

PAVIMENTOS DE LARGA DURACIÓN

Autores/Ponente

Jacinto L. García Santiago (Sacyr)

Carlos García (Collosa)

Julien Buisson (Sorigué)

Cristian Cortés (Serviá Cantó)

Juan José Potti (Proyecto Fénix A.I.E)



A vertical strip of three images on the left side of the page. The top image shows a close-up of a road surface with a grid pattern. The middle image shows a road curving into the distance. The bottom image shows a close-up of a road surface with vertical lines.

RESUMEN

La aplicación de criterios de sostenibilidad en los pavimentos de carreteras está impulsando el estudio de nuevos conceptos en su diseño para prolongar sustancialmente la vida de los mismos de modo que no aparezcan daños estructurales y que su mantenimiento sólo requiera una renovación periódica de la capa de desgaste o rodadura por requerimientos de seguridad y comodidad (características superficiales).

La creciente intensidad de tráfico, especialmente de vehículos pesados, que soportan las carreteras en los países más industrializados exige el diseño de firmes capaces de cumplir las expectativas de incremento de tráfico. En este contexto, el concepto de firmes que solo requieran una rehabilitación superficial periódica encaja perfectamente, ya que se minimizan las afecciones al tráfico causadas por las operaciones de mantenimiento.

Hasta hace poco, el diseño de firmes semiflexibles con mayor capacidad portante se efectuaba mediante un incremento proporcional del espesor del mismo. Recientes experiencias en Gran Bretaña y E.E.U.U han demostrado que se pueden construir firmes mucho más duraderos sin necesidad de incrementar substancialmente el espesor. En este tipo de firmes, los criterios clásicos de deterioro (fatiga a flexotracción) pierden sentido, siendo más importantes los fallos por fisuración descendente (top-down cracking).


El Proyecto Fénix (www.proyctofenix.es) incluye dentro de sus actividades una dedicada en exclusiva a esta temática. El programa de investigación incluye: análisis de las principales causas de fallo en las mezclas bituminosas utilizadas en España, técnicas y prácticas constructivas y de control para evitar fallos prematuros en la ejecución, diseño y modelización de nuevas estructuras de firme que respondan a nuevos criterios de deterioro esperados con tipificación de nuevos tipos de mezclas requeridos para que cumplan con las expectativas de durabilidad previstas.

Este trabajo muestra las principales líneas de actuación del proyecto, en las que han cooperado un importante número de empresas y organismos públicos de investigación.

En este trabajo, además de las empresas participantes en la tarea, han colaborado el Centro de Estudios del Transporte (CEDEX), la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad Politécnica de Cataluña.

Palabras Clave: pavimentos, larga duración, firmes flexibles, Proyecto Fénix

1. INTRODUCCIÓN



El diseño y construcción de carreteras incluye un amplio abanico de variables y condicionantes que han de ser tenidos en cuenta. Uno de los más importantes es la durabilidad prevista. Ésta determina la vida útil de la inversión y, por lo tanto, la previsión de rehabilitación.

Además de las implicaciones económicas que supone la rehabilitación de estas infraestructuras, en el caso de pavimentos que soportan grandes intensidades de tráfico las restricciones al tráfico que implican las reparaciones hacen que el dilatar el periodo en el que éstas sean necesarias se convierta en un criterio crucial en el diseño.

Éste ha sido básicamente el germen que ha generado el concepto de pavimento de larga duración. Aunque existen muchas peculiaridades en la interpretación del concepto, la definición más genérica, y tal vez más aceptada, es la propuesta por el proyecto ELLPAG [1]:

Un pavimento de larga duración es aquel en el que no se produce un deterioro significativo en el cimiento y capas de base siempre que se lleve a cabo un correcto mantenimiento de la capa de rodadura.

Esta definición obvia el definir periodos definidos de vida útil (por ejemplo 30,40 ó 50 años) aunque en cualquier caso el objetivo son durabilidades muy superiores a las que ahora se incluyen como periodos de proyecto.

Según los criterios convencionales de diseño de firmes, al aumentar las previsiones de intensidad de tráfico la respuesta inmediata es un aumento en el espesor de capas que componen el firme (Figura 1). ¿Pero, es acertada esta metodología?

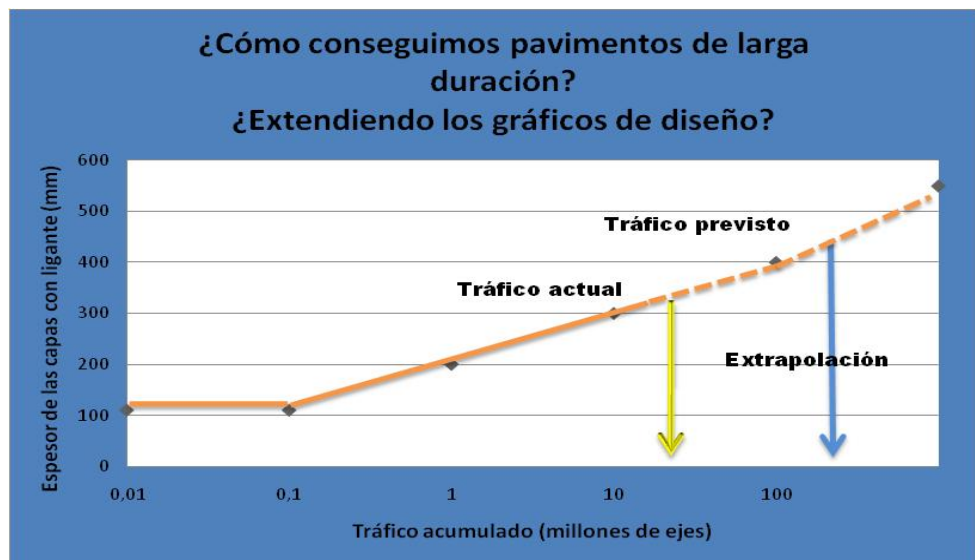


Figura 1.

Para diseñar un pavimento de larga duración es básico comprender y cuantificar los mecanismos de deterioro que sufren las estructuras de firmes utilizadas en la actualidad. Dos de los deterioros estructurales más comunes son la fisuración por fatiga y la deformación permanente.

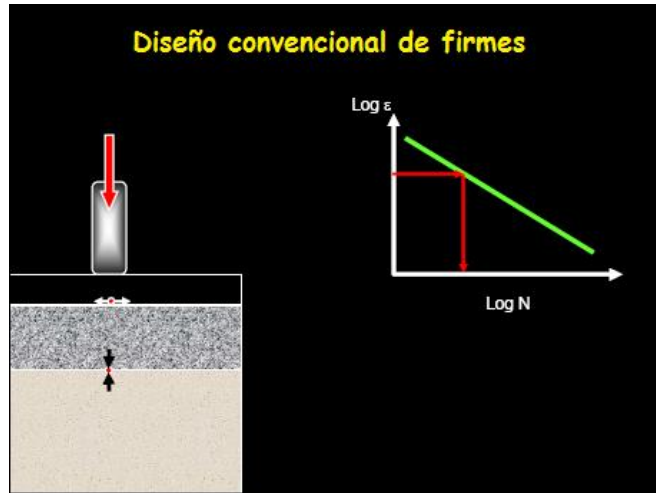


Figura 2. Ley de fatiga convencional de una mezcla bituminosa

Sin embargo, diversas experiencias realizadas con firmes en los que se ha aumentado el espesor de mezclas bituminosas a costa de los materiales granulares, han demostrado que la vida útil de los mismos es bastante superior a la inicialmente prevista. De forma general se ha verificado que la fisuración por fatiga y la deformación permanente no son los mecanismos prioritarios de deterioro si se supera un umbral de rigidez en el conjunto de las capas constituidas por mezclas bituminosas [2] (Figura 3).

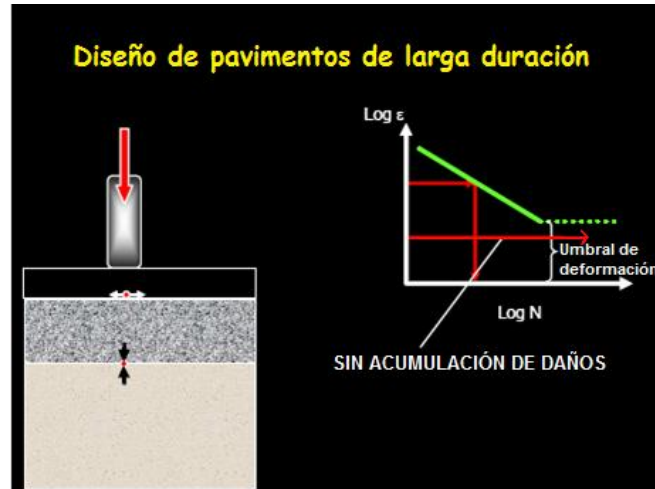


Figura 3. Las leyes de fatiga no se extrapolan indefinidamente


Las investigaciones publicadas hasta el momento se han centrado en pavimentos semiflexibles en los que los modelos de deterioro citados son los predominantes. En el caso de pavimentos semirrígidos las causas principales de deterioro son algo diferentes y requieren un estudio específico, ligado a las discontinuidades provocadas por las juntas de las capas tratadas y su eventual reflejo en las capas bituminosas.

El concepto de firmes de larga duración no es una aproximación simple a la mejora de la calidad de los pavimentos; es más bien una aproximación conceptual que implica el diseño de firmes, caracterización de materiales, sistemas productivos de mezclas bituminosas, pero también afecta a las tecnologías de conservación y a los sistemas de gestión de firmes, ya que modifica de forma substancial el análisis de ciclo de vida de las infraestructuras construidas.

Hay una cierta ruptura con los pavimentos “tradicionales” en cuanto a conceptos y práctica en su concepción, ejecución y mantenimiento que giran en torno a:


- Operaciones de conservación limitadas a la renovación periódica de la capa de rodadura, entendida como capa de desgaste, condicionadas al mantenimiento de las características superficiales, relacionadas con el confort y seguridad del usuario
- No hay operaciones de rehabilitación o refuerzo de características estructurales.
- Además de los tradicionales modelos de deterioro, fisuración a fatiga a flexotracción (figuración ascendente desde las capas bituminosas inferiores) y deformación permanente en las capas granulares o explanada, se considera uno nuevo, el de fisuración descendente (*Top down cracking*)
- Nuevos conceptos en cuanto a diseño de secciones y disposición de capas y materiales, estrechamente ligados a los requisitos tenso-deformacionales y de fatiga de cada capa. Como elemento más rupturista con las soluciones estructurales tradicionales aparece la disposición de una capa altamente resistente a fatiga (lo que implica reducido volumen de huecos y alto contenido de betún) en sustitución de las capas habituales de base, de formulación opuesta.



A vertical strip on the left side of the page shows a close-up, golden-yellow image of an asphalt surface, highlighting its granular texture and some small imperfections.

Bajo una perspectiva de diseño, los datos publicados en la bibliografía definen que la máxima deformación bajo tensión en el fondo de la mezcla bituminosa no debería exceder el límite de $60-70 \cdot 10^{-6}$ mm [3, 4, 5,6]. Igualmente, en el caso de la deformación vertical de las capas granulares el límite propuesto es de $200 \cdot 10^{-6}$ mm.

Además de la fatiga y la deformación se deben tener en cuenta otros procesos que generan el deterioro del firme. Entre ellos destacan los siguientes: reflexión de fisuras, fisuración descendente, fisuración térmica y el envejecimiento.

A vertical strip on the left side of the page shows a nighttime view of a road with light trails from vehicles, creating a sense of motion and depth.


Finalmente, las técnicas constructivas del firme en lugar de tener un papel secundario en la consecución de un pavimento de las citadas características, adquieren una gran relevancia.

La calidad en un sentido amplio se debe orientar en la obtención de las funcionalidades definidas para cada una de las capas del firme.


A vertical strip on the left side of the page shows a close-up, golden-yellow image of an asphalt surface, highlighting its granular texture and some small imperfections.

2.- Descripción del Proyecto Fénix.

El Proyecto Fénix representa el mayor esfuerzo en I+D realizado en Europa en el área de la pavimentación de carreteras. España es el segundo país más importante en Europa en producción de mezcla bituminosa, según una reciente información elaborada por la EAPA (European Association Asphalt Association).



En este contexto y ante una situación social que reclama una mayor seguridad en el transporte y un desarrollo de la actividad productiva bajo unas prácticas más amigables con el medio ambiente se ha concebido el Proyecto Fénix, **"Investigación estratégica en carreteras más seguras y sostenibles"**.




El proyecto de cuatro años de duración se estructura en torno a 12 líneas de investigación originales que van desde el desarrollo de nanomateriales activos en la reducción de emisiones de los vehículos, al desarrollo de nuevas tecnologías de producción en plantas asfálticas más eficientes, al desarrollo de nuevas mezclas bituminosas obtenidas mediante procedimientos más amigables con el medio ambiente y más seguras ante el riesgo de accidentes, al desarrollo de sistemas proactivos de la seguridad integrados en la carretera o en el aprovechamiento energético de la irradiación solar sobre el pavimento filtrante.

3- Tarea de Pavimentos de Larga Duración

Una de las líneas de investigación del proyecto es la de **Pavimentos de Larga Duración**.

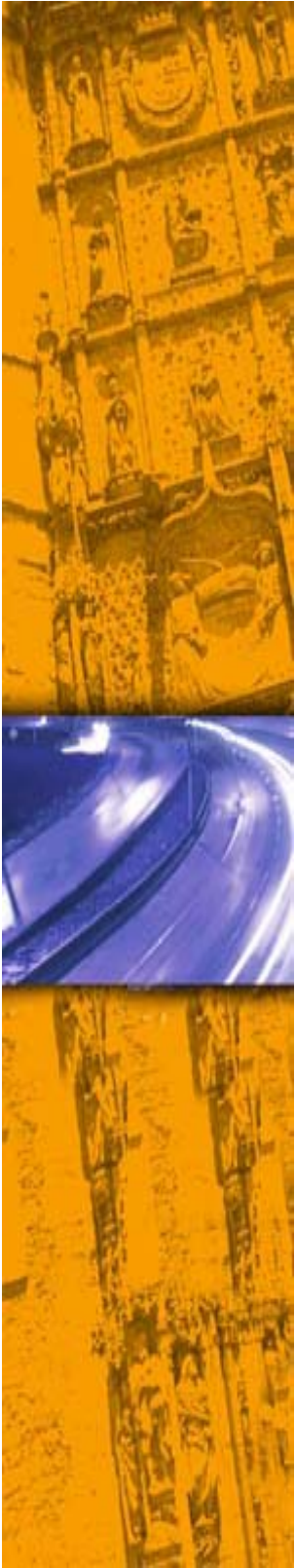
El objetivo de la tarea es la de incrementar la durabilidad de los firmes, asegurando su integridad durante un periodo de servicio mayor de lo habitual (no inferior a 30 años), sin necesidad de ninguna actuación de rehabilitación estructural salvo renovaciones periódicas de la capa de rodadura para mantenimiento de características superficiales relacionadas con la seguridad y confort del usuario.



Se investiga que diseños estructurales, materiales componentes y procedimientos de ejecución y de control permitirían asegurar que durante un periodo de proyecto largo no habría necesidad de ninguna actuación de rehabilitación estructural, siendo admisibles únicamente renovaciones de tipo superficial para mantener las características relacionadas con la seguridad vial.

La tarea de Pavimentos de Larga Duración está desglosada en cuatro actividades importantes encaminadas a:

- evaluar la tipología y causas de los fallos de los firmes, especialmente los prematuros, y estudiar las metodologías de fabricación, puesta en obra y control en relación con esos fallos y las medidas de mejora y prevención tanto tecnológicas como procedimentales necesarias para evitarlos.
- investigar las mejoras estructurales y/o de mezclas encaminadas a aumentar la durabilidad frente a la fatiga ascendente. En esta tarea destaca el nuevo concepto de capas de base resistentes a fatiga
- investigar la problemática de la fisuración descendente (*top-down cracking*)
- validar los resultados a escala real.



4.- Actividades de la tarea de Pavimentos de Larga Duración

4.1.- Tarea relacionada con la calidad de la puesta en obra

En esta tarea se investiga, en una primera fase, sobre los deterioros de los pavimentos con mezclas asfálticas para discernir que fallos pueden asumirse como fallos tempranos respecto al comportamiento esperable de las estructuras construidas. Fallos relacionados con la inadecuación estructural en el diseño del firme, con los materiales que constituyen la estructura del firme o con los procesos de fabricación y puesta en obra.

Una de las causas recurrentes del agotamiento del firme es la alteración de la homogeneidad de las características de las mezclas en las capas construidas debida a los procesos de fabricación, transporte y su puesta en obra, por ello se analizan metodologías de fabricación, puesta en obra y control que disminuyan o eliminen esas causas.

Un primer bloque lo constituye la investigación de los factores que concurren, conjunta o aisladamente, en provocar segregaciones en la composición y características finales de la mezcla extendida, abarcando todo el ciclo del proceso, desde la selección de materiales, diseño de la mezcla y proceso de acopio, fabricación, extendido y compactación.



Una segunda parte del estudio se orienta a identificar factores de falta de homogeneidad térmica en la capa ejecutada y la repercusión que las masas frías tienen en la compactación, densidad y cohesión final obtenidas. Se cuenta con técnicas avanzadas, como son las del empleo de cámaras de visión térmica, capaces de identificar las eventuales áreas o masas de mezcla con falta de homogeneidad térmica.

En esta fase se trata de establecer la influencia de la falta de homogeneidad térmica con la densidad y cohesión final alcanzada. Se emplean métodos rápidos basados en la resistividad capa, de última generación, sin necesidad de extracción de testigos, para trazar suficientes perfiles de densidad en correspondencia con los perfiles térmicos. El estudio analiza la influencia de la heterogeneidad térmica en las características finales de la mezcla en la capa (densidad, modulo, fatiga, etc.) y cohesión (tracción indirecta).

Estudios realizados por la Universidad Politécnica de Cataluña [7] han demostrado que la cohesión de la mezcla puesta en obra, altamente relacionada con su durabilidad, también está condicionada por la temperatura; aunque se consiga obtener una densidad final correcta, la cohesión de las mezclas compactadas a menos temperatura es menor.

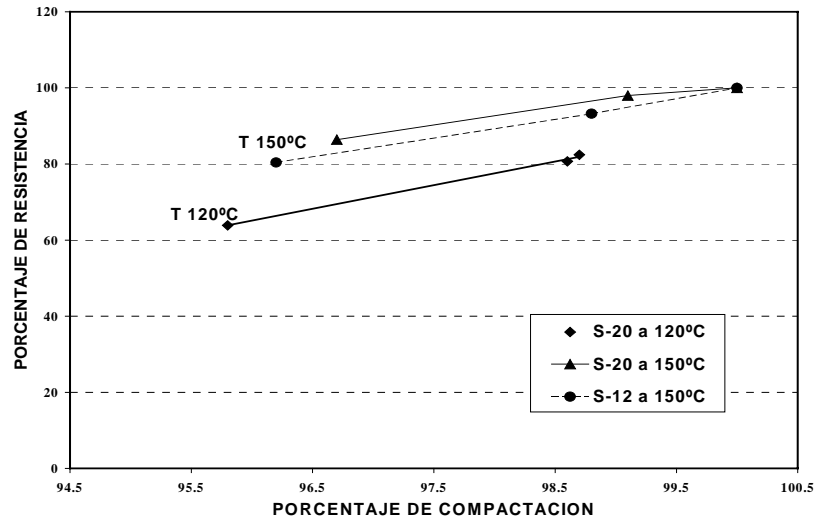


Gráfico 1: Variación del porcentaje de resistencia a tracción indirecta en función del porcentaje de compactación. Mezclas S-20 y S-12.

En el gráfico, se puede apreciar que la temperatura de compactación de la mezcla no sólo favorece su compactación, sino que mejora la cohesión. Es posible obtener la misma compactación con menos temperatura, pero como se observa en el gráfico, la mezcla compactada a 150°C presenta una resistencia a tracción indirecta del orden de un 15% superior a la compactada a 120°C. Esto indica que es posible llegar a los niveles normalmente exigidos en obra del 97-98% compactando a bajas temperaturas, pero la resistencia a tracción indirecta se reducirá notablemente.

Además del estudio de los efectos de paradas de extendedoras, también se estudia la influencia de la duración del transporte en diversas situaciones y mezclas, en cuanto a generación de costras frías en el contorno de la carga y sus eventuales efectos por presencia de masas frías en la capa extendida.







Etiqueta	Mín.	Máx.	Med.
Li1	74.6	158.4	108.1
Li2	70.5	149.5	105.4

Objetivos:

Relacionar :

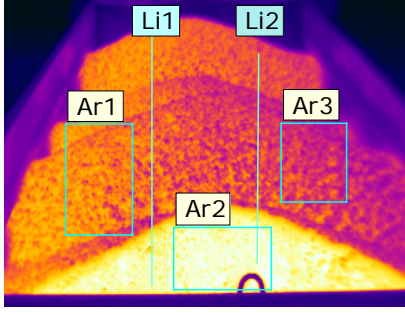
- Temperatura mezcla
- Tipo de mezcla
- Tiempo de Transporte
- Espesor de costra
- Riesgos detrás de la extendidora





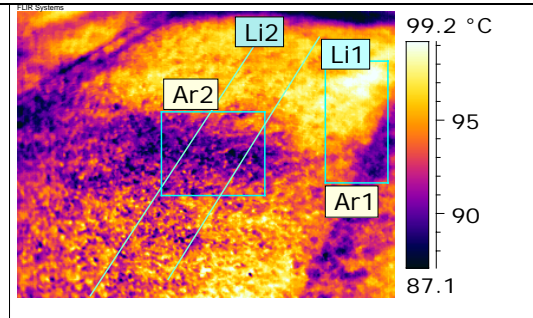

Etiqueta	Mín.	Máx.	Med.
Li1	61.8	109.6	83.4
Li2	61.2	107.9	81.2

Costras frías en el contorno de camión

Termograma de la carga del camión	Perfiles de temperatura																						
	<table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th colspan="2">°F</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>160</td><td>_____</td></tr> <tr><td>150</td><td>_____</td></tr> <tr><td>140</td><td>_____</td></tr> <tr><td>130</td><td>_____</td></tr> <tr><td>120</td><td>_____</td></tr> <tr><td>110</td><td>_____</td></tr> <tr><td>100</td><td>_____</td></tr> <tr><td>90</td><td>_____</td></tr> <tr><td>80</td><td>_____</td></tr> <tr><td>70</td><td>_____</td></tr> </tbody> </table>	°F		160	_____	150	_____	140	_____	130	_____	120	_____	110	_____	100	_____	90	_____	80	_____	70	_____
°F																							
160	_____																						
150	_____																						
140	_____																						
130	_____																						
120	_____																						
110	_____																						
100	_____																						
90	_____																						
80	_____																						
70	_____																						




Presencia de restos de las costras frías en la capa extendida



°F
99
98
97
96
95
94
93
92
91
90
89
88

Esta tarea del estudio abarca un importante trabajo de campo y de laboratorio para:

- Contemplar un amplio muestrario de procedimientos y tecnologías de fabricación y puesta en obra a fin de identificar las mejores técnicas disponibles bajo el prisma de la homogeneidad y los eventuales procesos de mejoras aplicables.
- Incluir zonas geográficas y épocas climatológicamente diversas (cálida y fría) para investigar la influencia de ambas situaciones sobre la homogeneidad térmica en cuanto a distancia de transporte y problemas de discontinuidad en el extendido.
- Investigar qué participación en la aparición de fallos prematuros es achacable a falta de homogeneidad de composición, estableciendo la relación entre ellas y las deficiencias de la mezcla en cuanto a características mecánicas, fatiga, cohesión, susceptibilidad al agua, etc.



También se investigaran tanto los factores del propio proceso de compactación que introducen heterogeneidad de resultados de densidad, como sobre las bases para nuevos desarrollos tecnológicos aplicables a los equipos de compactación que puedan detectar e indicar el grado de compactación en tiempo real, lo que posibilitaría la corrección de zonas con insuficiente compactación.

Se ha realizado un estudio que ha consistido en determinar la influencia de la temperatura de compactación en la densificación y comportamiento mecánico de la mezcla compactada.

Se realizan ensayos de tracción indirecta, determinación del módulo resiliente mediante compresión diametral, CDT y nuevo ensayo, desarrollado en el marco de este proyecto, denominado Ensayo Fénix, a tres series de probetas Marshall, compactadas a temperaturas diferentes, y fabricadas a partir de cada una de las mezclas estudiadas. Las granulometrías estudiadas han sido S-20, S-12, G-20, D-20. Las temperaturas de compactación empleadas han sido 120°C, 135°C y 155°C.

Este estudio ya indica una mayor susceptibilidad de las mezclas con más mástico (y contenido de betún) a la temperatura de compactación.



Energía de fractura en función de la temperatura de compactación. Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min.

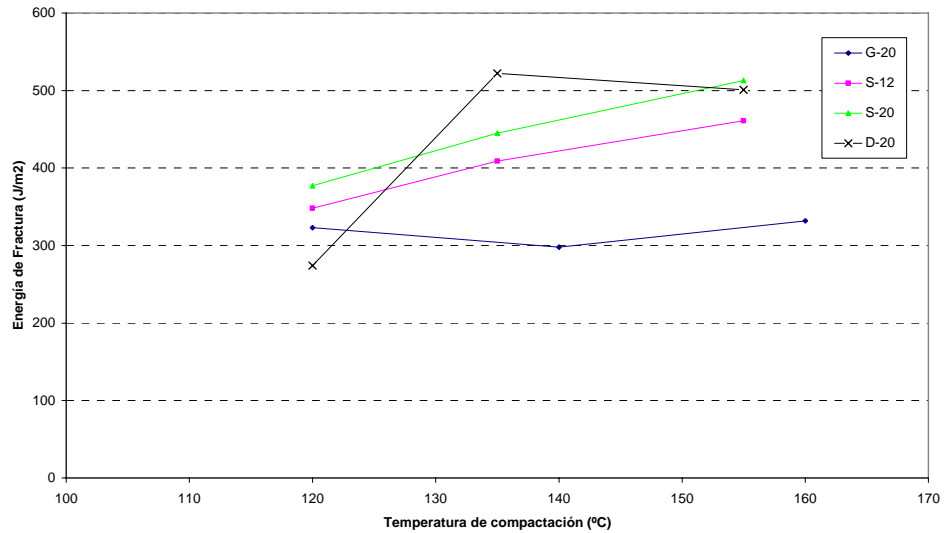


Gráfico 2: Representación gráfica de la energía de fractura en función de la temperatura de compactación para cada mezcla en el ensayo Fénix.

En el gráfico se observa como el aumento de la temperatura de compactación ha tenido más influencia en las mezclas D-20, mientras que la mezcla G-20 ha sido la que menos ha acusado esta variación.

4.2.- Deterioros por Fisuración Descendente

Tradicionalmente se ha aceptado como modelo de deterioro aquél en que las fisuras de las capas bituminosas se iniciaban en el fondo de capa, ya fueran debidas al fenómeno de fatiga en la propia capa o bien por reflexión desde las capas inferiores.



Sin embargo, estudios recientes han puesto de manifiesto que con frecuencia las fisuras de los pavimentos bituminosos se originan en superficie y progresan paulatinamente hacia abajo, probablemente como consecuencia del efecto conjunto de los elevados esfuerzos superficiales aplicados por los neumáticos de los vehículos, tracciones en el borde de la rodada y tensiones originadas por diferenciales térmicos.

Este fenómeno aún poco conocido se conoce en la literatura inglesa como *Top-down cracking*, y en español se ha denominado Fisuración descendente.

La reciente identificación de este tipo de fallo parece poner en entredicho los procedimientos actuales para estimar la vida en servicio del pavimento, ya que aquellos se basan en mecanismos de deterioro con origen en el fondo de capa, no prestando por tanto atención al fenómeno de fisuración descendente.

En una primera fase, la investigación va encaminada a profundizar en el conocimiento de los factores y causas que originan este deterioro y del mecanismo de progreso de la fisuración, (condiciones climáticas, condiciones de tráfico, edad del ligante, propiedades de la mezcla, estructura del firme etc.), para poder determinar qué requisitos y diseños de mezclas responderían mejor frente a este fenómeno.

Una vez definido el marco con las características y tipologías de los firmes con potencial de fisuración descendente, se procede a identificar distintos tramos de carreteras susceptibles a este tipo de fisuración.



Este tipo de fisuras normalmente aparecen en firmes flexibles con espesor de mezcla bituminosa igual o superior a 150mm o en firmes semirrígidos con gravacemento o suelocemento.

Los casos más típicos en los que la fisura puede corresponderse con fisuración descendente son:

- Fisura individual única y de pequeña longitud que aparece a los lados de la rodada o fuera de ellas.
- Grupo de fisuras longitudinales paralelas situadas en los bordes o dentro de la rodada.
- Fisura paralela longitudinal conectada con otras fisuras más pequeñas transversales.

Asimismo se está investigando en la identificación, y eventual desarrollo, en su caso, de ensayos orientados a determinar la susceptibilidad de las mezclas de rodadura a la fisuración descendente. Analizar la influencia de la resistencia a fatiga, a la fisuración a baja temperatura, al envejecimiento, la ductilidad en ensayos a rotura, la resistencia frente a la acción del agua a través de ensayos de determinación de módulo complejo a compresión simple, compresión diametral, etc.

Se precisará también desarrollar un modelo de generación y propagación de daño, que identifique los mecanismos que rigen la aparición y propagación de las fisuras Top-down, considerando los daños acumulados por fatiga por la repetición de cargas, la acción de tensiones de tipo térmico y las tensiones y esfuerzos cortantes debidos a la presión de contacto neumático-superficie.



Dicho modelo permitiría en un futuro próximo, y en las condiciones españolas, seleccionar los tipos más adecuados de firmes, predecir su vida en servicio de una manera realista y concebir estrategias de rehabilitación con poco riesgo de sufrir el problema de fisuración descendente.

Un objetivo de esta investigación es la evaluación de la extensión del problema de Fisuración descendente en las carreteras españolas, y la elaboración de un modelo que permita estimar el riesgo de que aparezcan problemas de fisuración descendente en determinadas secciones estructurales.

Ya se han identificado tramos con esta patología, por ejemplo, y próximo a la sede de este Congreso, una zona en la carretera CL-602 entre Olmedo e Iscar (Valladolid), que se ha testificado para verificar la presencia de fisuración descendente y tomar muestras para continuar el estudio.


A continuación se exponen una serie de fotografías sacadas del trabajo realizado en la identificación de fisuras con Fisuración descendente.



Fig.1.- Posibles fisuras susceptibles de Fisuración Descendente




Fig.2.- Testigo en el que se observa fisuración descendente




En los Pavimentos de Larga Duración, necesariamente ha de emplearse una estrategia de conservación basada en fresar y reponer la capa de rodadura antes de que los desperfectos de ésta última amenacen con extenderse a la capa intermedia.

En el caso de la fisuración descendente, que se origina en la superficie del firme y se extiende hacia las capas inferiores, es necesario conocer cuando esas fisuras de superficie están llegando al fondo de la capa de rodadura.

Se precisa por tanto un método diagnóstico, apoyado en auscultación de rendimiento alto o al menos medio, que permita chequear grandes longitudes de la red, y decidir cuándo es necesario fresar y reponer la capa de rodadura.



Hasta ahora el método más efectivo para determinar la profundidad de las fisuras descendentes es la obtención de testigos y la comprobación visual de la profundidad de la fisura. Sin embargo este método tiene muchos inconvenientes, principalmente su bajo rendimiento y los cortes de tráfico que ocasiona.



Parece que un método prometedor puede ser el Georradar, que ya se emplea con éxito para determinar la profundidad y espesor de capas del firme en campañas de auscultación, y puntualmente para diagnosticar algunos defectos localizados.



Dentro del marco del Proyecto Fénix se han realizado ya algunas pruebas con georradar, con un procedimiento semimanual, para intentar determinar la profundidad de fisuras previamente diagnosticadas como top-down cracking mediante la obtención de testigos. Los resultados iniciales son alentadores, y actualmente se está perfeccionando el método mediante la variación de distintos parámetros del georradar. Otro reto de esta línea de trabajo es conseguir que el procedimiento de auscultación final se automatice y alcance rendimientos altos.

También se está investigando en nuevas técnicas de ultrasonidos, que permiten determinar de un modo rápido la profundidad de las fisuras y espesores de capas de firme en campañas de auscultación, y puntualmente diagnosticar algunos defectos localizados.

Si finalmente se obtiene un procedimiento de auscultación rápido y fiable quedaría a punto un elemento indispensable en la estrategia de Pavimentos de Larga Duración: la información necesaria para tomar la decisión de fresar y reponer la capa de rodadura, preservando así al resto de capas del paquete estructural.

4.3. Tarea relativa a la estructura del firme, resistencia de las mezclas según su función estructural y demanda de fatiga.


La fisuración por fatiga de los firmes asfálticos es uno de los más importantes mecanismos de deterioro de este tipo de pavimentos. El paso de los vehículos pesados sobre el firme, genera, en la parte inferior de la capa asfáltica unas tensiones, que aunque inferiores a las solicitaciones que producirían su rotura, su repetida aplicación acaba produciendo su fisuración por fatiga.

Pese a que éste, junto con, es el mecanismo tradicional de deterioro a tener en cuenta en el diseño de firmes, la cierto es que la forma en que se considera en el diseño de la estructura del pavimento y disposición de las distintas mezclas es muy discutible y mejorable.

Esto hace que nuestros pavimentos sean muy resistentes a las deformaciones plásticas (propiedad básica en el diseño de la mezcla) pero fallan muy rápidamente por fisuración por fatiga.

El objetivo general de esta tarea del proyecto sería el de especializar la estructura del firme, de modo que las capas se caractericen y sitúen en función de las demandas tensionales-daño acumulado, primando el criterio de durabilidad. (Fig. 8).






En un firme de tipo flexible o semiflexible, en el que el criterio de daño predominante, en cuanto a daño acumulado, sea el derivado de trabajo a flexotracción, tendríamos que disponer como capa inferior una mezcla en la que predomine, en su caracterización, el criterio de resistencia a fatiga por daño acumulado a deformación de tracción, ya que, es precisamente ahí, en esa capa, dónde la deformación horizontal a tracción es mayor al paso de las cargas de tráfico.

Por tanto, hay que perseguir un doble objetivo en esa capa inferior:

- reducir el valor de la deformación crítica (a tracción) para el daño acumulado, lo que se consigue con espesor de capas y capacidad de soporte (módulo) en éstas
- maximizar la resistencia a fatiga.



Los requisitos de esa capa de base indicarían como adecuada una mezcla con pocos huecos y mucho mástico para maximizar la resistencia a fatiga (lo que resulta contradictorio con las formulaciones habituales de las capas de base).

Asimismo, en las capas situadas por encima debería predominar el aporte estructural (espesor y módulo), junto con buena resistencia frente a la acción del agua (ya que, en todo caso, hay que asegurar al máximo la adherencia entre capas) y resistencia a las deformaciones plásticas.

Este esquema sería distinto del habitual. (Fig.8)

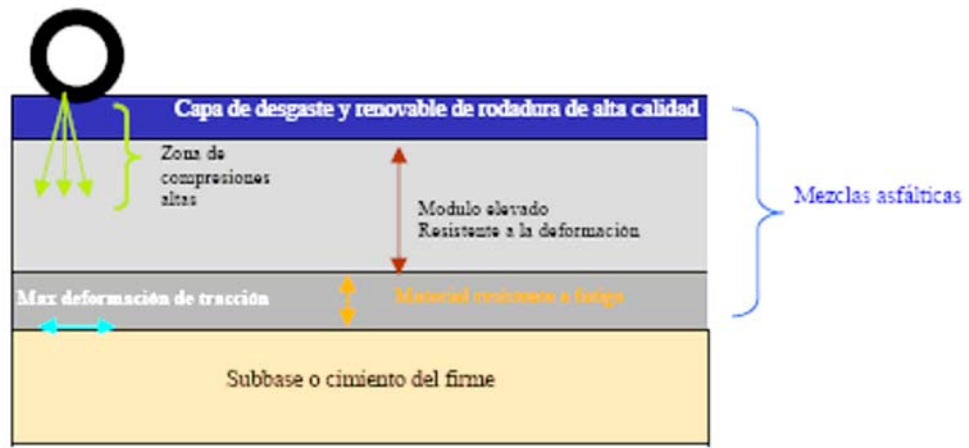


Fig. 8 Esquema de estructura de Firme. Ref. [2]

La deformación crítica en la capa inferior depende principalmente de los espesores y del aporte estructural de cada capa (Módulo) de la estructura, disminuyendo conforme aumentan éstos, como se muestra en el esquema de la figura 9.

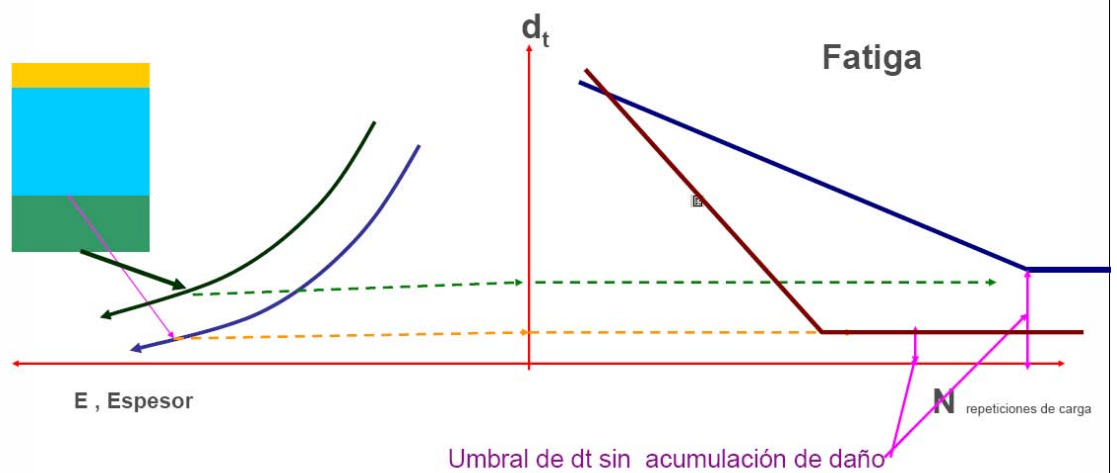
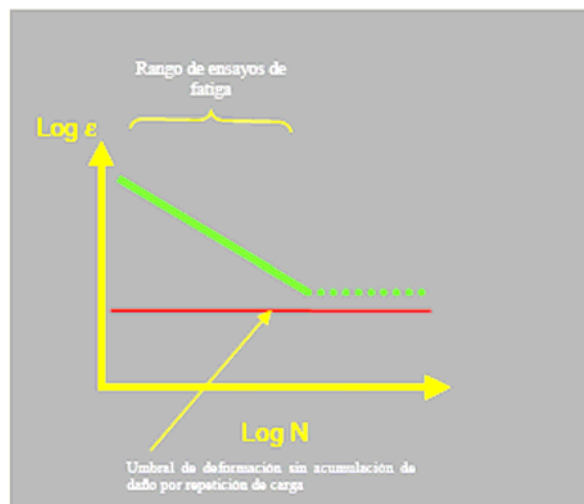


Figura 9.

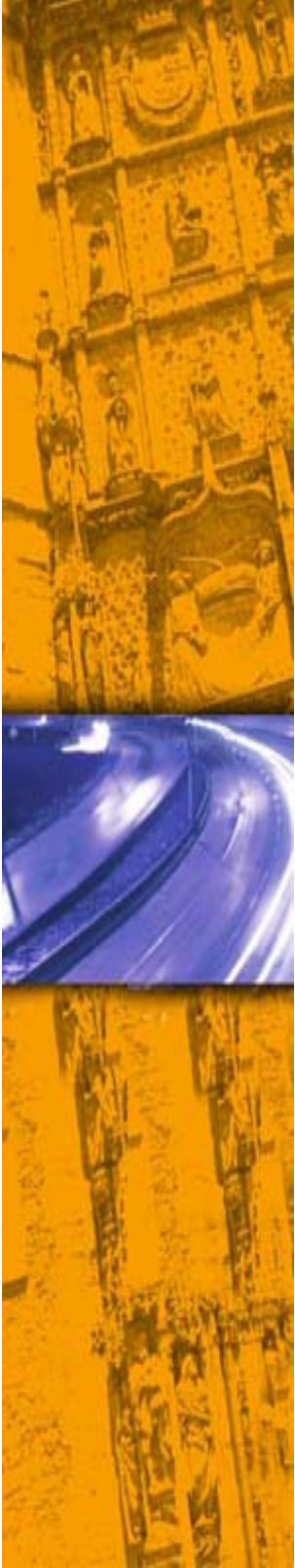


El objetivo dual es disponer en el fondo de la estructura una capa con un comportamiento a fatiga potenciado y en la que lleguen tensiones reducidas a flexotracción (a partir de mezclas de buen o alto módulo encima y con suficiente espesor), a la vez que esas deformaciones de tracción deben ser inferiores al umbral de sensibilidad a las repeticiones de carga en la ley de fatiga.

Las mezclas de la capa de base deben tener leyes de fatiga en las que el umbral de insensibilidad (el quiebro de la ley de fatiga para infinitas repeticiones de carga, ver figura) se produzca para unas deformaciones de tracción realistas.



Este umbral de insensibilidad a fatiga se sitúa mas allá del rango habitual de repeticiones de carga de los ensayos de fatiga, por lo que su conocimiento, actualmente escaso, implica ensayos de larga duración.



Las primeras actividades están dirigidas a establecer conceptualmente las bases de los diseños estructurales apropiados, las demandas tenso-deformacionales de las mezclas de cada capa y los requisitos de éstas para responder adecuadamente a esas demandas:

- Así, las capas de base deberán, por un lado, tener una ley de fatiga adecuada para poder trabajar por debajo del umbral de sensibilidad al daño acumulado y, por otro, las capas situadas encima deben tener el suficiente espesor y capacidad resistente para llevar las deformaciones de tracción en fondo de la capa de base por debajo de este umbral.
- Las capas situadas encima deben tener un módulo elevado para producir una adecuada disipación de tensiones sin tener que llegar espesores excesivos y unas leyes de fatiga adecuadas, aún estando sometidas a unas deformaciones menores conforme nos alejamos de la base. Asimismo deben ofrecer una alta resistencia a deformaciones de tipo plástico de forma que no tengan ningún reflejo en el deterioro del perfil de superficie
- Las capas de rodadura tienen unas características funcionales que se estudian junto con el problema de la fisuración descendente en el apartado siguiente.



Mediante cálculo analítico, con programas multicapa, se seleccionarán las posibles estructuras, en base a unas primeras estimaciones de parámetros (módulo), determinando los umbrales de deformaciones admisibles para evitar sensibilidad a daño acumulado.

En base a lo anterior se establece un plan extenso de caracterización de las capas de mezclas, en particular las de base, de nuevo diseño, incluyendo ensayos de fatiga de larga duración a fin de tener caracterizado para cada una el hipotético umbral de insensibilidad al daño acumulado de fatiga. Este umbral de insensibilidad a fatiga se situaría mas allá del rango habitual de repeticiones de carga de los ensayos de fatiga, por lo que su conocimiento, actualmente escaso, implica ensayos de muy larga duración.

Una vez adquirido suficiente conocimiento de las mezclas adecuadas y determinadas sus características y parámetros de comportamiento el siguiente enfoque ha de ir al establecimiento de un modelo de cálculo preciso que integre todas las variables influyentes, incluyendo las de entorno y climáticas que introduzcan variaciones en las características de las mezclas a fin de caracterizar adecuadamente las secciones a estudiar y obtener los datos a validar en un ulterior ensayo a escala real. Del análisis anterior es posible que se aprecie la insuficiencia de los modelos existentes y surja la necesidad de desarrollar un modelo nuevo.

Otra parte imprescindible es la económica y de optimización del consumo de recursos y materias primas, para lo que se desarrollará el correspondiente estudio para cada solución a lo largo de la vida de proyecto prevista, en comparación con los diseños actuales.





CONCLUSIONES

Con los conocimientos actuales parece factible diseñar y construir pavimentos asfálticos que incrementen de forma muy sustancial la vida de proyecto. Este logro puede hacerse además con pequeños incrementos de costes en la construcción (incluso en algunos casos con reducción de los mismos).

El secreto de este nuevo concepto radica en diseñar materiales con especificidades funcionales dentro del pavimento, huyendo de la idea actual de colocar las mezclas más baratas en el fondo.

El conseguir dichas especificidades no es una tarea fácil, ya que además de una adecuada selección de materiales hay que realizar muy buenas ejecuciones de obra que requieren moderna e innovadora maquinaria y métodos de control.

Los primeros resultados del Proyecto Fénix son muy prometedores, ya que se está consiguiendo un trabajo compacto en cada uno de los frentes del conocimiento que se requieren.

La identificación de causas de deterioro de las mezclas o el estudio a escala real de fisuración descendente son dos buenos ejemplos de estos logros.

Agradecimientos

La realización del Proyecto Fénix (www.proyectofenix.es) ha sido posible gracias a la contribución financiera del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) dentro del marco del programa Ingenio 2010 y, más concretamente, a través del Programa CENIT. Las empresas y centros de investigación que participan en el Proyecto desean mostrar su gratitud por dicha contribución.

Los autores quieren agradecer a todas las organizaciones y empresas participantes del Proyecto Fénix y, en especial, a aquellas que están participando en la actividad de Pavimentos de Larga Duración:

UPC: Félix Pérez, Rodrigo Miró, Ramón Botella

CEDEX: Ángel Mateos

UPM: Miguel Ángel del Val, Juan Gallego

Fénix A.I.E: Jose Luis Peña

SACYR: Patricia Díaz, Miguel Martín, Francisco Guisado

Collosa: Sonia Alvarez

Sorigué: Julio del Pozo, Mar Subarroca



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



[1] FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories). ELLPAG Phase 1 Report.

[2] Newcomb, D. E., Buncher, M., Huddleston, I. J. "Concepts of perpetual pavements." Transportation Research Circular, No 503 Perpetual Bituminous Pavements, (2001).

[3] Monismith, C. L., Long, F. "Overlay Design for Cracked and Seated Portland Cement Concrete (PCC) Pavement- Interstate Route 710." Technical Memorandum TM UCB PRC 99-3, Pavement Research Center, Institute for Transportation Studies, University of California, Berkeley, (1999)

[4] Timm, D.H. "The Effects of Load Spectra and Variability of Perpetual Pavement Design" Paper 7 Proceedings International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements, Auburn USA, 7-9 June 2004.

[5] Thompson, M., "Design Principles for Long Lasting HMA Pavements" Paper 14 Proceedings International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements, Auburn USA, 7-9 June 2004.

[6] Peterson, R., "Determination of Threshold Strain Level for Fatigue Endurance Limit in Asphalt Mixtures" Paper 15 Proceedings International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements, Auburn USA, 7-9 June 2004.

[7] Pérez Jimenez, F; Miró R; Martínez A; "Empleo del Ensayo de Tracción Indirecta para el control de Calidad de la ejecución de Mezclas Bituminosas" X Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Asociación Española de la carretera, Sevilla, España, 1999.