

# DESARROLLO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS A PARTIR DE SU CARACTERIZACIÓN EN UN ENSAYO A TRACCIÓN

Félix Edmundo Pérez Jiménez, Rodrigo Miró Recasens, Adriana Haydée Martínez,  
Jesús Alonso Mota, Jorge Cepeda Aldape y Margarita Rodríguez Cambeiro



LABORATORIO DE CAMINOS  
DPTO. DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE Y TERRITORIO  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

## “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo”

### Presidente



**D. JOSÉ LUIS ELVIRA MUÑOZ**

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Director Técnico de la Dirección General de Carreteras  
del Ministerio de Fomento  
Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Madrid  
Encomienda de la Orden del Mérito Civil, Medalla al  
Mérito Profesional del C.I.C.C.P. y Medalla de Oro de  
la Carretera



**D. JOSÉ Mª MORERA BOSCH**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Consejero Delegado de Iberpistas, S.A.C.E y Director  
Regional de las Autopistas Centro-Norte del Grupo Abertis  
Miembro del Comité Ejecutivo de A.S.E.T.A.



**D. JUAN MANUEL MORÓN GARCÍA (q.e.p.d.)**

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Vicepresidente de la Red de Innovación y Nuevas  
Tecnologías en Ingeniería Civil  
Medalla al Mérito Profesional del Colegio de Ingenieros  
de Caminos, Canales y Puertos

### Vocales (relacionados alfabéticamente)



**D. JORGE O. AGNUSDEI**

Doctor en Ciencias Químicas  
Presidente de la Comisión Permanente del Asfalto  
de Argentina  
Secretario Permanente de los Congresos  
Ibero-Latinoamericanos del Asfalto



**D. ÓSCAR DE BUEN RICHKARDAY**

Ingeniero Civil y Maestro en Ciencias  
Jefe de la Unidad de Autopistas de Cuota de la  
Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México  
Académico de Número de la Academia Mexicana de  
Ingeniería



**D. CÉSAR CAÑEDO-ARGÜELLES TORREJÓN**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Presidente de Prointec, S.A.  
Medalla de Honor y Medalla al Mérito Profesional del  
Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos



**D. RAFAEL IZQUIERDO DE BARTOLOMÉ**

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y  
Licenciado en Ciencias Económicas  
Profesor Jean Monnet de la Unión Europea  
Profesor Emérito de la Universidad Politécnica de  
Madrid

### Secretario



**D. ANICETO ZARAGOZA RAMÍREZ**

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y  
Licenciado en Ciencias Económicas  
Profesor Titular de la E.T.S.I.C.C.P. de la U.P.M.  
Director General de Oficemen

### Comité de Aceptación

**D. ALBERTO BARDESI ORÚE-ECHEVARRÍA**

Subdirector de Asfaltos de Repsol YPF Lubricantes y Especialidades, S.A.

**D. JACOBO DÍAZ PINEDA**

Director General de la Asociación Española de la Carretera

**D. JUAN JOSÉ JARILLO RODRÍGUEZ**

Subdirector de Planificación y Proyectos de Carreteras de la  
Dirección General de Carreteras de la Consejería de Transportes e  
Infraestructuras de la Comunidad de Madrid

**D. JOSÉ ANTONIO SOTO SÁNCHEZ**

Director Técnico de la Cepsa Productos Asfálticos, S.A.

**Fallo del Jurado de la  
1ª Edición del "Premio  
Internacional a la  
Innovación en Carreteras  
Juan Antonio Fernández  
del Campo", adoptado  
en reunión celebrada en  
Madrid, el día 14 de  
septiembre de 2006**

*"...tras una intensa deliberación y habiendo obtenido la mayoría de los votos del Jurado, cuyos miembros (...) han emitido su dictamen personalmente, se acuerda otorgar el galardón como mejor trabajo de innovación en carreteras presentado a la "1ª Edición del Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo" al original que lleva por título Desarrollo de un nuevo procedimiento para la evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas a partir de su caracterización en un ensayo a tracción, y del que son autores D. Félix Edmundo Pérez Jiménez, D. Rodrigo Miró Recasens, D<sup>a</sup> Adriana Haydée Martínez, D. Jesús Alonso Mota, D. Jorge Cepeda Aldape y D<sup>a</sup> Margarita Rodríguez Cambeiro.*

*El Jurado ha querido destacar el marcado carácter internacional del equipo investigador que se ha alzado con este galardón, como demuestra el hecho de que sus integrantes procedan de universidades de España, México y Argentina.*

*Asimismo, el Jurado acuerda reconocer con una Mención Especial el trabajo titulado Síntesis de la investigación colombiana sobre caracterización de mezclas asfálticas utilizando desechos plásticos, y del que son autores D. Fredy Alberto Reyes Lizcano y D<sup>a</sup> Ana Sofía Figueroa Infante."*



# A LA MEMORIA DE UN MAESTRO Y GRAN AMIGO



**José Luis Elvira Muñoz**  
Presidente del Jurado de la  
1ª Edición del "Premio  
Internacional a la  
Innovación en Carreteras  
Juan Antonio Fernández  
del Campo"

*“La humanidad ha evolucionado comunicándose. El habla fue el gran vínculo para el primer contacto entre los hombres. El camino fue su complemento imprescindible. El aislamiento sólo lleva a la penuria y a la angustia, y como tal se ha considerado una condena.”*

Son palabras de mi maestro y gran amigo Juan Antonio Fernández del Campo y Cuevas, que fueron pronunciadas en mayo de 1993, durante el acto inaugural del XII Congreso Mundial de Carreteras de la **International Road Federation** (IRF), que presidía S.M. El Rey Juan Carlos I y en el que tuve el honor de desempeñar las funciones de Ponente General.

Tres o cuatro frases tan sólo que revelan, sin embargo, la extraordinaria sensibilidad de Juan Antonio, su generosidad intelectual y, sobre todo, la gran pasión que sentía por la carretera en toda la concepción del fenómeno, especialmente en su dimensión social... espiritual incluso.

Y es que, por encima de sus cualidades como ingeniero, como técnico, como investigador y científico, como docente, por encima de todo ello destacó siempre su condición de humanista, comprometido con su época y defensor de **“la comunicación frente al aislamiento, la amplitud frente a la estrechez y la paz frente a la violencia”**. Palabras, una vez más, extraídas de aquel discurso de apertura del Congreso Mundial de Madrid, una de tantas intervenciones

brillantes del ilustre Juan Antonio Fernández del Campo pero, como él mismo me confesaría, una de las más importantes de su trayectoria vital.

El 19 de noviembre de 1991 el Consejo Directivo de la Asociación Española de la Carretera nombraba a Juan Antonio Fernández del Campo Presidente de la institución, y de su mano, representando al Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX, que dirigía en aquel momento, pasé a formar parte activa de dicho Consejo. En 1995 fui designado Miembro Honorario de la AEC, y un año más tarde me convertí en su Vicepresidente, cargo que ostenté hasta el año 2000, todo y siempre con Juan Antonio.

El 3 de julio de 1996, siendo Subdirector de Tecnología del Ministerio de Fomento, recibí de manos de Juan Antonio la Medalla de Oro de la Carretera, sin duda un momento de los más emotivos de mi andadura profesional, del que guardo un entrañable recuerdo.

También fue un día grande el 15 de septiembre del año pasado, cuando tuve la inmensa satisfacción de presidir el acto en el que pusimos el nombre del ingeniero Juan Antonio Fernández del Campo a un puente de la Autovía del Noroeste en León, su tierra natal.

En todos estos años son numerosas las anécdotas, muchos los lances y acontecimientos vividos cerca de Juan Antonio Fernández del Campo. Pero de ninguno puedo decir haber sentido el orgullo tan especial que hoy experimento en mi calidad de Presidente del Jurado del Premio que lleva su nombre.

Hace exactamente un año tuve el gran honor de presentar, junto a Miguel M<sup>a</sup> Muñoz Medina, actual Presidente de la AEC, las Bases de la 1<sup>a</sup> Edición del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras ***Juan Antonio Fernández del Campo***".

Unos meses antes, el entonces Director General de la Asociación, Aniceto Zaragoza Ramírez, me proponía presidir el Jurado del que, según aventuraba, aspiraba a convertirse en el más importante galardón a la investigación viaria en lengua castellana. Un premio que, así planteado, sólo podía llevar un nombre, el de Juan Antonio Fernández del Campo.

Por supuesto, acepté la invitación de buen grado, haciendo mío el objetivo del galardón y procurando cuanto estuviera en mi mano para alcanzar su materialización. Una tarea para la que he contado con la valiosa colaboración de los Vocales de este Jurado, profesionales de la talla de Jorge O. Agnusdei, Doctor en Ciencias Químicas y Presidente de la Comisión Permanente del Asfalto de Argentina; Óscar de Buen Richkarday, Ingeniero Civil, Maestro en Ciencias y Jefe de la Unidad de Autopistas de Cuota de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México; César Cañedo-Argüelles Torrejón, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y Presidente de Prointec, S.A.; Rafael Izquierdo de Bartolomé, Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Licenciado en Ciencias Económicas y Profesor Emérito de la Universidad Politécnica de Madrid; José M<sup>a</sup> Morera Bosch, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y Consejero Delegado de Iberpistas, S.A.C.E., y Aniceto Zaragoza Ramírez, hasta hace muy poco Director General de la AEC y ahora Director General de Oficemen.

Lamentablemente, poco tiempo después de anunciar la convocatoria del Premio, perdíamos a uno de los Vocales del Jurado, también compañero y amigo entrañable, y ser humano excepcional. Un recuerdo muy especial para Juan Manuel Morón García, Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, cuya rápida desaparición le impidió ejercer la labor encomendada en este Jurado, pero cuya figura y talante han estado presentes de forma permanente en los trabajos desarrollados por el resto de sus miembros.

El 14 de septiembre de 2006 el Jurado de la 1ª Edición del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras ***Juan Antonio Fernández del Campo***” se reunía en Madrid con el propósito de adoptar el fallo.

En términos generales, todos los trabajos que optaban al galardón destacan por su brillantez, su carácter innovador, su alto nivel científico y técnico... El esfuerzo investigador quedaba también patente en la práctica totalidad de los originales, mereciendo destacar, especialmente, aquellos presentados por profesionales de la otra orilla del Atlántico, que han acudido con sumo interés, avalado por el prestigio de Juan Antonio en Latinoamérica, a esta primera llamada del Premio que lleva su nombre.

Pero había uno que reunía todos los requisitos establecidos en las Bases: innovación, calidad, originalidad de las soluciones que contempla, amplias posibilidades de materialización práctica de sus conclusiones, relevancia de las mismas y esfuerzo investigador. Un trabajo en el que además se da la circunstancia que ha sido desarrollado por un equipo internacional del que forman parte técnicos argentinos, españoles y mexicanos.

***Desarrollo de un nuevo procedimiento para la evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas a partir de su caracterización en un ensayo a tracción*** es su título, y sus autores Félix Edmundo Pérez Jiménez, Rodrigo Miró Recasens, Adriana Haydée Martínez, Jesús Alonso Mota, Jorge Cepeda Aldape y Margarita Rodríguez Cambeiro, miembros todos ellos del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña.

El Jurado no tuvo duda alguna. Su dictamen fue unánime. En palabras del equipo redactor, la investigación trata de ofrecer “una visión más clara del

proceso de fatiga de las mezclas bituminosas, definiendo las características mecánicas que gobiernan en este fenómeno". Y, sin duda, lo ha conseguido.

Enhorabuena por ello. Y felicidades por este Premio tan merecido, que merece también distinguir a unos profesionales como los que integran el equipo del Profesor Félix Pérez, uno de los expertos más prolijos en el ámbito de la investigación viaria, no sólo en España, sino en el mundo europeo e iberoamericano.

La 2ª Edición del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras **Juan Antonio Fernández del Campo**", que se convocará el próximo año 2007, será la actividad más importante y significativa de la recién creada Fundación de la Asociación Española de la Carretera (FAEC), una institución que nace con el propósito de promover con cuantas herramientas estén a su alcance la investigación, el desarrollo y la innovación en el campo de las infraestructuras viarias, coadyuvando a la mejora continuada de la carretera y, por ello, a la modernidad y sostenibilidad en todos los órdenes de la vida relacionados con ella.

Con tan loables fines, estoy convencido que esta Fundación será el paraguas perfecto para consolidar el Premio que honra la Memoria del ilustre Ingeniero Fernández del Campo, un nombre que seguirá, de esta forma, pronunciándose y trayendo a nuestro recuerdo muchos buenos momentos.

A mi maestro y gran amigo, Juan Antonio Fernández del Campo.

*En Madrid, a 29 de noviembre de 2006*



# EL LEGADO DE UN INGENIERO INMORTAL



**Miguel Mª Muñoz Medina**  
*Presidente del Comité de  
Gestión del "Premio  
Internacional a la Innovación  
en Carreteras Juan Antonio  
Fernández del Campo"*

La idea de convocar un premio de investigación viaria que se convierta en la referencia para todos los países de habla hispana comenzó a gestarse el 15 de septiembre de 2005, fecha en la que amigos y familiares de Juan Antonio Fernández del Campo se reunieron en el Viaducto del Sil, situado en la Autovía del Noroeste a su paso por tierras leonesas, para descubrir un hito conmemorativo dedicado a la memoria de este Ingeniero de Caminos nacido en León el 14 de mayo de 1936. Aquel día el Viaducto del Sil fue rebautizado por el Ministerio de Fomento, y desde entonces, figura en todos los mapas como *Viaducto del Ingeniero Fernández del Campo*. Allí, al pie de una carretera que atraviesa la tierra que le vio nacer, queda indeleble la impronta de un Ingeniero fundamental en la historia reciente de nuestras vías.

Unos meses antes, concretamente el 26 de abril de 2004, Juan Antonio Fernández del Campo fallecía de forma repentina en Madrid. Ya por aquel entonces era memoria viva de la Ingeniería de Caminos española, lo que le permitía ejercer de autoridad en materia de carreteras tanto dentro como fuera de nuestras fronteras. Lejos de mantenerse alejado de la actualidad viaria española, en el momento de su desaparición Juan Antonio era el Presidente de la recién creada ITS España.

Desde muy joven, este Ingeniero leonés tuvo claro que el estudio de las infraestructuras viarias habría de ser el núcleo de su actividad profesional. Por ello, pronto alcanzó el grado de Doctor Ingeniero de Caminos, Canales

y Puertos. Desde sus inicios en la Universidad, se mostró partidario de una Ingeniería en la que el Humanismo cumpliera un papel protagonista. Por ello, al tiempo que forjaba una nueva página en la Historia de la Ingeniería de nuestro país, Juan Antonio siempre se cuidó de mantener viva su pasión por la literatura y la pintura.

Con estas firmes bases, Juan Antonio Fernández del Campo abordó con gran brillantez su trayectoria profesional a lo largo de cuatro décadas, lo que se debió en gran medida a una sabia combinación de sus facetas de empresario, técnico y docente. Sin embargo, su legado no sólo se circunscribe a las fronteras españolas sino que va más allá. Y es que Juan Antonio dedicó gran parte de sus años de trabajo a estrechar lazos con los países de Latinoamérica.

A ello contribuyó, sin duda alguna, su brillante naturaleza dotada de la generosidad más genuina y desinteresada, la más fiel al sentido último del concepto. Y es que Juan Antonio era un hombre siempre dispuesto a prestar su ayuda, y siempre sin pedir nada a cambio, lo que deja patente que su concepción de la generosidad era impecable desde cualquier punto de vista.

Todos aquellos que nos honramos de haber disfrutado de su amistad no podemos olvidar el elegante sentido del humor que siempre tenía a punto para cualquier situación; probablemente ésta fuera la manifestación más esclarecedora de la filosofía de vida enormemente optimista que guiaba todos y cada uno de los pasos de Juan Antonio.

La Asociación Española de la Carretera también puede dar fe de su gran legado profesional. Tras ser miembro del Consejo Directivo de esta entidad durante varios años, Juan Antonio accedió en 1991 a la Presidencia, cargo que ostentó hasta 2000. Durante estos años, la AEC vivió una época de expansión sin precedentes.

La repentina desaparición de Juan Antonio dejó al sector viario nacional huérfano de una de sus más insignes figuras. Por ello, poco después de su fallecimiento se solicitó de forma unánime un reconocimiento público a su ejemplar trayectoria.

Con este fin se convocó el 30 de noviembre de 2005 la 1ª Edición del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*”. Se daba así carta de naturaleza a un certamen que nacía con el firme propósito de contribuir al desarrollo de la tecnología viaria en todo el mundo a través de la realización de estudios e investigaciones en materia de carreteras desde variadas perspectivas científicas. Siguiendo uno de los postulados que marcaron la trayectoria profesional de Juan Antonio, este premio apuesta de forma inequívoca por el español como lengua de pleno derecho en el ámbito de la investigación internacional de carreteras.

A día de hoy, podemos afirmar que la 1ª Edición del “Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*” ha cosechado un gran éxito. Y no hago esta afirmación desde la petulancia. Antes al contrario, me atrevo a remarcar que este éxito se debe al alto nivel de los trabajos presentados, que, además, proceden de una gran variedad de países, como Argentina, Chile, Colombia, España, México, Perú o Venezuela. Asimismo, los temas abordados son tremendamente diversos y van desde la tecnología de firmes a la financiación de infraestructuras viarias, pasando por los sistemas de contención, sin olvidar los sistemas de gestión de tráfico urbano e interurbano.

El pasado 14 de septiembre el Jurado de este Premio adoptó el fallo que otorga la Primera Edición del galardón al equipo de la Universidad Politécnica de Cataluña liderado por Félix Edmundo Pérez Jiménez y formado por Rodrigo Miró Recasens, Adriana Haydée Martínez, Jesús Alonso

Mota, Jorge Cepeda Aldape y Margarita Rodríguez Cambeiro. Este equipo se ha alzado como ganador con un trabajo que lleva por título ***Desarrollo de un nuevo procedimiento para la evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas a partir de su caracterización en un ensayo a tracción***. Además de ser una investigación de gran rigor científico y enormes posibilidades prácticas, su gran valía consiste en que ha sido desarrollada por un grupo de profesionales de gran nivel que proceden de varios países.

Es para mí un motivo de satisfacción que el equipo de Félix Pérez se haya hecho merecedor de este Premio. De esta forma, se reconoce el trabajo de este Doctor Ingeniero de la Universidad Politécnica de Cataluña que es, por derecho propio, uno de los más destacados continuadores de la labor iniciada en Sudamérica por Juan Antonio Fernández del Campo. No en vano, los proyectos dirigidos por Félix gozan de gran prestigio no sólo en España sino también en los países del entorno latinoamericano, ya que trabaja de forma activa y permanente con los profesionales del otro lado del Atlántico.

Al trabajo de estos últimos está dedicada la Mención Especial con que el Jurado de esta Primera Edición del certamen ha querido reconocer la notable labor de los ingenieros colombianos Fredy Alberto Reyes Lizcano y Ana Sofía Figueroa Infante, autores del original titulado ***Síntesis de la investigación colombiana sobre caracterización de mezclas asfálticas utilizando desechos plásticos***.

Así las cosas, podemos afirmar que los objetivos de este certamen han sido superados con creces. Sin duda, ésta es la razón que ha de animarnos a proseguir por la senda iniciada y convocar el próximo año la 2ª Edición del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras Juan Antonio Fernández del Campo". Por ello, me satisface anunciar que ésta será una de las principales actividades previstas para los próximos meses por la Fundación de la

Asociación Española de la Carretera (FAEC), una entidad que empezará en 2007 a dar sus primeros pasos en aras de la promoción de la carretera como uno de los ejes claves del desarrollo.

Pero toda esta aventura no habría sido posible sin el constante apoyo de las instituciones y empresas que han patrocinado y apoyado la creación y consolidación del certamen. Por esta razón, como Presidente del Comité de Gestión del Premio y de la Asociación Española de la Carretera, no quiero finalizar estas líneas sin dedicar unas palabras de gratitud a todos ellos, ya que, desde un principio, creyeron firmemente en el "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*". No me cabe duda alguna que continuarán respaldando futuras ediciones del galardón, que estarán también abiertas a sumar nuevos esfuerzos y apoyos.

Por último, sólo me resta destacar el gran trabajo realizado por todos los miembros del Jurado de esta Primera Edición, cuyos trabajos y deliberaciones han estado dirigidos por José Luis Elvira Muñoz, Director Técnico de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, a quien agradezco toda su dedicación. Un recuerdo muy especial para Juan Manuel Morón, Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, tristemente fallecido poco tiempo después de ser nombrado miembro del Jurado del "Premio Internacional a la Innovación en Carreteras *Juan Antonio Fernández del Campo*". Gran amigo y colaborador de la Asociación Española de la Carretera, la inspiración y el buen hacer de Juan Manuel han estado, a buen seguro, presentes en todas las deliberaciones del Jurado.

*En Madrid, a 29 de noviembre de 2006*



# DESARROLLO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS A PARTIR DE SU CARACTERIZACIÓN EN UN ENSAYO A TRACCIÓN

---

## **Autores:**

**Félix Edmundo Pérez Jiménez**

*Catedrático Universidad Politécnica de Cataluña  
Director Equipo de Investigación.*

**Rodrigo Miró Recasens**

*Profesor Titular Universidad Politécnica de Cataluña.*

**Adriana Haydée Martínez**

*Profesor Lector Universidad Politécnica de Cataluña.*

**Jesús Alonso Mota**

*Profesor Universidad Autónoma de Querétaro, México.*

**Jorge Cepeda Aldape**

*Profesor Universidad Autónoma de Nuevo León, México.*

**Margarita Rodríguez Cambeiro**

*Investigadora École Polytechnique Fédérale de Lausanne.*



|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Presentación .....  | 20 |
| 2   | El fallo por fisuración por fatiga de los firmes asfálticos.<br>Su consideración y evaluación en los métodos de dimensionamiento<br>de firmes y en el diseño de mezclas bituminosas ..... | 22 |
| 2.1 | Determinación del fallo por fatiga de las capas de mezclas<br>bituminosas en los métodos de dimensionamiento .....  | 23 |
| 2.2 | El fallo por fisuración por fatiga en el estudio y dosificación<br>de las mezclas bituminosas .....   | 25 |
| 3   | Procedimientos para la determinación de la ley de fatiga<br>de las mezclas bituminosas .....  | 28 |
| 3.1 | Procedimientos experimentales. Determinación del fallo<br>de fisuración por fatiga .....  | 29 |
| 3.2 | Propagación de la fisura .....  | 33 |
| 4   | Análisis del fallo por fatiga. criterio de la deformación crítica .....   | 35 |
| 4.1 | Deformación crítica .....   | 39 |
| 5   | Análisis del fallo por fatiga. Relación entre los parámetros<br>de las leyes de fatiga y las características mecánicas de la mezcla:<br>módulo y deformación crítica .....                | 43 |
| 6   | Determinación de la ley de fatiga de una mezcla a partir de su<br>resistencia a la rotura (ensayo de tracción directa estático) .....   | 45 |
| 7   | Conclusiones .....  | 47 |
|     | Referencias .....   | 50 |

## 1.- PRESENTACIÓN

Durante estos últimos años el Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructuras del Transporte y del Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña ha desarrollado varias líneas de investigación, relacionadas con el proyecto, construcción y conservación de firmes y con el estudio de materiales para carreteras.

Un denominador común de todas estas líneas de investigación ha sido la creación de nuevos ensayos y procedimientos de medida, que caractericen mejor los materiales para carreteras, para así conseguir firmes y pavimentos de mayor calidad. Dentro de estos ensayos y procedimientos cabe citar el ensayo Cántabro o el permeámetro LCS, aplicados al diseño y control de ejecución de mezclas porosas (drenantes) y microaglomerados, el método UCL aplicado a la caracterización de ligantes bituminosos, la aplicación del ensayo de tracción indirecta al control de ejecución de mezclas bituminosas, el ensayo BTD (Barcelona Tracción Directa) aplicado al estudio de materiales compuestos (mezclas bituminosas con fibras) o para determinar la tenacidad de materiales bituminosos, o el ensayo de corte LCB aplicado a la valoración de los riegos de adherencia.

Todos estos trabajos sobre mezclas bituminosas nos han ido proporcionando unos conocimientos y unas herramientas que nos han permitido abordar con éxito uno de los problemas más difíciles de valorar en el comportamiento de las mezclas bituminosas, su fisuración por fatiga. En la evaluación del comportamiento de las mezclas bituminosas ante el

fallo por fatiga hay varios aspectos que han sido considerados como posibles fallos o limitaciones en su valoración:

- La influencia de los procedimientos de ensayo empleados en la evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas ensayadas.
- La influencia de la interpretación de resultados y del criterio de fallo en la determinación de las leyes de fatiga.
- La relación del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas con su composición o con otras propiedades mecánicas que faciliten su valoración.

Como se recoge en este documento, varios trabajos y tesis realizadas en el Laboratorio de Caminos de Barcelona han ido profundizando sobre los apartados antes comentados, para proponer un método que permita controlar y estimar la respuesta a la fisuración por fatiga de una mezcla bituminosa a partir de su curva tensión-deformación, obtenida en un ensayo de tracción directa a velocidad controlada.

Esta línea de investigación se inicia con la tesis doctoral presentada por D. Jorge Cepeda para la obtención de su título de Doctor “Análisis del comportamiento de mezclas asfálticas a fisuración por fatiga mediante la aplicación de un nuevo ensayo dinámico a tracción directa”. En este trabajo, que mereció la calificación por el tribunal de Sobresaliente Cum Laude, se empieza a profundizar en la posible relación que puede existir entre el comportamiento a fatiga de la mezcla y su energía a rotura obtenida en un ensayo estático

de tracción. El nuevo ensayo aplicado, ensayo BTM, permite ensayar, al mismo tiempo, las probetas de mezcla bituminosa a cargas repetidas, para analizar su comportamiento a fatiga, y su rotura a tracción para evaluar la energía de rotura y tenacidad de la mezcla a velocidad de deformación constante. Esta tesis puso de manifiesto que, en el ensayo de fatiga a tensión controlada, las muestras de mezclas bituminosas van experimentando pequeñas deformaciones en cada aplicación de carga, produciéndose su fallo cuando esta deformación acumulada alcanza un determinado nivel. Este nivel de rotura es el mismo para todas las probetas del mismo tipo de mezcla ensayadas, con independencia de la carga de ensayo, y varía con el tipo de mezcla. Mezclas fabricadas con betunes modificados o con mayor cantidad de betún tienen una mayor deformación crítica de rotura. A la deformación acumulada a partir de la cual el proceso de fatiga empieza a propagarse de una forma rápida la denominamos deformación crítica, siendo una característica de la mezcla ensayada.

Esta deformación crítica de la mezcla, puesta de manifiesto en el ensayo dinámico BTM, ha sido también verificado en el ensayo de fatiga a flexotracción, en el estudio llevado a cabo por Dña. Margarita Rodríguez para la obtención de su tesis doctoral sobre comportamiento a fatiga de mezclas bituminosas fabricadas con material proveniente de fresado de pavimentos asfálticos envejecidos, mezclas recicladas. Este trabajo ha servido también para mostrar que, en este tipo de ensayo, puede cometerse el error de dar como roto un material a fatiga, cuando la probeta se encuentra todavía

intacta o conserva gran parte de su resistencia a la fisuración por fatiga.

Este problema ocurre debido a que en el ensayo de flexotracción, que es el normalmente empleado en España y en muchos países para la evaluación de la resistencia a la fatiga, por hacerse el ensayo a deformación controlada, se establece el criterio de fallo a fatiga cuando se reduce la carga o el módulo a la mitad. Si se analizan todos los parámetros resultantes de este ensayo, en particular, la evolución de la deformación, se observa, en algunas de las probetas ensayadas, que su carga o su módulo se reduce a la mitad sin que se haya prácticamente iniciado su fallo por fatiga, manteniéndose su deformación por debajo de la crítica. Si estas probetas son sometidas a un nuevo ensayo de fatiga, aumentando la amplitud de deformación, se comportan como si fuesen nuevas.

Esto llevó a la implementación de un nuevo ensayo a tracción, desarrollado en el Laboratorio de Caminos, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la aplicación del ensayo BTM dinámico. La aplicación de este nuevo ensayo de fatiga ha permitido poner de nuevo de manifiesto las conclusiones obtenidas en los estudios precedentes, analizar con más profundidad el proceso de fatiga, reafirmando y cuestionando algunas de las opiniones existentes sobre este mecanismo de deterioro en firmes asfálticos, y sobre todo, desarrollar un procedimiento sencillo para poder valorar el comportamiento a fatiga de una mezcla a partir de la obtención de su energía y resistencia a rotura, mediante la apli-

cación de un simple ensayo de tracción directa. Gran parte de estos resultados están recogidos en la tesis presentada por D. Jesús Alonso para la obtención de su título de Doctor.

El trabajo aquí recogido que presentamos al Premio Juan Antonio Fernández del Campo es el resultado de una línea de investigación sobre uno de los problemas de gran relevancia en la técnica de carreteras, que ha supuesto un gran esfuerzo investigador y cuya aplicación práctica tiene una gran transcendencia, puesto que permitirá controlar y mejorar la respuesta de las mezclas y de los pavimentos asfálticos ante uno de los más preocupantes modos de deterioro, su fallo por fisuración por fatiga.

Los autores de este trabajo nos sentimos orgullosos de poder presentar nuestro trabajo al Premio Juan Antonio Fernández del Campo, pues todos, en mayor o menor medida, hemos sido alumnos de Juan Antonio. De él hemos aprendido gran parte de nuestros conocimientos sobre carreteras y materiales asfálticos, y sobre todo, nos ha transmitido su ilusión por investigar, por formar a nuestros alumnos, por trabajar en equipo, y por defender y exponer nuestros conocimientos por todo el mundo y en especial en América Latina, a la que había dedicado últimamente gran parte de sus ilusiones y dedicación.

## **2.- EL FALLO POR FISURACIÓN POR FATIGA DE LOS FIRMES ASFÁLTICOS. SU CONSIDERACIÓN Y EVALUACIÓN EN LOS MÉTODOS DE DIMENSIONAMIENTO DE FIRMES Y EN EL DISEÑO DE MEZCLAS BITUMINOSAS**

Los firmes empleados en la construcción de carreteras pueden ser agrupados en dos tipos, en función de que su capa superior esté constituida por una capa de hormigón, pavimentos de hormigón, o por una capa asfáltica, pavimentos asfálticos. En el comportamiento de ambos tipos de firmes, en la calidad de servicio que proporcionan a los usuarios, en su fallo y deterioro, tiene una gran incidencia la respuesta y el comportamiento de estas capas superiores.

En el caso de los pavimentos asfálticos el fallo de esta capa puede producirse:

- por deformaciones excesivas y pérdida de regularidad.
- por la pérdida de áridos, peladuras o desintegración.
- por fisuración por aplicación de cargas repetidas (fisuración por fatiga), fisuración por esfuerzos térmicos o fisuración por reflexión de grietas.

En los métodos analíticos de dimensionamiento de firmes asfálticos suelen tenerse en cuenta dos mecanismos de deterioro:

- fallo del firme por deformaciones excesivas en la zona de rodada de los vehículos, por acumulación de las

deformaciones producidas en las diferentes capas del firme y de la explanada por el paso de los vehículos.

- fallo del firme por fisuración por fatiga de las capas asfálticas del firme, producido también por el sucesivo paso de los vehículos.

Últimamente en algunos métodos analíticos desarrollados en estos últimos años, como el método de la AASHTO 2002 (1, 3), se van introduciendo, además de estos mecanismos de deterioro, aquellos que tienen que ver con la fisuración del pavimento asfáltico por esfuerzos térmicos y con la evolución de su calidad de rodadura (evolución del IRI). En todo caso, es importante destacar que el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas es una cuestión fundamental en el dimensionamiento del firme y por tanto es muy importante considerar cómo esta propiedad es tenida en cuenta y valorada tanto en los métodos de dimensionamiento como en el proyecto de la mezcla.

### **2.1.- Determinación del fallo por fatiga de las capas de mezclas bituminosas en los métodos de dimensionamiento**

Hasta finales de los años '60 todos los métodos empleados en el diseño de los firmes de tipo asfáltico eran experimentales. Estaban basados en la observación del comportamiento de firmes en servicio y, sobre todo, en los resultados obtenidos en el comportamiento de diferentes tipos de firmes asfálticos en el ensayo AASHO, 1956-1961 (4).

En este macroensayo sobre el comportamiento de firmes y puentes de carreteras, se construyeron 6 pistas circulares donde se ensayaron 290 tipos de pavimentos asfálticos y 271 rígidos. Estas pistas eran circuladas por diferentes tipos de vehículos pesados, cuyas cargas variaban entre 12 y 30 Kips para los ejes simples, y entre 24 y 48 Kips para los ejes tandem. El número total de aplicaciones de carga a que fueron sometidas las diferentes secciones durante dos años superó el 1.000.000 de aplicaciones.

Tras un posterior y laborioso examen de los datos, se propuso un método de dimensionamiento que con diferentes modificaciones y mejoras ha estado en uso hasta hace pocos años, en que apareció el nuevo método analítico-experimental AASHTO 2002. La ventaja que ofrecen los métodos experimentales es el estar basados en la observación de la realidad, pero tienen el inconveniente de que, a pesar del enorme esfuerzo y presupuesto que supuso el ensayo AASHO (27 millones de dólares), el número de casos estudiados es limitado y no siempre es posible la proyección y extrapolación a otros casos. Así, en el caso del ensayo AASHO, se ensayaron secciones de firmes asfálticos con espesor máximo de las capas asfálticas de 15 cm, espesores que resultaban escasos y estaban totalmente superados a la conclusión del ensayo. El ensayo se realizó para unas condiciones dadas de explanada y tipo de clima y hubo de ser extrapolado en el método de dimensionamiento a otros tipos de explanadas y climas.

La aparición de los métodos analíticos, sobre todo a partir de los programas de ordenador que permiten obtener el estado de

tensiones y deformaciones producidas en el firme por los diferentes tipos de carga, ha supuesto un gran avance en el estudio y análisis de los pavimentos asfálticos. Los métodos analíticos suponen que el firme está constituido por un conjunto de capas horizontales que se apoyan sobre la explanada y que todas ellas, incluida la explanada, tienen un comportamiento elástico. Los programas actuales, en especial los de elementos finitos, pueden suponer un comportamiento más complejo de los materiales del firme, visco-elástico, no lineal, plástico, etc., pero lo normal en los métodos analíticos de dimensionamiento de firmes es suponer un comportamiento elástico y lineal de los materiales y analizar dos mecanismos de deterioro:

- fallo por deformaciones excesivas, por acumulación de las deformaciones plásticas producidas en las diferentes capas del firme y de la explanada en cada aplicación de carga. Se consideran capas deformables del firme las capas granulares y las capas de mezcla bituminosa.
- fallo por fisuración por fatiga de las capas cohesivas del firme: capas tratadas con ligantes hidráulicos y capas de mezcla bituminosa. En el caso de los firmes con base granular y firmes con base bituminosa, son únicamente las capas de mezcla bituminosa las que han de soportar este mecanismo de deterioro.

Para evaluar la deformación por la aplicación de cargas repetidas sobre los materiales granulares y las mezclas bituminosas o para estimar la resistencia a la fisuración por fatiga de la mezcla bituminosa se recurre, figuras 2.1 y 2.2, a las leyes de fatiga de estos materiales. Estas leyes de fatiga deter-

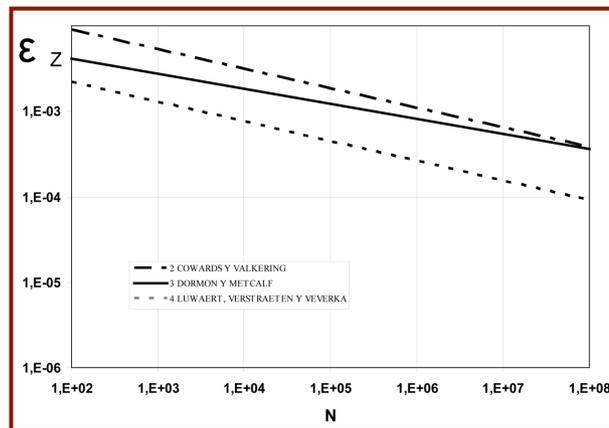


Figura 2.1. Leyes de fatiga para controlar la deformación de la explanada.

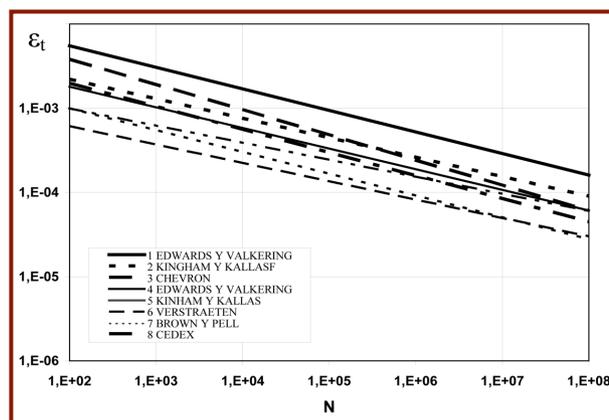


Figura 2.2. Leyes de fatiga para el control de la fisuración de las mezclas bituminosas.

minadas experimentalmente en el laboratorio tienen la siguiente expresión:

$$\log N = a - b * \log \mathcal{E}$$

donde:

$N$ : número de aplicaciones de carga hasta producir el fallo por fatiga del material considerado.

$\mathcal{E}$ : deformación a la que es sometida el material en cada aplicación de carga.

En el caso de las deformaciones plásticas la deformación considerada es la que se produce en la dirección de la aplicación de la carga, figura 2.3, mientras que en el caso del fallo por fatiga la deformación considerada es la deformación horizontal en la base de la capa de mezcla bituminosa, figura 2.4.

En el caso de las mezclas bituminosas estas leyes de fatiga son obtenidas en el laboratorio mediante diferentes procedimientos de ensayo y continúan siendo la base de los últimos métodos analíticos de dimensionamiento de firmes, como es el caso del Método analítico-experimental AASTHO 2002.

## 2.2.- El fallo por fisuración por fatiga en el estudio y la dosificación de las mezclas bituminosas.

Las capas de mezcla bituminosa son, como hemos visto en el apartado anterior, uno de los componentes básicos de los pavimentos asfálticos, de cuya respuesta y comportamiento va a depender en gran manera el comportamiento del firme.

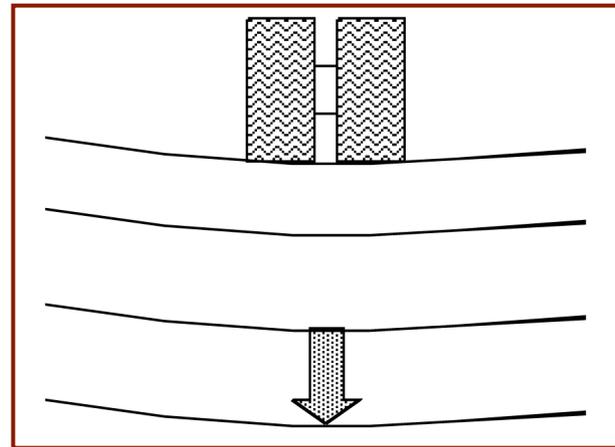


Figura 2.3. Fallo por deformación.

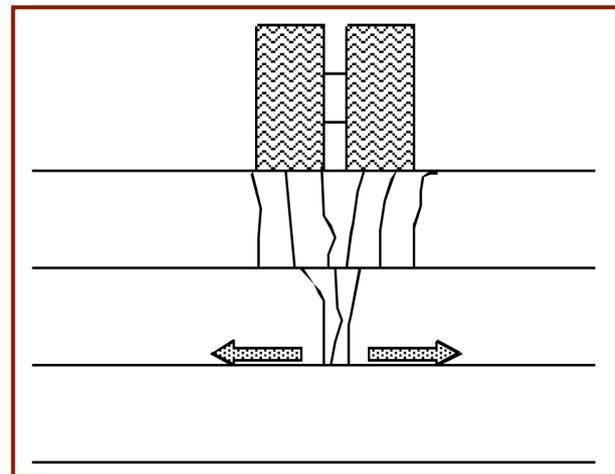


Figura 2.4. Fallo por fisuración por fatiga.

Por ello, los materiales a emplear en estas capas han de estar debidamente estudiados y dosificados, con el fin de obtener unas propiedades conformes con las solicitaciones a que van a estar sometidos. En el caso de las mezclas bituminosas los mecanismos que pueden dar lugar a su fallo y que deberían ser tenidos en cuenta en su dosificación y diseño son:

- su resistencia a las deformaciones plásticas.
- su resistencia a la disgregación por efecto del tráfico y de la acción de desvuelta del agua.
- su resistencia a la fisuración por esfuerzos térmicos.
- su resistencia a la fisuración por aplicación de cargas repetidas, fisuración por fatiga.

De estas cuatro propiedades, las dos primeras han sido siempre tenidas en cuenta en la dosificación de las mezclas bituminosas, mientras que las dos últimas, en especial el fallo por fatiga, no han sido consideradas en su diseño. Esto es debido principalmente a la dificultad y laboriosidad que presentan los ensayos aplicados a la valoración de la fatiga y, sólo últimamente, a raíz del programa SHRP (5, 6) llevado a cabo en Estados Unidos, se han puesto a punto nuevos ensayos que de una forma todavía muy laboriosa y compleja permiten tener en cuenta esta propiedad en la dosificación de las mezclas bituminosas.

El programa SHRP (Strategic Highway Research Program) fue llevado a cabo en Estados Unidos entre los años 1987 y 1993 con el fin de reducir el gasto de mantenimiento y conservación de carreteras, considerado excesivo y que ascendía

a 100 millones de dólares al año. El programa tuvo un presupuesto de 50 millones de dólares y uno de sus principales desarrollos fue el procedimiento Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement) (6), que recoge un conjunto de nuevos métodos y procedimientos de ensayo y de especificaciones para ligantes y mezclas bituminosas.

Dentro del método Superpave, en el apartado referente al diseño de mezclas bituminosas se definen tres niveles de caracterización y de estudio. En el primer nivel, aplicado al estudio de mezclas para carreteras de tráfico medio o bajo, el estudio de estas mezclas se hace a partir de sus características volumétricas obtenidas mediante el ensayo de prensa giratoria. Para los niveles 2 y 3 empleados con tráfico alto, se tiene en cuenta la resistencia a las deformaciones plásticas de la mezcla y su resistencia a fatiga, determinada a partir del ensayo de tracción indirecta de fluencia. En el caso del nivel 2 se determina esta propiedad sólo para una temperatura, mientras que para el nivel 3 se realiza el estudio a diferentes temperaturas.

En el método Superpave se recurre a este ensayo de tracción indirecta de fluencia por la dificultad, mayor duración y coste que suponen los ensayos convencionales de fatiga y se determina la respuesta de la mezcla a fatiga, el número de aplicaciones de carga que puede aguantar la mezcla a fatiga, mediante la aplicación de la ley de propagación de fisuras de Paris en materiales visco-elásticos:

$$Np = \frac{1}{A} \int_{c_0}^h \frac{d_c}{k^n}$$

donde:

$d$ : longitud de la fisura.

$N_p$ : número de aplicaciones de carga para propagar la fisura desde la longitud inicial  $C_0$  hasta la superficie.

$h$ : espesor de la capa de mezcla bituminosa.

$C_0$ : longitud inicial de la fisura.

$k$ : factor de intensidad de tensiones.

$A, n$ : parámetros dependientes de las propiedades del material.

En los estudios llevados a cabo por Roque y otros autores en las Universidades de Pennsylvania y Texas (5) se han obtenido diferentes expresiones que permiten relacionar las características obtenidas en el ensayo de fluencia de la mezcla y su resistencia a tracción con los parámetros  $n$  y  $A$  que gobiernan el proceso de rotura según la ley de Paris. Este procedimiento, que se analizará más adelante, es el único que existe hasta ahora que permite valorar el comportamiento a fatiga de la mezcla a partir de sus propiedades mecánicas, pues hasta ese momento el comportamiento a fatiga de la mezcla era estimado a partir de la composición volumétrica de la mezcla y de las características del betún.

El procedimiento SHRP supone un gran adelanto, ya que mezclas de similar composición volumétrica pueden tener respuestas distintas: por el efecto de la naturaleza de los áridos, por la interacción filler-betún, por la forma de los áridos, por su absorción, etc., todo ello hace que se pueda evaluar

mejor esta propiedad de la mezcla si se parte de su comportamiento mecánico real y de alguna propiedad mecánica que está relacionada con la fatiga, que de su mera composición volumétrica y de las características del ligante.

En resumen, la determinación de las leyes que rigen el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas es fundamental para el dimensionamiento de los firmes asfálticos y es importante profundizar en los parámetros mecánicos que determinan su comportamiento, con el fin de desarrollar o complementar diferentes tipos de ensayos, que con mayor facilidad nos permitan valorar rápidamente esta importante propiedad de la mezcla.

### 3.- PROCEDIMIENTOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA LEY DE FATIGA DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS

El conocer el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas es básico para proceder al dimensionamiento del firme en los métodos analíticos. Como se ha indicado anteriormente, las leyes de fatiga empleadas en los métodos analíticos de dimensionamiento pueden estar influidas por el proceso y criterio de ensayo empleado en su determinación. Por otra parte, en la determinación de las leyes de fatiga se emplean procedimientos de ensayo complejos que impiden que sean tenidos en cuenta en la dosificación de las mezclas. Esto ha llevado, en el caso del programa SHRP, al desarrollo de procedimientos de análisis que permiten estimar el comportamiento de las mezclas a fatiga a partir de ensayos más sencillos. En esta misma línea, el Laboratorio de Caminos ha desarrollado un procedimiento de ensayo todavía más sencillo para estimar la vida a fatiga de las mezclas bituminosas, habiendo analizado previamente los pros y contras de los diferentes procedimientos existentes y poder así aportar y cotejar el estado del arte con nuestra propia experiencia y con los resultados obtenidos con el procedimiento puesto a punto.

El fallo por fisuración por fatiga fue observado en primer lugar en los materiales metálicos. Piezas metálicas sometidas en un ensayo de tracción a una tensión inferior a la de rotura acababan rompiendo, si se aplicaba la sollicitación repetidamente. Desde los primeros estudios sobre el fallo por

fatiga en metales se dedujo que podía establecerse una relación logarítmica entre la tensión o deformación impuesta y el número de sollicitaciones:

$$\log N_{\varepsilon} = a - b \log \varepsilon$$

$$\log N_{\sigma} = c - d \log \sigma$$

donde:

- $N_{\varepsilon}$ ,  $N_{\sigma}$ : número de aplicaciones de carga aplicados en un ensayo de fatiga a deformación ó tensión controlada.
- $\varepsilon$ : deformación impuesta, en un ensayo de fatiga a deformación controlada.
- $\sigma$ : tensión impuesta, en un ensayo de fatiga a tensión controlada.
- $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ : características del material ensayado.

Esta misma ley ha sido también empleada en el análisis del comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas, donde han sido aplicados diferentes tipos de ensayo, fundamentalmente a flexotracción, figura 3.1, para obtener las leyes de fatiga, procedimientos experimentales o fenomenológicos.

La fisuración por fatiga de las mezclas bituminosas ha sido también analizada mediante la aplicación de la ley Paris para propagación de fisuras:

$$\frac{dc}{dN} = Ak^{-n}$$

Donde  $dc$ , es el incremento de la longitud de la fisura para una nueva aplicación de carga,  $k$  es el factor de intensidad de tensiones y  $A$  y  $n$  son dos constantes del material.

En la aplicación de ambos procedimientos se han ido introduciendo modificaciones y mejoras para tener en cuenta el comportamiento visco-elástico de las mezclas bituminosas.

### 3.1.- Procedimientos experimentales. Determinación del fallo de fisuración por fatiga

El fallo por fatiga de las mezclas bituminosas no suele producirse en la mayoría de los ensayos de una forma brusca, fisurándose totalmente el material, lo que permitiría fácilmente determinar el número de ciclos asociados al fallo por fatiga, sino que en la mayoría de los ensayos tiene lugar un progresivo deterioro del material, daño continuo, sin que llegue a producirse la fisuración completa de la probeta. Por ello, una de las primeras cuestiones a considerar cuando se realizan los ensayos de fatiga es establecer el fallo. Este fallo se determina de dos formas, dependiendo del tipo de ensayo realizado: una para los ensayos realizados a tensión controlada y otra, para los ensayos llevados a cabo en deformación o desplazamiento controlado. Figura 3.2.

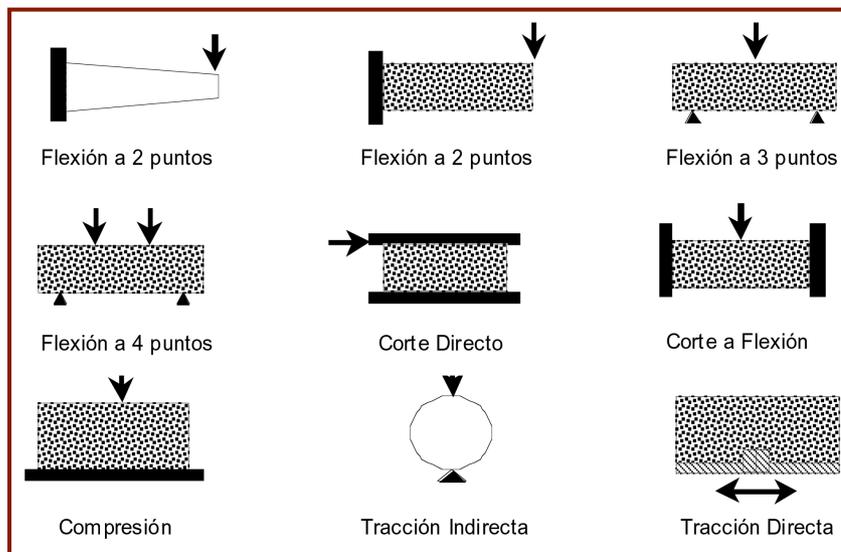


Figura 3.1. Diferentes pruebas de laboratorio para caracterizar la fatiga en mezclas bituminosas.

En el primer caso, tensión controlada, son ensayos de fatiga en que se mantiene constante la tensión o la carga impuesta al material. Normalmente se va registrando la deformación producida, aunque esto no sea estrictamente necesario, y la resistencia a fatiga del material se asocia al ciclo en que se produce la rotura del material y la carga se hace cero o, en otros casos, cuando el módulo de la mezcla se reduce a su 10%.

En el segundo caso, se mantiene constante la deformación o desplazamiento impuesto y se registra la evolución de la

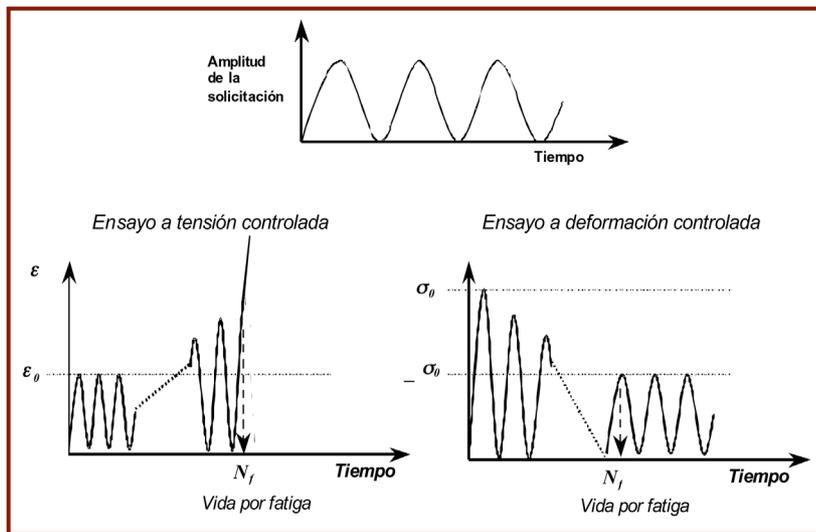


Figura 3.2. Criterio de fallo por fatiga de acuerdo con el tipo de ensayo.

carga durante el ensayo. Se considera que se ha producido el fallo por fatiga cuando la carga o el módulo del material ensayado se reduce a la mitad.

A pesar de la claridad con que se definen en los apartados anteriores los criterios para definir el fallo por fatiga, no resulta tan sencilla su aplicación en la práctica, debido, sobre todo, a la forma que tienen las curvas donde se recoge la evolución de los parámetros que indican el fallo por fatiga (carga, deformación ó módulo). Estas curvas tienen forma de S y según Di Benedetto y otros autores (7) en el proceso de fatiga podrían distinguirse tres fases, figura 3.3.

En la primera fase se produce un rápido descenso del módulo de la mezcla que según Di Benedetto, es debido a que se produce un calentamiento de la mezcla por su comportamiento viscoso y esto da lugar a una pérdida de módulo en el que también tiene influencia la tixotropía y fenómenos locales. La segunda fase es la que muestra una pérdida continua del módulo que, según estos autores, es la que realmente se debería asociar con el proceso de fatiga. En esta fase es cuando se van produciendo los pequeños fallos y microfisuras en la mezcla que al ir aumentando en densidad da lugar a la aparición de fisuras y al rápido decremento del módulo de la mezcla, fase 3.

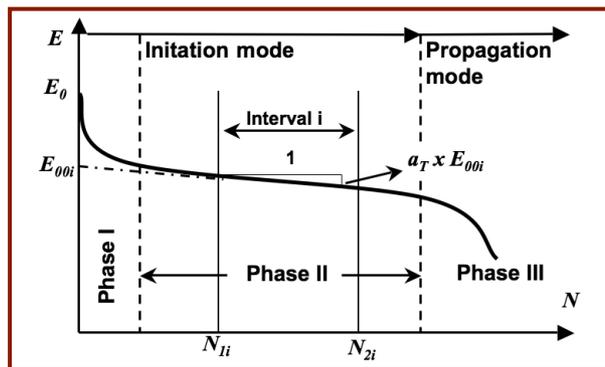


Figura 3.3. Determinación del  $E_{00i}$  y de  $a_T$  a partir de la curva de evolución del módulo en función del número de ciclos.  
 Fuente: Di Benedetto (7).

Esto ha llevado a Di Benedetto y otros a definir la fatiga como un proceso de daño continuo que viene dado por la evolución del módulo de la mezcla según las siguientes expresiones de daño:

$$D(N) = \frac{E_{00} - E(N)}{E_{00}}$$

donde:

$D$ : parámetro de daño

$E_{00}$ : intersección de la línea de ajuste para la curva de módulo  $E$  en función del número de ciclos en la fase II, figura 3.3.

$E(N)$ : variación del módulo con el número de ciclos

Donde el incremento de daño en cada aplicación de carga  $dD/dN$  está relacionado con la tensión o deformación aplicada. Khalid (8).

$$\frac{dD}{dN} = - \frac{1}{E_{00}} * \frac{dE}{dN} = - a_i$$

$$a_i = f(\mathcal{E})$$

siendo  $a_i$  la pendiente de la curva  $E$  versus  $N$  en la fase II, figura 3.3.

También se ha estudiado el fallo por fatiga a partir de la energía que la mezcla va soportando en cada ciclo de carga, determinado a partir del estado de tensiones y deformaciones a que está sometida la mezcla, y como ésta se incre-

menta en el ensayo de tensión controlada cuando se inicia el fallo de la probeta, mientras que disminuyen en el ensayo de fatiga a deformación controlada. Esta variación de la energía de fatiga con el número de ciclos es empleada también para definir el fallo por fatiga, figura 3.4.

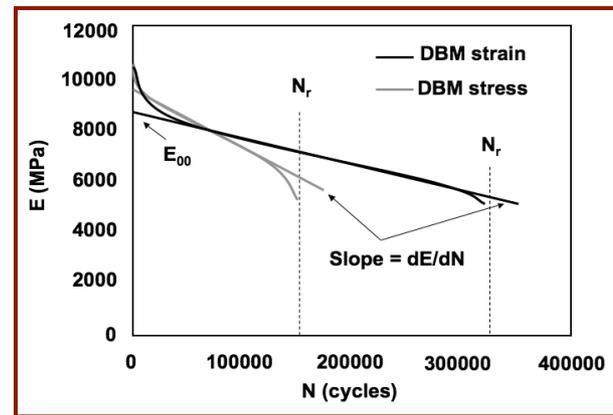


Figura 3.4. Definición del fallo según el ensayo a tensión y a deformación controlada Fuente: Khalid (8).

En el caso de un ensayo de carga cíclica a tensión o deformación controlada la tensión aplicada en cada ciclo viene dada por la siguiente expresión:

$$w = \pi \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot \text{sen} \phi$$

donde:

$w$ : energía disipada

$\sigma$ : tensión aplicada

$\epsilon$ : deformación aplicada

$\phi$ : ángulo de desfase

Esto permite obtener de forma más sencilla, sobre todo en el caso del ensayo a tensión controlada, el fallo por fatiga de la probeta. Además, este criterio de fallo se corresponde en ambos casos a una situación física de la probeta similar, cuando la densidad de microfisuración es muy alta y empieza a producirse la fisura y rotura rápida de la probeta.

Por otra parte, Di Benedetto (7), Khalid (8) y otros autores tienen en cuenta la variación de la energía con los ciclos de carga  $\frac{dW}{dN}$  para corregir el efecto desviador que tanto el aumento de temperaturas como la tixotropía o los efectos locales pueden tener en el efecto de fatiga. Corrigen así la pendiente de la fatiga  $a_T$  obtenida anteriormente mediante la siguiente expresión:

$$a_F = a_T - \frac{1}{W_{00}} \cdot \frac{dW}{dN} \cdot C \cdot \left( \frac{E_0 - E_{00}}{E_{00}} \right)$$

donde:

$a_T$ : pendiente de la curva E versus N en la fase II.

$a_F$ : pendiente de la curva de fatiga corregida.

C: factor que varía con el tipo de ensayo y la zona de medida.

$W_{00}$ : ordenada al origen de la curva de ajuste de la variación de la energía disipada con el número de ciclos.

$dW/dN$ : pendiente de la curva de ajuste de la energía en función del número de ciclos

$E_0$ : módulo al inicio del ensayo, figura 3.3.

$E_{00}$ : intersección de la línea de ajuste para la curva de módulo E en función del número de ciclos en la fase II, figura 3.3.

De esta manera consiguen estos autores una mejor correlación entre la pendiente de la fatiga y la deformación impuesta, aunque en el caso de Di Benedetto establece una relación lineal y Khalid una relación exponencial.

Otro aspecto muy importante desde el punto de vista de este trabajo y presentado por Di Benedetto en su artículo -conviene destacar que este artículo de Di Benedetto es un resumen del trabajo realizado por el RILEM que recoge toda la experiencia europea-, es el establecer el criterio de fatiga en el momento en que el módulo de la mezcla, figura 3.3, empieza a disminuir de forma rápida, cuando el ensayo de fatiga pasa de la fase 2 a la fase 3.

$$D_{III} = \frac{(E_0 - E_{III})}{E_0}$$

donde:

$D_{III}$ : parámetro de daño en la transición de la fase 2 a la fase 3.

$E_{III}$ : módulo en la transición de la fase 2 a la fase 3.

En este caso Di Benedetto corrige también este parámetro para eliminar el sesgo que produce en el ensayo la tixotropía, el calentamiento y los efectos antes señalados, sobre  $D_{III}$ , obteniéndose la siguiente expresión:

$$D_{III_c} = D_{III} - (4/5) \cdot \left[ \frac{(E_0 - E_{000})}{E_0} \right]$$

donde  $D_{III_c}$  es el parámetro de daño corregido.

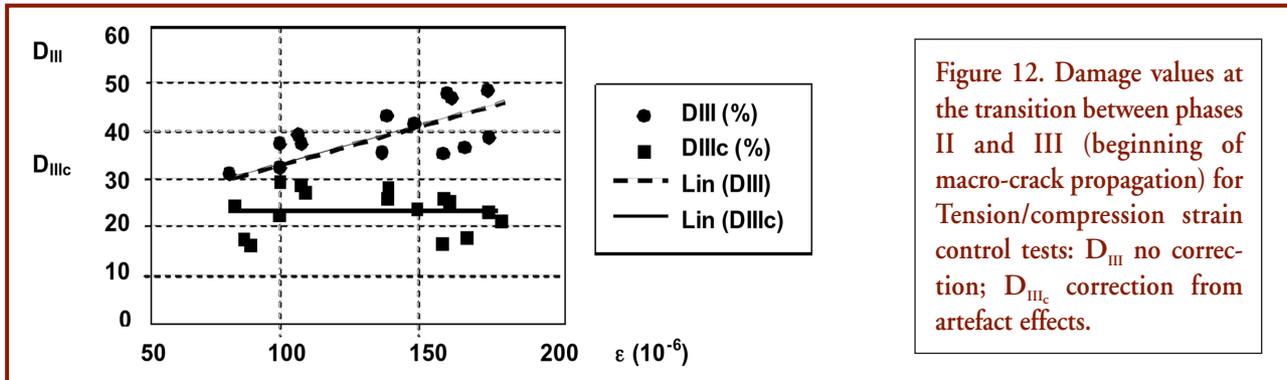


Figure 12. Damage values at the transition between phases II and III (beginning of macro-crack propagation) for Tension/compression strain control tests:  $D_{III}$  no correction;  $D_{IIIc}$  correction from artefact effects.

Figura 3.5. Análisis de la relación entre  $D_{III}$  y  $D_{IIIc}$ . Fuente: Di Benedetto (7).

Di Benedetto analiza en este caso la relación entre  $D_{III}$  y  $D_{IIIc}$  con la deformación inicial de ensayo, figura 3.5, y encuentra que no existe correlación entre  $D_{IIIc}$  y la deformación inicial. Es decir, con independencia de la deformación con que se inicia el ensayo el valor de  $D_{IIIc}$  permanece invariable, como si se tratase de una constante de la mezcla. Como veremos más adelante en este trabajo, nuestros resultados van en esta línea, pero además hemos podido relacionar a partir de este parámetro el comportamiento a fatiga de la mezcla con los resultados de los ensayos estáticos, lo que facilita enormemente valorar la respuesta a fatiga de las mezclas bituminosas.

### 3.2.- Propagación de la fisura

Otros autores, sobre todo los que han participado en el desarrollo del programa SHRP y en el establecimiento del método Superpave para el diseño de las mezclas asfálticas

(Roque, (5) y (9)), han analizado el fallo de fatiga de las mezclas bituminosas mediante la aplicación de la ley de Paris de la propagación de la fisura.

La longitud inicial de las fisuras corresponde a los pequeños fallos o desperfectos en la superficie de la capa de mezcla que da inicio a la propagación de las fisuras. En el caso de las mezclas bituminosas se supone que la longitud de  $C_o$  es de 0,3 pulgadas.

$$Np = \frac{1}{A} \int_{C_o}^h \frac{d_c}{k^n}$$

donde:

$d_c$ : longitud de la fisura.

$Np$ : número de aplicaciones de carga para propagar la fisura desde la longitud inicial  $C_o$  hasta la superficie.

$h$ : espesor de la capa de mezcla bituminosa.

$C_0$ : longitud inicial de la fisura.

$k$ : factor de intensidad de tensiones.

$A, n$ : parámetros dependientes de las propiedades del material.

La expresión anterior puede ser expresada como:

$$Np = \frac{1}{A} I_{k_{IT}}$$

donde  $I_{k_{IT}}$  es una función de los siguientes parámetros, suponiendo un firme bicapa.

$$I_{k_{IT}} = f\left(h_{MB}, h_B, \frac{E_{MB}}{E_B}, \frac{E_B}{E_E}\right)$$

donde:

$h_{MB}$ : espesor de la capa de mezcla bituminosa.

$h_B$ : espesor de la capa por debajo de la capa (base) de mezcla bituminosa.

$E_{MB}, E_B, E_E$ : módulos de la capa de mezcla bituminosa, capa de base y de la explanada.

Roque, Lytton (5) junto con otros investigadores de las Universidades de Pennsylvania y Texas, Pennsylvania State University y Texas A&M University, calcularon el valor de  $I_{k_{IT}}$  para distintas hipótesis de cálculo y obtuvieron finalmente la siguiente relación entre los parámetros antes mencionados que es tomada como base en el procedimiento Superpave para el diseño de mezclas.

$$\begin{aligned} \ln e(I_{k_{IT}} \cdot 10^4) = & -2,684307181 + 0,454159405 \cdot h_{MB} + 0,009515440 \cdot h_B - 0,035234133 \cdot \frac{E_{MB}}{E_E} \\ & + 0,0 \cdot \frac{E_B}{E_E} - 0,023512514 \cdot h_{MB} \cdot h_{MB} - 0,000716231 \cdot h_{MB} \cdot h_B + 0,000624809 \cdot h_{MB} \cdot \frac{E_{MB}}{E_E} \\ & + 0,0 \cdot h_{MB} \cdot \frac{E_B}{E_E} + 0,0 \cdot h_B \cdot h_B - 0,000051783 \cdot h_B \cdot \frac{E_{MB}}{E_E} + 0,002040196 \cdot h_B \cdot \frac{E_B}{E_E} \\ & + 0,000201206 \cdot \left(\frac{E_{MB}}{E_E}\right) \cdot \left(\frac{E_{MB}}{E_E}\right) + 0,0 \cdot \left(\frac{E_{MB}}{E_E}\right) \cdot \left(\frac{E_B}{E_E}\right) + 0,0 \cdot \left(\frac{E_B}{E_E}\right) \cdot \left(\frac{E_B}{E_E}\right) \end{aligned}$$

Los parámetros A y n son obtenidos directamente en el laboratorio ensayando probetas cilíndricas de mezclas bituminosas a tracción indirecta.

El ensayo se realiza en dos fases, en la primera se obtiene la evolución de la deformación cuando se aplica una carga estática que se mantiene durante 100 segundos, ensayo de fluencia. Terminada esta fase se rompe la probeta a tracción indirecta a una velocidad de deformación del plato de 50 mm/min y se determina su resistencia a tracción indirecta,  $\sigma_i$ .

En el ensayo de fluencia se determina una relación exponencial entre la deformación y el tiempo, figura 3.6.

$$D(t) = D_0 + D_1 t^m$$

donde:

$D(t)$ : función de fluencia.

$D_0, D_1$  y  $m$ : parámetros obtenidos al realizar el ensayo de fluencia.

Y se determinan los parámetros A y n a emplear en la expresión, mediante las siguientes ecuaciones:

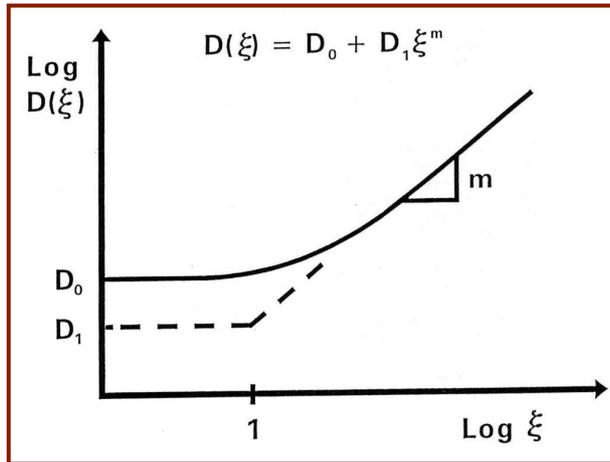


Figura 3.6. Determinación del valor de  $m$ , pendiente de la curva de fluencia.

$$n = \left( \frac{a_0}{m} a_1 \right)$$

$$\log A = \log a_2 + \frac{a_3}{m} \log D_1 + a_4 \log \sigma_i$$

Donde  $\sigma_i$  es la resistencia a tracción indirecta del material bajo unas condiciones determinadas de carga, en MPa, y  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  y  $a_4$  son cinco constantes que permiten calibrar y ajustar el modelo.

#### 4.- ANÁLISIS DEL FALLO POR FATIGA. CRITERIO DE LA DEFORMACIÓN CRÍTICA

En los estudios llevados a cabo en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña se han empleado tres tipos de ensayos: un ensayo basado en el procedimiento BTM (Barcelona Tracción Directa), que permite ensayar a fatiga probetas fabricadas en la compactadora Marshall mediante un tipo especial de bases; en segundo lugar se ha realizado el ensayo de flexotracción según la NLT-350, empleado en España para ensayar a fatiga las mezclas bituminosas y, por último, se ha aplicado un ensayo de fatiga a tracción en que mediante unas bases de anclaje que se pegan a las probetas prismáticas éstas pueden ser ensayadas a tracción dinámica. Tanto el procedimiento de ensayo BTM como el ensayo de tracción directa y sus bases de anclaje y preparación de probetas han sido objeto de dos patentes.

##### Ensayo BTM

El ensayo BTM (Barcelona Tracción Directa) está basado en un procedimiento especial para la fabricación de probetas que permite ensayarlas a tracción. La probeta se fabrica en la compactadora Marshall sobre una base constituida por dos semicírculos con un resalto en la zona de contacto, lo que crea una hendidura en la parte central de la probeta, y un sistema de anclaje donde aplicar los esfuerzos de tracción, figura 4.1.

El ensayo puede ser realizado en el modo estático aplicando una velocidad de deformación fija o bien, en el modo

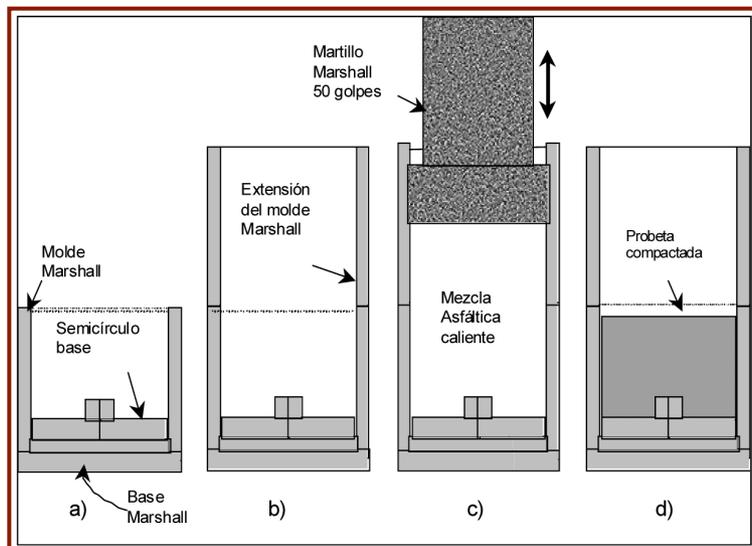


Figura 4.1. Esquema de fabricación de las probetas para el ensayo BTD.

dinámico, aplicando una carga senoidal de amplitud y frecuencia constante. El primer procedimiento es empleado para determinar la energía y la deformación de rotura de la mezcla; el segundo, para estudiar su comportamiento a fatiga.

En la modalidad estática, el ensayo consiste en aplicar un desplazamiento a velocidad uniforme de 1,0 mm/minuto, manteniendo la temperatura constante, hasta llegar a carga cero, es decir, hasta la rotura total de la probeta, figura 4.2. Durante el ensayo se registra el esfuerzo de tracción en función del desplazamiento y con él se puede evaluar la energía

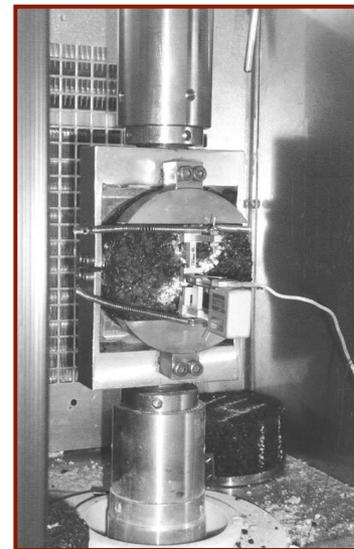


Figura 4.2. Ensayo BTD en modo dinámico y estático.

de fractura y obtener los valores de la resistencia máxima a tracción y su deformación de rotura.

En el segundo procedimiento, utilizando los mismos dispositivos mecánicos que en el ensayo estático, se somete la probeta a fatiga, es decir, a una carga dinámica de tracción hasta su fisuración.

#### Ensayo a flexotracción dinámica

El ensayo a flexotracción, con control de desplazamiento, consiste en someter una probeta prismática, apoyada en sus extremos y sujeta en su centro, a un desplazamiento de

éste que varía en el tiempo según una función sinusoidal, NLT-350.

Las probetas se compactan por vibración, de acuerdo a la norma NLT-173, mediante un elemento compactador formado por una placa de acero sobre la que van montados dos vibradores iguales, figura 4.3. La probeta original mide aproximadamente 300 x 300 x 50 mm y por serrado se obtienen cinco probetas prismáticas de dimensiones 300 x 50 x 50 mm.

El ensayo a fatiga a flexotracción dinámica consiste en someter una probeta prismática apoyada en los dos extremos, a un desplazamiento que varía en el tiempo con la siguiente ley:

$$D = D_0 \cdot \text{sen} (2 \pi F t)$$

siendo:

D: desplazamiento en el instante  $t$  ( $\mu\text{m}$ ).

$2D_0$ : amplitud total de la función desplazamiento ( $\mu\text{m}$ ).

F: frecuencia de la onda (Hz).

$t$ : tiempo (segundos).

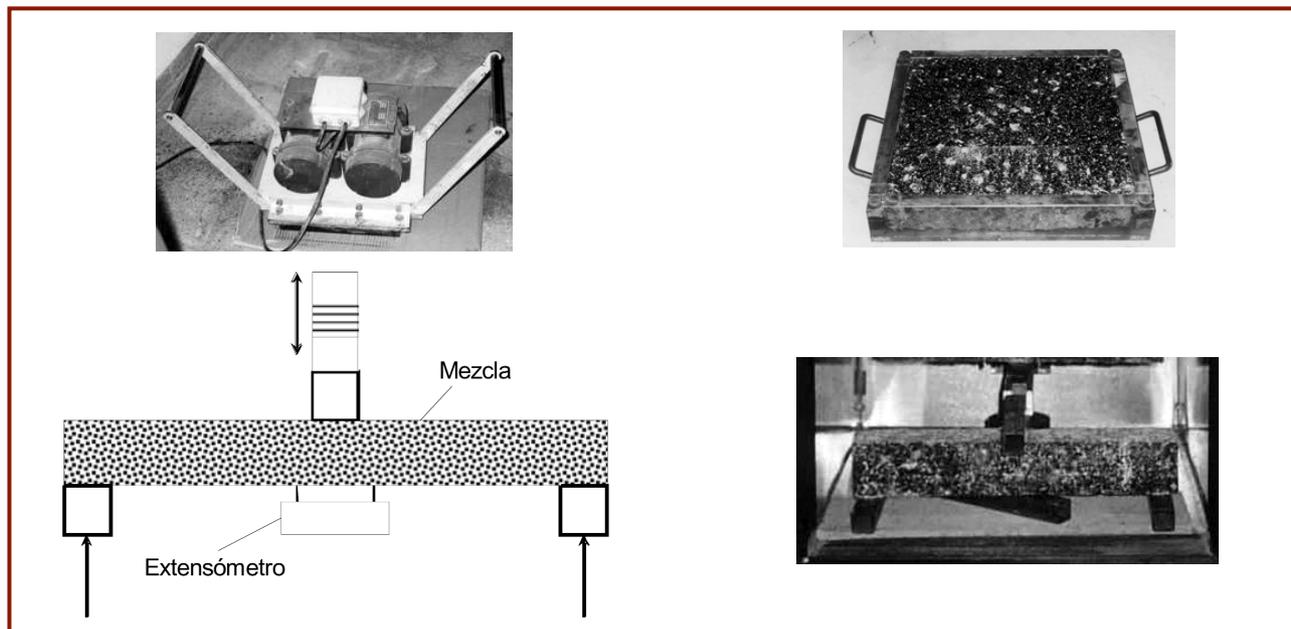


Figura 4.3. Compactación y obtención de la probeta para el ensayo a flexotracción.

### Ensayo a tracción directa

El ensayo a tracción directa consiste en someter una probeta prismática a un esfuerzo de tracción. El ensayo puede realizarse en modo estático o en modo dinámico. En modo estático, se aplica un esfuerzo de tracción a velocidad de deformación constante, registrando la variación de la carga con la deformación provocada (aunque el ensayo también puede realizarse a carga controlada). En modo dinámico, se aplica una amplitud de carga sinusoidal, registrando la variación de la deformación con el número de aplicaciones de carga (aunque el ensayo también puede realizarse a deformación controlada).

Las probetas prismáticas pueden obtenerse a partir de probetas prismáticas o cilíndricas fabricadas en laboratorio, de diferentes medidas según el equipo de compactación empleado, serrándolas adecuadamente para obtener unas dimensiones aproximadas de 150 x 50 x 50 mm, o pueden obtenerse, también por serrado, a partir de testigos cilíndricos extraídos directamente de la capa ejecutada en el firme, hasta obtener una probeta prismática de las dimensiones antes mencionadas.

En ambos casos, a la probeta prismática a ensayar se le practicará por serrado una pequeña entalladura de 5 mm en dos lados opuestos de su sección media. En cada una de las bases de la probeta prismática se fijará, mediante adhesivo, un soporte metálico, que permitirá fijar la probeta en las



Figura 4.4. Preparación de la probeta para realizar el ensayo a tracción directa.

mordazas situadas en cada uno de los pistones de una prensa, de forma que sobre la probeta pueda aplicarse un esfuerzo a tracción, figura 4.4.

Durante el ensayo en modo estático a deformación controlada, se registra la variación de carga con la deformación producida en la mezcla, medida mediante uno o dos extensómetros colocados respectivamente en una o dos caras entalladas de la probeta, figura 4.5. Si el ensayo se realiza en modo dinámico, a carga controlada, se registra la variación de la deformación con el número de aplicaciones de carga.

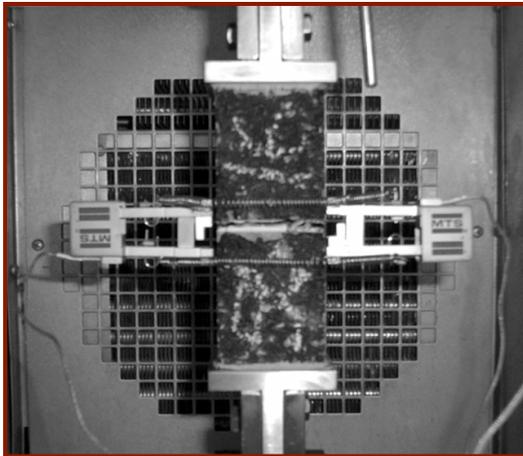


Figura 4.5. Ejecución del ensayo a tracción directa.

#### 4.1.- Deformación crítica

La aplicación de todos estos ensayos, en su modalidad dinámica, ha servido para poner de manifiesto que para cada mezcla existe una deformación unitaria a partir de la cual el proceso de fatiga se propaga de forma muy rápida. Esta deformación, que hemos denominado “deformación crítica” es independiente del estado de tensiones o de sollicitaciones a que está sometida la probeta en la fatiga. Es decir que si se le aplica una tensión grande, la deformación inicial producida será mayor y esta deformación irá aumentando en cada aplicación de carga hasta llegar a la deformación crítica, que es cuando se empezará a acelerar el proceso de fatiga y aumentar rápidamente la deformación producida en cada ciclo hasta la rotura del material. Si se le aplica una carga pequeña esta

deformación será menor, pero igualmente irá aumentando en cada aplicación de carga hasta un nivel de deformación igual que en el caso anterior, deformación crítica, a partir del cual aparece la fisura y ésta se propaga rápidamente.

En las figuras 4.6 y 4.7 y 4.8 puede apreciarse el resultado de los ensayos BTB, a flexotracción y a tracción directa, en el que puede observarse el nivel de deformación crítica correspondiente a cada ensayo. La deformación crítica es un parámetro que depende del tipo de ensayo y también de la mezcla ensayada, pero para un tipo de ensayo puede considerarse como una característica de la mezcla.

Es más, lo que también se ha podido observar en el ensayo de fatiga a flexotracción es que las mezclas que no llegan a

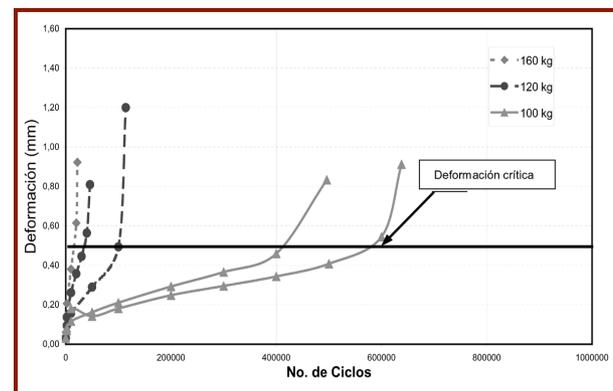


Figura 4.6. Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga. Ensayo de fatiga BTB. Mezcla D8, 5°C, B60/70.

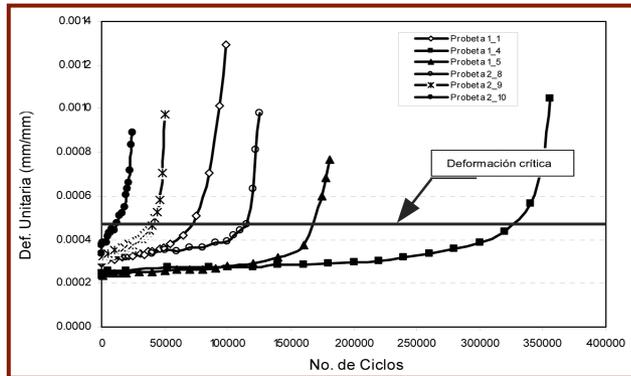


Figura 4.7. Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga. Ensayo de fatiga a flexotracción. Mezcla S20, 30%RAP, 5°C, B80/100.

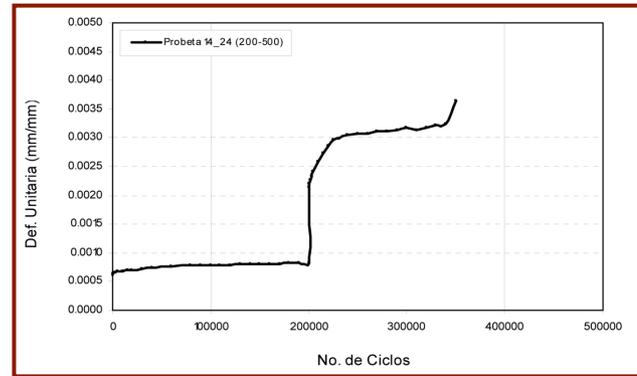


Figura 4.9. Evolución de la deformación con el número de ciclos ensayo de fatiga a flexotracción. Mezcla S20, 50%RAP, 35°C, B150/200.

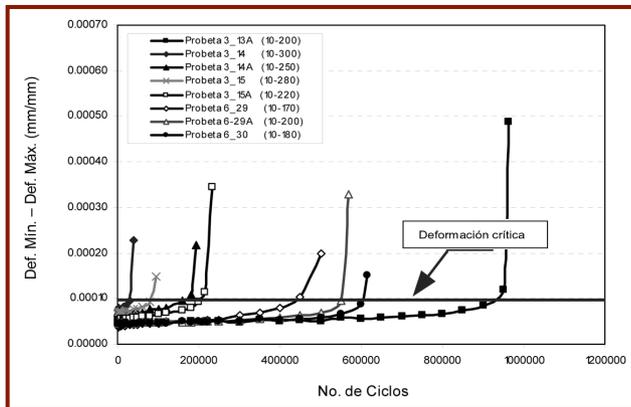


Figura 4.8. Evolución de la deformación unitaria con el número de ciclos de carga. Ensayo de fatiga a tracción directa. Microaglomerado (5 días de envejecimiento), 20°C.

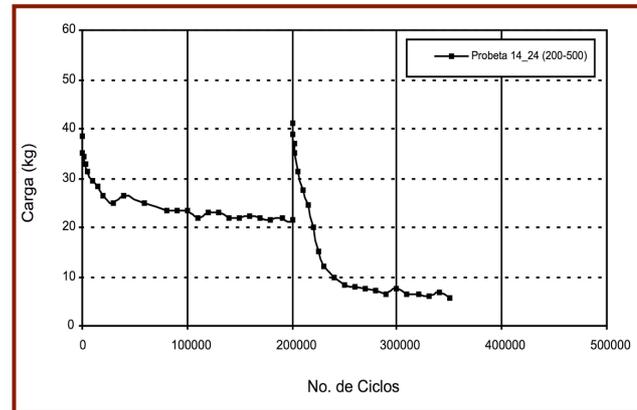


Figura 4.10. Evolución de la carga con el número de ciclos. Ensayo de fatiga a flexotracción. Mezcla S20, 50%RAP, 35°C, B150/200.

alcanzar esta deformación crítica, figura 4.9, no están rotas aunque se haya considerado que han fallado por el criterio convencional, reducción de la carga aplicada al inicio del ensayo, ciclo 200, al 50%, figura 4.10.

Si analizamos los resultados en deformaciones y en tensión del ensayo de esta probeta, que resulta muy deformable por realizarse el ensayo a 35° C, se observa que la carga inicial se reduce a la mitad después de 200.000 aplicaciones de carga, con lo que según el criterio clásico consideraríamos que habría fallado, pero si observamos la evolución de su deformación vemos que ésta no aumenta sino que se mantiene estable. Es como si se hubiese producido la rotura por fatiga de las fibras más exteriores de la probeta, y las interiores permanecen intactas necesitando un mayor desplazamiento para su fisuración, figura 4.11.

Si aumentamos ahora el nivel de desplazamiento en el ensayo de fatiga observamos que la probeta se comporta en el ensayo como si estuviera prácticamente sin ensayar, ya que responde con un nivel de esfuerzos similar al principio del ensayo, figura 4.10. Es decir, si consideramos el fallo de la probeta cuando su carga se reduce al 50% y no tenemos en cuenta la evolución de su deformación podemos equivocarnos y decir que la probeta ha fallado a fatiga mucho antes que en la realidad.

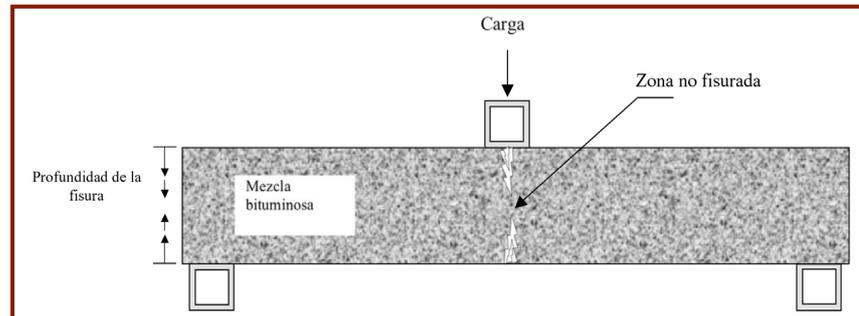


Figura 4.11. Variación de la profundidad de la fisura, en función de la amplitud del desplazamiento impuesto, en un ensayo de fatiga a flexotracción.

Éste es un problema que presentan los ensayos de flexotracción o de ménsula cuando se realizan a deformación o desplazamiento controlado y se ensayan mezclas deformables, fabricadas con betunes modificados o con mayor cantidad de betún o se ensayan a mayor temperatura.

La existencia de una deformación crítica en los ensayos de fatiga puede observarse también claramente en los ensayos de fatiga a tracción directa cuando se realizan a deformación controlada, figura 4.12. En este caso podemos observar que si el nivel de deformación impuesto es bajo, la probeta responde casi elásticamente y apenas varía la carga necesaria en cada aplicación de carga. Si aumentamos el nivel de deformación el proceso continúa de la misma manera, hasta llegar a una deformación más alta en que entonces rápidamente se produce su fallo por fatiga y la carga cae rápidamente.

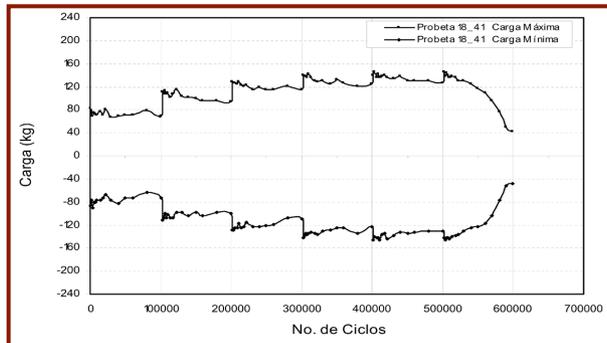


Figura 4.12. Evolución de la carga con el número de ciclos.  
 Fatiga a tracción directa. Deformación controlada.  
 Mezcla S20, 50%RAP, 20°C, B150/200.

El hecho de que la deformación crítica de fatiga pueda suponerse como una característica de la mezcla e independiente del estado de tensiones a que es solicitada la probeta en el ensayo viene a confirmar los resultados obtenidos por Di Benedetto y otros (7), en que proponían como fallo por fatiga el análisis de la evolución del módulo de la mezcla, y establecían como criterio de fallo el momento en que el módulo empieza a decrecer rápidamente, cuando pasa de la fase 2 a la fase 3. En el estudio realizado por Di Benedetto se dice que en los ensayos realizados observaron que el valor del módulo en que se produce este cambio brusco y que sirve para establecer el fallo por fatiga era independiente, para una misma mezcla, de la tensión inicial del ensayo. Esto es lo mismo que se ha observado en los ensayos aquí recogidos, ya que es lo mismo hablar de módulo que de deformación, ya que ambos parámetros están relacionados por una constante que es la tensión del ensayo. ( $\sigma_c = E \cdot \epsilon$ ).

La deformación crítica de fatiga es una constante de la mezcla ensayada que varía con el tipo de mezcla y con la temperatura de ensayo. En general, cuanto mayor contenido de betún tiene la mezcla, cuando se emplean betunes modificados más tenaces y cuanto mayor es la temperatura del ensayo, tanto mayor es su deformación crítica. Por otra parte, en el análisis de la evolución de la deformación con el número de ciclos también se observa que cuanto mayor es el módulo de la mezcla menor suele ser el incremento de la deformación en cada aplicación de carga, figura 4.13. Es como si la deformación crítica y el módulo de la mezcla determinasen su comportamiento a fatiga. Cuanto mayor sea el módulo de la mezcla y mayor sea su deformación crítica, mejor será su comportamiento a fatiga.

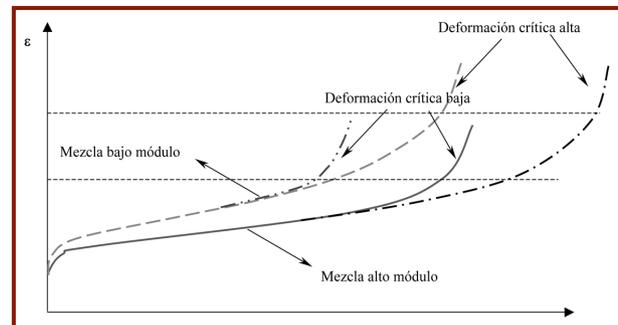


Figura 4.13. Influencia del módulo y de la deformación crítica en el fallo por fatiga.

Es por esta razón que en el trabajo realizado se ha analizado la relación de estos dos parámetros con los que define sus leyes y comportamiento a fatiga.

## 5.- ANÁLISIS DEL FALLO POR FATIGA. RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE LAS LEYES DE FATIGA Y LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA MEZCLA: MÓDULO Y DEFORMACIÓN CRÍTICA

Los ensayos realizados a tracción a tensión controlada han servido también para poner en evidencia que existe una relación entre el módulo dinámico de la mezcla ensayada y la pendiente de la ley de fatiga obtenida. Cuanto mayor es el módulo de la mezcla ensayada más tendida es la ley de fatiga obtenida y menor es el valor absoluto del coeficiente  $|b|$ , de la ley de fatiga:

$$\log \varepsilon = a - b \cdot \log N$$

Esto ya había sido observado por otros autores y es tenido en cuenta en los modelos de leyes de fatiga empleados en los métodos de dimensionamiento AASHTO 2002 (1), o en la representación de estas leyes en los gráficos y libros especializados, Yoder (10).

Esta relación ha sido obtenida, figura 5.1, para los ensayos realizados en el laboratorio, en el que se han ensayado mezclas muy deformables tipo M y mezclas más rígidas, mezclas tipo S, habiendo sido ensayadas estas mezclas a diferentes temperaturas, 20 y 35° C.

Aunque la tendencia es clara y ya ha sido puesta de manifiesto por otros autores, sería necesario aumentar el número

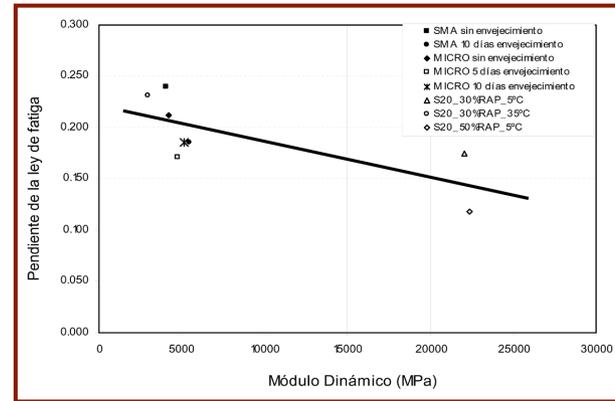


Figura 5.1. Correlación entre el módulo dinámico y la pendiente de las leyes de fatiga a tracción directa.

y el tipo de mezcla ensayada, mezcla de alto módulo, menor temperatura, etc., con objeto de tener un mayor número de puntos y obtener un mejor ajuste.

En el caso de la deformación crítica se ha observado que existe una clara correlación entre la deformación crítica de la mezcla ensayada y la deformación que corresponde a cada mezcla en el ciclo 1, figura 5.2, parámetro que nos permite determinar también la otra constante de la ley de fatiga:

De acuerdo con la relación obtenida, tendríamos que cuanto mayor es la deformación crítica, mayor es el valor de la deformación en el ciclo 1 y por tanto más desplazada hacia arriba será su ley de fatiga.

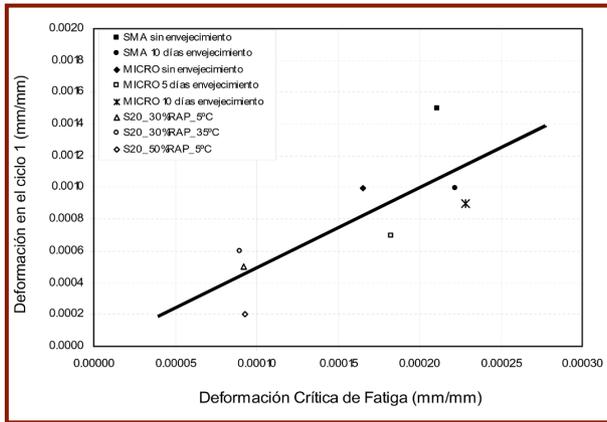


Figura 5.2. Correlación entre la deformación crítica de fatiga a tracción directa y la deformación en el ciclo 1.



Figura 5.3. Leyes teóricas de fatiga correspondientes a mezclas de diferente módulo y deformación crítica.

Así, si comparamos dos mezclas A y B, en que la mezcla A tiene un mayor módulo y una mayor deformación crítica a fatiga, la mezcla A tendrá un mejor comportamiento a fatiga, la mezcla A tendrá un mejor comportamiento a fatiga que la mezcla B, figura 5.3.

La influencia que tiene el módulo y la deformación crítica de fatiga puede ser también observado si representamos, figura 5.4, las diferentes leyes de fatiga que hemos obtenido en el laboratorio en el ensayo de las diferentes mezclas en función de la variable  $\varepsilon/\varepsilon_1$  (deformación de ensayo dividida por la deformación correspondiente al ciclo 1).

$$-b \cdot \log N = \log \varepsilon - a = \log \varepsilon - \log \varepsilon_1 = \log \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right)$$

En este caso las leyes de fatiga forman un abanico alrededor del punto (1, 1) de pendiente mayor a medida que va decreciendo su módulo. En esta figura, claramente puede observarse que una mezcla sometida en un ensayo de fatiga a la misma carga, a la misma sollicitación, cuanto mayor sea su módulo y mayor sea su deformación en el ciclo 1, mejor será su comportamiento a fatiga, ya que le correspondería una recta de fatiga con menor pendiente y en el eje de las ordenadas entraríamos con el valor  $\frac{\sigma}{E \cdot \varepsilon_1}$  que sería tanto más pequeño cuanto mayor sea el módulo E y el valor de la deformación en el ciclo 1. En definitiva, el módulo de la mezcla y la deformación crítica de fatiga.

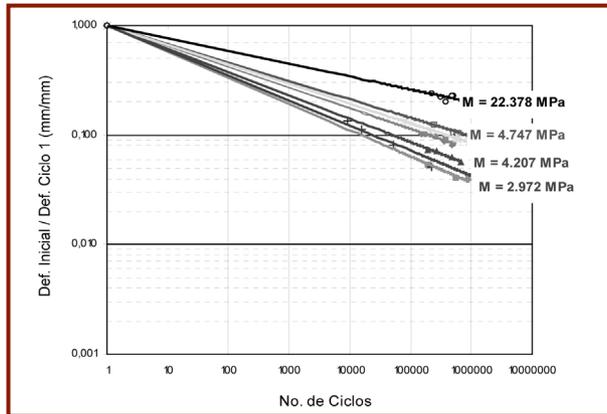


Figura 5.4. *Leyes de fatiga normalizadas con la deformación en el ciclo 1. Ensayo de fatiga a tracción directa.*

## 6.- DETERMINACIÓN DE LA LEY DE FATIGA DE UNA MEZCLA A PARTIR DE SU RESISTENCIA A LA ROTURA (ENSAJO DE TRACCIÓN DIRECTA ESTÁTICO)

Conocidos los dos parámetros básicos que rigen el comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas, el resto de la investigación ha ido dirigido a analizar la relación de estos dos parámetros dinámicos de la mezcla con otras características de la misma que pudiesen ser evaluadas directamente mediante el empleo de unos ensayos más sencillos de realizar, como son los ensayos estáticos. En este sentido se ha estudiado la relación entre la deformación de rotura y el módulo secante de la mezcla obtenido en un ensayo estático de tracción y sus homólogos en el ensayo dinámico: deformación crítica y módulo dinámico.

Se realizó sobre las mismas mezclas ensayadas a fatiga un ensayo a tracción en que se mantiene constante la velocidad de deformación. La velocidad de deformación del plato en el ensayo de tracción fue de 0,1 mm/min y la temperatura del ensayo era variable de acuerdo con la que se había realizado el ensayo de la mezcla a fatiga, 5, 20 y 35° C.

En estos ensayos se obtenía una curva de rotura como el de la figura 6.1, en donde se determinaba su módulo secante y la deformación correspondiente al máximo de la carga, la correspondiente al 10% de la carga máxima y la correspondiente a 0,05 MPa de carga.

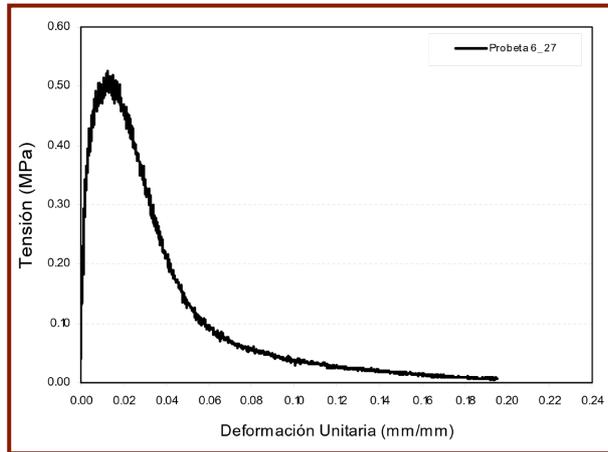


Figura 6.1. Evolución de la tensión con la deformación. Ensayo a tracción directa a velocidad de deformación constante. Microaglomerado.

En la figura 6.2 se ha representado la relación entre el módulo secante de la mezcla y el módulo dinámico. Como era de esperar, la relación obtenida ha sido muy buena. En la figura 6.3 se ha representado la relación entre la deformación crítica de la mezcla y su deformación de rotura (carga 0,05 MPa). La relación también es buena, se observa que hay una clara relación entre ambas variables, aunque con una mayor dispersión de resultados.

Esta mayor dispersión de resultados puede estar asociada a la gran variabilidad propia de los ensayos de fatiga y, quizás, a las pocas probetas ensayadas con cada mezcla. En algunos casos sólo se han ensayado 4 ó 5 probetas por mezcla, pero

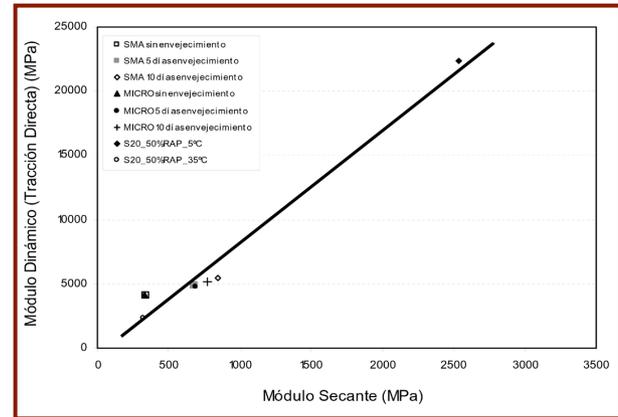


Figura 6.2. Correlación entre el módulo dinámico en tracción directa y el módulo secante en tracción directa estática. Mezclas SMA, microaglomerado y S20 con RAP.

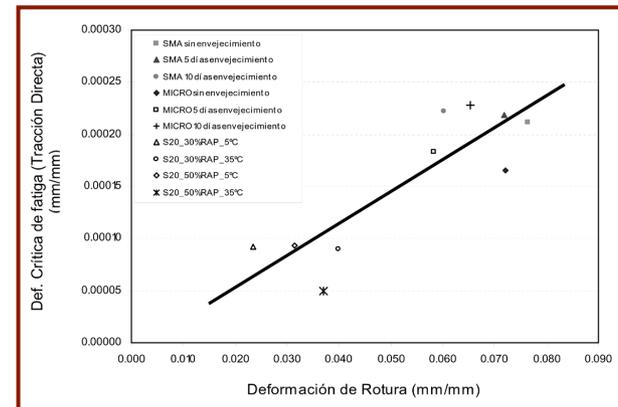


Figura 6.3. Correlación entre la deformación crítica de fatiga en tracción directa y la deformación de rotura en tracción directa estática, a 0,05 MPa de tensión.

lo que sí parecen evidenciar estos resultados es la gran relación entre las variables ensayadas y cómo fácilmente puede obtenerse el módulo dinámico y la deformación crítica de fatiga de una mezcla a partir de un ensayo estático de tracción, y a partir de estos dos parámetros obtener su comportamiento y su ley de fatiga.

## 7.- CONCLUSIONES

El trabajo realizado durante varios años en el Laboratorio de Caminos de Barcelona sobre el proceso de fatiga en las mezclas bituminosas, que ha dado lugar a tres tesis doctorales, a dos patentes y a diferentes tesinas y artículos técnicos, ha servido para obtener una visión más clara del proceso de fatiga de las mezclas bituminosas, establecer y definir las características mecánicas de la mezcla que gobiernan el proceso de fatiga y desarrollar un procedimiento de ensayo que permite obtener la ley de fatiga de la mezcla a partir de su curva de rotura en un simple ensayo de tracción. El procedimiento desarrollado se basa en los siguientes resultados:

**Primero.** En los ensayos de fatiga realizados, sobre todo en el caso de tracción a tensión constante, se pone de manifiesto que existe para cada tipo de mezcla ensayada una deformación crítica, a partir de la cual el proceso de fatiga se desarrolla muy rápidamente. Se pasa de la fase 2 (microfisuración) a la fase 3 (inicio y propagación de la fisuración).

**Segundo.** Esta deformación crítica es independiente del nivel de sollicitación a que se está realizando el ensayo. Es decir, con independencia de la tensión a que se realiza el ensayo y de la deformación inicial producida, cuando la deformación de la probeta en el ensayo alcanza la deformación crítica, rompe.

**Tercero.** En el caso de los ensayos de flexotracción o de ménsula realizados a deformación controlada, que estable-

cen el fallo por fatiga cuando la carga o el módulo de la probeta se reduce a la mitad, puede ocurrir que se dé por fisurada y rota por fatiga una probeta, cuando apenas se ha producido su deterioro por fatiga. Esto no ocurre si se establece el fallo en función de la deformación crítica.

**Cuarto.** El comportamiento a fatiga de las mezclas bituminosas, puede establecerse a partir de su módulo y de su deformación crítica. Conocido el módulo de la mezcla puede determinarse directamente la pendiente “b” de la ley de fatiga y el término independiente “a” a partir de la deformación crítica.

$$\log \varepsilon = a - b \log N$$

$$a = f(\varepsilon_{crítica})$$

$$b = g(E_{mezcla}^*)$$

**Quinto.** Existe una relación lineal (dentro del rango de mezclas ensayadas) entre la deformación crítica y el parámetro a y entre el módulo dinámico de la mezcla y la pendiente de la recta de fatiga.

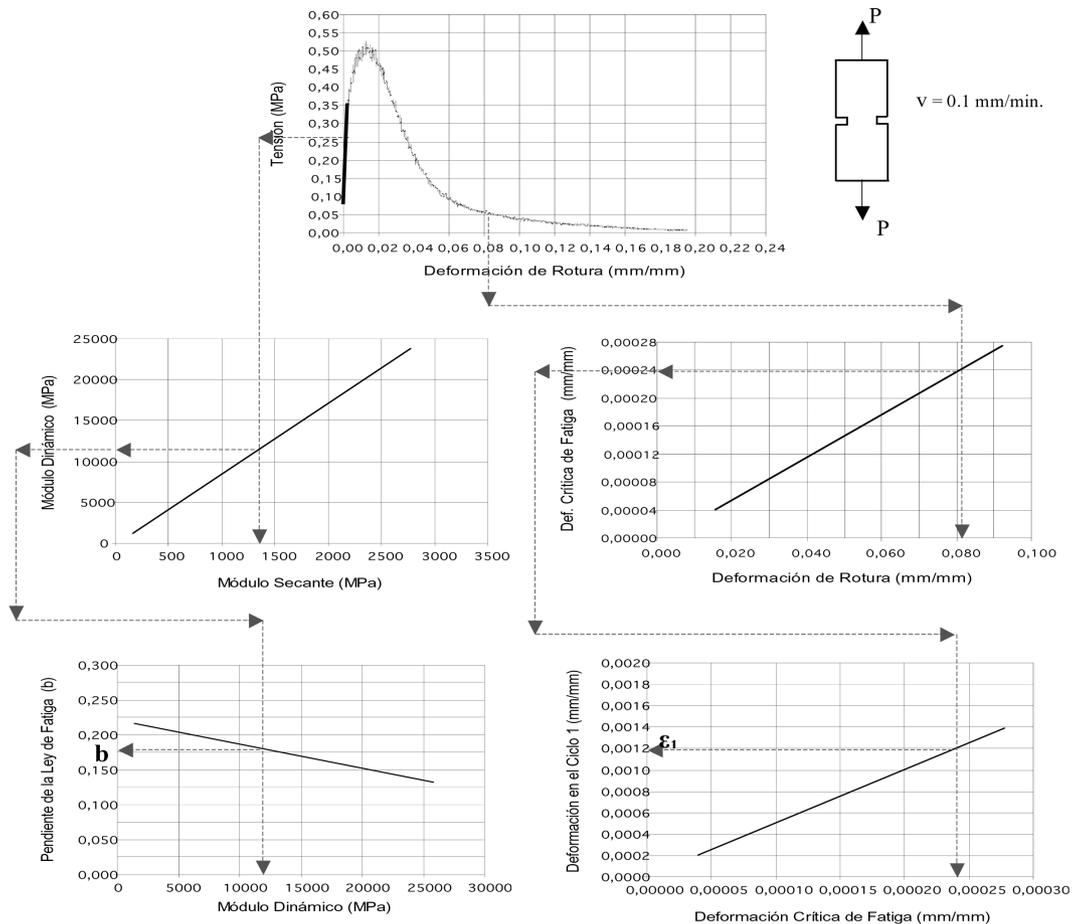
**Sexto.** Cuando mayor es el módulo de la mezcla menor será su pendiente de la ley de fatiga, valor de b. Cuando mayor es la deformación crítica mayor es el valor de a. Es decir, si queremos mejorar el comportamiento a fatiga de una mezcla para unas condiciones y temperatura de ensayo, debemos aumentar al mismo tiempo su módulo dinámico y su deformación crítica a fatiga.

**Séptimo.** La deformación crítica a fatiga de una mezcla y su módulo dinámico están relacionados con la deformación de rotura y con el módulo secante obtenido en el ensayo estático de tracción.

**Octavo.** Podemos determinar el comportamiento a fatiga de una mezcla, obtener su ley de fatiga, empleando únicamente un simple ensayo estático a tracción, lo que permite de una manera sencilla tener en cuenta esta propiedad en el diseño de la mezcla y optimizar el comportamiento a fatiga de la mezcla proyectada. Nomograma.

En resumen, presentamos un nuevo procedimiento para el análisis de la fatiga de las mezclas bituminosas que, por su aportación en el estudio del fenómeno de fatiga así como por su aplicación práctica, representa una gran aportación en la técnica de carreteras. Aunque el nomograma sólo sería aplicable en principio al tipo de mezclas ensayadas, lo importante de la investigación es haber constatado que se pueden establecer estas correlaciones, disponiendo de un nuevo método y procedimiento más sencillo para el estudio y proyecto de las mezclas asfálticas a fatiga.

## Nomograma para la determinación de la ley de fatiga de una mezcla a partir de su ensayo a tracción



**Ley de Fatiga**

$$\log \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right) = -b \log N$$

## REFERENCIAS

- (1) Project 1-37A: "Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures: Phase II". National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., 1998 - 2004.
- (2) Project 1-40: "Facilitating the Implementation of the Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures". National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., 2004 - active.
- (3) "Guide for mechanistic empirical design guide of new and rehabilitated pavement structures". Final Report. NCHRP. Transportation Research Board. National Research Council, Washington, D.C., March 2004.
- (4) "The AASHO Road Test: Report 5-Pavement Research". Highway Research Board Special Report 61E, National Research Council, Washington, D.C., 1962.
- (5) Roque, R.; Lytton, R.; Uzan, J.; Fernando, E.; Hiltunen, D. y Stoffels, S. "Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixes. Strategic Highway Research Program. SHRP-A-357". National Research Council, Washington, D.C., 1993.
- (6) "Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave". Asphalt Institute. US Department of Transportation. Federal Highway Administration, Lexington, USA, 1996.
- (7) Di Benedetto, H.; de La Roche, C.; Baaj, H. Pronk, H. y Lundström, R. "Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution". 6th RILEM Symposium PTEBM'03, Zurich, 2003, pp.15-38.
- (8) Khalid, H. y Artamendi, I. "Characterization of fatigue damage for paving asphaltic materials". Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Blackwell Publishing Inc., Sheffield, UK, No. 28, 2005, pp. 1113-1118.
- (9) Roque, R.; Zhang, Z. y Sankar, B. "Determination of crack growth rate parameters of asphalt mixtures using the Superpave IDT". Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technical Sessions, Chicago, Vol. 68, 1999, pp. 404-433.
- (10) Yoder, E. y Witzczak, M. "Principles of pavement design". John Wiley & Sons, Inc. USA, 1975.

Editado en Madrid,  
29 de noviembre de 2006