mm y 50 mm de separación entre apoyos.

5.4.3.4. Evaluación de la Influencia de las Condiciones de Ensayo en el Comportamiento a Fisuración de Mezclas Bituminosas

A modo de síntesis de los apartados anteriores, en este punto se resumen los efectos que las diferentes condiciones de ensayo analizadas ejercen sobre el comportamiento a fisuración del material.

En base a los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas, podemos decir que independientemente del tipo de mezcla analizado, y de las condiciones de ensayo utilizadas, la energía disipada en cada ciclo de carga durante el desarrollo del proceso de fisuración por fatiga va aumentando con el paso de los ciclos (lo que indica la evolución del daño en el material). Así, los materiales que disipen menor cantidad de energía por ciclo durante el transcurso del ensayo (para las mismas condiciones de ensayo), tendrán un mejor comportamiento a fisuración. En este mismo sentido, los materiales que tienen un mejor comportamiento a fisuración muestran una mayor cantidad de energía disipada acumulada al final del ensayo, puesto que es necesario introducir una mayor cantidad de energía para provocar su fallo.

En relación a las condiciones de ensayo, se puede afirmar que la energía disipada en cada ciclo del proceso de fisuración (dentro del volumen representativo de estudio) es creciente conforme se incrementa el nivel de carga aplicado (ya que se realiza un mayor trabajo sobre el sistema, y se provoca una cantidad de daño mayor), conforme se aumenta la temperatura de acondicionamiento (puesto que el material bituminoso se comporta de manera menos elástica y disipa más energía, produciéndose mayor daño para las mismas condiciones de carga), y conforme se disminuye la frecuencia (dado que las cargas con velocidad lenta de aplicación provocan mayores deformaciones en los materiales viscoelásticos). La distancia entre apoyos tiene una baja influencia en la energía disipada por el material en cada ciclo del proceso, siendo muy similar para las dos configuraciones analizadas (aunque ligeramente superior cuando se disminuye la distancia).

De la misma forma, los valores de energía disipada acumulada muestran como una disminución de la amplitud de carga aplicada, provoca un efecto positivo en el

comportamiento a fisuración de los materiales bituminosos (independientemente del tipo y de las condiciones de ensayo), de manera que aumenta su vida de fisuración por fatiga (e. g. cuanto menor es la amplitud de carga, mayor cantidad de energía es necesaria introducir en el sistema para provocar el fallo del material). Así, conforme se disminuye la amplitud de carga aplicada aumentan los umbrales de daño asociados a las mezclas. Esta mejora en el comportamiento del material se aprecia sobre todo en las fases de desarrollo de deformaciones plásticas y de micro/meso fisuración (la influencia del nivel de carga es menor cuando el material se encuentra en un estado de daño irreversible o macro-fisura).

Un incremento de la temperatura de ensayo, un descenso de la frecuencia y/o de la distancia entre apoyos, y la presencia de humedad en el material, provocan una caída de los umbrales de daño, y por tanto un descenso en su resistencia ante la propagación de fisuras por fatiga. Para bajas velocidades de circulación la influencia de la carga por eje es menor, de manera que el daño causado es muy similar (umbrales de daño quasi-constant). Este hecho refleja la importancia de la velocidad de circulación en el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, la cual ve disminuida su influencia cuando la discontinuidad situada debajo de la capa de mezcla bituminosa (distancia inicial entre apoyos) se reduce.

Finalmente podemos apuntar que los valores de RDEC calculados en las diferentes pruebas confirman que el daño por fisuración producido en el material, aumenta conforme se incrementa el nivel de carga aplicado y la temperatura de acondicionamiento, y conforme se disminuye la frecuencia y la distancia de separación entre apoyos.

En base a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para evaluar la sensibilidad a las condiciones de ensayo del método UGR-FACT, podemos decir que el tráfico más pesado, circulando a velocidades más lentas, y a temperaturas de servicio más elevadas, provocará un desarrollo más rápido de la patología de fisuración por fatiga (sin considerar relevante la influencia del tipo de defecto bajo la capa de aglomerado). No obstante, a pesar de que estas conclusiones coinciden con el comportamiento de los materiales de naturaleza visco-elástica, es necesario llevar a cabo un estudio en mayor profundidad que permita definir

qué rango de cargas, temperaturas y frecuencias son más propicias para el desarrollo del fenómeno de fisuración por fatiga en mezclas bituminosas.

5.4.4. Análisis de la Sensibilidad de los Materiales Evaluados

Para que un método de ensayo sea efectivo en el diseño de mezclas bituminosas es necesario que sus resultados muestren una buena sensibilidad a las modificaciones realizadas en los materiales que las componen. En lo que sigue se exponen los resultados obtenidos en dos estudios en los que se evalúa la sensibilidad del UGR-FACT frente a la variación en la composición de la mezcla. Así, el primer estudio se centra en el análisis del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas de similares características, pero fabricadas con áridos gruesos de diferente naturaleza, mientras que el segundo analiza la respuesta mecánica de mezclas bituminosas en las que únicamente se modificó el tipo de ligante utilizado.

5.4.4.1. Naturaleza del Árido

Para el estudio de la influencia de la naturaleza del árido en el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas se emplearon dos mezclas de similares características, una AC 16 S y una AC 22 S, cuya composición únicamente variaba en la naturaleza del árido grueso (ofítico y calizo respectivamente). El comportamiento mecánico de dichos materiales se evaluó bajo diferentes condiciones de ensayos a través del método UGR-FACT, empleando para ello distintos escalones de carga (2 kN; 1,5 kN; 1 kN; 0,5 kN), dos frecuencias (1 Hz y 5 Hz), dos distancias entre apoyos (15 mm y 50 mm), y dos temperaturas (3 °C y 20 °C).

La Figura 253 muestra los resultados obtenidos en las pruebas llevadas a cabo para las diferentes condiciones de ensayo en la relación amplitud de carga aplicada y el ciclo de fallo. Como se puede observar, independientemente de la frecuencia, temperatura o distancia entre apoyos utilizada, la vida de fatiga de la mezcla AC 16 S se muestra superior a

la de la mezcla AC 22 S. Así, podemos afirmar que la mezcla AC 16 S presenta un mejor diseño a fisuración por fatiga, que viene dado por la naturaleza del árido grueso ofítico utilizado, más resistente que el calizo empleado en la mezcla AC 22 S.

A pesar de ello, en función de las condiciones de ensayo, la diferencia de comportamiento entre ambas mezclas es más o menos acentuada. Así, las menores diferencias aparecen cuando se reduce la distancia entre apoyos y para velocidades bajas de aplicación de carga. Por otra parte, a bajas temperaturas se muestran las mayores diferencias en el comportamiento a fatiga, aunque hemos de destacar que estas condiciones de ensayo son las más favorables para ambas mezclas en términos del límite de resistencia a fatiga (lo que significa que las mezclas soportarán sin dañarse un tráfico más pesado, que en el caso de temperaturas de servicio de 20 °C).

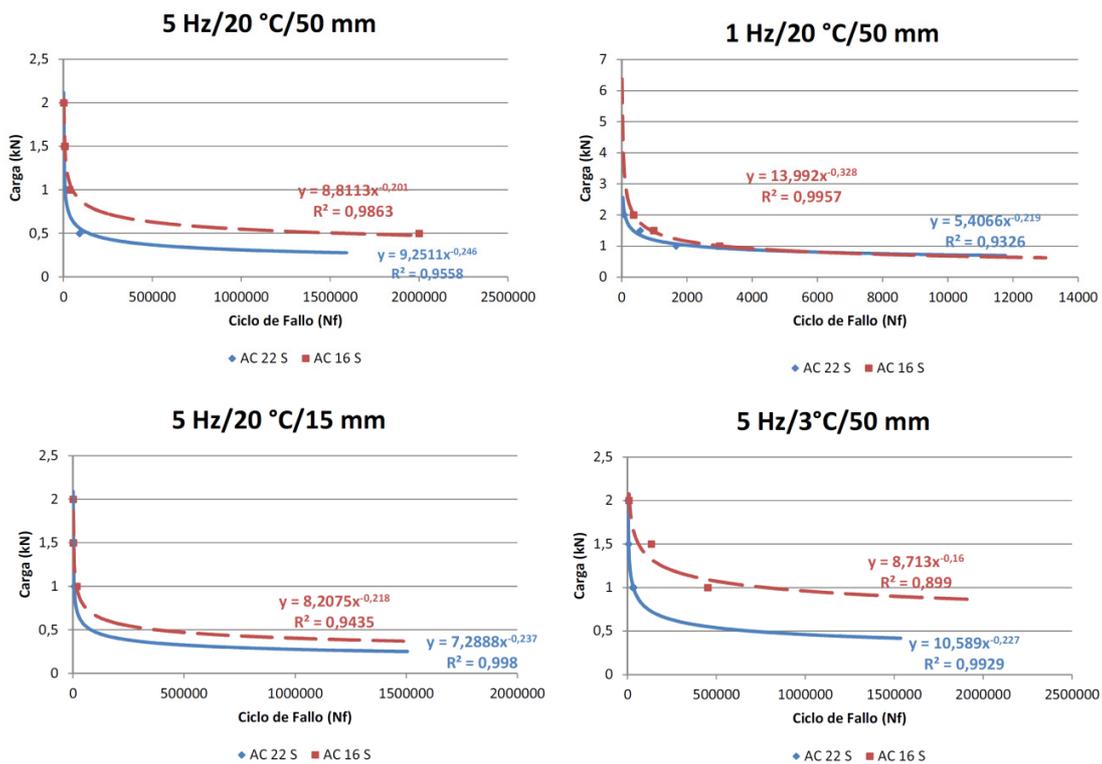


Figura 253. Leyes de fisuración por fatiga de las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas bajo diferentes condiciones de ensayo.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

Las Figuras 254-257 muestran los valores de energía disipada obtenidos en cada ensayo. Realizando un análisis comparativo entre ambas mezclas, se observa exactamente la misma tendencia que en el análisis fenomenológico de ciclo de fallo. Independientemente de las condiciones de ensayo aplicadas, la energía disipada por la mezcla AC 22 S en cada ciclo de carga es mayor que la disipada por la mezcla AC 16 S, por tanto el daño a fisuración producido en la misma es mayor (lo que provoca su fallo más temprano).

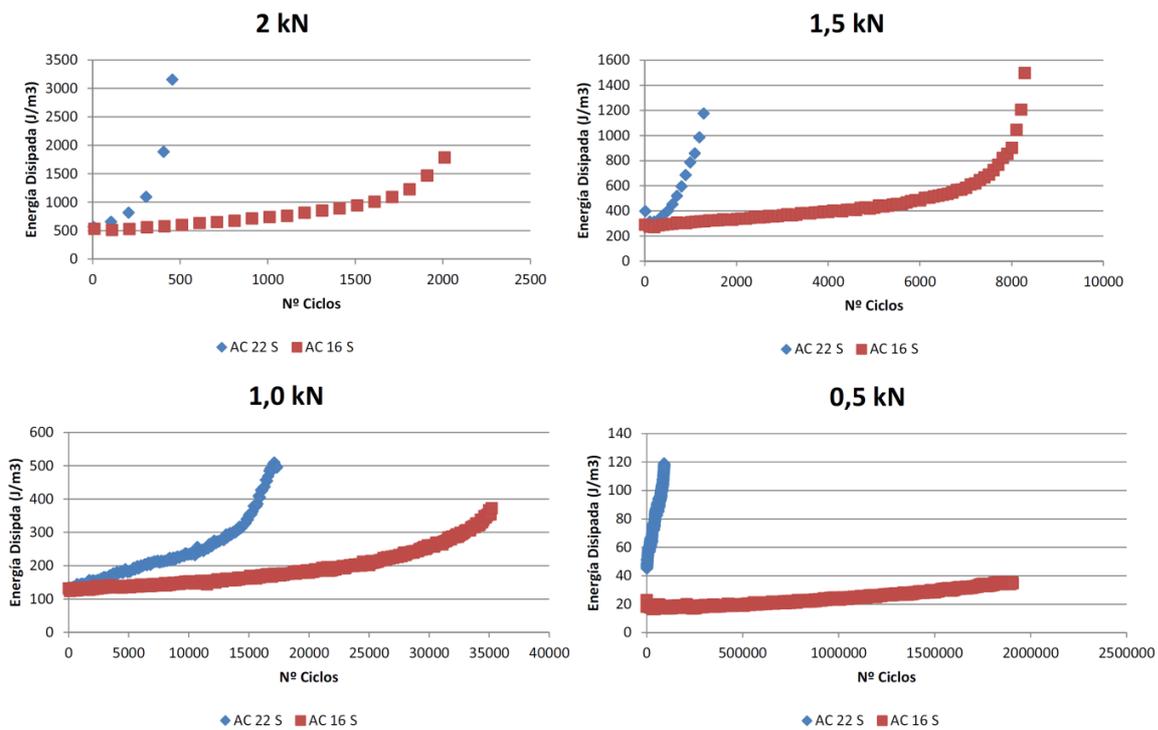


Figura 254. Energía disipada por las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 5 Hz de frecuencia, 20 °C de temperatura y una distancia entre apoyos de 50 mm.

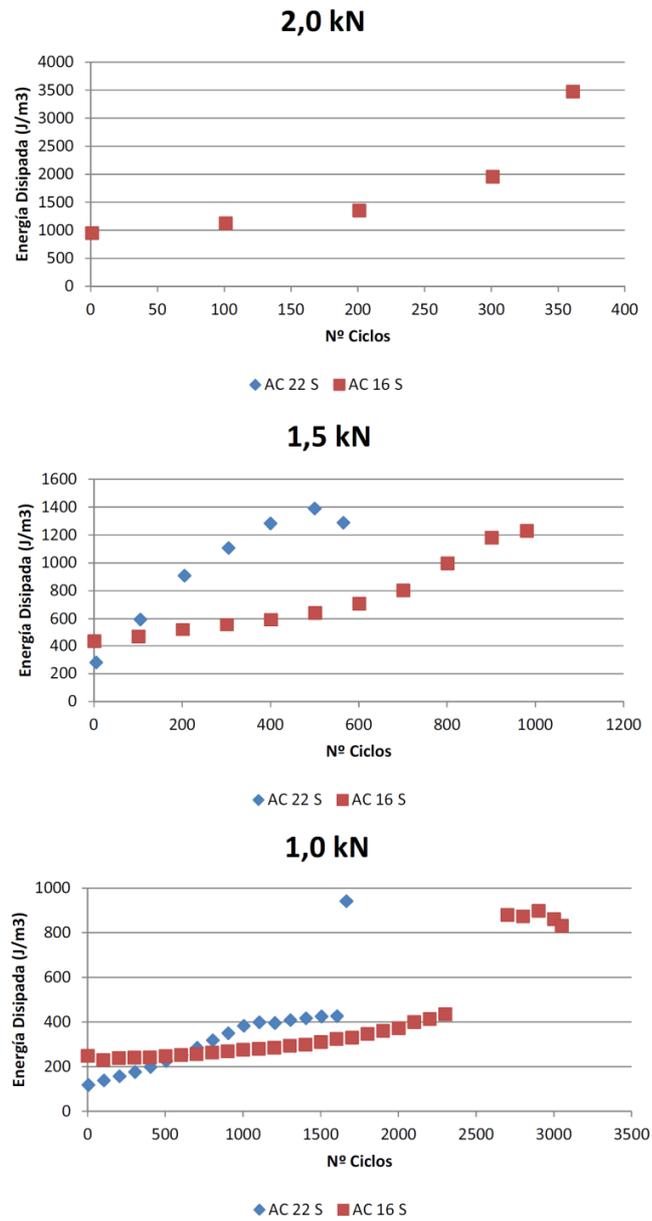


Figura 255. Energía disipada por las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 1 Hz de frecuencia, 20 °C de temperatura y una distancia entre apoyos de 50 mm.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

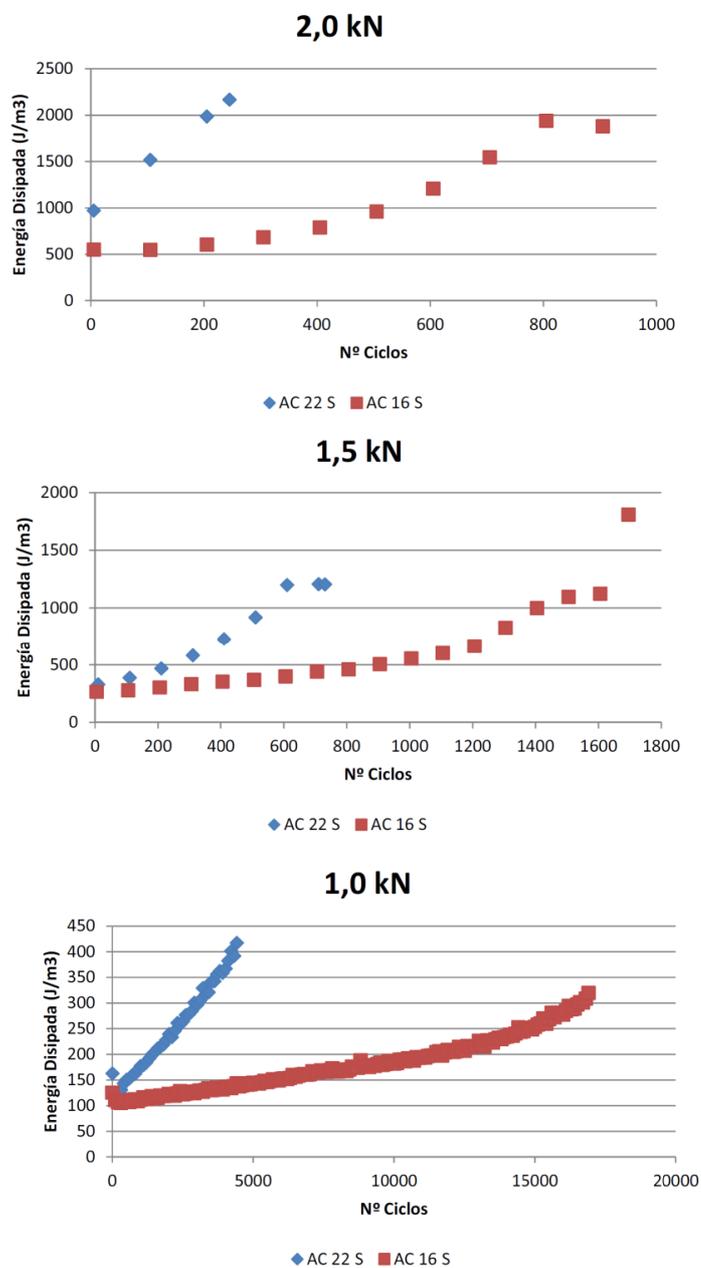


Figura 256. Energía disipada por las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 5 Hz de frecuencia, 20 °C de temperatura y una distancia entre apoyos de 15 mm.

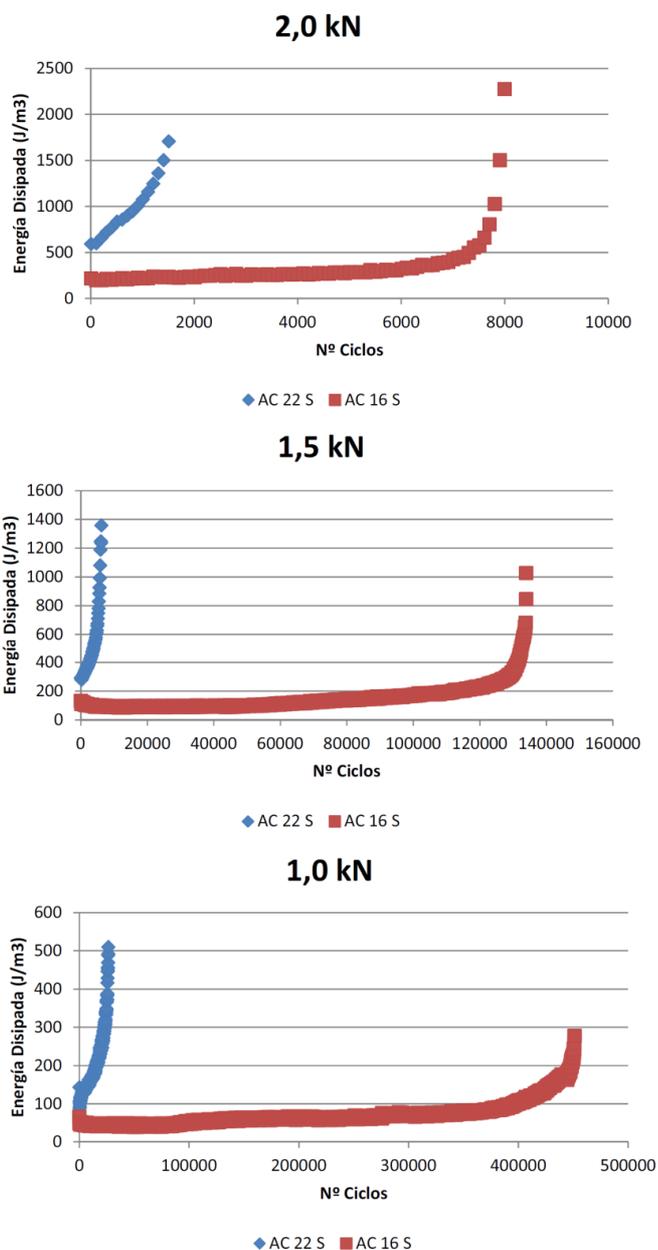


Figura 257. Energía disipada por las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas a 5 Hz de frecuencia, 3 °C de temperatura y una distancia entre apoyos de 50 mm.

Destacar que la tendencia mostrada por los valores de energía disipada en ambas mezclas es la misma, lo cual refuerza la repetibilidad de los resultados del método de ensayo desarrollado. Por otra parte, en algunos de los resultados mostrados existen particularidades, como que en la mezcla AC 16 S ensayada a 0,5 kN, 5 Hz, 20 °C y 50 mm de

distancia entre apoyos, los valores de energía disipada mostrados no son debidos al fallo del material, puesto que dicho ensayo se detuvo por alcanzar los 2.000.000 de ciclos. Además, en el caso de la mezcla AC 22 S ensayada a 2 kN, 1 Hz y 20 °C, no se mostraron los resultados de energía disipada porque el fallo del material ocurrió antes de alcanzar los 100 primeros ciclos de carga.

Los parámetros de daño medio calculados a partir de los valores de RDEC acumulado aparecen reflejados en la Figura 258. El análisis del comportamiento a fisuración de ambas mezclas ante este parámetro también demuestra la mejor respuesta de la AC 16 S, independientemente de las condiciones de ensayo aplicadas. Así el daño a fisuración asociado a este material es mucho menor que el asociado a la mezcla AC 22 S, por lo que podemos decir que el empleo del árido adecuado puede contribuir de forma directa a mejorar la resistencia de los materiales bituminosos (alargando como ya hemos visto, su vida de fatiga).

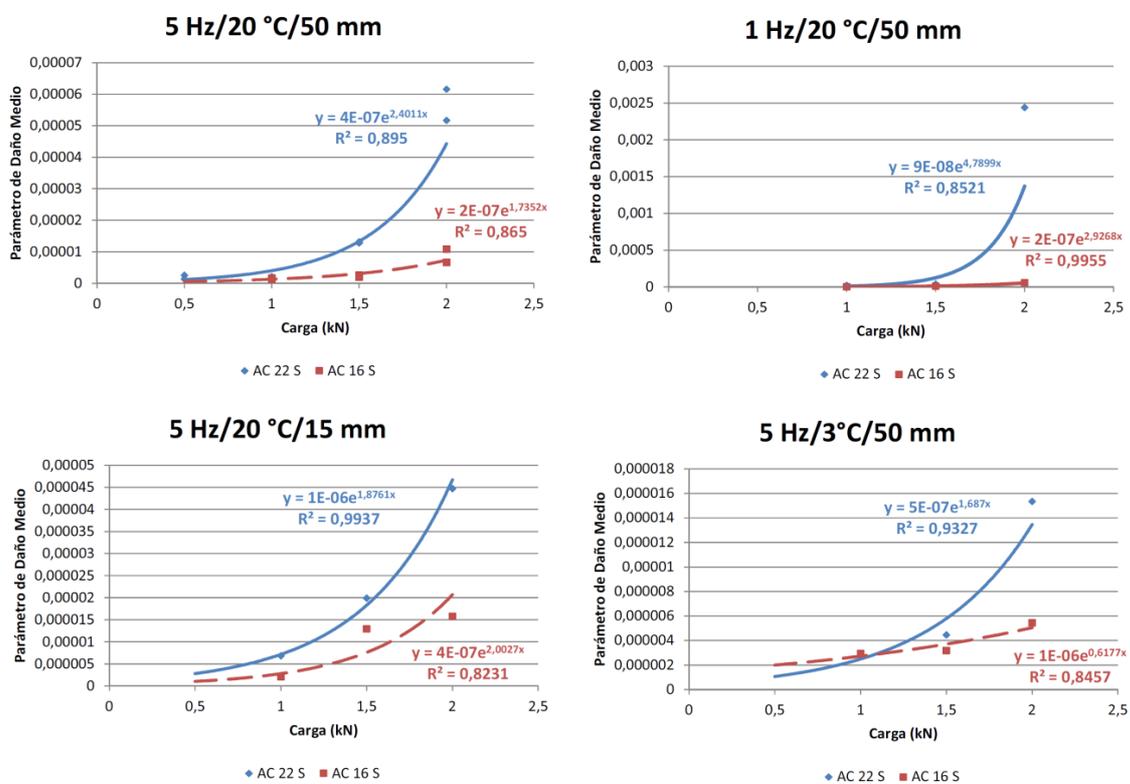


Figura 258. Parámetros de daño medio obtenidos para las mezclas AC 16 S y AC 22 S bajo diferentes condiciones de ensayo.

Finalmente, analizando los umbrales de daño obtenidos para cada material en los diferentes ensayos (Figura 259), se puede observar de forma clara como la mezcla AC 16 S se comporta considerablemente mejor que la mezcla AC 22 S. La mezcla AC 16 S presenta unos umbrales de daño mayores en todas las fases del proceso de fisuración, lo que indica que es necesario realizar un trabajo mayor para provocar su fallo. A pesar de ello, conforme se incrementa el nivel de carga aplicado, menor es la diferencia entre el comportamiento de ambos materiales, y más similar es la energía necesaria para provocar su fallo.

Comparando los umbrales de ambas mezclas se pone de manifiesto como la velocidad de propagación del daño por fisuración en la mezcla AC 22 S es mayor (puesto que el área contenida entre umbrales es menor) que en el caso de la AC 16 S. En este sentido, se puede decir que la mezcla AC 16 S tiene una mayor capacidad de deformar plásticamente antes de iniciar el proceso de fisuración por fatiga (quizás por la mayor resistencia del esqueleto mineral), pero también opone mayor resistencia a la propagación de este fenómeno una vez iniciado la micro y macro fisuración (debido a la mayor resistencia a fractura de los áridos).

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

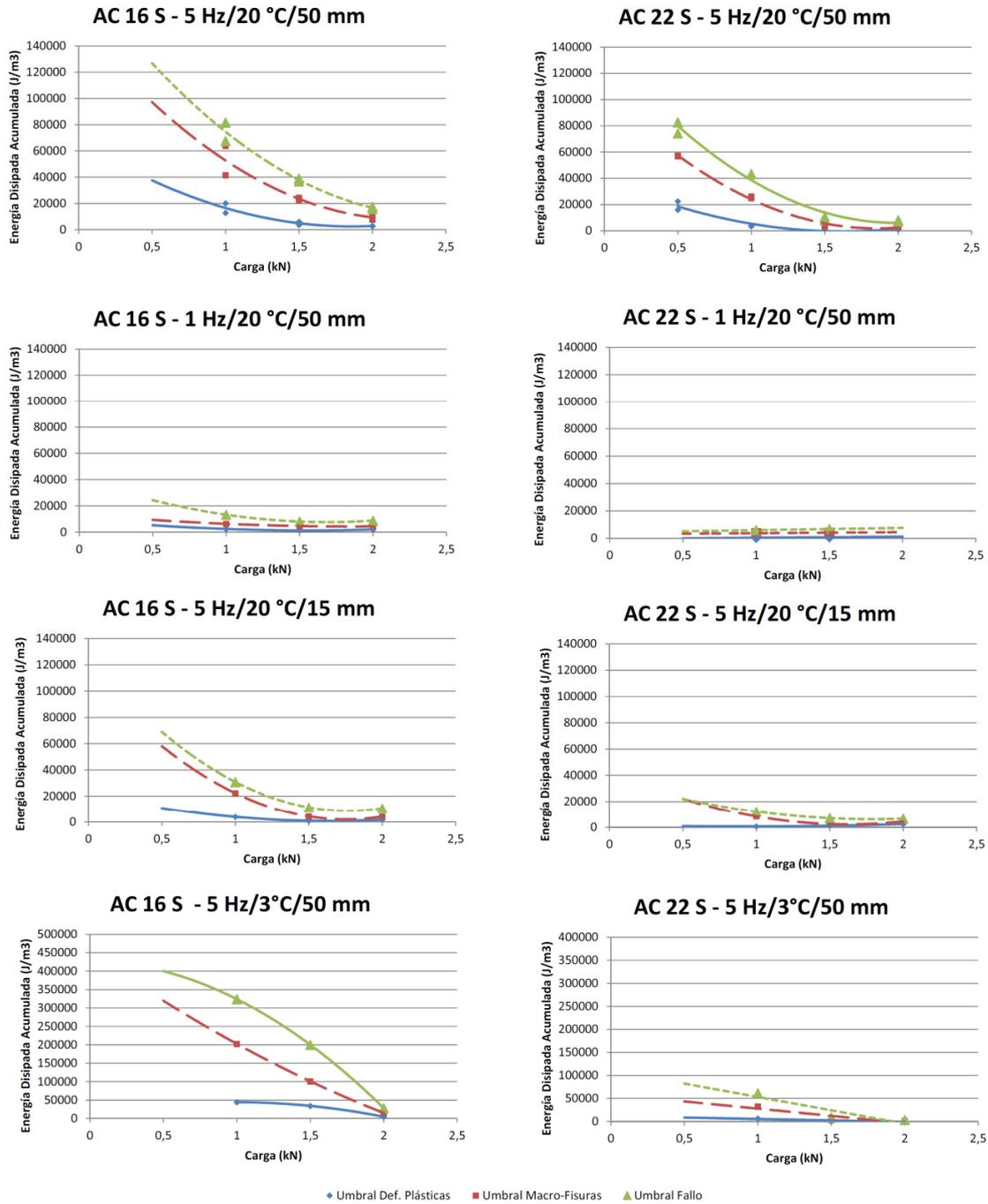


Figura 259. Umbrales de daño a fisuración para las mezclas AC 16 S y AC 22 S ensayadas bajo diferentes condiciones de carga.

A pesar de la gran similitud de características entre ambas mezclas (en las que se utilizó el mismo tipo de betún y esqueleto mineral), el ensayo desarrollado en esta investigación ha demostrado tener la precisión suficiente para poder poner de manifiesto cuál de ellas ofrece un comportamiento más favorable ante el desarrollo y propagación de fisuras por fatiga. Además, este estudio ha servido para mostrar la influencia de la naturaleza del árido en el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas.

Normalmente el proceso de fisuración se inicia en la matriz compuesta por el ligante, y se va desarrollando por zonas de debilidad del material como los huecos o las superficies de contacto árido-ligante. No obstante, una vez iniciado el proceso de fisuración, si el árido no es lo suficientemente resistente, se fractura y el proceso continúa a través de él. De la misma forma, si el árido opone resistencia, el proceso de fisuración ha de rodearlo para continuar su propagación, consumiendo una mayor energía para ello.

En la Figura 260 podemos observar como los áridos de naturaleza caliza quedan fracturados tras la ejecución del ensayo por la zona donde se propaga la macro-fisura (tridimensional). Este tipo de árido, al oponer menor resistencia provoca que sea necesario introducir un trabajo menor para inducir la aparición de una fisura en la mezcla. Por el contrario, podemos observar como en el caso de la mezcla con árido ofítico es el ligante el que se fractura (material que es común en ambas mezclas), quedando el árido intacto y rodeado por la macro-fisura.

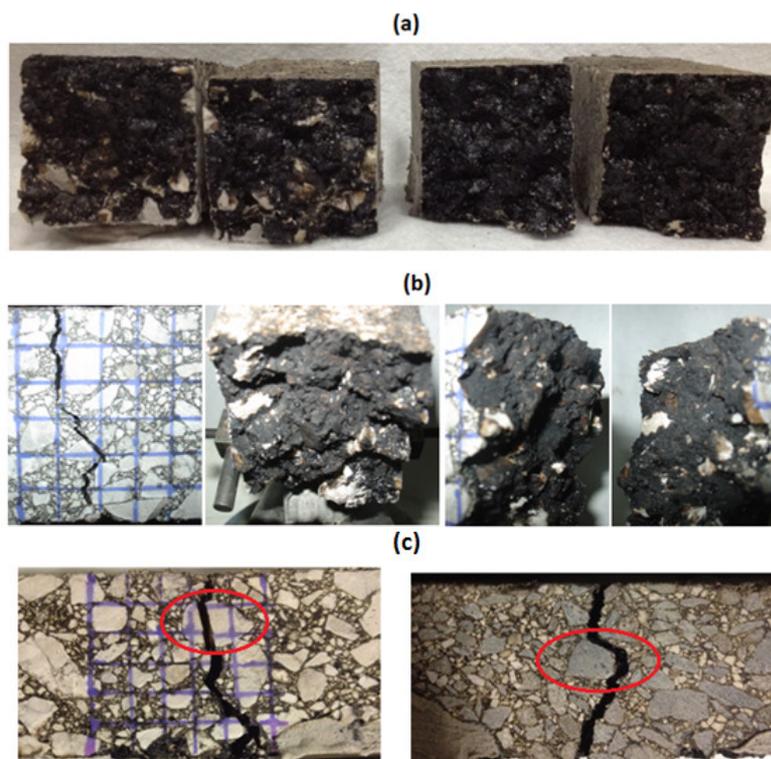


Figura 260. (a) Áridos fracturados en probeta de AC 22 S caliza (izq.), e intactos en probeta de AC 16 S ofita (dcha.); (b) Detalle del proceso de fractura de los áridos calizos durante la propagación de la macro-fisura; (c) detalle del proceso de propagación de la macro-fisura fracturando el árido calizo (izq.) y rodeando el ofítico (dcha.).

5.4.4.2. Tipo de Ligante

Finalmente, la última parte del plan de ensayos llevado a cabo en esta tesis doctoral tiene como objetivo valorar la sensibilidad del método de ensayo UGR-FACT al tipo de betún empleado en la fabricación de la mezcla. Así, se evaluó el comportamiento a fisuración por fatiga de una mezcla BBTM 11A elaborada con diferentes tipos de ligantes convencionales y modificados (BM3c, BMAVC, B50/70+1,5%PNFU por vía seca, y B50/70). Para ello se utilizaron diferentes escalones de amplitud de carga (0,5 kN; 0,75 kN; 1,0 kN), dejando fijas la frecuencia de ensayo (5 Hz), la temperatura (20 °C), y la distancia entre apoyos (0 mm).

En la Figura 261 aparecen los resultados obtenidos en el análisis fenomenológico entre el nivel de carga aplicado y el ciclo de fallo asociado. Como se puede observar, la vida de fatiga de los betunes modificados (ya sea con polímeros SBS, o con PNFU por vía seca o vía

húmeda) son muy similares entre sí, siendo considerablemente superiores a la de la mezcla fabricada con el betún convencional, poniendo de manifiesto el peor comportamiento de este material ante los fenómenos de fisuración por fatiga. Estos resultados demuestran claramente la sensibilidad del método de ensayo UGR-FACT ante el empleo de ligantes convencionales o modificados en la fabricación de la mezcla.

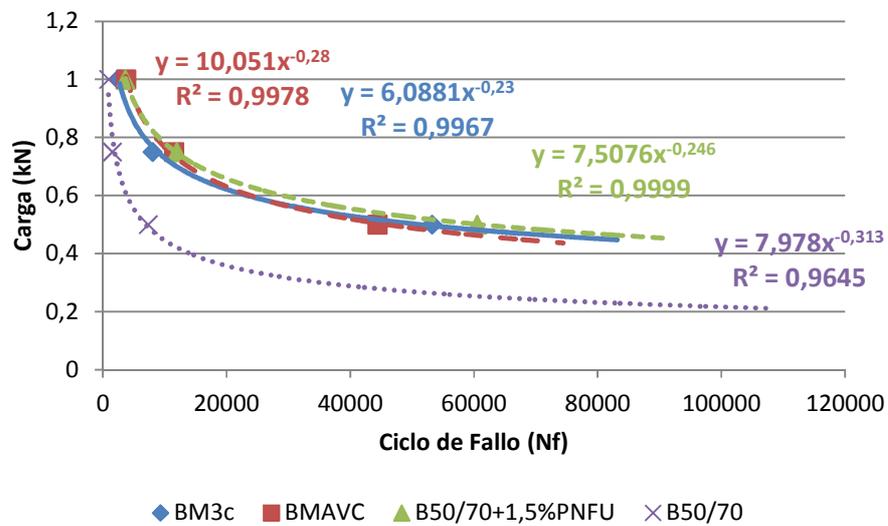


Figura 261. Leyes de fisuración por fatiga de las mezclas BBTM11A fabricadas con diferentes tipos de ligante.

La Figura 262 recoge los valores de energía disipada calculados durante los diferentes ensayos realizados. En ella se puede observar como para las etapas iniciales del proceso (deformaciones plásticas y micro-fisuración), la energía disipada por la mezcla fabricada con PNFU por vía seca al 1,5% (sobre peso total de la mezcla) es inferior a la disipada por las mezclas fabricadas con los betunes modificados con PNFU por vía húmeda, con polímeros SBS, o el betún convencional. Debido a este hecho, el daño producido a fisuración en el material es inferior al del resto de materiales, y por ello el inicio de una macro-fisura se retrasa en el tiempo. Este aspecto queda patente en las imágenes tomadas durante el estudio llevado a cabo en la anterior etapa con las mismas mezclas (Figuras 198-200, 204-206Y y 210-212), en las que se muestra como el inicio de la macro-fisura en este material

empieza más tarde que en las mezclas fabricadas con los otros ligantes (independientemente del tipo de carga aplicado).

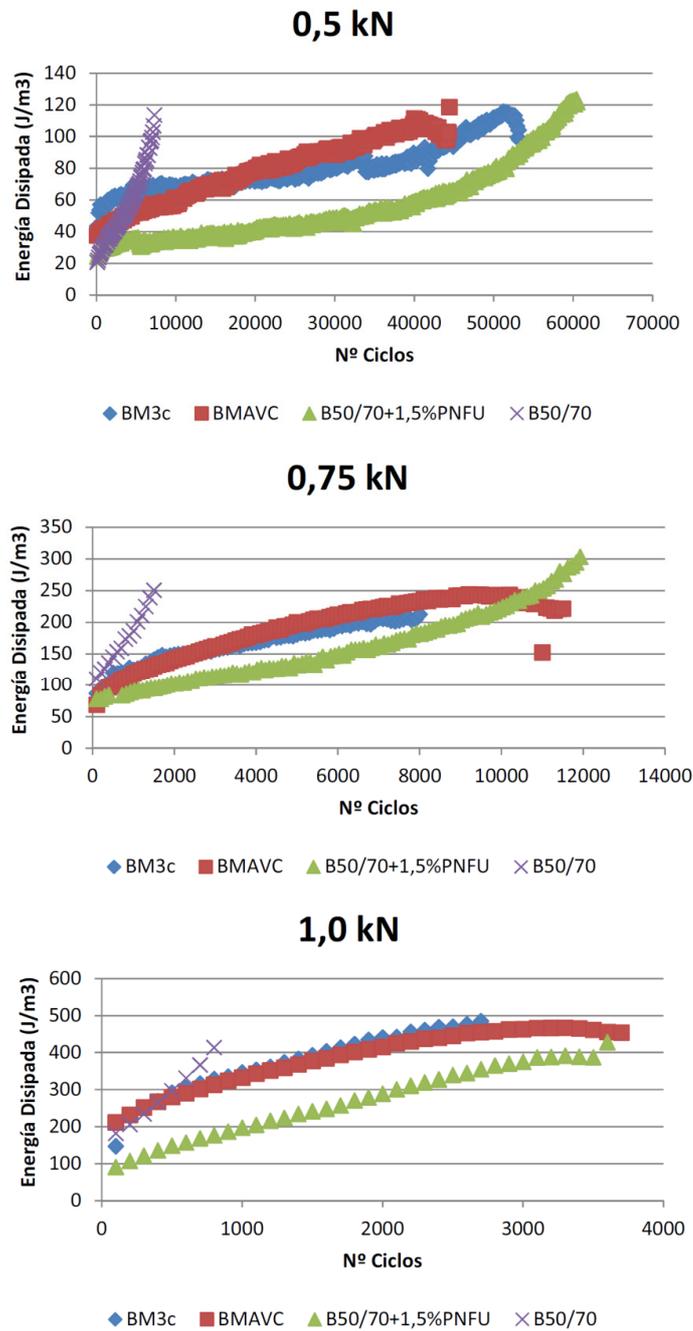


Figura 262. Energía disipada en los ensayos llevados a cabo con la mezcla BBTM 11A fabricada con diferentes tipos de ligante.

Tal y como demuestran algunos estudios (Moreno & Rubio 2012; Moreno et al. 2013), las mezclas fabricadas con PNFU por vía seca tienen una mayor rigidez que las fabricadas con los otros ligantes. Este aspecto contribuye a retardar la formación de deformaciones plásticas (y por tanto a resistir el inicio del fenómeno de fisuración), pero por otra parte hace que la mezcla se comporte de forma más rígida y por tanto, una vez iniciada la macrofisura, ésta se propague de forma más rápida a través del material. Así, en la última etapa del ensayo la energía disipada por la mezcla fabricada con PNFU por vía seca va aumentando en cada ciclo de carga adicional, hasta llegar a superar la energía disipada por los materiales fabricados con los otros ligantes.

En base a la Figura 262 podemos destacar otros aspectos como son la rápida tasa de disipación de energía de la mezcla fabricada con el betún convencional, lo cual indica su rápida propagación del daño a fisuración (y de ahí su baja vida de fatiga). Además, los resultados obtenidos en términos de energía disipada para las mezclas fabricadas con el betún de altas prestaciones modificado con polímeros SBS y el betún de alta viscosidad modificado con PNFU por vía húmeda son muy similares. Este hecho indica que las prestaciones ofrecidas por ambos betunes son comparables, lo cual resulta positivo para el ligante fabricado a partir del sub-producto de caucho.

Analizando los valores de RDEC acumulado podemos observar como el daño a fisuración sufrido por la mezcla fabricada con el betún B50/70 convencional se propaga de forma mucho más rápida que en el caso de los betunes modificados (Figura 263). Dentro de estos últimos, se contrasta lo expuesto anteriormente, de manera que se observa como la propagación de dicho daño en el betún modificado con PNFU por vía seca empieza siendo menor, pero termina superando al resto. Además, también se observa una propagación de daño muy similar entre el BMAVC y el BM3c.

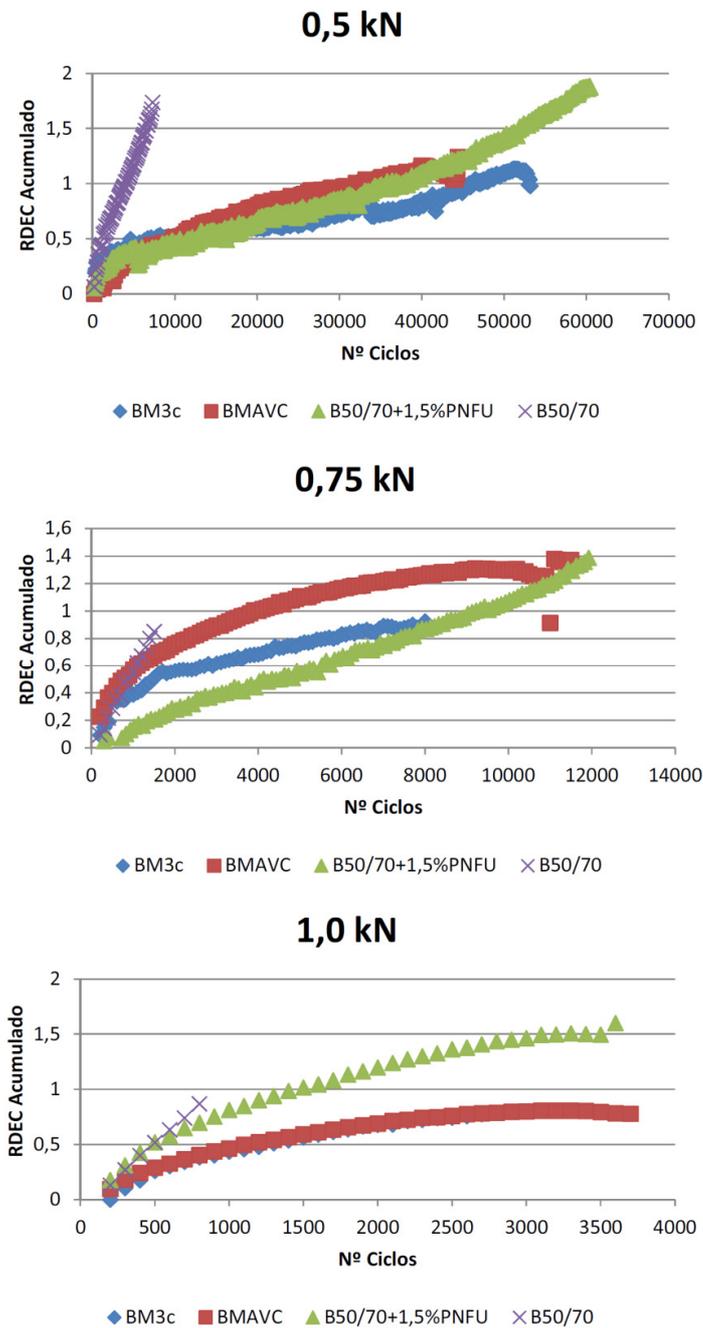


Figura 263. Valores de RDEC acumulado obtenidos en la evaluación del comportamiento a fisuración de la mezcla BBTM11A fabricada con diferentes tipos de ligante.

En este sentido, en las imágenes mostradas en la Figura 264 se puede observar el estado de daño en los ciclos de fallo de cada material ensayado bajo las mismas condiciones y nivel de

carga. Analizando la imagen de la mezcla fabricada con betún B50/70 modificado con PNFU por vía seca se corrobora como su fractura se produce limpia, con aspecto delgado y sin desdoblamientos, típico de materiales más rígidos y de una propagación de la fisura más rápida. Por su parte, la fisuración ofrecida por los betunes modificados BM3c y BMAVC aparece más ramificada y con una superficie de fallo dominante de mayor grosor. Este hecho es típico de materiales con una fisuración más plástica (la cual retarda el proceso una vez iniciado), capaz de fisurar por varias zonas hasta que se van uniendo y forman una macro-grieta principal. Finalmente, el fallo producido en el betún convencional muestra una macro-fisura más limpia que en el caso de los modificados, pero con un grosor superior al del mostrado con el betún modificado con PNFU por vía seca, lo que indica una rotura más rápida y brusca.

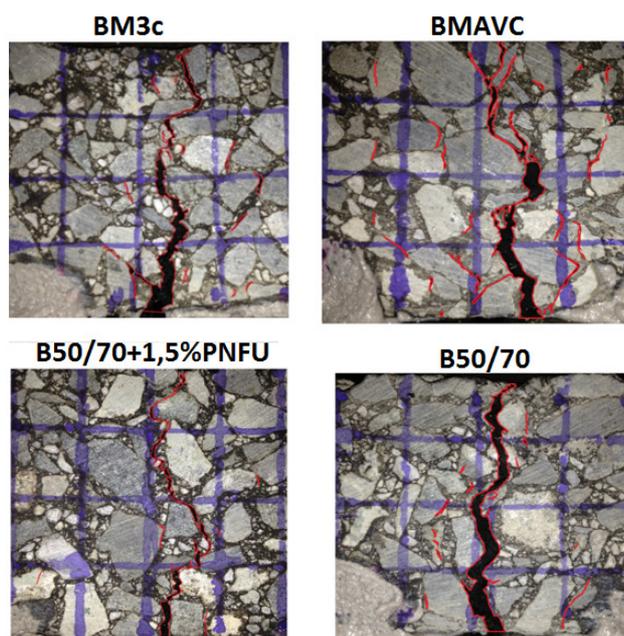


Figura 264. Estado de daño en su ciclo de fallo de cada una de las mezclas BBTM11A estudiadas.

A partir de los valores de RDEC acumulado, se llevó a cabo el cálculo del parámetro de daño medio para cada uno de los niveles de carga en las diferentes mezclas estudiadas (Figura 265). Como se puede observar, las mezclas fabricadas con betunes modificados muestran

un parámetro característico de daño a fisuración más bajo que los de la mezcla fabricada con un betún convencional (independientemente del tipo de carga). Dentro de los betunes modificados, los que emplean PNFU en su fabricación ofrecen una mejor respuesta ante la fisuración por fatiga que el modificado con polímeros SBS. No obstante, hemos de destacar que debido a su mayor rigidez, para niveles elevados de carga, el daño asociado a la mezcla fabricada con PNFU por vía seca aumenta situándose al mismo nivel que el daño asociado a la mezcla fabricada con BM3c.

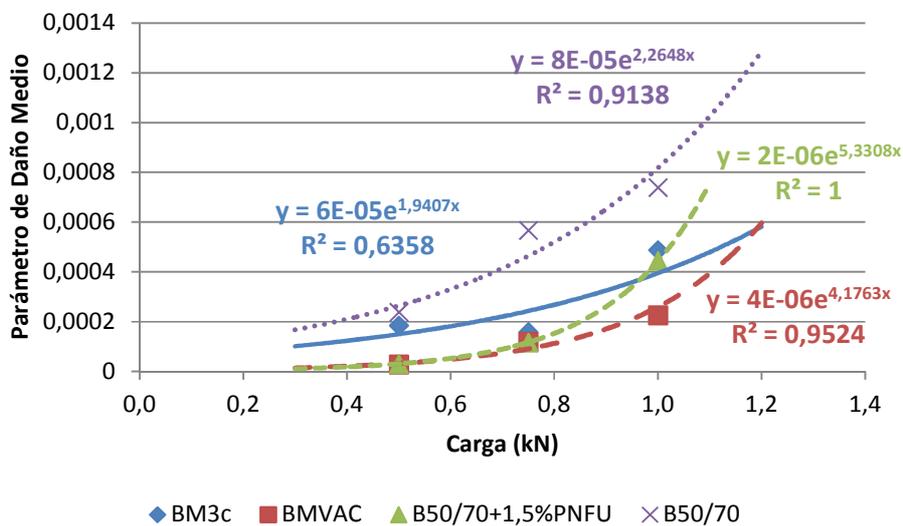


Figura 265. Parámetro de daño medio de la mezcla BBTM11A fabricada con diferentes tipos de ligante.

Finamente, en la última etapa de este estudio se analizará la energía disipada acumulada, y los umbrales de daño obtenidos para los ciclos característicos N_i y N_M a través del parámetro Displacement Ratio. La Figura 266 muestra los valores de energía disipada acumulada para cada uno de los ensayos realizados con las diferentes mezclas. Como se puede observar, los valores de energía disipada necesaria para provocar el fallo de los ligantes modificados es muy superior a la necesaria para provocar la fisuración de la mezcla fabricada con el betún convencional. Además, la energía disipada acumulada por las mezclas fabricadas con betunes modificados son todas del mismo orden, ofreciendo un

comportamiento muy similar en cuanto a tendencia la de las de las mezclas BBTM 11A BM3c y BBTM 11A BMAVC (lo que corrobora la similitud de prestaciones de ambos ligantes).

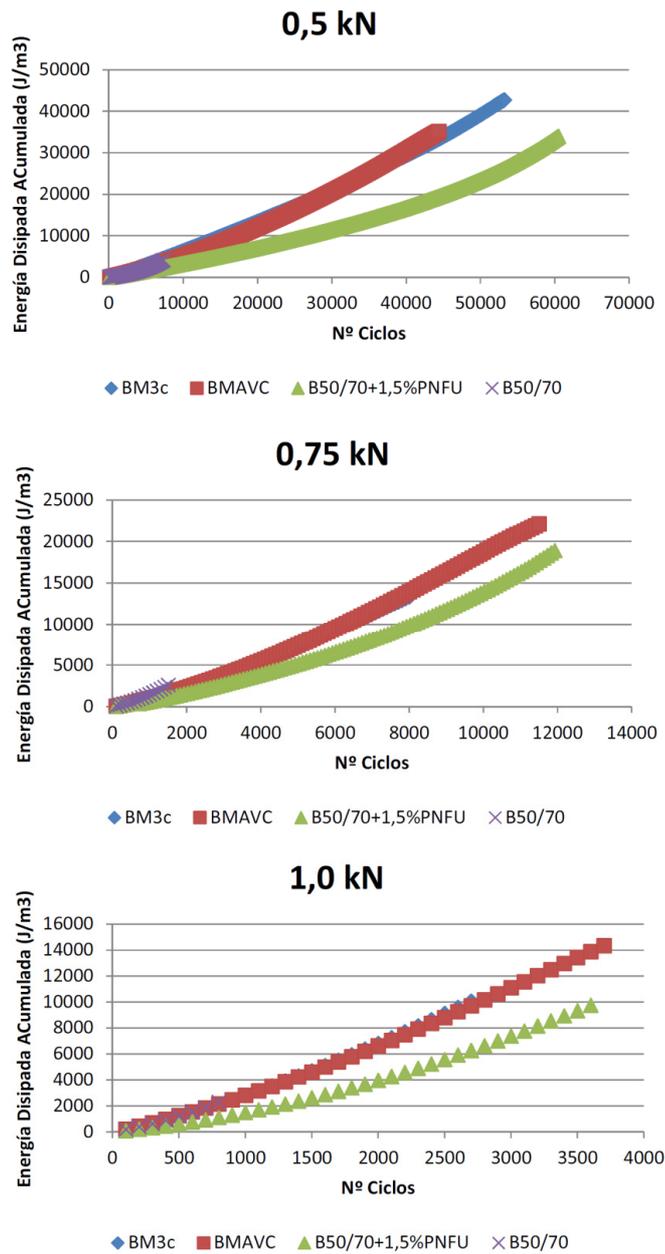


Figura 266. Energía disipada acumulada por la mezcla BBTM11A en función del tipo de ligante utilizado en su fabricación.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

Los umbrales de daño obtenidos para cada una de las mezclas (Figura 267), vuelven a poner de manifiesto las mejores prestaciones en términos de fisuración de las mezclas fabricadas con betunes modificados. Realizando una comparación entre ellos no se encuentran diferencias significativas, aunque podemos observar como los betunes modificados con PNFU (tanto por vía húmeda como seca) requieren una mayor cantidad de energía durante la etapa de deformaciones plásticas y micro-fisuración, de ahí que opongan una mayor resistencia a la propagación de fisuras que el betún BM3c. En términos de macro-fisura, el comportamiento de los tres ligantes modificados es más similar y dependiente de la amplitud de carga.

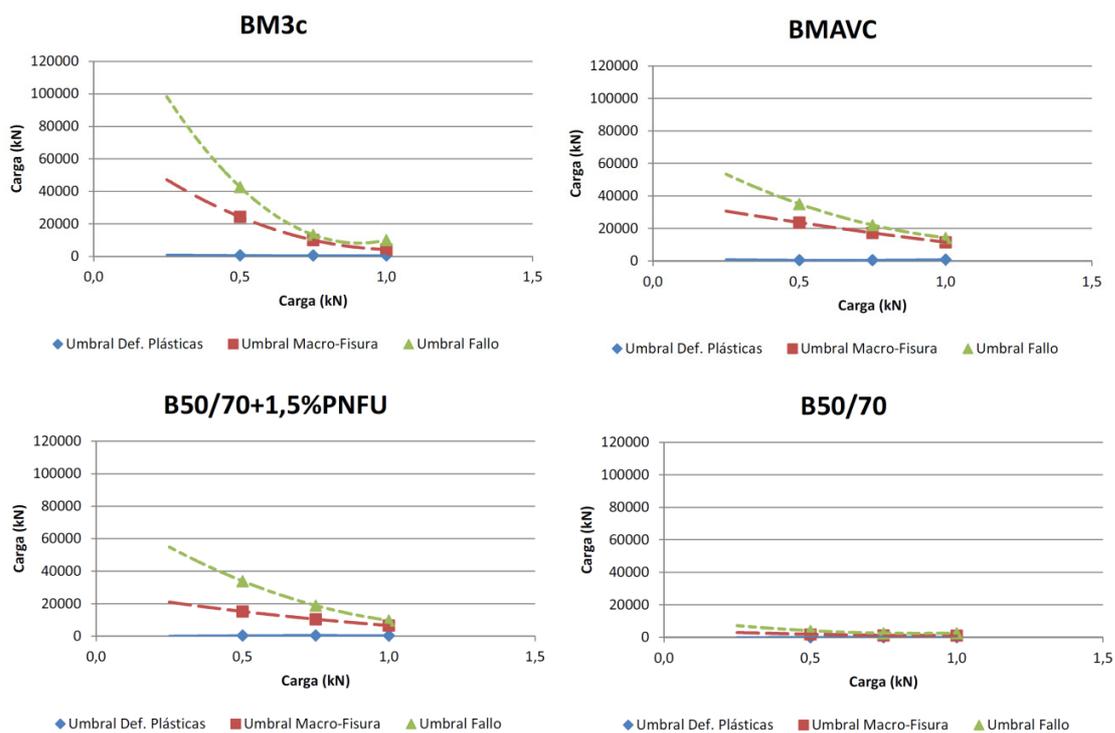


Figura 267. Umbrales de daño a fisuración de la mezcla BBTM11A fabricada con diferentes tipos de ligante.

Como fin a este estudio de la influencia del tipo de ligante en el comportamiento a fisuración de la mezcla podemos apuntar que las mezclas fabricadas con betunes

modificados presentan un comportamiento notablemente mejor que las mezclas fabricadas con betunes convencionales. Este hecho es más que lógico, pero los resultados sirven para verificar la sensibilidad del método de ensayo UGR-FACT ante los cambios de ligante en el diseño de mezclas bituminosas. Además, el método desarrollado en esta investigación también permite establecer diferencias en el análisis de mezclas fabricadas con distintos betunes modificados, observando qué ligante y bajo qué condiciones ofrece una mejor resistencia.

En la Figura 268 se muestra las imágenes de probetas ya ensayadas de las mezclas BBTM 11A fabricadas con los diferentes betunes utilizados en este estudio. Como se puede observar, la fisura en los betunes BM3c y B50/70 se propaga a través de la matriz del ligante sin fracturar el árido. Por el contrario, en las mezclas que utilizan los betunes modificados con PNFU, a pesar de tener exactamente el mismo esqueleto mineral que las anteriores, en este caso aparecen áridos gruesos fracturados.

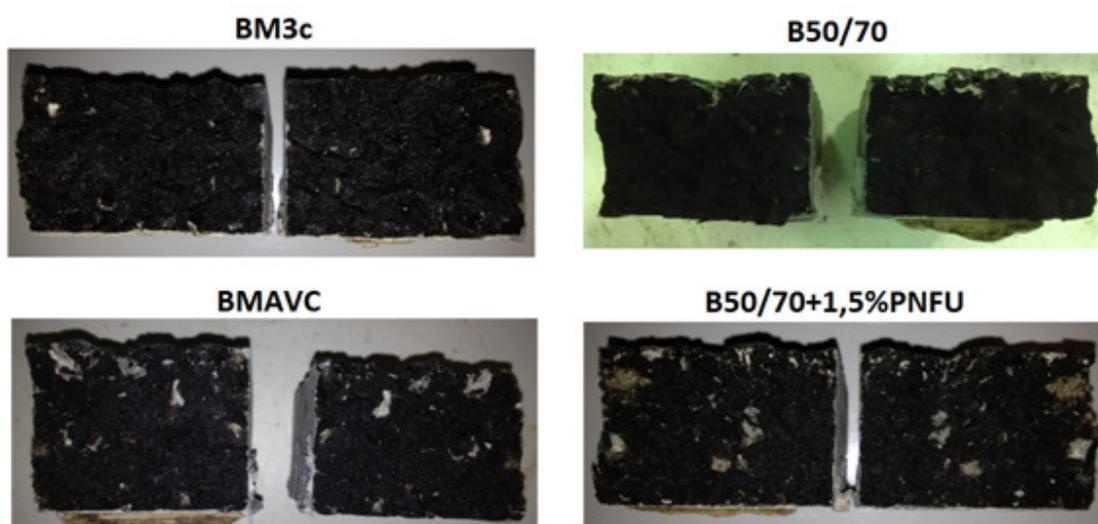


Figura 268. Estado de las probetas de mezcla BBTM11A tras ensayo UGR-FACT.

CONCLUSIONES / CONCLUSIONS

6. CONCLUSIONES

6.1. Introducción

La investigación realizada durante el desarrollo de la presente tesis doctoral comienza con una revisión de los conocimientos sobre el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas. En dicho estudio se pone de manifiesto que los principales causantes de esta patología son los procesos de fatiga asociados al paso del tráfico rodado y a los gradientes térmicos. Además, de entre el conjunto de las soluciones existentes para minimizar su impacto, se observó que la más efectiva es aumentar la resistencia de los materiales utilizados en la construcción del firme. En este sentido, se sentaron las bases para la mejora del diseño de mezclas bituminosas mediante el estudio de su comportamiento mecánico ante los procesos de fisuración.

Como complemento a dicho estudio, se llevó a cabo un análisis de las herramientas existentes para evaluar la respuesta de las mezclas asfálticas ante este fenómeno. Durante la recopilación de los diferentes métodos de ensayo se observó que la mayor parte de ellos únicamente son utilizados en el centro de investigación donde fueron desarrollados. Debido a este hecho, la optimización del diseño de mezclas bituminosas resistentes a fisuración resulta mucho más complicada puesto que no existe una herramienta común que permita establecer unos criterios de referencia.

En este contexto, y teniendo en cuenta los diferentes condicionantes que han limitado el empleo de los métodos de ensayo ya existentes, el objetivo principal de esta tesis doctoral ha sido desarrollar un método de ensayo de laboratorio para el análisis de la resistencia a fisuración de mezclas bituminosas. A continuación se exponen las principales conclusiones de esta investigación.

6.2. Conclusiones Finales

En la exposición de las conclusiones finales se seguirá la misma estructura planteada en la metodología, es decir, en primer lugar las conclusiones relativas al dispositivo de ensayo UGR-FACT, continuando con las relacionadas con las características del método de ensayo, evaluación del comportamiento a fisuración y por último su validación.

Dispositivo de ensayo UGR-FACT

- El dispositivo fabricado es un equipo sencillo de dimensiones reducidas, ligero, que puede ser adaptado a cualquier prensa dinámica de las que existen comúnmente en los centros o laboratorios de investigación dedicados al estudio de este tipo de materiales.
- Durante su fabricación se han utilizado materiales y procesos industriales comunes, siendo su coste económico reducido en comparación con otros dispositivos empleados en ensayos similares. Además, la simplicidad de su funcionamiento mecánico lo convierten en un dispositivo técnicamente fácil de reproducir.
- El dispositivo UGR-FACT permite la evaluación de materiales simples y compuestos, con dimensiones variables, garantizando un estado tensional capaz de inducir sobre un volumen representativo del material evaluado un proceso controlado de inicio y propagación de fisuras, así como un control completo de las deformaciones horizontales y verticales sufridas en dicho volumen.

Características del Método de Ensayo UGR-FACT

- Las probetas utilizadas para la ejecución del ensayo son sencillas y rápidas de fabricar (con geometría prismática, sin ningún tipo de orificio o de entalla), y garantizan la homogeneidad en su composición puesto que son obtenidas a partir de una misma muestra de ensayo. Por otra parte, sus dimensiones permiten una cómoda manipulación durante el ensayo, así como un reducido coste en consumo de materiales. Además, la fijación de la probeta sobre el dispositivo y su retirada tras

la ejecución del ensayo se realiza de forma simple con materiales de común empleo en laboratorios de carretera.

- Las condiciones de carga utilizadas en el método de ensayo han sido adecuadas para tratar de reproducir en la medida de lo posible las tensiones transmitidas por el tráfico, así como su velocidad de circulación y frecuencia de paso. En función de la resistencia del material evaluado, los niveles de amplitud de carga a utilizar variarán, aunque es recomendable emplear valores comprendidos entre 0,25 kN y 1,5 kN. Por otra parte, los estudios llevados a cabo demuestran que el rango de frecuencias más efectivo a la hora de evaluar el comportamiento de mezclas bituminosas se encuentra entre 1 Hz y 5 Hz, en función de las características del tráfico simulado. Estos rangos de valores permiten analizar en profundidad la evolución del daño del material en sus diferentes etapas, sin una duración excesiva del ensayo.
- Las condiciones de ensayo definidas en términos de temperatura, humedad y envejecimiento, han sido definidas de manera que permitan evaluar el comportamiento de los materiales bituminosos bajo circunstancias similares a las de su vida de servicio en el firme. El estudio de los materiales en un rango de temperaturas de 10 °C a 25 °C permitirá analizar su respuesta de forma efectiva en un margen visco-elástico. No obstante, dada la gran influencia de la temperatura en la respuesta del material, lo interesante es desarrollar el ensayo para las diferentes temperaturas a las que vaya a estar sometido durante su vida de servicio.
- La instrumentación utilizada permite obtener una información detallada de las deformaciones producidas en un volumen cercano a la zona de desarrollo del proceso de fisuración, controlando la evolución mecánica del material regularmente, y permitiendo evitar los problemas de aleatoriedad y dispersión tridimensional del fenómeno. Por otra parte, el criterio de fin de ensayo seleccionado permite detectar

de forma intuitiva el fallo del material, proporcionando una referencia clara en la evaluación del comportamiento de la mezcla.

Evaluación del Comportamiento a Fisuración

- El método de evaluación del comportamiento a fisuración UGR-FACT combina los aspectos más positivos del enfoque fenomenológico tradicional, con las ventajas que aporta el estudio de la energía disipada. Utilizando ambos enfoques es posible establecer un estudio en diferentes etapas, que permite analizar con detalle el comportamiento a fisuración de la mezcla.
- La definición de los umbrales de daño permite estudiar la tenacidad y propagación de daño durante las diferentes fases del proceso, de manera que pueda actuarse en el diseño de material para mejorar cada una de ellas. Dichos umbrales representan la energía necesaria para provocar un determinado tipo de daño en la mezcla (deformaciones plásticas, micro-fisuras o macro-fisura), así, cuanto mayores son los umbrales, más resistencia opondrá el material a ser dañado.
- Los nuevos parámetros definidos en esta investigación, Displacement Ratio y Parámetro de daño medio, proporcionan una herramienta útil para el análisis del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, pudiendo ser utilizados en la caracterización y diseño de estos materiales. Por un lado el Displacement Ratio permite definir de manera sencilla cada una de las etapas del proceso de fisuración, coincidiendo con el estado de degradación observado en el material, y manteniendo una tendencia estable en sus valores independientemente de las condiciones de ensayo. Por otro lado, el parámetro de daño medio permite establecer una cuantificación precisa del daño a fisuración producido en el material en cada ciclo, evaluando qué mezclas y bajo qué condiciones de carga son más resistentes ante un proceso de fisuración por fatiga.

Validación del Método de Ensayo UGR-FACT

- La repetibilidad del método de ensayo UGR-FACT se considera dentro de los valores de precisión exigidos en los ensayos de carreteras, y por tanto puede ser aceptado como procedimiento de evaluación del comportamiento a fisuración de materiales bituminosos. Además, a este hecho hemos de sumarle los altos coeficientes de correlación obtenidos en las curvas de aproximación empleadas en el análisis de sus resultados, los cuales muestran un comportamiento homogéneo de los materiales evaluados independientemente de las condiciones de carga.
- La sensibilidad mostrada por el método UGR-FACT para las diferentes condiciones de ensayo resulta adecuada para la evaluación del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas ante diferentes situaciones. Las condiciones de ensayo que mayor influencia ejercen sobre el comportamiento a fisuración de los materiales bituminosos son la amplitud de carga, la frecuencia y la temperatura. En este sentido, conforme se incrementa la amplitud de carga y se disminuye la frecuencia, el daño a fisuración provocado en la mezcla aumenta. Por otro lado, a bajas temperaturas, el material se muestra mucho más resistente a la evolución del daño por fisuración (debido a que se comporta de manera más elástica, recuperando una mayor cantidad de la energía introducida en el sistema sin que ésta se disipe en forma de daño) que a altas temperaturas (en las que se agota muy rápidamente su capacidad de deformar plásticamente, y su baja resistencia hace que aparezcan fisuras de forma más prematura). Finalmente, cuando se disminuye la distancia de separación entre apoyos, la propagación del fenómeno de fisuración se acelera, no obstante, la influencia de esta variable no es comparable con la de la amplitud de carga, frecuencia o temperatura.
- El método de ensayo UGR-FACT permite realizar análisis comparativos del comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas fabricadas con diferentes materiales, estableciendo un criterio objetivo de diseño. Durante los ensayos

llevados a cabo en esta investigación se ha analizado el comportamiento de mezclas con las mismas características en las que únicamente se ha variado la naturaleza del árido grueso empleado, o el tipo de ligante utilizado. Los resultados obtenidos en ambos estudios muestran cómo el método UGR-FACT permite establecer diferencias significativas en el comportamiento mecánico (con resultados coherentes y estables), entre los distintos materiales, independientemente de las condiciones de carga.

6. CONCLUSIONS

6.1. Introduction

The research presented for this thesis began with an overview and discussion of the most recent advances in the response of bituminous mixes to fatigue cracking. This study highlights that the main factors in the development of this road pavement pathology are fatigue processes associated with the passage of vehicle traffic and temperature gradients. Furthermore, of the solutions commonly used to minimize the negative impact, the most effective one involved enhancing the strength of the materials used in road construction. For this reason, the first step in this research was to lay the foundations for the improvement of asphalt mix design by studying the mechanical response of mixes to cracking processes.

To complement of this study, we analysed the existing tools currently used to evaluate mix response to this phenomenon. During this analysis, it was observed that most of these tools were only used at the research centres where they had been created. For these reasons, the optimization of bituminous mixes capable of resisting fatigue cracking is much more complicated since there is no standardized tool or method for establishing a set of reference criteria.

Based on these findings, and taking into account the various conditioning factors that limit the use of existing test methods, the main objective of this thesis was to develop a laboratory test method for the analysis of the resistance of bituminous mixes to fatigue cracking. The following section presents the principal conclusions that can be derived from this research.

6.2. Final Conclusions

The final conclusions have the same structure as the methodological phases of this research. In other words, the conclusions regarding the UGR-FACT test device are the first ones given. They are followed by the conclusions related to the characteristics of the test

method, to the evaluation of mix response to cracking, and finally to the validation of the test method.

UGR- FACT Test Device

- The test device is a simple piece of equipment with reduced dimensions. It is light, not difficult to handle, and it also has the advantage of being easily adapted to any dynamic press, commonly found in laboratories and research centres where bituminous mixes are designed and tested.

- The device was manufactured from materials widely available and with basic industrial processes. The cost of the device is low in comparison to other equipment used for the same purpose. Furthermore, it has a simple mechanism, and is thus a device that from a technical viewpoint, is easy to reproduce.

- The UGR-FACT device is capable of evaluating both simple and compound materials of variable dimensions. The test device provides valuable fatigue-cracking data by initiating and propagating a controlled cracking process in a representative volume of the bituminous mix. The device is able to accurately measure the horizontal and vertical deformations produced in the volume studied.

Characteristics of the UGR-FACT Test Method

- The test specimens used for the test are quickly and easily manufactured (smooth prisms without any type of orifice or notch). Their composition is also homogeneous since they are obtained from a single test sample. Furthermore, because of their dimensions, they can be easily manipulated during the test. Another advantage is the reduced consumption of material. Finally, the specimen is simple to attach and detach from the device, using commonly materials found in all road engineering laboratories.

- The load conditions used in the test method try to reproduce to the degree possible the stresses transmitted by traffic loads, vehicle speed, and the frequency of passing vehicles. Depending on the strength of the material evaluated, the load amplitude levels vary, though it is recommended to use values in a range from 0.25 kN to 1.5 kN. Moreover, the studies carried out show that the most effective frequency range when evaluating asphalt mixes is between 1 Hz and 5 Hz, depending on the characteristics of the simulated traffic. This range of values can be used to make an in-depth analysis of the evolution of the damage to the material in its different phases without the test being excessively long.
- The test conditions as defined in terms of temperature, moisture, and ageing were defined so as to evaluate the performance of the bituminous material in circumstances that resemble those of the service life of the pavement. The study of the material within a temperature range of 10 °C - 25 °C is an effective way of analysing its response within a visco-elastic margin. However, given the influence of the temperature on the response of the material, it is crucial to design the test for the various temperatures to which the mix material will be subject to during its service life.
 - The instrumentation used is able to obtain detailed information regarding the deformations produced in a volume close to the zone where the cracking process develops. The equipment regularly controls the mechanical evolution of the material and thus avoids the problems of randomness and tridimensional dispersion of the phenomenon. Furthermore the end-of-trial criterion selected intuitively detects the failure of the material, thus providing a clear reference in the evaluation of mix performance.

Evaluation of Cracking Behavior

- The UGR-FACT test method for fatigue cracking combines the most positive aspects of the conventional phenomenological approach with the advantages of the study of dissipated energy. By using both approaches, it is possible to carry out a study in different phases, which allow a detailed analysis of mix response to cracking.
- The definition of damage thresholds facilitates the study of the tenacity and propagation of damage during the different phases of the cracking process with a view to improving mix design. These thresholds represent the energy necessary to cause a certain type of damage in the mix (plastic deformations, micro-cracks, and macro-cracks). Thus, the higher the damage thresholds are, the more resistant the material will be to cracking damage.
- The Displacement Ratio and Mean Damage Parameter are two new parameters defined in this research. They are a useful tool for the analysis of the response of bituminous mixes to fatigue cracking, and can be used for the characterization and design of these materials. Moreover, the Displacement Ratio is a simple way of defining each of the cracking process phases by representing the state of degradation observed in the material and maintaining a stable tendency in the values, independently of the test conditions. Furthermore, the Mean Damage Parameter establishes an accurate quantification of the cracking damage produced in the material in each cycle by evaluating which mixes are most resistant and under which loading conditions, when faced with fatigue cracking.

Validation of the UGR-FACT Method

- The repeatability of the UGR-FACT test method is within the range of accuracy for the values required in road tests. Accordingly, it should be accepted as an evaluation procedure of cracking behaviour in bituminous mixes. Furthermore, an added

consideration is the high correlation coefficients obtained in the approximation curves used in the analysis of its results, which reflect a homogeneous behaviour of the materials evaluated, independently of the load conditions.

- The sensitivity shown by the UGR-FACT method to the various test conditions signifies that it is suitable for the evaluation of asphalt mix response to fatigue cracking in different contexts. The test conditions that have the greatest impact on this response are load amplitude, frequency, and temperature. In this sense, as the load amplitude increases and the frequency decreases, the cracking damage in the mix increased. Furthermore, at low temperatures, the material becomes much more resistant to cracking damage. This is because the mix behaves more elastically, thus recovering a larger quantity of the energy entered in the system without this energy dissipating in the form of damage. In contrast, at high temperatures, the material rapidly exhausts its capacity for plastic deformation and this low resistance causes cracks to prematurely appear. Finally, when the distance between supports is decreased, cracking propagates more rapidly though the influence of this variable is not comparable to that of the load amplitude, frequency, and temperature.
- The UGR-FACT test method can be used to perform comparative analyses of the response to the fatigue cracking of bituminous mixes manufactured with different materials with a view to establishing an objective design criterion. During the tests carried out as part of this research, we analysed the performance of mixes of similar characteristics. The only difference between them was the coarse aggregate or the type of binder used. The results obtained in both studies showed how the UGR-FACT method established significant differences in the mechanical behaviour (with stable and coherent results) of the different materials tested, independently of the load conditions.

Design of a Laboratory Test Method for the
Analysis of Asphalt Mix Response to Fatigue Cracking

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La investigación aquí presentada ha permitido desarrollar un método de ensayo para evaluar el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, que puede ser empleado como alternativa a los existentes en el estudio de estos materiales ante dicha patología.

Durante el desarrollo de las diferentes etapas de esta tesis doctoral surgen nuevas líneas de investigación que podrían contribuir a mejorar los procedimientos utilizados en el diseño a nivel de laboratorio de mezclas bituminosas.

Por otra parte, con el fin de mejorar el método de ensayo UGR-FACT y ampliar los conocimientos sobre el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, se proponen como futuras líneas de investigación:

- Estudiar de la influencia del grado de envejecimiento del material y del contenido de humedad en la respuesta de mezclas bituminosas ante el fenómeno de fisuración por fatiga. Como hemos podido comprobar durante una de las pruebas realizadas en el estudio experimental presentado en esta tesis, la presencia de agua puede provocar un desarrollo prematuro del fenómeno de fisuración por fatiga. El estudio en profundidad de este hecho, junto con el de la influencia del grado de envejecimiento, puede resultar de interés para definir de forma más precisa el comportamiento mecánico de estos materiales.
- Analizar la influencia de la inclusión de periodos de descanso durante los ciclos de carga (simulando las condiciones reales de tráfico), sobre el comportamiento a fisuración de las mezclas bituminosas, para ver si cumple con las teorías establecidas sobre el fenómeno de “healing”.

En el Anexo II de este documento, se recoge una prueba realizada en la que se muestra el efecto positivo que tiene la inclusión de estos periodos de descanso en el comportamiento a fisuración de estos materiales. Este estudio puede ser utilizado como punto de partida para esta línea.

- Estudiar a nivel de laboratorio el comportamiento a fisuración por fatiga de secciones de firme completas compuestas por varios tipos de mezclas y/o sistemas anti-fisuras. En este sentido, en el Anexo II se muestran los resultados obtenidos en algunas pruebas realizadas durante esta tesis que pueden orientar esta futura línea de investigación.
- Analizar la posibilidad de incorporar el empleo del método de ensayo UGR-FACT como herramienta para el diseño a nivel de laboratorio de mezclas bituminosas y la determinación de su contenido óptimo de ligante.
- Evaluar la influencia que determinados factores como el espesor de capa, el tipo de filler utilizado, resistencia a deformaciones plásticas, resistencia a fractura, etc. pueden tener sobre el comportamiento a fisuración por fatiga de la mezcla.
- Utilizar los resultados obtenidos a partir del método de ensayo UGR-FACT para la implementar modelos cohesivos o de daño continuo no local, de manera que ayuden a mejorar los métodos de evaluación no destructiva utilizados en el estudio de este tipo de materiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdulshafi, A. A., Majidzadeh, K. (1985). “J-Integral and cyclic plasticity approach to fatigue fracture of asphalt mixes.” Transportation Research Board, National Research Council, Transportation Research Record 1034, pp.112-123.

Absulshafi, O. (1983). “Rational material characterization of asphaltic concrete pavements.” PhD Dissertation, Ohio State University, Columbus.

Advanced Surfaced Technologies, Inc. (2008). “Asphalt rubber history, performance and value: Unlocking the opportunities”. Deutsche Gummimodifizierte Asphalt (DGmA) GmbH.

AFD40 (2011). TRB Committee (formerly A2B09) – Full Scale and Accelerated Pavement Testing. <<http://www.uta.edu/faculty/sroman/AFD40/>> (Nov. 25, 2011).

Ahlvin, R. E., Ulrey, H. H. (1962). “Tabulated values for determining the complete pattern of stresses, strains, and deflections beneath a uniform circular load on a homogeneous half space.” Highway Research Bulletin, No. 342, pp. 1-13.

Al-Qadi, I., Nassar, W. N. (2003). “Fatigue shift factors to predict HMA performance.” International Journal of Pavement Engineering, 4(2).

Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. A. (2004). “Field installation and design considerations of steel reinforcing netting to reduce reflection cracks.” 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements – Mitigation, Risk and Assesment and prevention, Edited by Petit, Al-Qadi et Millien, pp. 97-104.

American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO (1993). “Guide for design of pavement structures.” ISBN 1-56051-055-2, Washington D. C., USA.

Anderson, D. A., Le Hir, Y. M., Marasteanu, M. O., Planche, J., Martin, D. (2001). “Evaluation of fatigue criteria for asphalt binders.” Transportation Research Record 1766, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp. 48-56.

Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR (2007). “UNE-EN 12697-24, Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente: Resistencia a la fatiga.” Manual de normas técnicas UNE-EN, Madrid.

Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR (2009). “UNE-EN 12697-12, Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente: Determinación de la Sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.” Manual de normas técnicas UNE-EN, Madrid.

Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR (2011). “UNE-EN 12697-44, Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente: Propagación de fisura por el ensayo de flexión con una probeta semi-circular.” Manual de normas técnicas UNE-EN, Madrid.

Asphalt Institute (1981). “Thickness design manual series no. 1 (MS-1).” 9th Ed., College Park, Md.

Baburamani, P. S., Porter, D. W. (1996). “Dissipated energy approach to fatigue characterization of asphalt mixes.” Proceeding of Combined 18th ARRB TR Conference Transit New Zealand Symposium, Part 2, pp. 327-347.

Baaj, H., Di Benedetto, H., Chaverot, P. (2003). “Fatigue of mixes: An intrinsic damage approach.” RILEM Symposium PTEBM 03, Zurich.

Baek, C., Underwood, B. S., Sunramanian, V., Gudatti, M. N., Kim, Y. R., Lee, K. (2008). “Viscoelastic continuum damage model based finite element analysis of fatigue cracking.” Proceedings of 6th RILEM International Conference on Cracking in Pavement, Chicago, Illinois, USA, pp. 315-324.

Baek, J., Al-Qadi, I. L. (2006). “Finite element method modeling of reflective cracking initiation and propagation: investigation of the effect of steel reinforcement interlayer retarding reflective cracking in hot mix asphalt overlay.” Transportation Research Board, National Research Council, Transportation Research Record 1949, pp. 32-42.

Baek, J. (2010). “Modeling reflective cracking development in hot mix asphalt overlays and quantification of control techniques.” Dissertation, University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, Illinois.

Baladi, G., Schorsch, M., Svasdisant, T. (2003). “Determining the causes of top down cracks in bituminous pavements.” Michigan Department of Transportation, Report No. MDOT-PRCE-MSU-2003-110.

Balay, J. M., Mateos, A. (2004). “First results of the European cost 347 action: existing accelerated load testing facilities in Europe, previous and current at European research.” 2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing, Minneapolis, Minnesota, USA.

Balay, J. M., Brosseaud, Y. (2010). « La géotechnique routière et le dimensionnement des chaussées : démarche française et applications ferroviaires. » Journée Technique de Formation sur la Géotechnique routière et ferroviaire, Tunis.

Ballié, M. (2004). “Complexe anti-fissure d’efficacité démontrée à base de treilles métalliques et d’enrobés bitumineux.” 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements – Mitigation, Risk and Assessment and prevention, Edited by Petit, Al-Qadi et Millien, pp. 113-120.

Barenblatt, G. I. (1962). “The mathematical theory of equilibrium of crack in brittle fracture.” Advances in Applied Mechanics, VII, pp. 55-129.

Bardesi, A. (2010). “Introducción a las mezclas bituminosas.” Curso de Mezclas Bituminosas: dosificación, fabricación, puesta en obra y control de calidad, Intevia, Barcelona.

Barenberg, E. J., Thompson, M. R. (1992). “Calibrated mechanistic structural analysis procedures for pavements.” NCHRP project 1 – 26. TRB, National Research Council, Washington, D. C.

Bazin, P., Saunier, J. (1967). “Deformability, fatigue and healing properties of asphalt mixes.” Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, University of Michigan.

Behnia, B., Dave, E., Ahmed, S., Buttlar, W., Reis, H. (2011). “Investigation of effects of the recycled asphalt pavements amounts on low temperature cracking performance of asphalt mixtures using acoustic emissions.” Transportation Research Board, 90th Annual Meeting, Washington D. C., January.

BEKAERT (2002). “Bitufor: un système combiné pour la réflexion des chaussées”. Rapport Technique.

Belgian Road Research Center, BRRC (1998). “Design of overlaid cement concrete pavements reinforced with Bitufor® traffic loading.” Research Report EP5035/3544, Brussels, Belgium.

Bell, C. A., Wieder, A. J., Fellin, M. J., (1994a). “Laboratory Aging of Asphalt-Aggregate Mixtures: Field Validation.” Oregon State University, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington.

Bell, C. A., AbWahab, Y., Cristi, M. E., Sosnovske, D. (1994b). “Selection of laboratory aging procedures for asphalt-aggregate mixtures.” Strategic Highway Research Program, SHRP-A-383, National Research Council, Washington D. C.

Bell, C. A., Sosnovske, D. (1994). “Aging: Binder validation.” Oregon State University, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington.

Bhosale, S. S., Mandal, J. N. (2007). “Experimental study for evaluating crack retardation of asphalt concrete overlays.” ASTM Journal of Testing and Evaluation, Vol. 35(6), pp. 589-601.

Bhurke, A. S., Shin, E. E., Drzal, L. T. (1997). “Fracture morphology and fracture toughness measurement of polymer-modified asphalt concrete.” Transportation Research Board, National Research Council, Transportation Research Record 1590, pp.23-33.

Bodin, D., Pijaudier-Cabot, G., De la Roche, C., Piau, J. M., Chabot, A. (2004). “Continuum damage approach to asphalt concrete fatigue modeling.” *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130 (6), pp. 70-708.

Bonnaure, F., Gravos, A., Udrón, J. (1980). “A new method for predicting the fatigue life of bituminous mixes.” *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologist*, Vol. 47, pp. 499-529, Seattle.

Bonnaure, F. P., Huibers, A. H. J. J., Boonders, A. (1982). “A laboratory investigation of the influence of rest periods on the fatigue characteristics of bituminous mixes.” *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist*, Vol. 51, pp. 104-128.

Bonnot, J. (1992). “L’expérience française des procédés de lutte contre les conséquences des fissures de retrait des assises de chaussées traitées aux liants hydrauliques.” *Jornadas sobre Reflexión de Grietas en Carreteras*, CEDEX, Madrid.

Bonnot, J. (1998). “Fissuration de retrait des chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques.” *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N. 156 et 157.

Boussinesq, M. J. (1885). « Application des potentiels a l’étude de l’équilibre et du mouvement des solides élastiques. » Gauthier-Villars, 721 pgs.

Breyse, D., De la Roche, C., Domee, V., Chauvin, J. J. (2003). “Influence of rest time on recovery and damage during fatigue tests on bituminous composites.” *Proceedings of 6th RILEM Symposium PTEBM’03*, Zurich.

British Standard Institution, BSi (1991). *Mechanics toughness testing. BS 7448 Part 1: Method of determination of K_{IC} critical CTOD and critical J values of metallic materials.* London, UK.

British Standard Institution, BSi (2012). *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. BS EN 12697-46:2012. Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension test.* London, UK.

Brown, S. F. (1978). “Material characterization for analytical pavement design.” Applied Science Publisher, London.

Brown, S. F., Brunton, J. M., Hughes, A. D., Brodick, B. V. (1985). “Polymer grid reinforcement of asphalt.” Proceedings A. A. P. T. Vol. 54.

Brown, S. F., Brunton, J. M., Armitage, R. J. (1989). “Grid Reinforced overlays.” 1st International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Assessment and Control. Edited by Rigo J. M. et Degeimbre, R., pp. 63-70.

Brown, S. F., Brodrick, B. V. (1999). “25 Years experience with the pilot-scale Nottingham pavement test facility.” International Conference on Accelerated Pavement Testing, Reno, Nevada, Paper No. CS6-7, 37 pages.

Brown, S. F., Thom, N. H., Saunders, P. J. (2001). “A study of a grid reinforced asphalt to combat reflection cracking.” Journal of Asphalt Paving Technology, Vol. 70, pp. 543-570.

Brunton, J. M., Brown, S. F., Pell, P. S. (1987). “Development of the analytic design method of asphalt pavements.” Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Seattle, WA.

Burmister, D. M. (1943). “The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways.” Proceedings Highway Research Board, Vol. 23, pp. 126-148.

Burmister, D. M. (1945). “General theory of stresses and displacement in layered systems.” Journal of applied physics, Vol. 16, No. 2, pp. 39-36; No. 3, pp. 126-127; No. 5, pp. 296-302.

Burmister, D. M. (1962). “Applications of layered system concepts to design and construction of asphalt pavement.” Proceedings of the First Paving Conference, University of New Mexico, Alburquerque, USA, pp. 21-47.

Caltabiano, M. A., Brunton, J. M. (2001). “Refelction cracking in asphalt overlays.” Journal of Asphalt Paving Technology, Vol. 60, pp. 310-332.

CALTRANS, State of California Department of Transportation (2005). “Uses of Scrap Tire Rubber. State of the Technology and Best Practices.” Materials Engineering and Testing Services.

CALTRANS, State of California Department of Transportation (2006). “Asphalt Rubber Usage Guide”. Materials Engineering and Testing Services.

Carpenter, S. H., Jansen, M. (1997). “Fatigue behavior under new aircraft loading conditions.” Proc., Aircraft Pavement Technology in the Midst of Change, ASCE, Reston, Va., pp. 259–271.

Carpenter, S. H., Ghuzlan, K. A., Shen, S. (2003). “A fatigue endurance limit for highway and airport pavement.” Journal of transportation research record (TRR), No. 1832, pp. 131-138.

Carpenter, S. H., Shen, S. (2006). “A dissipated energy approach to study hot-mix asphalt healing in fatigue.” Transportation Research Record 1970, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp. 178–185.

Case, S. W., Reifsnider, K. L. (2003). “Fatigue of composite materials.” In: Milne, I.; Ritchie, R. O.; Karihaloo, B. (eds). Comprehensive Structural Integrity. Cyclic Loading and Fatigue, Vol. 4, pp. 205-442, Elsevier, Amsterdam.

Castro, M., Sánchez, J. A. (2006). “Fatigue and Healing of Asphalt Mixtures: Discriminate Analysis of Fatigue Curves.” Journal of Transportation Engineering, ASCE, pp. 168-174.

Central Massachusetts Regional Planning Commission, CMRPC (2006). “Pavement management field guide to road surface distresses”. Transportation Management Systems Programs.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX (1992). “Jornadas sobre Reflexión de Grietas en Carreteras.” Madrid.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, CEDEX (2007). “Manual de Empleo de Caucho de NFU en Mezclas Bituminosas.” Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiente.

Chaboche, J.L., Lesne, P.M. (1988). “A non-linear continuous fatigue damage model.” Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. **11** (1), pp. 1–17.

Chang, D. T., Lai, R. Q., Chang, J. Y., Wang, Y. H. (1998). “Effects of geogrid in enhancing the resistance of asphalt concrete to reflection cracks.” ASTM STP 1348. American Society for Testing and Materials, pp. 39-51.

Chehab, G. R. (2002). “Characterization of asphalt concrete in tension using a viscoelastoplastic model.” Ph. D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, USA.

Clauwaert, C., Francken, L. (1989). “Etude et observation de la fissuration réfléctive au centre de recherches routier belge.” 1st International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Assessment and Control. Edited by Rigo J. M. et Degeimbre, R., pp. 170-181.

Clyne, T., Jhonson, E., Worel, B. (2009). “Use of taconite aggregates in pavement applications.” Project No. MRP-6(063), Minnesota Department of Transportation.

Colombier, G. (1997). “Cracking in pavements: nature and origin of cracks.” Prevention of Reflective Cracking in Pavements – RILEM Report 18. Edited by Vanelstraete A. et Franckien L., pp. 1-15.

Collop, A. C., Sewell, A. J., Thom, N. H. (2004). “Laboratory assessment of the resistance to crack propagation in high-stiffness asphaltic materials.” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications, Vol. 218 (55), pp. 55-66.

Cooper, K. E., Held, S. L. (1987). “The evaluation of fiber reinforcement techniques to inhibit reflection cracking in overlays.” Department of Civil Engineering, Nottingham University, Nottingham, UK.

Cooper, K. E., Brown, S. F. (1989). “Development of a simple apparatus for the measurement of the mechanical properties of asphalt mixes.” Proceedings Eurobitume Symposium, Madrid, pp. 494-498.

Cooper Technology, Co. (2012). <<http://www.cooper.co.uk/index.asp?lang=ES>> (Aug. 3, 2012).

Corté, J. F., Goux, M. T. (1996). “Design of pavement structures: The French technical guide.” Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1539, 116-124.

Croteau, J. M., Chaignon, F., Thompson, M. (2007). “A four year performance review of north American and international fibre-reinforced membrane system.” Fifty-Second Annual conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA), Ontario, Canada.

Daniel, J. S. (1996). “Rate-dependient Stiffness of asphalt concrete used for field to laboratory prediction and fatigue and healing evaluation.” Master Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC.

Daniel, J. S., Bisirri, W. M. (2004). “Fatigue evaluation of asphalt mixtures using dissipated energy and viscoelastic continuum damage approach.” Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 73, pp. 557-583.

Daniel, J. S., Bisirri, W. M. (2005). “Characterizing fatigue in pavements materials using a dissipated energy parameter.” Proceedings of the Geo-Frontiers 2005 Congress, Austin, Texas.

Dave, E. V., Song, S. H., Buttlar, W. G., Paulino, G. H. (2007). “Reflective and thermal cracking modeling of asphalt concrete.” Advanced Characterization of Pavement and Soil

Engineering Materials Conference, Athens, Greece. Edited by Loizos, Scarpas and Al-Qadi, pp. 1241-1252.

De Beer, M., Fisher, C., Jooste, F. J. (1997). "Determination of pneumatic tire/pavement interface contact stresses under moving loads and some effects on pavements with thin asphalt surface layers." Proceedings 8th International Conference on Asphalt Pavements, University of Washington, Seattle, 179-227.

De Beer, M., Fisher, C., Kannemeyer, L. (2004). "Tyre pavement interface contact stresses on flexible pavements – quo vadis?." Roads the Arteries of Africa: 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Sun City, North West Province, South Africa.

De Bondt, A. H., Saathof, L. E. B. (1993). "Movements of a cracked semi-rigid pavements structure." Reflective Cracking in Pavements, State of Art and Design Recommendations, Proceedings of the Second international RILEM Conference, Liege, Belgium, pp. 449-457.

De Bondt, A. H. (1999). "Anti-reflective cracking design of reinforced asphaltic overlays." PhD Thesis, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands.

De la Roche, C., Riviere, N. (1997). "Fatigue behaviour of asphalt mixes: Influence of laboratory test procedures on fatigue performance." 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, WA.

De Souza, F. V., Soares, J. B., Allen, D. H., Evangelista, J. F. (2004). "Model for predicting damage evolution in heterogeneous viscoelastic asphaltic mixtures." Transportation Research Board, National Research Council, Transportation Research Record 1891, pp. 131-139.

Deacon, J. A. (1965). "Fatigue of asphalt concrete." Graduate Report, Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley.

Delgadillo, R., Bahia, H. (2005). “Rational fatigue limits for asphalt binders derived from pavement analysis.” *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 74, pp. 97–138.

Dempsey, B. J. (2002). “Development and performance of interlayer stress absorbing composite (ISAC) in AC overlays.” *Transportation Research Record, TRB, National Research Council, No. 1809*, pp. 175-183.

Di Benedetto, H., Soltani, A. A., Chaverot, P. (1993a). “Fatigue damage for bituminous mixtures: A pertinent approach.” *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologist*, Vol. 65.

Di Benedetto, H., Neji, J., Antoine, J. P., Pasquier, M. (1993b). “Apparatus for laboratory study of cracking resistance.” *2nd International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – State of the Art and Design Recommendations*. Edited by Rigo J. M., Degeimbre, R. et Francken, L., pp. 179-186.

Di Benedetto, H., De La Roche, C., Francken, L. (1997). “Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM interlaboratory tests.” *Mechanical tests for bituminous materials*, H. Di Benedetto and L. Francken, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 15–26.

Di Benedetto, H., de la Roche, C., Baaj,H., Pronk, A., Lundstrom, R. (2004). “Fatigue of bituminous mixtures.” *Materials and Structures*, Vol. 37, April 2004, pp. 202-216.

Dirección General de Carreteras, DGC (2000). “Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas (Ensayo de Inmersión-Compresión).” *Normas NLT, Ensayos de Carreteras, N° 162*, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid.

Dirección General de Carreteras, DGC (2008). “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes PG-3.” *Ministerio de Fomento, Ediciones Liteam*, Madrid.

Douglas, R. A., Alabaster, D., Charters, N. (2008). “Measured tire/road contact stresses characterized by tire type, wheel load, and inflation pressure.” Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Toronto, Ontario.

Dugdale, D. S. (1960). “Yielding of Steel Sheets Containing Slits.” Journal of Mechanics and Physic of Solids, Vol. 8, pp. 100-108.

Dumas, P., Vecoven, J. (1993). “Processes reducing reflective cracking; Synthesis of laboratory tests.” Reflective Cracking in Pavements, State of Art and Design Recommendations, Proceedings of the Second international RILEM Conference, Liege, Belgium, pp. 263-270.

Eberik, M. A., Sucouglu, H. (2002). “Energy based low-cycle fatigue characteristics of degrading structures.” Proceedings of 12th European Conference on Earthquake Engineering, London.

Ellis, S., Dudgeon, R. (2004). “Pre-cracking as a technique to minimize reflection cracking in semi-rigid pavement structures – long performance monitoring.” 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements – Mitigation, Risk and Assesment and prevention, Edited by Petit, Al-Qadi et Millien, pp. 325-332.

ELSAMEX (2012). “MACROSEAL. Microaglomerado en Frío”. Informe técnico, 2009. <<http://www.elsamexinternacional.com>> (Feb. 3, 2012).

Elseifi, M., Al-Qadi, I. (2003). “A simplified overlay design model against reflective cracking utilizing service life prediction.” Transportation Research Board (TRB) 82nd Annual Meeting, paper No. 03-3285, Washington, D. C.

Emery, J. J. (2007). “Mitigation of Asphalt Pavement Top-Down Cracking.” 4th International SIIV Congress, Palermo (Italy).

European Asphalt Pavement Association, EAPA (2012). “Asphalt in Figures 2010”. <<http://www.eapa.org>> (Aug. 21, 2012).

European Commission (1999). “Development of New Bituminous Pavement Design Method.” Final Report of the Action COST 333, Directorate General Transport.

Eurovia – Vinci (2012). <http://www.eurovia.com/fr>

Fakhri, M. (1997). “Characterization of asphalt pavement materials.” Ph. D. Thesis, The University of New South Wales, Sydney, Australia.

Fernando, E. G., Nusanu, D., Park, D., Liu, W. (2006). “Evaluation of effect of tire size and inflation pressure on tire contact stresses and pavement response.” Technical Report 0-4361-1, College Station, Texas Transportation Institute, Texas, USA.

Federal Highway Administration, FHWA (1998). “Fundamental properties of asphalts and modified asphalts.” Task K-Microdamage Healing in Asphalt and Asphalt Concrete, Final Report, Vol. 2.

Federal Highway Administration, FHWA (2001). Traffic Monitoring Guide. FHWA-PL-01-021. U.S. Department of Transportation, Office of Highway Information Management, USA.

Finn, F. N., Sraf, C., Kulkarni, R., Nair, K., Smith, W., Abdullad, A. (1977). “The use of prediction subsystems for design of pavement structures.” Proceedings of fourth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 2, Ann Arbor, Michigan.

Florence, C. (2005). “Étude expérimentale de la fissuration reflective et la modelisation de la resistance de structures cellulaires.” These, Ecole National des Ponts et Chaussées, Paris.

Fock, G. (1989). “The use of paving felts to influence the life expectancy and permanent adhesion of asphalt road surfaces.” 1st International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Assessment and Control. Edited by Rigo J. M. et Degeimbre, R., pp. 95-102.

Ford, T. L., Yap, P. (1990). "Truck tire/pavement interface." Proceedings of the 23rd FISITA Congress: The promise of New Technology in the Automotive Industry, Torino, Italy, pp. 333-340.

Francken, L., Clauwaert, C. (1987). "Characterization and structural assessment of bound materials for flexible road structures." Proc. 6th Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich., pp. 130–144.

Fromm, J. H. (1974). "The mechanisms of asphalt stripping from aggregate surfaces." Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 43.

Gallego, J., Prieto, J. N. (2006). "Development of a new laboratory equipment for the study of reflective cracking in asphalt overlays." Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D. C., No. 1970, pp. 215-222.

García, J. (1992). "Procedimientos de estudio en Laboratorio." Jornadas sobre Reflexión de Grietas en Carreteras, CEDEX, Madrid.

García, S., García, C., Buisson, J., Cortés, C., Potti, J.J. (2006). "Pavimentos de larga duración." VII Congreso Nacional de Firmes. Avila, España.

Gary, B. E., Martin, G. E. (1932). "Resurfacing with bituminous types of surfaces." Highway Research Board Proceedings, Vol. 12, pp. 177-192.

Geosyntech Company (2012). < <http://www.geosynthetics.com.cn/>> (Feb. 2, 2012).

Geotexan (2012). < <http://www.geotexan.com/index.php>> (Feb. 2, 2012).

Germann, F. P., Lytton, R. L. (1979). "Methodology for predicting the reflection cracking life of asphalt overlays." Research Report FHWA/TX-79/09+207-5, College Station, Texas.

Ghuzlan, K., Carpenter, S. H. (2000). "An energy-derived/damagebased failure criteria for fatigue testing." Transportation Research Record 1723, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp. 131–141.

Ghuzlan, K. (2001). “Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures based upon dissipated energy concepts.” Ph. D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Gibney, A., Lohan, G., Moore, V. (2002). “Laboratory study of resistance of bituminous overlays to reflective cracking.” Transportation Research Record, TRB, National Research Council, No. 1809, pp. 184-190.

Gil, S., Herrero, O. (2009). “Betún modificado con polvo de neumático y ceras, en mezcla M-10 con fibras”. IV Jornada Nacional de ASEFMA, Madrid.

Goacolou, H., Marchand, J. P. (1982). “Fissuration des couches de roulement.” Seme Conférence Internationale sur les Chaussées bitumineuses, Delft, The Netherlands.

Goodyear (2012). “Truck tyres: Technical data book.” <http://www.goodyear.eu/tr_tr/images/truck-tire-tech-data-book-2010_tcm1293-81828.pdf> (May 15, 2012).

Griffith, A. A. (1924). “Theory of Rupture.” Proceedings of the First International Congress in Applied Mechanics, Delft, The Netherlands, pp. 55-63.

Guissi, G. (2005). “La remontée des fissures dans les re-surfaçages : Développement d’une méthodologie de conception de re-surfaçages.” Rapport de synthèse, École de Technologie Supérieure, Montréal.

Grzybowska, W., Wojtowicz, J., Fonferko, L. C. (1993). “Application of geo-synthetics to overlays in Cracow region of Poland.” Reflective Cracking in Pavements, State of Art and Design Recommendations, Proceedings of the Second international RILEM Conference, Liege, Belgium, pp. 343-350.

Hajek, J. J., Selezneva, O. I., Mladenovic, G., Jiang, Y. J. (2005). “Estimating Cumulative Traffic Loads.” FHWA-RD-03-094, Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development, USA.

Hall, K. T., Connor, M., Darter, M. I., Carpenter, S. H. (1989). “Rehabilitation of concrete pavements: Concrete pavement evaluation and rehabilitation system.” Report FHWA-RD-88-073, Vol. 3, FHWA, U.S. Department of Transportation.

Harmelink, D., Aschenbrener, T. (2003). “Extent of Top-Down Cracking in Colorado.” Report No. CDOT-R-2003-7, Final Report, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Denver, Colorado.

Harris, B. (2003). “Fatigue in composites.” Woodhead Publishing Ltd., Cambridge.

Hartman, A. M. (2000). “An experimental investigation into mechanical and performance and structural integrity of bituminous road pavement mixtures under the action of fatigue load.” PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University College Dublin, Dublin, Ireland.

Hartman, A. M., Gilchrist, M. D., Nolan, D. (2001). “Wheel-tracking fatigue simulation of bituminous mixtures.” International Journal of Materials and Pavement Design, Vol. 2(2), pp. 141-160.

Hartman, A. M., Gilchrist, M. D. (2004). “Evaluating four point bend fatigue of asphalt mixture using image analysis.” Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, pp 60-68.

Hashin, Z. (1964). “Theory of mechanical behavior of heterogeneous media.” Applied Mechanics Reviews, Vol. 17(1).

Hicks, R. G., Finn, F. N., Monismith, C. L., Leahy, R. B. (1993). “Validation of SHRP binder specification through mix testing.” Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 62, pp. 565-614.

Hillerborg, A. (1978). “A model for fracture analysis.” Report TVBM-3005, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

Hopman, P. C., Kunst, P. A. J. C., Pronk, A. C. (1989). “A renewed interpretation method for fatigue measurement, Verification of Miner’s rule.” 4th Eurobitume Symposium, Vol. 1, Madrid, pp. 557-561.

Hossain, M., Swartz, S., Hoque, E. (1999). “Fracture and tensile characteristics of asphalt-rubber concrete.” ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 11 (4), pp. 287-294.

Hu, S., Zhou, F., Scullion, T. (2010). “Reflection Cracking Based Asphalt Overlay Thickness Design and Analysis Tool.” Journal of the Transportation Research Board, No. 2155, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D. C., pp. 12-23.

Huang, Y. H. (1993). “Pavement analysis design.” Englewood Cliffs, New Jersey 07632, Prentice Hall.

Hugo, F., Mc Cullough, B. F., Van der Walt, B. (1990). “Development of a Strategy for the implementation of Full-Scale Accelerated Pavement Testing for the Texas Highway department.” Research Report 1246-2F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.

Hung, D. H., Vinson, T. S. (1994). “Low-temperature Cracking: Test Selection.” Strategic Highway Research Program (SHRP). Department of Civil Engineering, Oregon State University.

Hunter, E. R., Ksaibati, K. (2002). “Evaluating moisture susceptibility of asphalt mixes.” Department of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming, Laramie.

Instituto Nacional de Estadística, INE (2011). “Anuario Estadístico de España 2011. Entorno Físico y Medio Ambiente.” <<http://www.ine.es>> (Apr. 12, 2012).

Irwin, G. R., Kies, J. A. (1952). “Fracture and fracture dynamics.” Welding Journal Research Supplement.

Irwin, G. R., Kies, J. A. (1954). “Critical energy rate analysis of fracture strength.” Welding Journal Research Supplement, Vol. 33, pp. 193-198.

Irwin, J. G. (1957). "Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate." *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp. 361-364.

Jacobs, M. M. J. (1990). "Determination of crack growth parameters of asphalt concrete, based on uniaxial dynamic tensile test." *Proceedings of the fourth RILEM symposium on mechanical test for bituminous mixes*, Budapest, pp. 483-496.

Jacobs, M. M. J., De Bondt, A. H., Molenaar, A. A. A., Hopman, P. C. (1992). "Cracking in asphalt concrete pavements." *Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements (ISAP)*, Vol. 1.

Jacobs, M. M. J., Hopman, P. C., Molenaar, A. A. A. (1996). "Application of fracture mechanics principles to analyze cracking in asphalt concrete." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 65, pp. 1-39.

Jenq, Y. S., Perng, J. D. (1991). "Analysis of crack propagation in asphalt concrete using cohesive crack model." *Transportation Research Board, National Research Council, Transportation Research Record 1317*, pp. 90-99.

Jenq, Y. S., Liaw, C. J., Liu, P. (1993a). "Analysis of crack resistance of asphalt concrete overlays – A fracture mechanics approach." *Transportation Research Board, National Research Council, Transportation Research Record 1388*, pp. 35-41.

Jenq, Y. S., Liaw, C. J., Kim, S. C. (1993b). "Effects of temperature on early crack formation in Portland cement concrete pavements." *Transportation Research Board, National Research Council, Transportation Research Record 1388*, pp. 160-166.

Joseph, P., Haas, W. A. P., Rothenburg, L. (1987). "Low temperature reflection cracking through asphalt overlays." *Proceedings 6th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, pp. 935-945.

Kanitpong, K., Bahia, H. U. (2002). “Role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA.” Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 72.

Kanninen, M. F., Popelar, C. H. (1985). “Advanced fracture mechanics.” Oxford University Press, Inc., NY.

Khodaii, A., Fallah, S., Nejad, F. M. (2009). “Effects of geosynthetics on reduction of reflection cracking in asphalt overlays.” Geotextiles and Geomembranes, Vol. 27, pp. 1-8.

Kim, H., Buttlar, W. G. (2005). “Micromechanical fracture modeling of hot-mix asphalt concrete based on a disk-shaped compact tension test.” Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75.

Kim, H., Wagoner, M. P., Buttlar, W. G. (2009). “Micromechanical fracture modeling of asphalt concrete using a single edge notched beam test.” Materials and Structures, Vol. 42, pp. 667-689.

Kim, K. W., El Hussein, H. M. (1995). “Effect of differential thermal contraction on fracture properties of asphalt materials at low temperature.” Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, pp. 474-499.

Kim, K. W., El Hussein, H. M. (1997). “Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures.” Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 7-8, pp. 403-411.

Kim, K. W., Doh, Y.S., Lim, S. (1999). “Mode I reflection cracking resistance of strengthened asphalt concrete.” Construction and Building Materials, Vol. 13, pp. 243-251.

Kim, Y. R., Little, D. N., Benson, F. (1990). “Chemical and mechanical evaluation on healing mechanism of asphalt concrete.” Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 59, pp. 240-276.

Kim, Y. R., Little, D. N., Burghardt, R. C. (1991). "SEM analysis on fracture and healing of sand-asphalt mixtures." *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 3(2), pp. 140–153.

Kim, Y. R., Lee, H. J., Little, D. N. (1997). "Fatigue characterization of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 66, pp. 520-569.

Kim, Y. R., Lee, H. J., Little, D. N. (1998). "Fundamental properties of asphalts and modified asphalts." Texas A&M University, Volume 4, final report.

Kim, Y.R., Little, D., Lytton, R. (2002). "DMA to evaluate the fatigue and healing potential of asphalt binders in sand asphalt mixtures." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 71, pp. 176-199.

Kim, Y. R., Little, D. N., Lytton, R. L. (2003). "Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures." *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15 (1), pp. 75-83.

Kim, R., Underwood, S., Mun, S., Guddati, M. (2006). "Perpetual pavement evaluation using the viscoelastic continuum damage finite element program." *International Conference on Perpetual Pavement*, Columbus, Ohio.

Kraemer, C., Pardillo, J.M., Rocci, S., Romana, M., Sánchez, V., del Val, M.A. (2004). *Ingeniería de Carreteras*. Vol. II., Mc Graw Hill.

Kunst, P. A. J. C., Kirschner, R. (1993). "Investigations on the Effectiveness of synthetic asphalt reinforcements." *Reflective Cracking in Pavements*, Rigo, J. M., Degeimbre, R., and Francken, L., Ed. RILEM.

Kutay, M. E., Gibson, N. H., Youtcheff, J. (2008). "Use of pseudostress and pseudostrain concepts for characterization of asphalt fatigue tests." *Proceedings of 6th RILEM International Conference on Cracking in Pavement*, Chicago, Illinois, USA, pp. 305-314.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC (1988). “Fissuration de retrait de chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques.” Bulletin de Liaison du LCPC, Vol. 156-157, pp. 37-35 et 59-87.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC (1998). « Catalogue des dégradations de surface des chaussées ». Méthode d’essai n°52.

Laveissiere, D. (2002). “Modelisation de la remontée 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.” These, L’Universite de Limoges, Faculte des Sciences, Limoges.

Lee, C.; Souny-Slitine, N. (1998). “Final research findings on traffic-load forecasting using weigh-in-motion data.” Research Report 987-7. Center for Transportation Research, The University of Texas, Austin, USA.

Lee, H. J. (1996). “Uniaxial constitutive model of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory.” PhD thesis, North Carolina State Univ., Raleigh, N.C.

Lee, H, Kim, Y. R. (1998). “Viscoelastic constitutive model for asphalt concrete under cyclic loading.” Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 124 (4), pp. 32-40.

Lee, H. J., Daniel, J. S., Kim, Y. R. (2000). “Continuum damage mechanics-based fatigue model of asphalt concrete.” Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 12 (2), pp. 105-112.

Lee, S. (2003). “Long-term performance assessment of asphalt concrete pavements using the third scale model mobile loading simulator and fiber reinforced asphalt concrete.” Thesis, North Carolina University.

Li, X. (2005). “Investigation of the fracture resistance of asphalt mixtures at low temperatures with a semi-circular bend (SCB) test.” PhD Thesis, University of Minnesota.

Li, X., Marasteanu, O., Iverson, N., Labuz, J. F. (2006). "Observation of crack propagation in asphalt mixtures with acoustic emission." Transportation Research Board, National Research Council, Transportation Research Record 1970, pp. 171-177.

Li, X., Braham, A., Marasteanu, M., Buttlar, W., Williams, R. (2008). "Effects of fracture affecting fracture energy of asphalt concrete at low temperature." Third EATA Conference, European Asphalt Technology Association, pp. 397-416.

Little, D. N., Lytton, R. L., Williams, D., Kim, Y. R. (1999). "An analysis of the mechanism of microdamage healing based on the applications of micromechanics first principles of fracture and healing." Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 68, pp. 501-542.

Little, D. N., Lytton, R. L., Devon, W., Chen, C. W. (2001). "Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete, Volume I: Microdamage and microdamage healing, Project Summary Report." FHWA-RD-141, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, College Station.

Livneh, M., Ishai, I., Kief, O. (1993). "Bituminous Pre-Coated Geotextile Felts for Retarding Reflection Cracks." Reflective Cracking in Pavements, State of Art and Design Recommendations, Proceedings of the Second international RILEM Conference, Liege, Belgium, pp. 343-350.

Loira, L., Sebaaly, P. E., Haji, E. Y. (2008). "Long-Term Performance of Reflective Cracking Mitigation Techniques in Nevada." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2044, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., pp. 86-95.

Long Term Pavement Performance, LTPP (2011). Data Base. <<http://www.ltp-pp-products.com>>

Lundstrom, R., Isacsson, U. (2004). “An investigation of the applicability of Schapery’s work potential model for characterization of asphalt fatigue behavior (with discussion).” *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 73, pp. 657-695.

Lundstrom, R., Ekblad, J. (2006). “Fatigue characterization of asphalt concrete using Schapery’s work potential model.” *Annual Transaction of the Nordic Rheology Society*, Vol. 14.

Lundstrom, R., Ekblad, J., Isacsson, U., Karlsson, R. (2007). “Fatigue modeling as related to flexible pavement design.” *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 8, pp. 165-205.

Lytton, R.L. (1989). “Use of geotextiles for reinforcement and strain relief in asphalt concrete.” *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 8, pp. 217-237.

Lytton, R. L. (1993). “Development and validation of performance prediction model and specifications for asphalt binders and paving mixes.” *The Strategic Highway Research Program Project Report SHRP-A-357*.

Lytton, R. L., Tsai, F. L., Lee, S-I, Luo, R., Hu, S., Zhou, F. (2010). “Models for predicting reflection cracking of hot mix asphalt overlays.” *NCHRP Report 669*. College Station, Texas Transportation Institute, Texas, USA.

Majidzadeh, K, Brovild, F. N. (1968). “Effect of water on bitumen- Aggregate Mixtures – State of the art.” *Special HRB Report, No. 98*, Highway Research Board.

Majidzadeh, K., Kaufmann, E. M., Ramsamooj, D. V. (1971). “Application of fracture mechanics in the analysis of pavement fatigue.” *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 40, pp. 227-246.

Majidzadeh, K., Dat, M., Madisi-Ilyas, F. (1976). “Application of fracture mechanics for improved design of bituminous concrete. Vol. II: Evaluation of improved mixture

formulations and the effect of temperature conditions on fatigue models”. Repport FHWA-RD-76-92, Federal Highway Administration Washington D. C.

Manjoine, M. J. (1965). “Biaxial brittle fracture test.” ASME, Journal of Basic Engineering, Vol. 87(2), pp. 293-298.

Marasteanu, M. O., Labuz, J. F., Dai, S., Li, X. (2002). “Determining the low temperature fracture toughness of asphalt mixtures.” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research of the National Academies, Washington D. C., No. 1789, pp. 191-199.

Marcobal, J. R. (2012). “El tráfico en AASHTO 93.” Curso de dimensionamiento de firmes con el método AASHTO 93, Ciesm-Intevia, Madrid.

Marshek, K. M., Chen, H. H., Conell, R. B., Hudson, R. W. (1986). “Experimental determination of pressure distribution of truck tire pavement contact.” Transportation Research Record, 1070, Transportation Research Board, Washington, D. C., 9-13.

Masad, E., Branco, V., Little, D., Bhasin, A. (2008). “A unified method for the analysis of controlled-strain and controlled-stress fatigue testing.” International Journal of Pavement Engineering, Vol. 9.

Masad, E., Branco, V., Little, D., Bhasin, A. (2009). “Quantitative comparison of energy methods to characterize fatigue in asphalt materials.” Journal of Materials in Civil Engineering, 83.

Mateos, A., Marrón, J. O., Pérez, J. (2009). “Firmes de larga duración.” Revista Ingeniería Civil, 155, pp. 49-57.

Mathews, J. M., Monismith, C. L. (1993). “Investigation of laboratory fatigue testing procedures for asphalt aggregate mixtures.” Journal of Transportation Engineering, Vol. 119 (4), pp. 634-654.

Mc Daniel, M. (1997). “Use of the MMLS to investigate fatigue of asphalt pavements at low temperatures”. Master Thesis, The University of Texas at Austin.

Michelin (2009). “Presiones de inflado para neumáticos de camión.” <<http://www.michelintransport.com/ple/front/affich.jsp?codeRubrique=37&lang=ES>.> (May 15, 2012).

Miner, M. A. (1945). “Cumulative damage in fatigue.” Applied mechanics, Vol. 12 (9), pp. 159-164.

Miró Recasens, R. (1994). “Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro.” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Barcelona, Barcelona.

Mobasher, B, Mamlouk, M. S., Lin, H. M. (1997). “Evaluation of crack propagation properties of asphalt mixtures.” Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 123(5), pp. 405-413.

Molenaar, A. A. A. (1983). “Structural performance and design of flexible road construction and asphalt concrete overlays.” Doctoral Thesis, University of Delft, Delft, Netherlands.

Moolenaar, A. A. A. (1984). “Fatigue and reflection cracking due to traffic loads.” Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 53, pp. 440-474.

Molenaar, A. A. A, Nods, M. (1996). “Design method for plain and geodrid reinforced overlays on cracked pavements.” Reflective Cracking in Pavements, Francken, L., Beuving, E. and Molenaar, A. A. A., Ed. RILEM.

Molenaar A. A. A., Potter, J. (1997). “Assesment and evaluation of the reflection crack potential.” Prevention of Reflective Cracking in Pavements – RILEM Report 18, Edited by Vanelstraete A. et Franckien L., pp. 16-42.

Molenaar A. A. A. (2004). “Bottom-up fatigue cracking: myth or reality?.” 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements – Mitigation, Risk Assessment and Prevention, Edited by Petit C., Al-Qadi I.L. et Millien A., pp. 275-282.

Monismith, C. L., Secor, K. E., Blackner, E. W. (1961). “Asphalt mixture behavior in repeated flexure.” Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 30, pp. 188-222.

Monismith, C. L., Deacon, J. A. (1969). “Fatigue of asphalt paving mixtures.” Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 95, pp. 317-346.

Monismith, C. L., Salam, Y. M. (1973). “Distress characteristics of asphalt concrete mixes.” Proceedings of Asphalt Paving technology, Vol. 42, pp. 320-350.

Monismith, C. L., Inkabi, K. (1977). “Design consideration for asphalt pavements.” PB-274-109, prepared for the Federal Highway Administration, Sacramento, California Div.

Monismith, C. L., Epps, J. A., Finn, F. N. (1985). “Improved asphalt mix design.” Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 55, pp. 347-406.

Montestruque, G., Rodrigues, R., Nods, M., Elsing, A. (2004). “Stop of reflection crack propagation with the use of pet geogrid as asphalt overlay reinforcement.” Cracking in Pavements, Mitigation, Risk Assessment and Prevention, Proceedings of the fifth International RILEM Conference, Limoges, France, pp. 231-238.

Moreno, F., Rubio, M. C. (2012). “Influence of crumb rubber on the indirect tensile strength and stiffness modulus of hot bituminous mixes.” Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 24 (6), pp. 715-724.

Moreno, F., Sol, M., Pérez, M., Martín, J., Rubio, M. C. (2013). “The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation.” Materials and Design, Vol. 47, pp. 61-67.

Myers, L. A., Roque, R., Ruth, B. E., Drakos, C. (1999). “Measurement of contact stresses of different truck tire types to evaluate their influence on near-surface cracking and rutting.” Transportation Research Record, 1388, Transportation Research Board, Washington, D. C., 108-119.

National Cooperative Highway Research Program, NCHRP (2004). “Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures.” Design Inputs, Chapter 4. Traffic. <<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg>> (Mar. 6, 2012).

National Cooperative Highway Research Program, NCHRP (2007). “Mechanistic empirical design of new and rehabilitated pavement structures.” 1-37A Project. <<http://www.trb.org/mepdg/guide.htm>> (Oct. 8, 2011).

Nernas K., Nunn, M. (2004). “A model for top-down reflection cracking in composite pavements.” 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements – Mitigation, Risk Assessment and Prevention, Edited by Petit C., Al-Qadi I.L. et Millien A., pp. 409-416.

Newcomb, D. E., Buncher, M. (2001). “Concepts of perpetual pavements.” Transportation Research Circular No. 503: Perpetual Bituminous Pavements.

Orowan, E. (1955). “Energy criterion of fracture.” Welding Journal Research Supplement, pp. 157-160.

Orowan, E., Felbeck, D. K. (1995). “Experiments of brittle fracture of steel plates.” Welding Journal Research Supplement, pp. 570-575.

Páez, A., Lucas, F. J., Conde, M. P., Pradas, J. L., Lanchas, S., Costa, A., Loma, J. (2010). “Mezclas bituminosas en caliente para capas antireflexión de grietas.” V Jornada Nacional de ASEFMA, Madrid.

Pais, J. C., Sousa, J. B., Way, G. B., Stubstad, R. N. (2000). “An overlay design method for reflective cracking.” Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, pp. 129-151.

Paris, P. C., Erdogan, F. (1963). "A critical analysis of crack propagation laws." Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, Ser. D, 85 (3), pp. 524-534.

Park, S. W., Kim, Y. R. (1996). "A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete." Mechanics of materials, Vol. 24 (4), pp. 241-255.

Paulino, G. H., Song, S. H., Buttlar, W. G. (2004). "Cohesive zone modeling of fracture in asphalt concrete." In: Petite C., Al-Qadi I., Millien A., editors. Proceedings of the Fifth RILEM International Conference in Cracking on Pavements: mitigation, risk assessment and prevention, Limoges, France, pp. 63-70.

Pell, P. S. (1962). "Fatigue characteristics of bitumen and bituminous mixes." Proceedings of International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 310.

Pell, P. S. (1967). "Fatigue of asphalt pavement mixes." Proceedings of the second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, pp. 577-594.

Pell, P. S., Cooper, K. E. (1975). "The fatigue of testing and mix variable on the fatigue performance of bituminous materials." Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologist, 44, Phoenix, AZ.

Pérez, A., Páez, A. (2009). "Experiencias en el empleo de betún modificado con NFU por vía húmeda." IV Jornada Nacional de ASEFMA, Madrid.

Pérez Jiménez, F., Miró Recasens, R., Fonseca Rodriguez, C. (1997). « Essai BDT pour la détermination de la ténacité et résistance au fissurage des mélanges bitumineux. » Quatrième Symposium International RILEM « Essais mécaniques pour les matériaux bitumineux », Lyon, pp. 391-396.

Pérez Jiménez, F., Miró Recasens, R., Martínez, A., Garrote Villar, E. (2007). "Nuevo procedimiento de ensayo para evaluar la tenacidad de las mezclas bituminosas." Revista Carreteras, Asociación Española de la Carretera, nº 153, pp. 38-45.

Pérez Jiménez, F., Miró Recasens, R., Martínez, A., Botella Nieto, R., Valdés Vidal, R. (2011). “Estado de resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas. Ensayos Fénix y Ebade”. Revista Asfalto y Pavimentación, Vol. 1, pp. 39-51.

Pérez, S. (2008). “Approche expérimentale et numérique de la fissuration réfléctive des chaussées.” These, Université de Limoges.

Pérez, S., Balay, J. M., Petit, C., Wendling, L. (2008). “Improvement of a laboratory reflective cracking test by mean of the LCPC’s APT FABAC machine.” 3rd International Conference on Accelerated Pavement Testing.

Perng, J. D. (1989). “Analysis of crack propagation in asphalt concrete using a cohesive crack model.” Ph. D. Thesis, The Ohio University, Ohio.

Prieto Muñoz, J. N. (2006). “Desarrollo de un nuevo ensayo de laboratorio para medir la eficacia de sistemas antirreflexión de fisuras en capas bituminosas.” Tesis Doctoral, universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Pronk, A. C., Hopman, P. C. (1991). “Energy dissipation: The leading factor of fatigue.” Proc., Conf. of the United States Strategic Highway Research: Sharing the Benefits, Thomas Telford, London, pp. 255–267.

Proyecto Fénix (2010). “Pavimentos de larga duración. Guía sobre fisuración descendente”. <<http://www.proyctofenix.es>> (Dec. 11, 2011).

Rababaah, H., Vrajitoru, D., Wolfer, J. (2005). “Asphalt Pavement Crack Classification: A comparaisón of GA, MLP, and SOM”. Proceeding of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, Washington D. C.

Raithby, K. D., Sterling, A. B. (1970). “The effect of rest periods on the fatigue performance of a hot-rolled asphalt under reversed axial loading.” Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 39, pp. 134-152.

Raithby, K. D., Sterling, A. B. (1972). “Some effects of loading history on the fatigue performance of rolled asphalt.” Transport and Road Research Laboratory, Rep. No. LR 496, Crowthorne, U.K.

Ramsamooj, D. V. (1991). “Prediction of fatigue life of asphalt concrete beams from fracture test”. Journal of Testing and Evaluation, Vol. 19 (3), pp. 231-239.

Ramsamooj, D. V. (1994). “Fatigue cracking and rutting in flexible pavements.” Fracture Mechanics Applied to Geotechnical Engineering, Vallejo, L. E. and Liang, R.Y., Ed. ASCE, Geotechnical Special Publication, No. 43, pp. 132-146.

Read, J. M. (1996). “Fatigue Cracking of Bituminous Paving Mixtures.” PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, UK.

Reese, R. (1997). “Properties of aged asphalt binder related to asphalt concrete fatigue life.” Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 66, pp. 604-632.

REFLEX (2002). “Reinforcement of flexible road structures with steel fabrics to prolong service life – Guidelines - Final Report T9:02”. Rapport technique, Brite/Euram.

Reifsnider, K. L. (2001). “Fatigue on composite materials.” Composite Materials Series, Vol. 4, Elsevier Science, Amsterdam.

Rigo, J. M. (1993). “General introduction, main conclusions of the 1989 conference on reflective cracking in pavements, and future prospects.” Liege University, Belgium and Belgian Road Research Centre, Brussels, Belgium.

Rivière, N., Chauvin, J. J. (1997). “Amélioration de l’interprétation de l’essai de fatigue sur les matériaux bitumineux.” Mechanical tests for bituminous materials, H. Di Benedetto and L. Francken, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 283–290.

Roque, R., Birgisson, B., Wang, J. (2006). “Effects of visco-elastic stress redistribution on the cracking performance of asphalt pavement.” Journal of Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 75.

Rowe, G. M. (1993). “Performance of asphalt mixtures in the trapezoidal fatigue test.” Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 62, pp. 334-384.

Rowe, G. M. (1996). “Application of the dissipated energy concept to fatigue cracking in asphalt pavements.” PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Nottingham, UK.

Rowe, G. M., Bouldin, M. G. (2000). “Improve techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures.” Proceedings of the 2nd Euroasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona.

Ruiz, A. (2010). “Mezclas con caucho de neumáticos.” Curso de Mezclas Bituminosas: dosificación, fabricación, puesta en obra y control de calidad, Intevia, Barcelona.

Sacer. <http://www.sacer.fr/>

Sangpetngam, B., Birgisson, B., Roque, R. (2003). “Development of an efficient hot mix asphalt fracture mechanics-based crack growth simulator.” Annual Transportation Research Board Meeting, Washington, D. C.

Scarpas, A., Al-Khoury, R., Gurp, C. A. P. M., Erkens, S. M. J. G. (1997). “Finite elements simulation of damage development in asphalt concrete pavements.” 8th Conference on Asphalt Pavements, Vol. 1, University of Washington, Seattle, Washington, pp. 673-692.

Schapery, R. A. (1975). “A theory of crack initiation and growth in viscoelastic media: Theory development.” International Journal of Fracture, Vol. 11(1), pp. 141-159.

Schapery, R. A. (1982). “Models for damage growth and fracture in nonlinear viscoelastic particulate composites.” Proceedings of 9th U. S. National Congress of Applied Mech., American Society of Mechanical Engineers, pp. 237-245.

Schapery, R. A. (1984). “Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media.” International Journal of Fracture, Vol. 25 (3), pp. 195-223.

Shatnawi, S. R. (1996). “The development of the repetitive direct tension test.” Caltrans, California Department of Transportation, Sacramento, California.

Seeds, S. B., Mc Cullough, B. F., Carmichael, F. (1985). “Asphalt concrete overlay design procedure for portland cement concrete pavements.” Transportation Research Record, Transportation Research Board, Washington D. C., No. 1007, pp.26-36.

Service Technique des Bases Aériennes, STBA (1999). « Techniques Anti-Remontées des Fissures - Guide d’emploi en chaussées aéronautiques ». <http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr/publications/documents/techfiss.pdf> (Jan. 21, 2012).

Seo, Y., Kim, Y. R., Schapery, R. A., Witczak, M. W., Bonaquist, R. (2004). “A study of crack tip deformation and crack growth in asphalt concrete using fracture mechanics.” Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 74, pp. 200-228.

Shell International Petroleum Company, Ltd. (1978). “Shell pavement design manual.” London.

Shen, S., Carpenter, S. H. (2005). “Application of the dissipated energy concept in fatigue endurance limit testing.” Transportation Research Record 1929, Transportation Research Board, Washington, D. C., 165–173.

Shen, S., Airey, G., Carpenter, S., Huang, H. (2006). “A dissipated energy approach to fatigue evaluation.” International Journal of Road Materials Pavement Design, Vol. 7(1), pp. 47–69.

Shen, S. (2006). “Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing.” Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Ill, 227 pgs.

Shen, S., Carpenter, S. H. (2007). “Dissipated energy concepts for HMA performance: fatigue and healing.” Center of Excellence for Airport Technology, COE Report No. 29,

Technical Report of Research, Federal Aviation Administration. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Shimazaki, M., Konno, M., Takahasi, M., Kasahara, A. (2010). “Development of high performance asphalt for prevention of reflective cracking.” First International Conference on Pavement Preservation, Newport Beach, California, Paper 71, pp. 227-245.

Siddharthan, R. V., Yao, J., Sebaaly, P. (1998). “Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution.” Journal of Transportation Engineering, 124 (6), 557-566.

Sias, J. E. (1996). “Rate-dependent stiffness of asphalt concrete used for field to laboratory prediction and fatigue and healing evaluation.” MS thesis, North Carolina State Univ., Raleigh, N.C.

Smith, B. J., Hesp, S. (2000). “Crack pinning in asphalt mastic and concrete: regular fatigue studies.” Transportation Research Record 1728, Transportation Research Board, Washington, D. C., pp. 75-81.

Soares, J. B., Colares de Freitas, F. A., Allen, D. H. (2003). “Crack modelling of asphaltic mixtures considering heterogeneity of the material.” Transportation Research Board, National Research Council, Transportation Research Record 1832, pp. 113-120.

Sobhan, K., Crooks, T., Tandon, V., Mattingly, S. (2004). “Laboratory simulation of the growth and propagation of reflection cracks in geogrid reinforced asphalt overlays.” 5th International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Mitigation, Risk, Assessment and Prevention. Edited by Petit, C., Al-Qadi, I. L. et Millien, A., pp. 589-596.

Sobhan, K., Genduso, M, Tandon, V. (2005). “Effects of geosynthetics reinforcement on the propagation of reflection cracking and accumulation of permanent deformation in asphalt overlays.” Third LACCET International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. Advances in Engineering and Technology: A global perspective. Cartagena, Colombia, pp. 1-9.

Song, I., Little, D., Masad, E., Lytton, R. (2005). "Comprehensive evaluation of damage in asphalt mastics using X-ray CT, continuum mechanics, and micromechanics." *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 74, pp. 885-920.

Song, S. H., Paulino, G. H., Buttlar, W. G. (2005). "Simulation of mode I and mixed-mode crack propagation in asphalt concrete using a bilinear cohesive zone model." *Transportation Research Board, National Research Council, Transportation Research Record 1832*, pp. 113-120.

Song, S. H., Paulino, G. H., Buttlar, W. G. (2006). "Simulation of crack propagation in asphalt concrete using an intrinsic cohesive zone model." *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, pp. 1215-1223.

Sousa, J. B., Shatnawi, S. R., Cox, J. (1996). "An approach for investigation reflective fatigue cracking in asphalt-aggregate overlays." *Third RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavement, Maastricht*, pp. 103-112.

Sousa, J. B., Pais, J. C., Saim, R., Way, G. B., Stubstad, R. N. (2002). "Development of a mechanistic-empirical based overlay design method for reflective cracking." *Transportation Research Board, Washington D. C., Vol. 6*, pp. 339-363.

Strategic Highway Research Program, SHRP A-369 (1994). "Binder characterization and evaluation." *Asphalt research program, National Research Council, Washington D. C.*

Strategic Highway Research Program, SHRP A-404 (1994). "Fatigue response of asphalt-aggregate mixes." *Asphalt research program, National Research Council, Institute of transportation studies, University of California, Berkeley.*

Tamagny, P., Wendling, L., Piau, J. M. (2004). "A new explanation of pavement cracking from top to bottom: The visco-elasticity of asphalt materials." *Cracking in Pavements, Mitigation, Risk Assessment and Prevention, Proceedings of the fifth International RILEM Conference, Limoges, France*, pp. 425-432.

Tangella, S. C., Craus, J., Deacon, J. A., Monismith, C. L. (1990). “Summary report on fatigue response of asphalt mixtures”. Technical memorandum No. TM-UCB-A-003A-89-3M, prepared for SHRP Project A-003A. SHRP-A/IR-90-011. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

Talreja, R. (1987). “Fatigue of composite materials.” Technomic Publishing Co., Lancaster.

Tayebali, A. A., Coplantz, J. S., Harvey, J. T., Monismith, C. L. (1992). “Interim report on fatigue response of asphalt aggregate mixtures.” SHRP Project A-003A, TM-UCB-A-003A-92-1, Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California-Berkeley, Berkeley, CA.

Tayebali, A. A., Deacon, J. A., Coplantz, J. S., Monismith, C. L. (1993). “Modeling fatigue response of asphalt-aggregate mixtures.” Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 62, pp. 385-421.

TENSAR (2002). “Chaussées Souples: renforcement des couches bitumineuses dans les routes et autres zones sujettes à circulation”. Rapport Technique.

Thom, N. (2008). Principles of pavement engineering. Thomas Telford Ltd.

Thompson, M. R., Hugo, F. (1987). “Design methods.” Workshop 2, Proceedings of Sixth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 2, Ann Arbor, Michigan.

Tielking, J. T. (1994). “Force transmissibility of heavy truck tires.” Tire Science Technology, 22 (1), 60-74.

Titi, H., Rasouljan, M., Martínez, M., Becnel, B., Keel, G. (2003). “Long-term performance of stone interlayer pavement”. Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, pp. 118-126.

Tschegg, E. K., Stanzl-Tschegg, S. E., Litzka, J. (1993). “New testing method to characterize mode I fracturing of asphalt aggregate mixtures.” Reflexive Cracking in Pavements, State of

the Art and Design Recommendations, Proceedings of the Second International RILEM Conference, Liege, Belgium, pp. 263-270.

Uhlmeier, J. S., Willoughby, K., Pierce, L. M., Mahoney, J. P. (2000). “Top down cracking in Washington state asphalt concrete wearing course.” Transportation Research Record, 1730.

Uzan, J., Levenberg, E. (2001). “Strain measurements in asphalt concrete specimens towards the development of a fracture model.” International Journal of Pavement Engineering, Vol. 2 (4), pp. 243-258.

Valdés, G., Botella, R., Pérez, F. (2009). “Evaluación de la Resistencia a la Fisuración en Mezclas Bituminosas Mediante la Utilización del Ensayo Fénix.” IV Jornada Nacional de ASEFMA, Madrid.

Van Gurp, A. P. M., Moolenaar, A. A. A. (1989). “Simplified method to predict reflective cracking in asphalt overlays.” RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements, pp. 190-198.

Van der Poel, C. (1954). “A general system describing the viscoelastic properties of bitumen and its relation to routine test.” Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, pp. 221-232.

Van Dijk, W., Moreaud, H., Quedeville, A., Uge, P. (1972). “The fatigue of bitumen and bituminous mixes.” Proceedings of the third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, London, pp. 354-366.

Van Dijk, W. (1975). “Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes.” Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Vol. 44, p. 38.

Van Dijk, W., Visser, W. (1977). “The energy approach to fatigue for pavement design.” Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 46, pp. 1-40.

Verstraeten, J., Veverka, V., Francken, L. (1982). “Rational and practical design of asphalt pavements to avoid cracking and rutting.” Proc., 5th Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, Delft Univ. of Technology, Delft, The Netherlands, pp. 45–58.

Vanelstraete, A., Francken, L. (1996). “Laboratory testing and numerical modeling of overlay systems on cement concrete slabs.” Proceedings of the third RILEM Conference on Reflective Cracking Pavement, Maasticht, pp. 211-220.

Vanelstraete, A., Bondt, A. H. (1997). “Crack prevention and use of overlay systems.” Prevention of reflective cracking in pavements – RILEM Report 18, Edited by Vanelstraete et Franckien, pp. 43-60.

Vanelstraete, A., Bondt, A. H., Courard, L (1997). “Characterization of overlay systems.” Prevention of reflective cracking in pavements – RILEM Report 18. Edited by Vanelstraete et Franckien, pp. 61-83.

Vanelstraete, A., De Visscher, J. (2004). “Long term performance on site of interface systems.” 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements – Mitigation, Risk and Assesment and prevention. Edited by Petit, Al-Qadi et Millien, pp. 699-706.

Vinogradov, A. M., Jenkins, C. H. M., Winter, R. M. (2001). “Cyclic loading effects on durability of polymer systems.” In: Monteiro, P. J. M.; Chong, K. P.; Larsen-Basse, J.; Komvopoulos, K. (eds.) Long Term Durability of Structural Materials, Elsevier, Amsterdam, pp. 150-170.

Wagoner, M. P., Buttlar, W. G., Paulino, G. H. (2005a). “Disk shaped compact tension test for asphalt concrete fracture.” Journal of Society for experimental mechanics, Vol. 45 (3), pp. 270-277.

Wagoner, M. P., Buttlar, W. G., Paulino, G. H. (2005b). “Development of a single notched beam test for asphalt concrete mixtures.” Journal of Testing Evaluation, Vol. 33, No. 6, pp. 1-9.

Wagoner, M. P., Buttlar, W. G., Paulino, G. H., Blankenship, P. (2005c). “Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a disk-shaped compact tension test.” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,

Transportation Research Board of the National Academies, Washington D. C, No. 1929, pp. 183-192.

Wagoner, M. P., Buttlar, W. G. (2007). "Influence of specimen size on fracture energy of asphalt concrete." Proceedings of the Technical Sessions. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 76, pp. 391-426.

Wessel, E. T. (1968). "State of the art of the WOL specimen for K_{IC} fracture toughness testing." Engineering Fracture Mechanics, Vol. 1 (1), pp. 77-82.

Williams, D. A. (1998). "Microdamage healing in asphalt concretes: relating binder composition and surface energy to healing rate." PhD thesis, Texas A&M Univ., College Station, Texas.

Williams, D., Little, D. N., Lytton, R. L., Kim, Y. R, Kim Y. (2001). "Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete, volume II: Laboratory and field testing to assess and evaluate microdamage and microdamage healing." Publication No. FHWA-RD-98-142, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Witczak, M. W. (1999). "Advanced AC mixture material characterization models framework and laboratory test plan." Superpave Models Team Investigators, Final Report Superpave Support and Performance Models Management, NCHRP 9-19, Subtask F2.

Witczak, M. W., Bonaquist, R., Von Quintus, H., Kaloush, K. (1999). "Specimen geometry and aggregate size effects in uniaxial compression and constant height shear test." Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 69, pp. 733-793.

Witczak, M. W., El-Basyouny, M. M. (2004). "Calibration of Fatigue Cracking Models for Flexible Pavements." Guide for Mechanistic-Empirical Design, Appendix IT-1, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D. C.

Wöhler, A. (1968). "Versuche uber die Festigkeit der Eisenbahnwagenachsen." English summary, Engineering, Vol. 4, pp. 160-161.

Wu, R., Harvey, J. T., Monismith, C. L. (2006). “Towards a mechanistic model for reflective cracking in asphalt concrete overlays.” *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 75, pp. 497-534.

Wysong, Z. D. (2004). “Development and comparison of the asphalt binder cracking device to directly measure thermal cracking potential asphalt.” Thesis College of Engineering and Technology, Ohio University.

Yamaoka, I., Yamamoto, D., Hara, T. (1989). “Laboratory fatigue testing of asphalt concrete pavements containing fabric interlayers and field.” 1st International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Assessment and Control. Edited by Rigo J. M. et Degeimbre, R., pp. 49-56.

Yap, P. (1998). “A comparative study of the effect of truck tire types on road contact pressures.” Paper 881846, Society of Automotive Engineers, Inc., 53-59.

Yildirim, Y., Qatan, A., Prozzi, J. (2006). “Field manual for crack sealing in asphalt pavements.” Research Project 0-4061-P3, Center for Transportation Research, The University of Austin, Austin, Texas.

Zhang, J., Li, V. C. (2002). “Monotonic and fatigue performance in bending of fiber reinforced engineered cementitious composite in overlay system.” *Cement and concrete Research*, Vol. 32, pp. 415-423.

Zhang, Z., Roque, R., Birgisson, B., Sangpetngam, B. (2001a). “Identification and Verification of a suitable crack growth law.” *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 70, pp. 206-241.

Zhang, Z., Roque, R., Birgisson, B. (2001b). “Evaluation of laboratory measured crack growth rate for asphalt mixtures.” *Transportation Research Record 1767*, TRB, National Research Council, Washington, D. C., pp. 67-75.

Zhou, F., Chen, D., Scullion, T., Williammee, R. (2004). “Overlay tester: a simple test to evaluate the reflective cracking resistance of asphalt mixtures.” 5th International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements – Mitigation, Risk, Assessment and Prevention. Edited by Petit, C., Al-Qadi, I. L. et Millien, A., pp. 597-604.

Zhou, F., Scullion, T. (2005). “Overlay Tester: A Rapid Performance Related Crack Resistance Test”. FHWA/TX-05/0-4467-2. Texas Transportation Institute, College Station, Austin, Texas.

6DSolutions (2001). “Roadtex, Rotaflex, et Cidex: Grilles de fibre de verre pour renforcement d’enrobé”. Rapport Technique.

ANEXO – I: BORRADOR DE NORMA

ANEXO – I: University of Granada Fatigue Cracking Asphalt Test (Borrador de Norma UGR-FACT)

MÉTODO DE ENSAYO PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A FISURACIÓN POR FATIGA DE MATERIALES BITUMINOSOS

A-I. 1. Objeto y Campo de Aplicación

Este borrador de norma describe el método de ensayo a seguir para determinar la susceptibilidad de los materiales bituminosos a fisurarse cuando están sometidos a las cargas de fatiga del tráfico. El ensayo se lleva a cabo sobre el material bituminoso compactado, aplicando una carga controlada, y es aplicable tanto a mezclas bituminosas de cualquier tamaño máximo de árido, como a sistemas compuestos por varios tipos de mezclas bituminosas, con o sin sistemas anti-fisuras (geotextiles, geomallas, etc.).

El ensayo es aplicable tanto a probetas preparadas y compactadas en laboratorio, como a probetas extraídas del pavimento; las probetas de diferentes tamaños, se colocan sobre el dispositivo de ensayo fijadas a las placas situadas en los apoyos deslizantes.

La susceptibilidad de los materiales bituminosos a fisurarse se evalúa analizando el desarrollo del proceso en sus diferentes etapas, debido a la aplicación de una carga cíclica, bajo unas condiciones de ensayo constantes (temperatura, frecuencia, distancia entre apoyos, etc.). El procedimiento de ensayo permite caracterizar el comportamiento a fisuración por fatiga de mezclas bituminosas, de manera que pueda analizarse su comportamiento estructural en la carretera.

A-I. 2. Normas para Consulta

Las normas que a continuación se indican son indispensables para la aplicación de esta norma. Para las referencias con fecha, solo se aplica la edición citada. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición de la norma (incluyendo cualquier modificación de ésta).

EN 12697-6:2003 Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático.

EN 12697-27 Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 27: Toma de muestras.

EN 12697-33:2003 Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 33: Probetas preparadas mediante compactador de placa.

EN 12697-34:2003 Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 34: Mezclado en laboratorio.

A-I. 3. Términos, Definiciones, Símbolos y Abreviaturas

En el contexto de esta norma se aplican los siguientes términos, definiciones, símbolos y abreviaturas.

Fisuración por fatiga

Aparición de una fisura en un material debido a la aplicación repetida de una carga.

Fallo por Fisuración

Pérdida de la resistencia de un material debido a la propagación total de una fisura a través de todo su espesor

Criterio de Fallo

El número de aplicaciones de carga cuando se produce el fallo por fisuración de un material.

Vida hasta la Fisuración por Fatiga de una Probeta

El número de ciclos, N_f , correspondiente al criterio de fallo, para un conjunto de condiciones de ensayo (temperatura, frecuencia, amplitud de carga, etc.).

Volumen representativo

Volumen de material contenido en la probeta, en el que se produce el desarrollo de un proceso de fisuración por fatiga controlado, debido a la concentración de tensiones generadas por la aplicación de sollicitaciones que simulan los efectos térmicos y del tráfico.

Energía Disipada

Pérdida de la energía introducida en el material, de forma que ésta es transportada fuera del sistema material (disipada), por procesos externos en forma de trabajo mecánico, generación de calor, o daño.

Umbral de Daño

Cantidad de energía disipada acumulada por el material a partir del cual se produce en él un estado de daño (inicio de micro/meso fisuras, inicio de macro-fisura, fallo por fisuración).

Ley de Fisuración por Fatiga

Ecuación potencial ($y=a \cdot x^b$) que caracteriza el comportamiento a fisuración por fatiga de una serie de probetas a diferentes niveles de amplitud de carga, y bajo unas condiciones de ensayo determinadas.

Límite de Resistencia a Fisuración por Fatiga

Valor de amplitud de carga por debajo del cual, el incremento de la vida de fatiga no es proporcional a la disminución del nivel de carga y la mezcla bituminosa posee una larga vida de fatiga (denominada ilimitada).

Parámetro de Daño Medio

Cantidad de daño a fisuración producido de media en cada ciclo de carga, sobre un material determinado, ensayado bajo unas condiciones concretas (carga, frecuencia, temperatura, etc.).

Ley de Daño a Fisuración

Ecuación exponencial ($y=a \cdot e^{b \cdot x}$) que caracteriza el daño medio producido a fisuración por fatiga de una serie de probetas a diferentes niveles de amplitud de carga, y bajo unas condiciones de ensayo determinadas.

Símbolo	Significado	Unidades
h	Altura de la probeta	mm
l	Longitud de la probeta	mm
b	Ancho de la probeta	mm

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

L	Distancia de separación entre apoyos	mm
P	Amplitud de la carga aplicada en la parte superior de la probeta	kN
ω_i	Energía total disipada en el ciclo i, dentro del volumen representativo	J/m ³
ω_{hi}	Energía disipada en el ciclo i en sentido horizontal, dentro del volumen representativo	J/m ³
ω_{vi}	Energía disipada en el ciclo i en sentido vertical, dentro del volumen representativo	J/m ³
n_i	número del ciclo i	-
δ_i	Displacement Ratio en el ciclo i	mm/mm
δ_{hi}	Amplitud de los desplazamientos horizontales dentro del volumen representativo, en el ciclo i	mm
δ_{vi}	Amplitud de los desplazamientos horizontales dentro del volumen representativo, en el ciclo i	mm
ω	Energía disipada acumulada	J/m ³
N_i	Ciclo de inicio de fisura	-
N_M	Ciclo de inicio de macro fisura	-
N_f	Ciclo de fallo por fisuración	-
RDEC	Ratio of Dissipated Energy Change / Tasa de cambio de energía disipada	-
γ	Parámetro de daño medio	-
LRFF	Límite de resistencia a fisuración por fatiga	kN

Tabla A-I. 134. Símbolos y definiciones.

A-I. 4. Principio

Generalidades

Este método de ensayo caracteriza el comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, así como la eficiencia de sistemas anti-remonte de fisuras, sometidas a cargas de fatiga cíclica. Dicho comportamiento se caracteriza mediante unos parámetros de daño establecidos a través de la energía disipada por el material, y un análisis de fatiga de la mezcla obtenido a partir de las relaciones tenso-deformacionales dentro del volumen

representativo de estudio. Este ensayo puede emplearse tanto con probetas fabricadas en laboratorio como con testigos obtenidos de la carretera, de diferentes tamaños y composición (muestras de materiales simples o complejos).

Así, el ensayo trata de reproducir las condiciones de carga y ambientales que provocan el fenómeno de fisuración en las mezclas bituminosas de los firmes de carretera. De esta forma no solo se tienen en cuenta los tipos de esfuerzos producidos, sino también su magnitud, frecuencia de aplicación, influencia de los periodos de descanso, acondicionamiento de la probeta, etc. de manera que el ensayo permite el inicio y propagación de fisuras controladas, bajo condiciones lo más próximas posible a las producidas en el pavimento real.

Ensayo de Elemento

Un ensayo de elemento consiste en la aplicación de una carga en forma de seno-verso, de amplitud constante (asociada a los valores de carga medios en la carretera o país de empleo del material), en la zona central de la probeta a ensayar (volumen de probeta a estudiar), bajo la que se encuentra una discontinuidad (de longitud variable en función de las condiciones del estudio). El resultado se debe obtener a partir de la aparición y propagación de una macro-fisura en dicha zona central, la cual provocará variaciones en las deformaciones horizontales y verticales producidas en la probeta (previamente a su aparición provocará deformaciones plásticas), obteniendo cambios en sus ciclos de histéresis, y modificando el módulo de rigidez de ésta, así como la cantidad de energía disipada. Así, a lo largo de todo el ensayo deben registrarse los valores de deformación vertical y horizontal producidos en dicha zona central de la probeta (o volumen representativo de estudio).

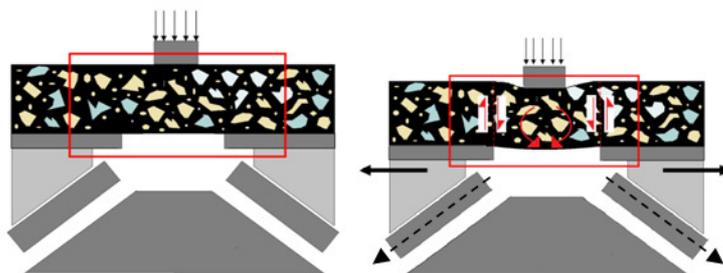


Figura A-I. 1. Movimientos y solicitaciones dentro del volumen de estudio.

Comportamiento a Fisuración

El comportamiento a fisuración de una mezcla debe llevarse a cabo para diferentes magnitudes de carga, con y sin periodos de descanso, y para diferentes condiciones de ensayo (temperatura, humedad, etc.).

A-I. 5. Aparatos

Dispositivo de Ensayo

El dispositivo está compuesto por una *base* (Figura A-I.2a), dos *apoyos deslizantes* (Figura A-I.2b) y un *cabezal de aplicación de carga* (Figura A-I.2c). La base está formada por el sistema de apoyo y unión del prototipo a la prensa de ensayo, sobre la que se encuentra soldada la plataforma de deslizamiento de los apoyos deslizantes, compuesta por dos planos inclinados y un par de raíles que permiten el desplazamiento de los apoyos sin riesgo de cabeceos ni movimientos residuales (que puedan inducir errores en las medidas de deformación tomadas), así como por dos vástagos verticales que serán utilizados para llevar a cabo la toma de medidas de las deformaciones verticales en la zona superior de la probeta (utilizando medidores tipo LVDT, Figura A-I.2f).

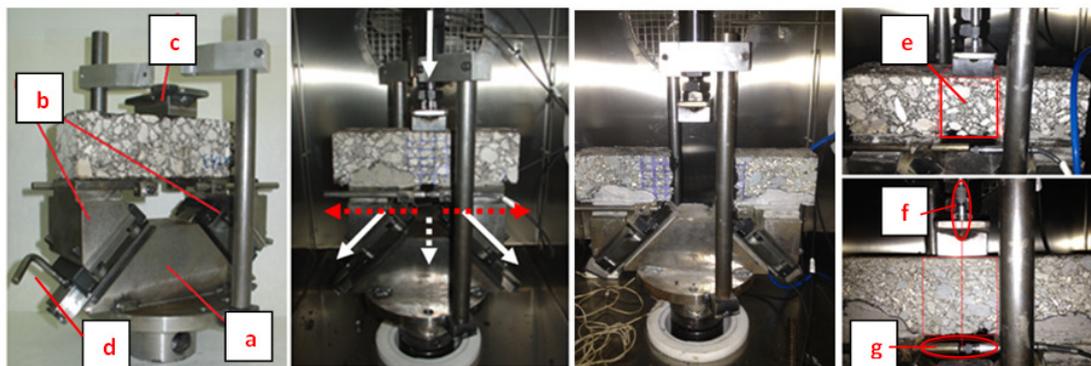


Figura A-I. 2. Descripción del dispositivo de ensayo.

Los apoyos deslizantes permiten el movimiento de deformación de la probeta tanto en sentido horizontal como en vertical (Figura A-I.2e). Estos elementos deslizantes están formados por dos carros de bolas (de forma que se minimiza el rozamiento, permitiendo la transmisión efectiva de las cargas) que se adaptan a la forma de los carriles situados en la base, sobre los que se incorporan dos plataformas de apoyo en las que se fijará la probeta a ensayar (adherida mediante el empleo de una resina epoxi). Además, sobre los apoyos horizontales se colocarán dos elementos auxiliares (uno a cada lado) que permitirán la fijación de los medidores de deformación horizontal (Figura A-I.2g).

La distancia de separación entre los apoyos deslizantes puede variar en función de las condiciones de ensayo. Para la fijación de dichas distancias de separación se emplea un sistema de pernos que permiten fijar las posiciones de los carros durante el tiempo de adhesión de la probeta a los mismos antes de ser llevado a cabo el ensayo (Figura A-I.2d).

Finalmente, el cabezal de aplicación de carga se trata de un elemento independiente del cuerpo del dispositivo que va unido a la zona superior o travesaño de la prensa, y estará compuesto por una pieza de acero con el suficiente espesor para evitar su deformación durante la aplicación de la carga (y así evitar inducir errores diferenciales por deformaciones propias, independientes a las de la probeta), que proporcione una superficie plana sobre la que puedan colocarse los medidores de deformación verticales (Figura A-I.2f).

Máquina de ensayo

La máquina a utilizar para este método es cualquier tipo de prensa de laboratorio con control servo-hidráulico, que pueda generar una carga cíclica en forma de seno-verso, con la frecuencia y amplitud requeridas.

Célula de Carga

La célula de carga utilizada para medir la carga dinámica debe tener una precisión de lectura de $\pm 0,002$ kN, sobre una gama de medición de $\pm 2,5$ kN. Ambos valores son muy comunes de encontrar en las células de carga de cualquier laboratorio de ensayos de carreteras.

Extensómetros y Sensores de Desplazamiento

Los extensómetros utilizados para medir las deformaciones producidas en el volumen representativo de probeta a estudiar deben tener una base de medición de $50 \pm 0,5$ mm, una gama de medición comprendida entre $\pm 0,2$ mm y $\pm 0,5$ mm, y una precisión de lectura superior a $\pm 0,025$ μm . Por su parte, el sensor que mide el desplazamiento del pistón que aplica la carga, debe tener una gama de desplazamiento mayor o igual a $\pm 2,0$ mm, y su precisión de lectura debe ser superior a $\pm 5,0$ μm .

Dispositivo de Sujeción

El dispositivo de sujeción será acorde con las prescripciones expuestas en los apartados anteriores, de manera que permita la fijación de probetas sobre dos apoyos deslizantes, que permitan movimientos horizontales, así como induzcan la aparición de una macrofisura controlada en el volumen de estudio de la probeta. La probeta debe fijarse sobre los apoyos en más de un 60% de su superficie, de manera que se considere que dichos apoyos son un empotramiento.

Equipo de Recogida de Datos

El sistema automático de recogida de datos consta de un ordenador y un dispositivo de conversión analógico/digital. Este dispositivo debe poder generar un registro de la función de carga y de la función de señal del extensómetro, y debe tener una resolución tal que el error debido al proceso de conversión de la señal sea igual o más pequeño que la precisión de lectura de la célula de carga y del extensómetro.

Cámara Termostática

La cámara termostática de acondicionamiento debe lo suficientemente grande para poder contener tanto la probeta como los dispositivos de sujeción de ésta y permitir su trabajabilidad, permitiendo además mantener las temperaturas de ensayo de forma constante.

A-I. 6. Preparación de la Probeta

Elaboración y Aserrado

Las probetas de ensayo sobre materiales simples se deben obtener de muestras en forma de placa fabricadas de acuerdo con la Norma Europea EN 12697-33. Una vez compactadas, las probetas son serradas con forma prismática de diferentes dimensiones, 200 x 60 x 60 para tamaños máximos de árido superiores a 16 mm e inferiores a 32 mm, 200 x 60 x 40 mm para tamaños máximos de árido inferiores a 16 mm, y 200 x 60 x 80 mm para tamaños de árido superiores a 32 mm. Las probetas obtenidas de testigos de la carretera deberán de ser aserradas para cumplir con las dimensiones anteriores.

En el caso de las probetas compuestas, existen dos posibilidades fabricarlas en laboratorio u obtenerlas de testigos de la carretera. En el caso de la fabricación en laboratorio, utilizando un compactador de segmento de rodillo se aplicará la compactación de la capa inferior de mezcla, una vez se haya dejado enfriar (de forma que haya cogido la resistencia suficiente), se aplicara una capa de emulsión bituminosa de adhesión entre capas o un riego de betún, sobre el que se podrá o no colocar un sistema anti-remonte de fisuras, y finalmente se adicionará y compactará la mezcla superior. Tras la fabricación se llevará a cabo el aserrado de la probeta con las dimensiones mínimas de 200 x 80 x 80 mm, y máximas de 400 x 100 x 100 mm.

A fin de determinar el comportamiento a fisuración es necesario llevar a cabo el ensayo de un mínimo de 2 probetas (bajo las mismas condiciones de carga) por cada tipo de mezcla, o sistema complejo que se desee ensayar.

Densidad Aparente

La densidad aparente de las probetas se debe determinar de acuerdo con la Norma Europea EN 12697-6.

Almacenaje

Las probetas se deben almacenar sobre una superficie plana a 5 °C de temperatura, y han de ser ensayadas después de que haya transcurrido un tiempo entre 2 y 8 semanas desde su corte.

Preparación de los Dispositivos de Sujeción

Las probetas a ensayar deben tener dos caras opuestas aserradas, de dimensiones 200 x 40 mm; 200 x 60 mm; 200 x 80 mm; o 300 x 100 mm, en función del tipo de probeta a estudiar. Con objeto de sujetar la probeta al mecanismo de soporte se utilizan placas de diferente tamaño en función del tipo de probeta a ensayar. Dichas placas son fijadas mediante tornillos a los apoyos deslizantes, fijándose la probeta a dichos apoyos mediante una resina epoxi, dejando una distancia variable de separación entre apoyos. Además, las probetas deben estar fijadas en un 60% de la superficie para considerar que sus apoyos están empotrados.

A-I. 7. Procedimientos

Preparación del Equipo de Ensayo

En primer lugar, 24 horas antes de llevar a cabo el ensayo, la probeta deberá adherirse al dispositivo de ensayo pegando su superficie mediante una resina epoxi, manteniendo la distancia entre apoyos deseada. Es importante en este caso utilizar los pernos de fijación de los apoyos deslizantes para evitar ningún tipo de tensión durante el pegado de las probetas.

El dispositivo de ensayo debe colocarse en el marco de la prensa por medio de pasadores, tornillos y roscas, de manera que quede bien fijado sin ningún tipo de cabeceo (Figura A-I. 3).



Figura A-I.3.269 Detalle del ajuste del dispositivo a la prensa.

Una vez fijado el dispositivo al marco, se lleva a cabo una aproximación del cabezal de carga hasta que entre en contacto con la probeta (se recomienda llevar a cabo esta operación manejando la prensa en control por fuerza, y ejecutando la orden de entrar en contacto con una carga baja, como por ejemplo 0,015 kN), y a partir de ahí se colocan los extensómetros. Tanto los extensómetros verticales como horizontales deben ser colocados en el centro de la probeta, empleando las fijaciones incorporadas en el dispositivo (Figura A-I.4). Los extensómetros deben ser colocados de forma que puedan medir tanto en una dirección como en otra, aunque siempre es necesario dejar más recorrido hacia su salida, ya que en ambos casos es a lo que van a tender los desplazamientos.



Figura A-I. 4. Detalle del cabezal de carga y de la colocación de los LVDT's de medida verticales.

Una vez puesto a punto todos los elementos del ensayo, se acciona la cámara termostática a la temperatura de ensayo, y se acondiciona la probeta como mínimo 2 horas antes de realizar el ensayo.

Realización del Ensayo de Fisuración

Una vez que la probeta y el dispositivo han sido fijados, y los extensómetros han sido colocados, alcanzándose la temperatura de ensayo, se debe aplicar una carga cíclica en forma de seno verso (continua, o aplicando periodos de descanso, en función de las condiciones de ensayo).

Los valores de referencia de amplitud de carga, frecuencia, temperatura de acondicionamiento, distancia entre apoyos, y periodos de descanso, a utilizar durante el ensayo vienen recogidos en la Tabla A-I.2.

Parámetro	Valores	Unidades
Amplitud de Carga	2,0; 1,75; 1,5; 1,25; 1,0; 0,75; 0,5; 0,25	kN
Frecuencia	1; 3; 5	Hz
Periodo de Descanso	5; 15	s
Temperatura	-3; 15; 30	°C
Distancia entre apoyos	50; 15; 0	mm

Tabla A-I. 235. Valores de referencia de los parámetros de ensayo.

Registro de la Función de Carga, de la Función de Señal de los Extensómetros y de la Función de Desplazamiento

Las funciones se deben registrar cada 100 ciclos de carga (aunque si la duración del ensayo es menor de 1000 ciclos, debe llevarse a cabo cada 10). Además, las funciones de carga, del extensómetro y del desplazamiento se deben definir en cada ciclo en, al menos, 10 puntos separados por igual tiempo. Así, para cada función la frecuencia de lectura debe de ser de al

menos $10 \cdot F$, siendo F la frecuencia de onda de carga aplicada (es decir, si el ensayo se lleva a cabo a 5 Hz, la frecuencia de lectura deberá ser de 50 Hz).

Final del Ensayo

El ensayo termina cuando se produce la propagación total de la macro-fisura a través de la probeta, provocando su fallo y separación en dos piezas (o se detiene cuando el número de ciclos de carga alcanza los 2.000.000, considerando que a partir del valor de carga aplicado se encuentra el límite de resistencia a fisuración por fatiga). Este criterio de fin de ensayo permite evaluar cada una de las tres fases que comprende el proceso de fisuración (inicio, propagación y fallo).

A-I. 8. Cálculos y Expresión de Resultados

A-I. 8. 1. Cálculos

Determinación de la ley de fisuración por fatiga

A partir del valor de ciclo de fallo (N_f) obtenido por el material se llevará a cabo un análisis de regresión potencial que relacione dicho valor con el nivel de amplitud de carga aplicado en el ensayo. Utilizando diferentes niveles de amplitud de carga se obtendrá una ley de fisuración por fatiga que permitirá definir el límite de resistencia a fisuración (LRFF) asociado a dicho material (Figura A-I.5).

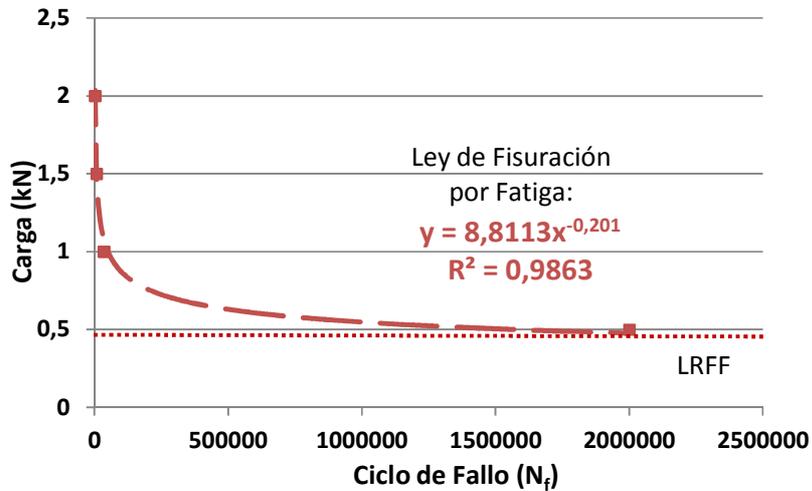


Figura A-1.5. Ley de fisuración por fatiga.

Determinación del parámetro de daño medio. Ley de daño a fisuración por fatiga

A partir de los datos obtenidos durante el ensayo en cada ciclo (carga aplicada, desplazamientos horizontales y verticales en el volumen, y ángulo de fase entre carga y desplazamiento), se determina la energía disipada dentro del volumen de material (área contenida en el interior de los ciclos de histéresis). El dispositivo de ensayo utilizado permite analizar tanto desplazamientos horizontales, como verticales a ambos lados de la probeta, de manera que puede obtenerse una medida global de toda la energía disipada en el volumen de estudio, con una evaluación más precisa el daño producido en el material. Así, la energía disipada total del sistema en cada ciclo de carga vendrá calculada como la energía disipada en sentido horizontal, más la disipada en sentido vertical (Ecuación A-1.1).

$$\omega_i = \omega_{hi} + \omega_{vi} \text{ (Ecuación A - 1.1)}$$

Donde ω_i es la energía disipada en el ciclo i (en J/m^3), ω_{hi} es la energía disipada en el ciclo i en sentido horizontal (en J/m^3), y ω_{vi} es la energía disipada en el ciclo i en sentido vertical (en J/m^3).

Una vez calculada la energía disipada se llevará a cabo la determinación de los valores de RDEC en cada ciclo (RDEC_i) según la Ecuación A-I.2, y el valor de su suma a lo largo del ensayo (RDEC Acumulado).

$$RDEC_{n+1} = \frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_n} \text{ (Ecuación A - I. 2)}$$

Donde ω_n es la energía disipada producida en el ciclo de carga n (en J/m³), y ω_{n+1} es la energía disipada producida en el ciclo de carga n+1 (en J/m³).

Empleando el valor de RDEC acumulado en el ensayo se define el parámetro de daño medio asociado al material evaluado bajo el nivel de amplitud de carga y las condiciones de ensayo definidas (Ecuación A-I.3). Llevando a cabo un análisis de regresión exponencial entre la amplitud de carga aplicada y el parámetro de daño medio asociado a la mezcla, se determina la ley de daño a fisuración para ese material en las condiciones de ensayo utilizadas (Figura A-I.6).

$$\gamma = \frac{RDEC \text{ Acumulado}}{N_f} \text{ (Ecuación A - I. 3)}$$

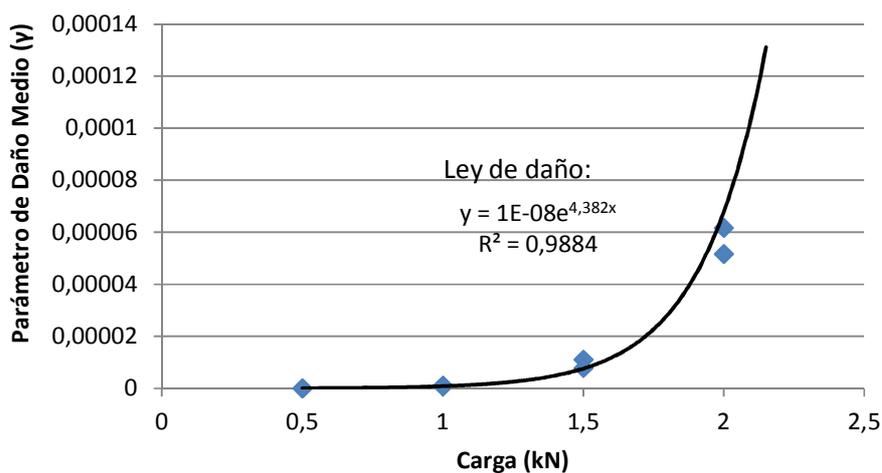


Figura A-I.6. Ley de daño a fisuración por fatiga.

Determinación de los umbrales de daño a fisuración

Mediante el cálculo Displacement Ratio (Ecuación A-I.4), se definirán los ciclos N_i y N_M , que determinarán las diferentes fases del proceso de fisuración sufrido por el material. La estimación de dichos ciclos se llevará a cabo a partir de los cambios de tendencia mostrados en la curva del parámetro Displacement Ratio (Figura A-I.7).

$$\delta_i = \frac{\delta_{hi}}{\delta_{vi}} \text{ (Ecuación A - I. 4)}$$

Donde δ_i es el valor del Displacement Ratio en el ciclo i , δ_{hi} es la amplitud de los desplazamientos horizontales en el ciclo i , y δ_{vi} es la amplitud de los desplazamientos verticales en el ciclo i .

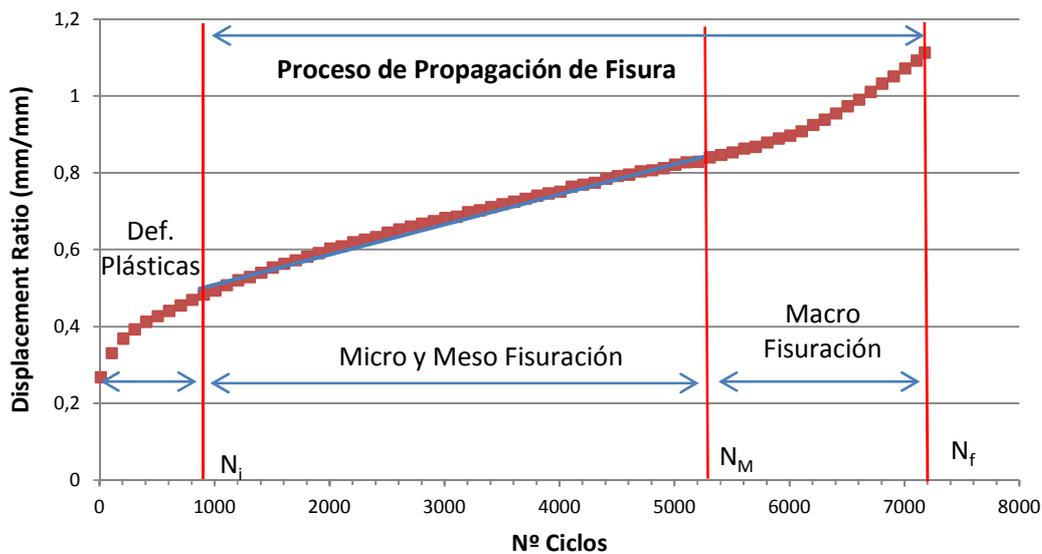


Figura A-I.7. Valores de Displacement Ratio.

A partir de los valores de energía disipada acumulada en cada ciclo de carga (Ecuación A-I.5), se determinarán los valores de energía umbrales asociados a los ciclos N_i , N_M , y N_f . De esta forma podrá evaluarse la energía necesaria para provocar los diferentes estados de

daño del material, de forma que pueda compararse su comportamiento con otras condiciones de carga y de ensayo (Figura A-I.8).

$$\omega = \sum_{i=1}^{N_i; N_M; N_f} \omega_i \text{ (Ecuación A – I.5)}$$

Donde ω es la energía disipada acumulada (J/m^3), en el ciclo de inicio del proceso de fisuración N_i , en el ciclo de inicio de la macro-fisura N_M , o en el ciclo de fallo N_f .

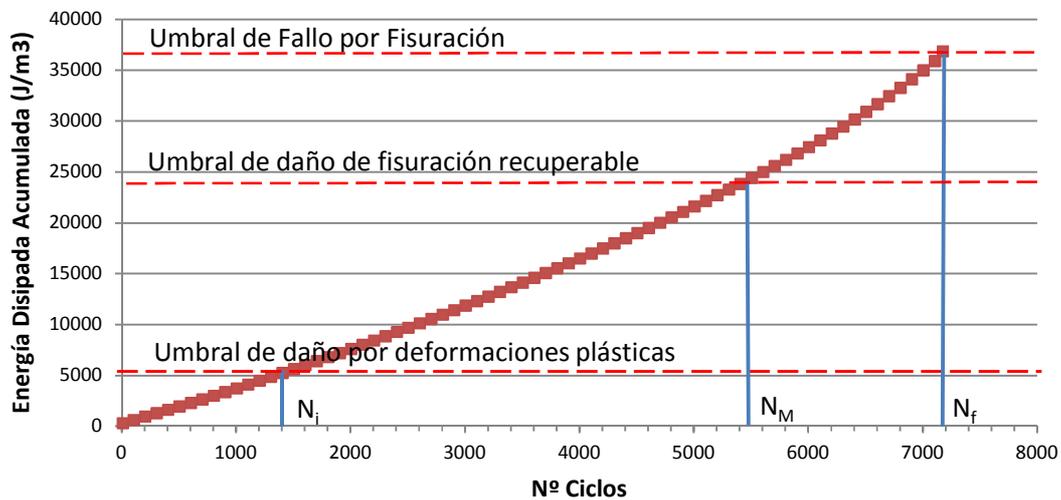


Figura A-I.8. Valores de energía disipada acumulada.

En base a dicho concepto, variando los escalones de carga aplicados en cada ensayo, pueden establecerse las curvas umbrales de cada material, de forma que se defina su comportamiento a fisuración en función de la carga aplicada (Figura A-I.9).

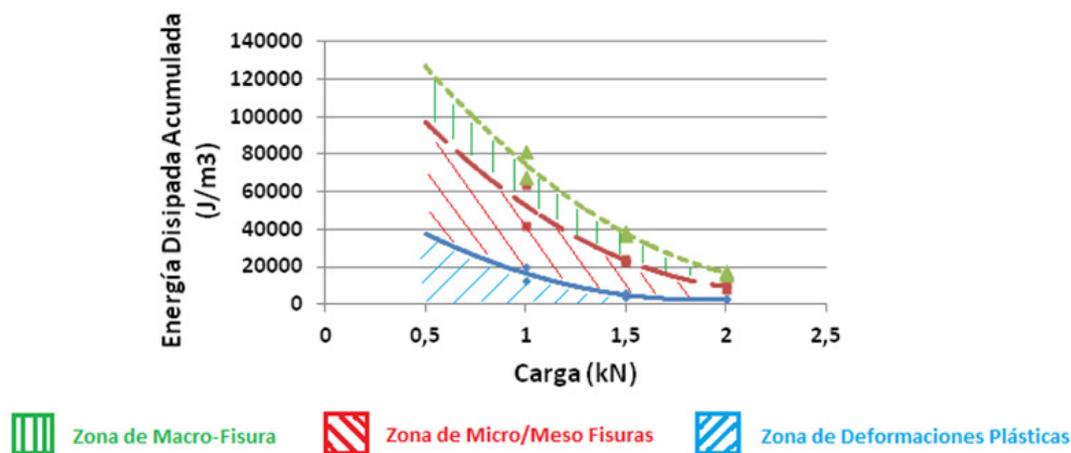


Figura A-I.9. Umbrales de daño asociados a cada nivel de carga.

A-I. 8.2. Expresión de Resultados

Los resultados a expresar al final del ensayo para evaluar el comportamiento a fisuración del material estudiado serán:

- Valor N_f (o en su defecto N_f^*) que marca el fallo del material a fisuración por fatiga (llevando a cabo un análisis fenomenológico del proceso). A mayor N_f , mayor número de ciclos, bajo unas condiciones de ensayo determinadas (incluyendo el espesor de probeta en el caso del N_f), habrá soportado el material estudiado, y por tanto más resistente será su comportamiento global ante el fenómeno de la fisuración por fatiga.
- Valor del parámetro de daño medio, que defina el daño por fisuración causado en un material bajo las condiciones de ensayo utilizadas. Cuanto menor sea el valor de este parámetro, menor será el daño por fisuración causado en cada ciclo, y por tanto más resistente será este material ante dicho fenómeno.
- Valores umbrales de daño para los ciclos N_i , N_M , y N_f , que marquen los límites de energía disipada que provocan los diferentes estados de daño en el material, y que permitan definir su resistencia a la aparición de fisuras, así como su resistencia a la propagación de las mismas. De la misma forma que en el caso anterior, cuanto mayores sean los valores de energía disipada acumulada de cada umbral, más

resistente será el material a cada una de las fases del proceso. Por otra parte, cuanto mayor distancia haya entre umbrales más oposición pondrá el material a la propagación de daño de micro o macro-fisuración.

A partir de dichos resultados, obtenidos para cada uno de los niveles de carga aplicados (dejando fijas las otras condiciones de ensayo: frecuencia, temperatura, etc.), pueden definirse las leyes de daño a fisuración (Ecuación A-1.6), así como su LRFF y la ley de fisuración por fatiga del material (Ecuación A-1.7).

$$\gamma(P) = a \cdot e^{b \cdot P} \text{ (Ecuación A – 1.6)}$$

$$P(N_f) = a \cdot N_f^b \text{ (Ecuación A – 1.7)}$$

A-I. 9. Informe de Ensayo

El Informe de ensayo debe contener la información relacionada con el apartado anterior, junto con la siguiente:

- Identificación de la muestra
- Densidad de la probeta
- Temperatura a la que se realizó el ensayo
- Distancia entre apoyos, y frecuencia de carga
- Duración de los periodos de descanso (si hubiere)
- Espesor medio de la probeta, incluyendo el espesor de todas las capas que se puedan identificar separadamente dentro de la probeta
- La identificación de los materiales que componen la mezcla y sus proporciones
- El método de fabricación de la probeta
- La fecha de fabricación de la muestra y edad de la probeta
- El número de probetas de la misma composición ensayadas
- El número y la fecha de esta norma
- La descripción de la verificación del funcionamiento correcto del equipo completo y del montaje de la probeta, incluyendo los resultados de este ensayo.

- El número medio de ciclos de fallo para cada prueba realizada en un mismo nivel del modo de carga y su desviación típica.
- Las leyes de daño y fatiga, así como el valor del LRFF.
- La gráfica con los umbrales de daño.

El estudio del comportamiento a fisuración por fatiga de una mezcla a través de este método de ensayo contempla como mínimo el análisis de 3 escalones de carga diferentes, realizando un mínimo de 2 probetas por cada escalón.

A-I. 10. Precisión

La repetibilidad y reproducibilidad del ensayo dependerán de si las muestras se han preparado en laboratorio o se han extraído de un pavimento, y del estado de las caras tras su aserrado. A pesar de que es necesario continuar en el estudio de la precisión del ensayo, en la Tabla A-I.3 se recogen los datos obtenidos de repetibilidad de este ensayo con probetas fabricadas en laboratorio para mezclas tipo AC 22 S, AC 16 S y BBTM 11A.

Anexo – I: Borrador de Norma

AC 22 S								
Condiciones de Ensayo	Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Media	Desviación Típica	Coef. Variación Cv	r
2,0 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	455	485	515	485	30,00	0,0616	9,99
	ED Acumulada (J/m ³)	8198	9619	6977	8264	1322,41	0,1600	25,86
1,5 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	1395	1230	1375	1333	90,05	0,0675	10,92
	ED Acumulada (J/m ³)	8203	10649	14423	11091	3133,29	0,2825	45,67
1,0 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	12805	17960	17105	15957	2762,70	0,1731	27,99
	ED Acumulada (J/m ³)	21039	43200	43247	35828	12807,99	0,3575	57,79
0,5 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	88790	91615	-	90203	1997,58	0,0221	4,38
	ED Acumulada (J/m ³)	82625	74192	-	78408	5963,13	0,0761	15,06
AC 16 S								
Condiciones de Ensayo	Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Media	Desviación Típica	Coef. Variación Cv	r	
2,0 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	2160	1455	1808	498,51	0,02758	54,61	
	ED Acumulada (J/m ³)	17646	15882	16765	1247,65	0,0744	14,73	
1,5 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	8285	7175	7730	784,89	0,01015	20,10	
	ED Acumulada (J/m ³)	39029	36875	37953	1522,98	0,0401	7,95	
1,0 kN; 5 Hz; 20 °C; 50 mm	N _f	35200	33805	34503	986,41	0,0286	5,66	
	ED Acumulada (J/m ³)	67604	81683	74644	9955,34	0,01334	26,40	
BBTM 11A BMAVC								
Condiciones de Ensayo	Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Media	Desviación Típica	Coef. Variación Cv	r	
1,0 kN; 5 Hz; 20 °C; 0 mm	N _f	3400	3700	3550	212,13	0,0598	11,83	
	ED Acumulada (J/m ³)	29020	30706	29863	1192,11	0,0399	7,90	
0,75 kN; 5 Hz; 20 °C; 0 mm	N _f	11500	11765	11632	187,38	0,0161	3,19	
	ED Acumulada (J/m ³)	47032	52081	49557	3570,36	0,0720	14,26	
BBTM 11A BM3c								
Condiciones de Ensayo	Parámetro	Prueba 1	Prueba 2	Media	Desviación Típica	Coef. Variación Cv	r	
0,75 kN; 5 Hz; 20 °C; 0 mm	N _f	7000	8000	7500	707,11	0,0943	18,66	
	ED Acumulada (J/m ³)	32898	30317	31607	1824,92	0,0577	11,43	

Tabla 36 Resultados de repetibilidad del ensayo.

ANEXO – II: PRUEBAS PARA FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

ANEXO – II: Pruebas para Futuras Líneas de Investigación

A-II. 1. Estudio de la Influencia de los Periodos de Descanso

Como se ha recogido durante el estudio del estado del arte, el fenómeno de “healing” asociado a los periodos de descanso entre cada ciclo de carga puede influir positivamente en el comportamiento a fatiga de mezclas bituminosas. En este sentido, desde esta investigación se ha pretendido analizar si el método de ensayo desarrollado es sensible a la inclusión de dichos periodos de descanso y si su efecto repercute en el comportamiento a fisuración del material.

Este apartado no pretende establecer un estudio en profundidad acerca de la influencia de los periodos de descanso en el comportamiento de la mezcla. Su objetivo es analizar la sensibilidad del método de ensayo desarrollado a los periodos de descanso, y de esta forma sentar las bases para desarrollar una posible futura línea de investigación donde se profundice en el estudio del comportamiento de la mezcla. Así, se ha llevado a cabo el estudio de una probeta fabricada con la mezcla AC 22 S, donde se evaluó la influencia de los periodos de descanso cortos tras la aplicación de cada ciclo (Tabla A-II.1). Dicho ensayo fue comparado con el ensayo realizado bajo las mismas condiciones pero sin periodo de descanso para la misma mezcla.

Tipo de Mezcla	Tipo de Periodo de Descanso	Tiempo de duración de cada periodo	Frecuencia de aplicación del periodo	Amplitud de Carga	Frecuencia de ensayo	Temperatura	Distancia entre apoyos
AC 22 S	Corto	15 s	Cada 5 ciclos de carga	1,5 kN	5 Hz	20 °C	50 mm

Tabla A-II. 1. Condiciones de ensayo para el estudio de la influencia de los periodos de descanso.

La Figura A-II.1 recoge los valores de energía disipada por la mezcla AC 22 S, con y sin periodos de descanso (PD). Como podemos observar la energía disipada de ambos ensayos, comienza igual, y alcanza los mismos valores finales, lo cual indica que se trata de la misma mezcla ensayada bajo las mismas condiciones. No obstante, durante la fase de micro-

fisuración la energía disipada se mantiene quasi-constante, con un crecimiento menor, en el caso de la mezcla con periodos de descanso. Una vez alcanzada la fase de macro-fisuración, cuando el daño producido no es reversible, la energía disipada vuelve a mostrar un crecimiento muy similar al de la mezcla sin periodos de descanso.

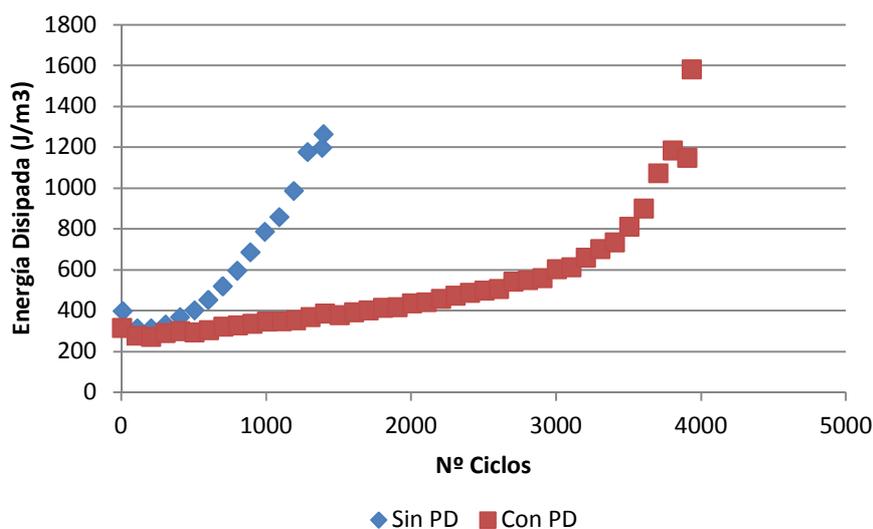


Figura A-III. 1. Energía disipada total durante el ensayo por el material AC 22 S con y sin periodos de descanso.

El hecho anteriormente comentado, muestra una influencia positiva de los periodos de descanso en comportamiento a fisuración de mezclas bituminosas, y como durante la fase de micro-daño, puede producirse un efecto de “healing” en la mezcla gracias a su acción (pero una vez alcanzado el macro daño, éste no surte efecto). Por su parte, en base a los valores de Energy y Displacement Ratio muestran como hasta el inicio del proceso de fisuración, el comportamiento de la mezcla es bastante similar, pero es en la fase de micro y meso-fisuración en la que la influencia de los periodos de descanso hace más notorio efecto.

Anexo – II: Pruebas para Futuras Líneas de Investigación

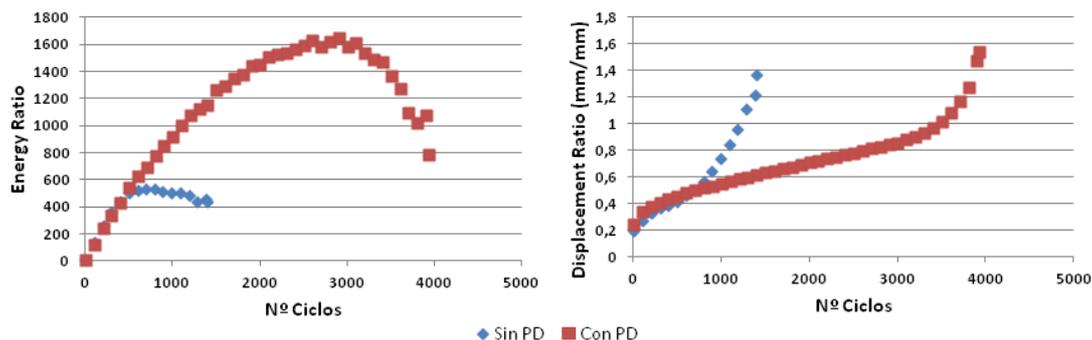


Figura A-II. 2.Comparativa de valores de Energy y Displacement Ratio, tras llevar a cabo el ensayo con y sin periodos de descanso.

Por su parte, la energía disipada acumulada muestra el efecto del periodo de descanso porque a igualdad de condiciones de ensayo, la energía necesaria para provocar el daño del material es mucho mayor (porque se está produciendo un proceso de recuperación entre los ciclos de aplicación de carga). En este sentido, podemos apuntar que el umbral de deformaciones plásticas es similar en ambos casos, y que la diferencia entre el umbral de fallo y el de macro-fisuración también lo es. Así, las mayores diferencias se producen en la zona de micro-daño, donde el efecto del “healing” hace que sea necesario introducir una mayor cantidad de energía para fisurar la mezcla.

De la misma forma, la gráfica de RDEC muestra como el daño producido por fisuración cada 100 ciclos, es menor en el caso de la mezcla que contiene periodos de descanso entre sus ciclos de carga.

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

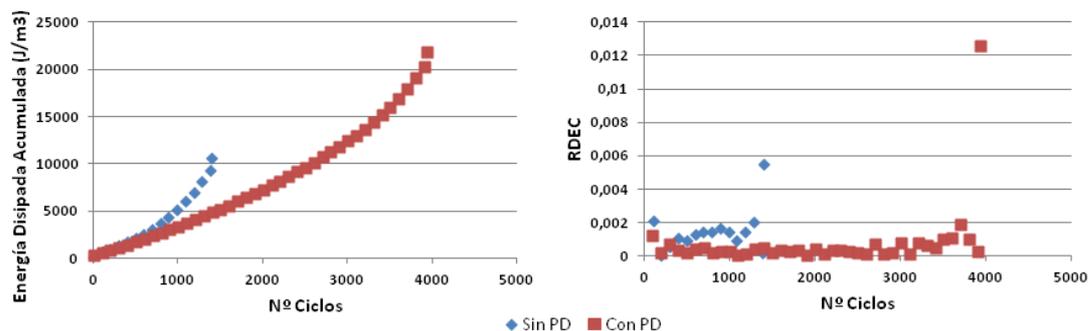


Figura 270 Valores comparativos de energía disipada acumulada y RDEC, en ensayo llevado a cabo con y sin periodo de descanso.

En base a esta prueba podemos afirmar, que el método de ensayo desarrollado muestra la sensibilidad suficiente para detectar el efecto de los periodos de descanso sobre el comportamiento a fisuración de la mezcla. Así, sería de gran interés profundizar en el estudio de esta línea de trabajo, para mejorar las condiciones de diseño de los materiales bituminosos a nivel de laboratorio.

A-II. 2. Estudio del Comportamiento a Fisuración por Fatiga de Materiales Compuestos

Este apartado recoge las pruebas realizadas con el ensayo desarrollado, sobre probetas compuestas por varios tipos de mezclas y sistemas anti-fisuras. De la misma forma que en el punto anterior, no se trata de un estudio en profundidad de este tipo de materiales, sino un análisis de la viabilidad de su estudio a través del método de ensayo de esta tesis. Para ello, en este caso se fabricaron a nivel de laboratorio dos probetas compuestas por una capa de rodadura BBTM 11A de 2,5 cm de espesor, y una capa intermedia de tipo AC 16 S de 4,5 cm (Figuras A-II.4 y A-II.5). La diferencia entre ambas probetas es que una de ellas llevaba como capa intermedia un geotextil no tejido de filamentos (100% de polipropileno virgen, unidos mecánicamente por un proceso de agujeteado), utilizado para retardar la propagación de fisuras en pavimentos (Figura A-II.6).

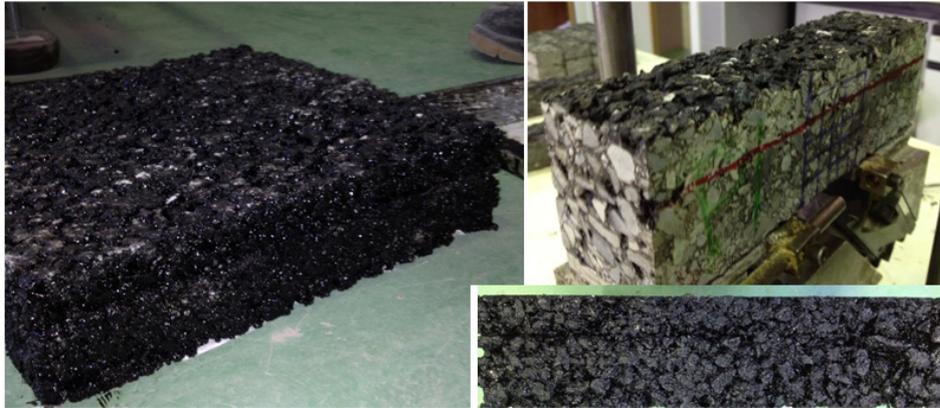


Figura 271. Detalle del paquete de firme fabricado en laboratorio formado por una capa intermedia AC 16 S y una capa de rodadura BBTM 11A.

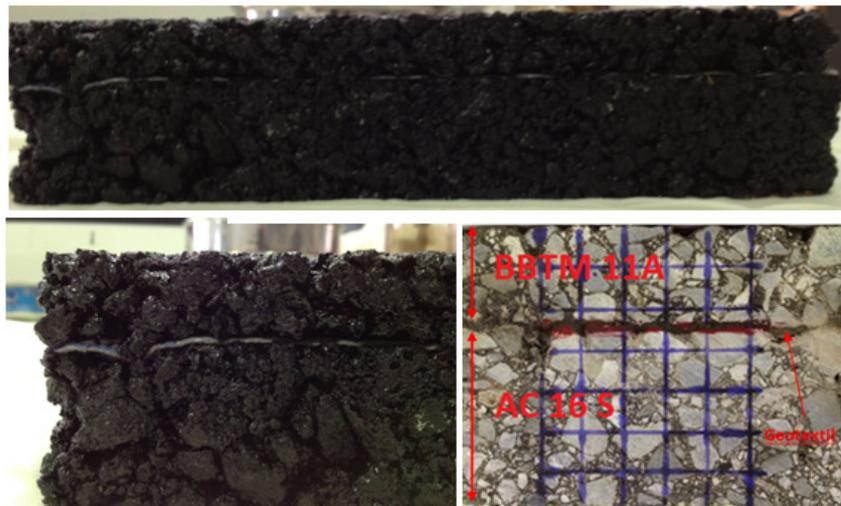


Figura 272. Detalle del paquete de firme compuesto por mezcla AC 16 S intermedia, mezcla BBTM 11A de rodadura, y geotextil como sistema anti-remonte de fisuras.

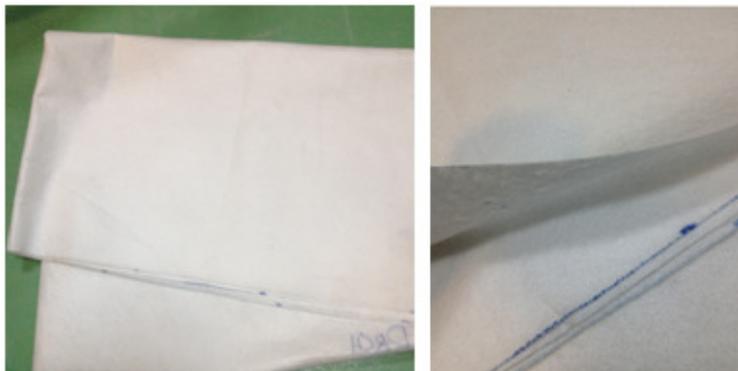


Figura A-II. 6. Detalle del geotextil utilizado como sistema anti-remonte de fisuras en el paquete defirme estudiado.

Ambas probetas fueron ensayadas bajo una carga de 2 kN, 5 Hz de frecuencia, a 20 °C de temperatura, y utilizando una distancia de separación entre apoyos de 50 mm. La Figura A-II.7 recoge los valores de energía disipada durante el ensayo de ambas mezclas. Como se puede observar, la evolución de la energía disipada en cada ciclo de la probeta sin geotextil es similar a la de las probetas fabricadas con un solo tipo de mezcla, pudiendo distinguir dos etapas (una con una pendiente de crecimiento menor asociada al micro daño, y otra con una pendiente mayor asociada a la macro-fisura). Por su parte, la tendencia mostrada por la probeta con geotextil es sustancialmente diferente, puesto que hubo un problema de adherencia entre capas durante el ensayo. La probeta fabricada no fue capaz de resistir el esfuerzo de cortante aplicado por el dispositivo y las dos capas de las que se componía se despegaron por la zona del geotextil (Figura A-II.8). Así, la evolución de la energía disipada lo que muestra es el crecimiento de 2 fisuras, en dos capas independientes con rotura por separado, no pudiendo evaluar el efecto del geotextil como sistema anti remonte de fisuras.

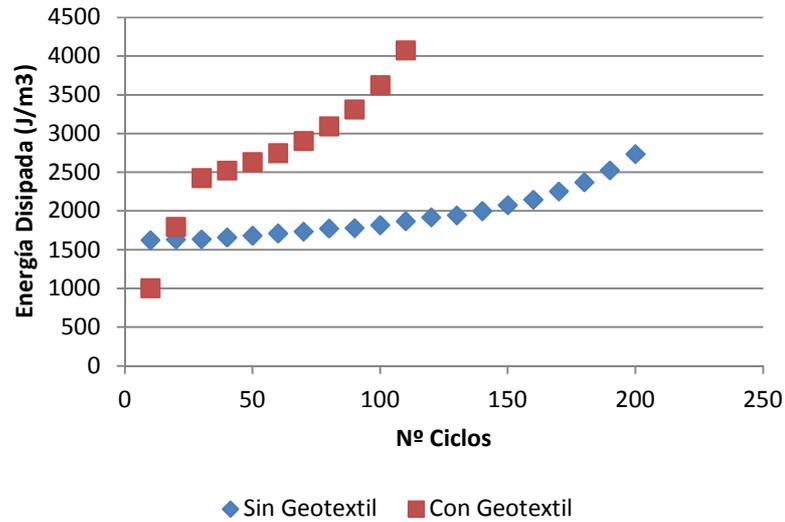


Figura A-II. 7. Resultados de energía disipada durante el ensayo de las probetas de firme completo fabricadas en laboratorio.



Figura A-II. 8. Detalle del fallo por cortante de la probeta fabricada y la consecuente separación entre capas.

Por su parte, los valores de energy y displacement ratio, también muestran una tendencia similar a la de los ensayos de probetas simples, permitiendo llevar a cabo un tratamiento de los resultados análogo (Figura A-II.9).

Diseño de un Método de Ensayo de Laboratorio para el
Análisis de la Resistencia a Fisuración de Mezclas Bituminosas

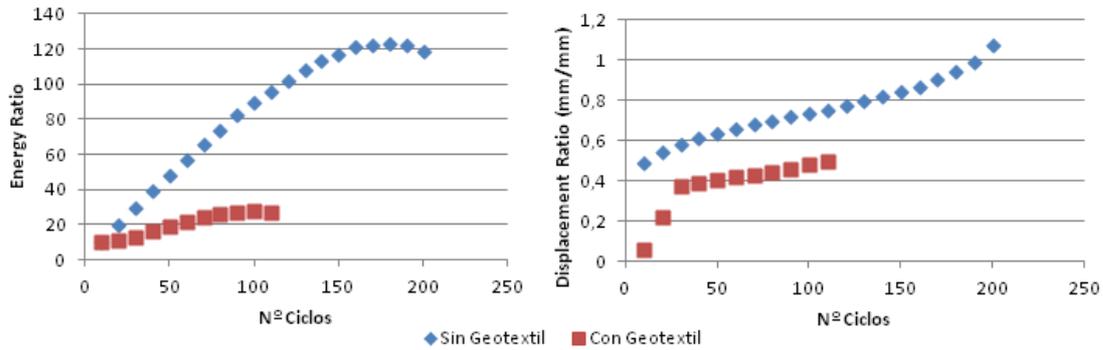


Figura A-II.9. Valores de Energy y Displacement Ratio de las probetas de firme completo fabricadas en laboratorio.

En las pruebas realizadas en este caso no ha podido evaluarse el efecto del sistema anti-remonte de fisuras debido al problema asociado a su adherencia. No obstante, el método de ensayo desarrollado ha demostrado tener la aptitud para ensayar secciones de firme compuestas de varios materiales, ofreciendo resultados estables con la misma tendencia que en el caso de los materiales simples. Además, dadas sus características de carga (tracción, flexión y cortante), se ha mostrado como una prueba útil para evaluar la adherencia entre capas, lo cual resulta en otro aspecto muy positivo.

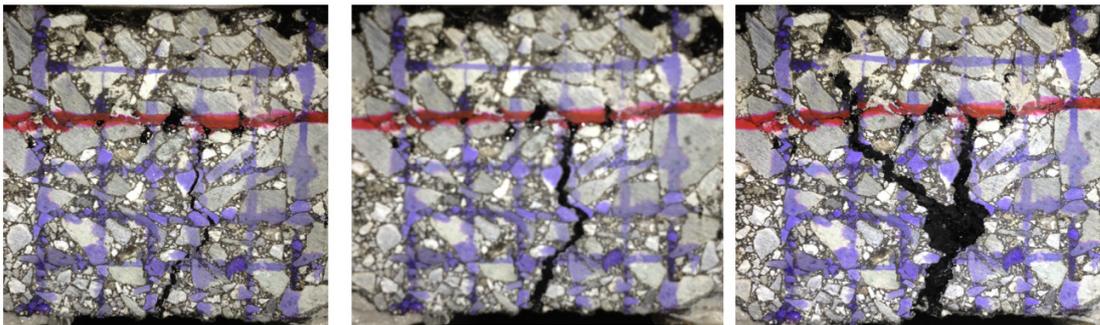


Figura A-II. 10. Detalle de la propagación de la fisura en la probeta sin geotextil.

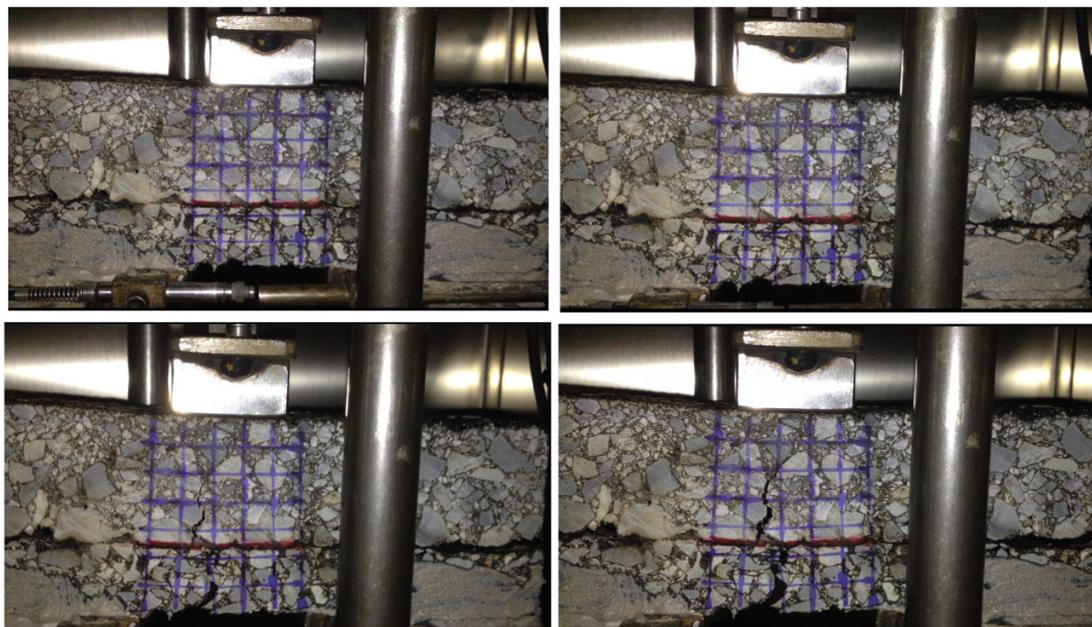


Figura A-III. 11. Detalle de la propagación de la fisura en la probeta con geotextil.

En el caso de que la adherencia fuera la correcta (como en el caso de la mezcla sin geotextil), el análisis comparativo del comportamiento a fisuración de diferentes secciones de firme, podría llevarse a cabo fácilmente a través de la energía disipada acumulada durante el ensayo (Figura A-II.12).

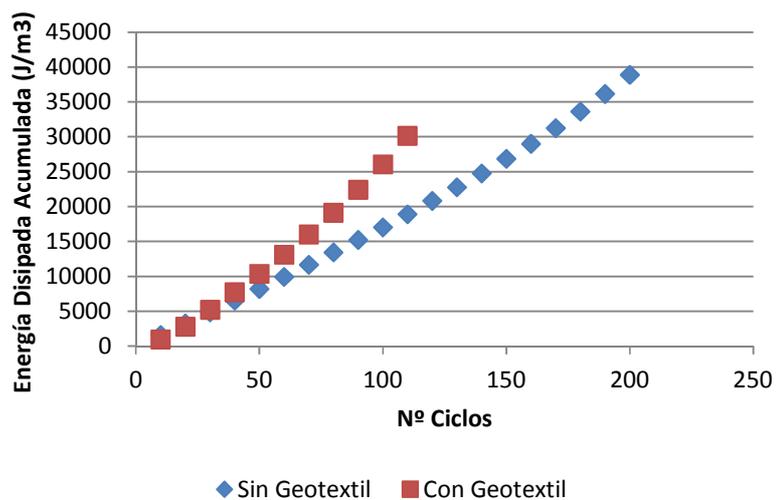


Figura A-II. 12. Resultados de energía disipada acumulada durante el ensayo de las probetas de firme completo fabricadas en laboratorio.