

Aplicación del método recursivo-incremental CalME a la evaluación del estado estructural de los pavimentos bituminosos

ANGEL MATEOS MORENO (*), JAVIER PÉREZ AYUSO (**), BELÉN CADAVID JÁUREGUI (***)
y JOSÉ ORENCIO MARRÓN FERNÁNDEZ (****)

RESUMEN El procedimiento CalME constituye una de las herramientas más avanzadas para el diseño de firmes flexibles a nivel mundial. Se trata de un método recursivo-incremental, lo cual implica la división de la vida útil del firme en un elevado número de intervalos temporales en los que la integridad estructural del mismo así como las condiciones ambientales pueden considerarse constantes. Así mismo implica que el daño calculado al final de cada intervalo sea utilizado en el siguiente como una condición de partida. El objetivo de este tipo de modelos es el de predecir la evolución en el tiempo de los diferentes mecanismos de deterioro.

En el presente artículo se muestran las ventajas de los procedimientos recursivo-incrementales frente a los métodos “clásicos” de diseño analítico, no sólo para el diseño de firmes sino especialmente como herramienta de apoyo a la evaluación estructural. En particular, se muestra el potencial del modelo de fatiga de la mezcla bituminosa incorporado por CalME. Este modelo, calibrado inicialmente en el laboratorio y posteriormente recalibrado en base al comportamiento observado a partir de ensayos in-situ de deflexión, proporciona una predicción fiable de la futura evolución del deterioro del pavimento bituminoso.

La validación de dicho modelo de fatiga se lleva a cabo en base al comportamiento de una serie de secciones flexibles ensayadas en la Pista de evaluación de firmes a escala real del CEDEX.

APPLICATION OF CalME INCREMENTAL-RECURSIVE METHOD TO THE EVALUATION OF THE STRUCTURAL CONDITION OF ASPHALT PAVEMENTS

ABSTRACT CalME procedure represents one of the most advanced tools for the design of flexible pavements world-wide. It is an incremental-recursive method, which means that pavement service life must be divided into many time intervals where both structural integrity and environmental conditions can be regarded as constants. It also means that the damage calculated at the end of each interval must be considered as initial condition for the next one. The goal of this type of models is the prediction of the evolution of the different distress mechanisms.

The advantages of incremental-recursive procedures versus “classical” analytical design are shown in this paper. Advantages are shown not only in terms of design, but also as a tool in order to support structural evaluation. In particular, the potential of asphalt fatigue model incorporated in CalME is presented. This model is initially calibrated in the laboratory, and it is then re-calibrated based on the actual performance observed from field deflection testing. The model provides a reliable prediction of the future evolution of the damage of the asphalt mixture.

Fatigue model validation has been conducted based on the performance from several flexible sections evaluated in CEDEX full-scale pavement test track.

Palabras clave: Diseño mecánico-empírico, Auscultación de pavimentos, Defléctometro de impacto, Fatiga mezcla bituminosa, Curva maestra, Módulo dinámico.

Keywords: Mechanistic-empirical design, Pavement auscultation, Falling weight deflectometer, Asphalt mixture fatigue, Dynamic modulus master curve.

(*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. E-mail: Angel.Mateos@cedex.es

(**) Escala de Titulados de Grado Medio de Organismos Autónomos del Ministerio de Fomento. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. E-mail: Javier.Perez@cedex.es

(***) Licenciada en Ciencias Físicas. Escala de Titulados Superiores de Organismos Autónomos del Ministerio de Fomento. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. E-mail: Belen.Cadavid@cedex.es

(****) Licenciado en Ciencias Químicas. Contratado I+D+i. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. E-mail: Jose.O.Marron@cedex.es

1. INTRODUCCIÓN

La predicción del comportamiento de un firme, esto es, de la evolución en el tiempo de los diferentes mecanismos de deterioro, constituye un problema de la máxima complejidad. Uno de los tipos de deterioro de mayor relevancia es la fatiga de la mezcla bituminosa, cuya prevención conlleva elevados costes económicos y ambientales, no sólo durante la construcción del firme sino también a lo largo de su vida de servicio. Precisamente la evaluación de dicha fatiga es uno de los principales objetivos de la auscultación estructural.

La auscultación estructural consiste típicamente en la aplicación de una carga, de magnitud y contenido frecuencial conocidos, sobre la superficie del pavimento con el fin de registrar el cuenco de deflexiones. La deflexión medida bajo la carga constituye un indicador global de la integridad estructural del firme; así mismo el módulo del pavimento, que puede obtenerse a partir de las técnicas de cálculo inverso, constituye un indicador de la fatiga de las mezclas bituminosas que lo constituyen. No obstante, el objetivo último no debiera ser sólo la obtención de información sobre la integridad del firme en un momento determinado, sino el de mejorar las predicciones previas de comportamiento. En definitiva, cada auscultación realizada ha de servir para disponer de una previsión más fiable del comportamiento futuro del firme. Es precisamente en este aspecto en el que entran en juego los modelos analíticos de tipo recursivo-incremental.

Frente a los métodos de diseño analítico convencionales, cuyo resultado es la predicción del número de repeticiones de carga permitidas hasta el fallo o agotamiento estructural, los modelos recursivo-incrementales proporcionan una predicción de la evolución en el tiempo de los diferentes tipos de deterioro bajo el efecto combinado de las cargas del tráfico y las condiciones ambientales. Estos modelos operan de forma incremental, de forma que las condiciones de deterioro existentes al final de cada intervalo son consideradas como condiciones de partida del siguiente.

En el marco del presente artículo ha de entenderse el diseño de firmes desde un punto de vista más amplio del convencional. Con el fin de ilustrar el nuevo concepto se incluye la Fi-

gura 1, donde se representa la típica evolución del módulo del pavimento bituminoso en un firme flexible¹ en servicio. La progresiva reducción del módulo que se observa en dicha figura refleja la acumulación de daño hasta llegar a un punto en el que se inicia la fisuración, en el fondo de la capa de mezclas bituminosas, que posteriormente ascenderá a la superficie. Esta fisuración continuará creciendo hasta alcanzar un nivel crítico, después del paso de N_f vehículos pesados, para el cual el firme se considera "agotado". La predicción de N_f ha sido el objetivo de los métodos clásicos de diseño analítico durante al menos dos décadas. El planteamiento de los mismos no entra a considerar el desarrollo del proceso de fatiga del firme a lo largo de su vida de servicio, de forma que su validez sólo puede comprobarse tras alcanzar los umbrales críticos de deterioro, típicamente un 20% de la longitud con presencia de fisuración en piel de cocodrilo. Esto implica, entre otras limitaciones, que la información procedente de las auscultaciones estructurales no pueda ser empleada para mejorar la predicción previa de la vida útil. El planteamiento de los métodos recursivo-incrementales es bien diferente, siendo su objetivo final la predicción del desarrollo del mecanismo de deterioro a lo largo del tiempo. Tal como refleja la Figura 1, pueden considerarse tres objetivos parciales: predicción del nivel de daño de la mezcla bituminosa (objetivo 1); determinación del módulo del pavimento bituminoso a partir del nivel de daño (objetivo 2) y, finalmente, determinación del nivel de fisuración a partir del nivel de daño (objetivo 3). Una de las principales ventajas de este nuevo planteamiento es que el modelo puede recalibrarse en base a la información disponible sobre el estado de deterioro real del firme y, en particular, en base a los resultados de las auscultaciones estructurales. De esta manera, estos procedimientos resultan idóneos para el seguimiento del comportamiento de firmes en servicio: cada auscultación estructural realizada no sólo proporcionará información sobre el estado de deterioro del firme sino que además conllevará una mejor predicción de su comportamiento futuro.

¹ Se entiende por firme flexible todo aquel constituido por un pavimento bituminoso, independientemente de su espesor, sobre suelos naturales o materiales granulares tipo zahorra.

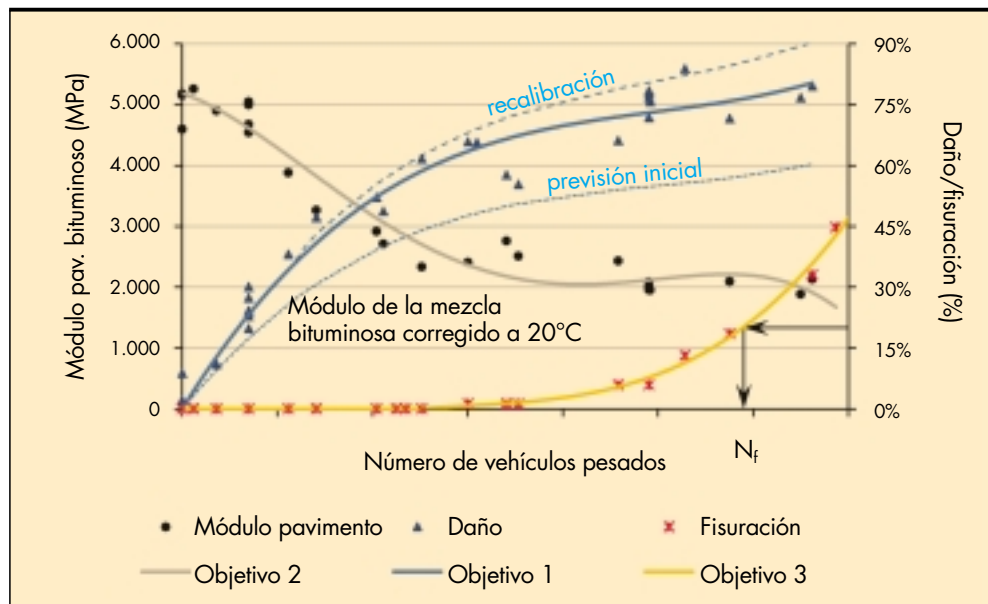


FIGURA 1. Planteamiento de los procedimientos recursivo-incrementales.

En la literatura anglosajona, es frecuente denominar a este tipo de procedimientos como “*incremental-recursive design*”, si bien no se trata exclusivamente de un método de diseño, sino de un modelo de simulación del comportamiento del firme. Este modelo podrá ser aplicado tanto al diseño de nuevos firmes o rehabilitaciones estructurales como al seguimiento de su comportamiento bajo tráfico real. Es precisamente esta segunda acepción la que resulta de aplicación en el presente artículo.

A día de hoy existen dos procedimientos de diseño recursivo-incremental de reconocido prestigio y aceptación internacional: la guía AASHTO-2002 “*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*” (1), de sobra conocida como MEPDG, y el programa CalME “*California Mechanistic-Empirical Software for Structural Design of Flexible Pavements*” (2). Los dos métodos, aplicables tanto al diseño de nuevos firmes como a la rehabilitación o refuerzo de los existentes, son claros exponentes de una tendencia que se ha impuesto a lo largo de la última década, que es el diseño frente a mecanismos específicos de deterioro. Ambos métodos incluyen la fatiga convencional de la mezcla bituminosa (de abajo hacia arriba), la fatiga de los materiales estabilizados así como la deformación permanente proveniente de las explanadas, de las bases granulares y de las mezclas bituminosas. La MEPDG también incluye la fisuración térmica (a bajas temperaturas) y la fisuración descendente (de arriba hacia abajo), mientras que CalME incluye la regularidad longitudinal. La descripción, siquiera somera, de ambos procedimientos se sale del alcance del presente artículo, que está enfocado exclusivamente a uno de los diferentes mecanismos de deterioro antes reflejados: la fatiga convencional de la mezcla bituminosa, y en particular al modelo incorporado por CalME. Los autores consideran que este último presenta claras ventajas para el seguimiento del comportamiento de firmes en servicio, entre las que cabe destacar las siguientes:

- La calibración inicial del modelo de fatiga en base a ensayos de laboratorio realizados sobre la mezcla bituminosa a emplear en la base del pavimento o del refuerzo.
- La consideración del decremento del módulo asociado a la fatiga de la mezcla bituminosa en cada intervalo, de cara al cálculo de la respuesta estructural del firme.

- La posibilidad de calibrar el modelo en base a los resultados del cálculo inverso obtenidos a partir del ensayo de deflectómetro de impacto.

Es preciso aclarar que el término “mecánico-empírico”, que incluyen tanto la MEPDG como CalME, es sinónimo de “analítico”. El primero es frecuentemente empleado en los Estados Unidos, mientras que el segundo es más habitual en Europa.

1.1. OBJETIVO

El objetivo del presente artículo es servir de introducción a los métodos de diseño mecánico-empírico de tipo recursivo-incremental. Así mismo mostrar el potencial de estos métodos, en particular el potencial del modelo de fatiga (de abajo hacia arriba) de la mezcla bituminosa implementado en CalME, como herramienta de apoyo a la auscultación estructural de firmes. El potencial de este modelo se evalúa por un lado para la correcta interpretación de los datos del deflectómetro de impacto y, por otro, para el establecimiento de previsiones fiables del futuro deterioro del pavimento bituminoso. Proporcionar los conceptos básicos para la implementación de este modelo específico de fatiga constituye, así mismo, un objetivo del presente artículo.

Para ello, la discusión que se presenta a continuación se ha ilustrado con resultados experimentales obtenidos en la Pista del CEDEX en el marco del Proyecto de I+D+i “Aplicación del Modelo CalME a los Ensayos de Explanadas Realizados en la Pista de Evaluación de Firmes a Escala Real del CEDEX”, llevado a cabo en colaboración con el Centro de Investigación de Firmes de la Universidad de California.

2. IMPORTANCIA DE LA CURVA MAESTRA DE LA MEZCLA BITUMINOSA

La curva maestra proporciona el módulo dinámico de la mezcla bituminosa para cualquier combinación de frecuencia y temperatura. Ambas variables se combinan en una única, la frecuencia reducida, en la que está implícito el principio de superposición tiempo-temperatura aplicable a los materiales termoreológicamente simples como la mezcla bituminosa. En la Figura 2 se recoge la curva correspondiente a la mezcla

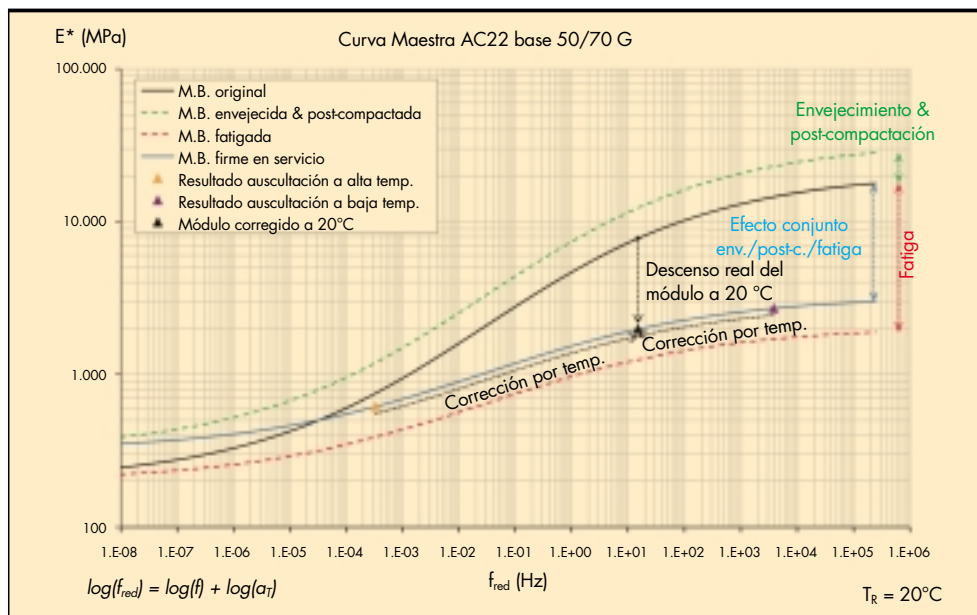


FIGURA 2. Curva maestra del módulo dinámico de la mezcla bituminosa.

gruesa (original) empleada en este estudio, obtenida a partir de ensayos de laboratorio mediante la aplicación de una carga senoidal. Los resultados obtenidos a cada temperatura, T , se ajustan a la temperatura de referencia, $T_R = 20^\circ\text{C}$, mediante la aplicación de una función del tipo $\log(a_T) = F(T-T_R)$, cuyos parámetros se obtienen mediante un ajuste iterativo junto con los correspondientes a la curva maestra propiamente dicha. Tanto la MEPDG como CalME emplean el mismo formato sigmoïdal para dicha curva:

$$\log(E) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(f/r)}} \quad (1)$$

La evaluación estructural in-situ de la capacidad portante de un firme relaciona la rigidez del pavimento con el nivel de deterioro del mismo. Sin embargo, no es el daño el único factor que determina el módulo de la mezcla bituminosa; a día de hoy está aceptado que tanto el envejecimiento como la densificación bajo las cargas del tráfico constituyen otros dos factores clave a considerar. De esta forma, la predicción de la evolución en el tiempo de los tres factores, así como la determinación de cómo cada nivel afecta a los parámetros de la curva maestra, constituyen el núcleo central de los procedimientos recursivo-incrementales como la MEPDG o CalME.

En relación con la predicción del efecto del envejecimiento y de la post-compactación, merecen especial atención la ecuación predictiva del módulo desarrollada por Witzak (3) así como el *Global Aging System* desarrollado por Mirna y Witzak (4), ambos implementados en la nueva guía AASHTO. El modelo CalME incluye así mismo modelos predictivos, que han sido calibrados en base al comportamiento observado en firmes en servicio. Sin embargo, a día de hoy, las incertidumbres asociadas a estas predicciones son elevadas, de forma que si bien pueden resultar aceptables en el marco de un método de diseño aplicable a nivel de red, no resultan suficientes para el seguimiento de un tramo de carretera en particular. De acuerdo con el modelo CalME, el efecto de ambos factores sobre el módulo de la mezcla bituminosa es equivalente a un incremento del parámetro δ en la ecuación 1. Este incremento, tal como refleja la Figura 2, es equivalente a multiplicar el módulo por el factor $10^{\Delta\delta}$. Dicho incremento también puede ser determinado experimentalmente a partir de ensayos de deflexión con el deflectómetro de impacto, siendo éste uno de los motivos por los que se considera idóneo el empleo del modelo CalME para el seguimiento del comportamiento de firmes en servicio.

Por lo que al efecto del daño se refiere, CalME introduce el factor $(1-\omega)$ que multiplica al parámetro α de la curva maestra, tal como recoge la ecuación [2] presentada a continuación. ω puede adoptar valores entre 0 y 1: $\omega=0$ se corresponde con la mezcla bituminosa original mientras que $\omega=1$ se corresponde con un material altamente fatigado que ha perdido sus propiedades viscosas así como su susceptibilidad frente a la temperatura, y cuyo módulo es $10^{\delta+\Delta\delta}$. En la Figura 2 se refleja el efecto de la fatiga sobre la curva maestra de la mezcla, que resulta mayor tanto en términos absolutos como relativos para altas frecuencias reducidas (altas frecuencias y bajas temperaturas).

$$\log(E) = \delta + \Delta\delta + \frac{\alpha \cdot (1-\omega)}{1 + e^{\beta + \gamma \log(f/r)}} \quad (2)$$

La coexistencia de los tres factores, daño, envejecimiento y post-compactación, unido al hecho de que cada uno afecte de forma diferente en función del rango de frecuencias y de la temperatura, dificulta el proceso de interpretación de los resultados de las auscultaciones estructurales. En la Figura 2 se representan los módulos obtenidos mediante cálculo inverso para el mismo pavimento bituminoso a dos temperatu-

ras diferentes. La auscultación realizada a altas temperaturas resulta en un módulo que, comparado al de la mezcla bituminosa original, podría hacer pensar en un nivel de deterioro muy reducido; lo contrario sucede cuando el ensayo se realiza a bajas temperaturas. En realidad ambos reflejan el mismo nivel de daño, al igual que el valor corregido a 20°C . Es preciso tener en cuenta que el proceso de corrección del módulo del pavimento a una temperatura de referencia, típicamente 20°C , no es en absoluto un problema trivial. En particular, resulta muy desaconsejable el empleo de curvas de corrección tipo como las que incluyen diferentes programas comerciales de cálculo inverso.

En definitiva, la curva maestra original de la mezcla bituminosa constituye una línea de referencia frente a la que comparar el módulo del pavimento obtenido mediante cálculo inverso a partir de las sucesivas auscultaciones estructurales. Así mismo, la curva maestra de la mezcla bituminosa in-situ determina no sólo el nivel de deterioro de la misma, sino además el nivel de envejecimiento y de densificación bajo las cargas del tráfico.

3. FATIGA DE LA MEZCLA BITUMINOSA: DEL LABORATORIO A LA REALIDAD

3.1. CALIBRACIÓN INICIAL EN LABORATORIO

El modelo de deterioro incorporado en CalME ha de calibrarse inicialmente en base a ensayos de fatiga en el laboratorio. En particular se emplean los mismos ensayos que para la determinación de una ley de fatiga convencional; la diferencia principal reside en la interpretación de los resultados. Al contrario que las leyes de fatiga, que sólo utilizan el primer y el último punto de cada ensayo (E_0 y $50\%E_0$), el modelo CalME se calibra a partir de la curva completa "módulo versus número de repeticiones", tal como se aprecia en el ejemplo de la Figura 3. Este ejemplo corresponde a una de las probetas ensayadas para la mezcla gruesa empleada en el estudio aquí descrito, en particular para una deformación de $250 \mu\text{e}$ y una temperatura de ensayo de 30°C . En total se ensayaron treinta probetas en el marco de este estudio, para 10 / 20 / 30°C , y los parámetros del modelo fueron obtenidos mediante una única regresión iterativa. El ajuste global obtenido fue bastante satisfactorio, con un error estándar medio del 5,1% del módulo inicial. Es preciso indicar que en los modelos recursivo-incrementales no existe el concepto de "fallo" como un hito que separa un firme funcional de un firme agotado, tal como ocurre con las leyes de fatiga convencionales. De hecho, y bajo el punto de vista de los autores del presente artículo, este carácter dicotómico constituye una de las más importantes limitaciones de dichas leyes. Por el momento, la cuestión no es si la mezcla bituminosa está fatigada o no, sino cuánto, además de cómo esto afecta a la rigidez del material. En cualquier caso, el modelo CalME también puede aplicarse a la predicción del N_f "clásico" de las leyes de fatiga, tal como se indica en la Figura 3.

La descripción del modelo de fatiga CalME cae fuera del alcance de este artículo, para lo que se refiere al lector a otras publicaciones (5) (6). En cualquier caso, las ecuaciones principales del mismo son las recogidas a continuación:

$$MN_p = A \cdot \left(\frac{\epsilon_{MB}}{\epsilon_{ref}} \right)^\beta \cdot \left(\frac{E}{E_{ref}} \right)^\gamma \cdot \left(\frac{E_i}{E_{ref}} \right)^\delta \quad (3)$$

$$\log(\omega) = \alpha \cdot \log \left(\frac{MN_{eff} + \Delta n}{MN_p} \right) \quad (4)$$

$$\alpha = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot \text{Temp}) \quad (5)$$

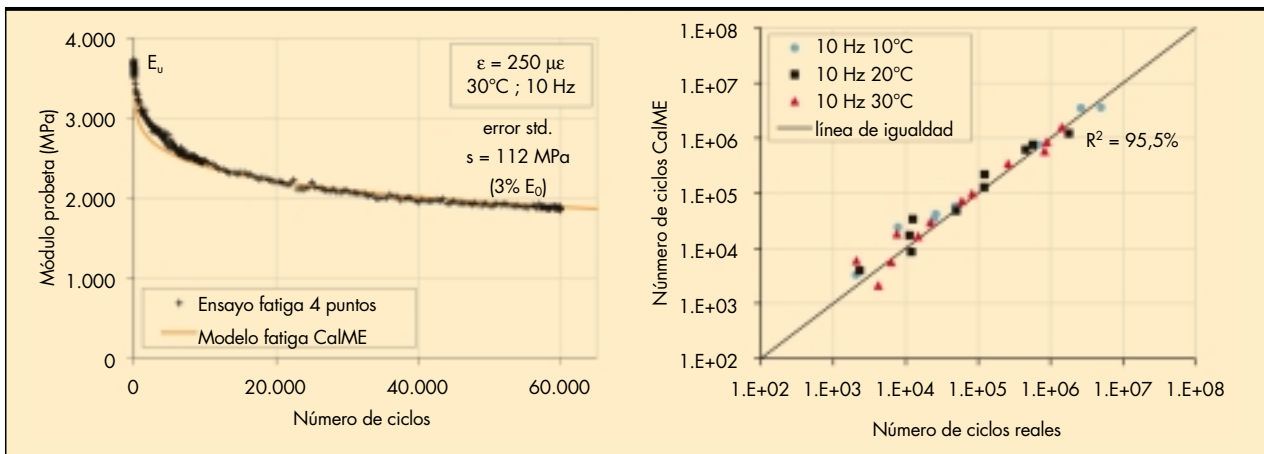


FIGURA 3. Calibración inicial del modelo CalME en laboratorio.

siendo:

- MN_p número de repeticiones permitidas para las condiciones de carga y temperatura del intervalo en cuestión (no confundir con N_p).
- E módulo de la mezcla bituminosa para las condiciones del intervalo en cuestión.
- ε_{MB} deformación calculada en el fondo del pavimento bituminoso bajo el eje.
- Δn número de aplicaciones de carga del intervalo en cuestión.
- ω daño o fatiga (el mismo parámetro de la ecuación [2]).
- α variable que controla la acumulación del daño en función de la temperatura.

El modelo CalME de deterioro de la mezcla bituminosa, una vez calibrado en laboratorio, puede aplicarse a la predicción de la evolución del módulo en un ensayo de fatiga con temperatura y nivel de deformación variables. Esto hace posible su aplicación posterior a firmes en servicio.

3.2. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE TRASLACIÓN (SF)

Desde hace tiempo es conocida la necesidad de introducir un “factor de traslación”² de la vida útil en las leyes de fatiga obtenidas en laboratorio para la mezcla bituminosa, como requisito previo a su aplicación a la predicción del comportamiento de firmes en servicio. De lo contrario, dichas leyes infraestimarían sistemáticamente el comportamiento frente a la fatiga de los pavimentos bituminosos. Una de las primeras referencias experimentales en este sentido fueron las obtenidas por Leahy et. al (7) en el marco del primer programa SHRP, que indicaban factores de 10 y 14 para un 10% y un 45% de fisuración respectivamente (% de la superficie de las bandas de rodada afectada por fisuración en piel de cocodrilo).

Son numerosas las razones que justifican la existencia del factor de traslación, si bien la más importante es la existencia de períodos de reposo entre las cargas del tráfico durante los cuales tiene lugar la autorreparación (“healing” en la literatura anglosajona) de la mezcla bituminosa (7). Otras razones son la distribución transversal aleatoria de las pasadas de los vehículos, el tiempo necesario para que las fisuras iniciadas en el fondo del pavimento alcancen la superficie, diferencias geométricas entre el espécimen de laboratorio y el pavimento real,

etc. Tal variedad justifica la tremenda dispersión que las diferentes referencias bibliográficas muestran para el factor de traslación, ya que cada valor experimentalmente obtenido será el resultado de la combinación de un elevado número de fenómenos que tendrán lugar de forma específica en cada carretera. Otras referencias experimentales son las siguientes: Prowell (9) obtuvo valores entre 4,2 y 75,2 a partir de resultados obtenidos en el circuito de tráfico controlado NCAT; Said (10) obtuvo un factor de traslación de 10 a partir de secciones reales en Suecia; Pierce et al. (11) obtuvieron valores entre 0,1 y 5,8 para firmes bituminosos en el estado de Washington. En la práctica, es posible encontrar desde valores inferiores a la unidad hasta de varios cientos, si bien es cada vez más frecuente el empleo del valor SF=10 para el diseño mecánico-empírico.

La Figura 4 indica el procedimiento de estimación empírica del factor de traslación; para ello es preciso comparar la vida prevista a partir de la ley de fatiga obtenida en el laboratorio con el número de repeticiones de carga que el firme soporta en la realidad antes de alcanzar una determinada condición crítica de deterioro. Es evidente que cada valor experimental se corresponde con una condición crítica en particular, típicamente un 20% de la longitud con presencia de fisuración en piel de cocodrilo, así como con un procedimiento específico de ensayo en laboratorio. Tomado como referencia la ley de fatiga determinada de acuerdo con la normativa europea EN 12697-24 D en desplazamiento controlado, resulta un factor de traslación de 108 para las secciones flexibles ensayadas en la Pista del CEDEX. Es importante tener en cuenta que la mayor parte de las referencias existentes a día de hoy emplean el procedimiento AASHTO T 321 de fatiga en cuatro puntos. Este procedimiento es esencialmente el mismo que el indicado por la normativa europea, si bien la interpretación de la deformación en la mezcla bituminosa es diferente. Así, de acuerdo con Pronk et al. (12), habría de introducirse un factor de 2, en términos de ε, cuando se comparen ambos procedimientos entre sí. Este hecho fue verificado en el marco del presente estudio, mediante el ensayo de varias probetas de la mezcla gruesa en la Universidad de California, tal como refleja la Figura 4. De esta forma, el factor de traslación anterior se reduciría a 2,6, que es del mismo orden que los indicados en las diferentes referencias antes mencionadas.³

² “Shift Factor” en la literatura anglosajona. El término “shift” (traslación) hace alusión al hecho de que la introducción del mismo es equivalente a una traslación de la ley de fatiga en la escala logarítmica.

³ En realidad, de acuerdo con Pronk, es la deformación obtenida mediante el procedimiento AASHTO la que ha de dividirse por 2, siendo correcta la interpretación de la normativa Europea. Así, el valor real del factor de traslación sería el de 108.

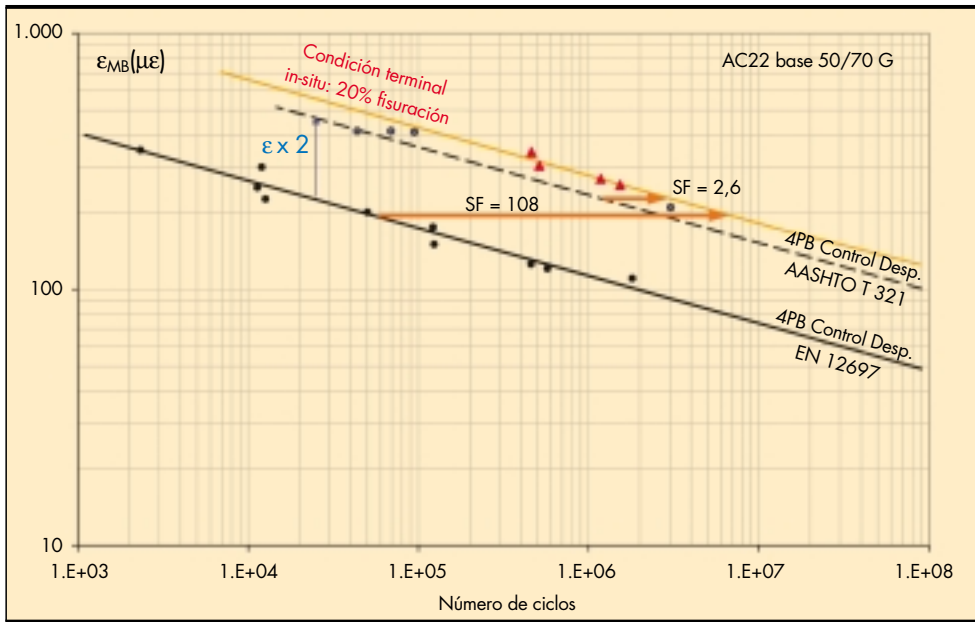


FIGURA 4. Determinación experimental del factor de traslación (SF).

En los métodos recursivo-incrementales, y a pesar de que no empleen las leyes de fatiga convencionales, también es necesaria la introducción de un factor de traslación. En la práctica, esto se lleva a cabo dividiendo en número de cargas del tráfico por dicho factor, antes de calcular el daño acumulado en cada intervalo de tiempo (Figura 5).

Del mismo modo que el modelo CalME calibrado en laboratorio puede aplicarse a la predicción de la evolución del módulo en un ensayo de fatiga con temperatura y nivel de deformación variables, también puede aplicarse a un firme real, con la diferencia de que en este caso la temperatura vendrá determinada por las condiciones ambientales y la deformación será la calculada bajo las cargas del tráfico. Este cálculo se realiza mediante la aplicación de un programa de tipo multicapa elástico lineal, teniendo en cuenta que el módulo de la mezcla bituminosa en cada intervalo vendrá determinado por

la temperatura y la velocidad de circulación del tráfico pesado, y además por los niveles de deterioro, envejecimiento y post-compactación de la mezcla bituminosa. En este proceso, la gran incógnita es el factor de traslación, que ha de ser fijado a partir de los resultados experimentales obtenidos en el pasado para condiciones similares.

Dada la reducida experiencia existente por el momento a nivel español sobre los factores de traslación, así como su alta dependencia del tipo de mezcla bituminosa y de las condiciones ambientales, parece aventurado el empleo de esta metodología a nivel de diseño, si bien de cara al seguimiento del comportamiento de tramos específicos de carretera la situación es bien diferente. En efecto, las auscultaciones estructurales llevadas a cabo de forma sistemática en las carreteras de mayor importancia proporcionan información periódica sobre el estado de deterioro del pavimento bituminoso. Dicha información, conve-

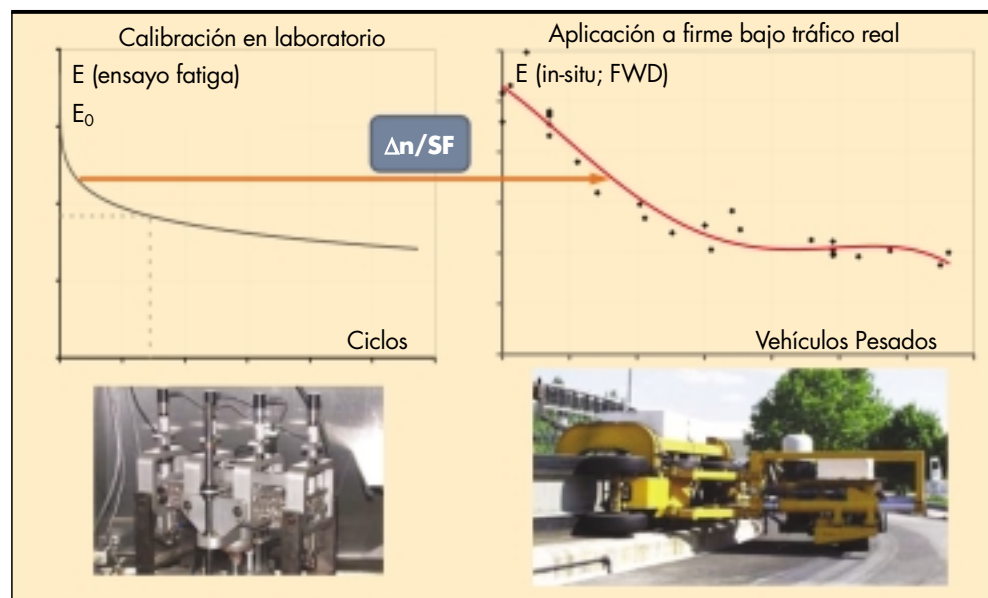


FIGURA 5. Aplicación del modelo de fatiga CalME a firmes en servicio.

nientemente procesada, puede ser empleada para determinar el factor de traslación específico del firme y condiciones ambientales en cuestión. Dicho factor, que podría ser aplicado posteriormente a firmes o refuerzos similares, nos servirá para cumplir el objetivo último de la auscultación estructural: la predicción fiable del comportamiento futuro del firme.

4. APLICACIÓN DEL MODELO CalME A SECCIONES ENSAYADAS EN LA PISTA DEL CEDEX

4.1. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE

El término “capacidad portante” es frecuentemente utilizado en diferentes contextos para referirse a conceptos que, si bien son diferentes, están relacionados entre sí. Estrictamente hablando, la capacidad portante de un firme puede definirse como su capacidad para resistir las cargas del tráfico sin deteriorarse y sin presentar deformaciones permanentes excesivas, a lo largo de un período de tiempo lo más largo posible. En el campo de la auscultación estructural de las carreteras, el término suele emplearse para referirse a la rigidez global del firme. En cualquier

caso, el paso de rigidez a nivel de deterioro no es en absoluto trivial, tal como se indica con anterioridad. Así mismo es preciso tener en cuenta que el envejecimiento de la mezcla bituminosa, que supone un incremento de rigidez, es uno de los factores que más reducen la resistencia frente a la fatiga y, por consiguiente, la capacidad portante estrictamente hablando.

A título de ejemplo, la Figura 6 recoge los resultados de las auscultaciones estructurales llevadas a cabo en una sección flexible que fue ensayada en la Pista del CEDEX mediante la aplicación de 1.323.000 aplicaciones de carga de un semieje de 6,5 toneladas a lo largo de un período de 28 meses. Como resultado, la sección llegó a un estado muy avanzado de deterioro, que se puso de manifiesto en una fisuración generalizada en piel de cocodrilo; así mismo tuvo lugar una importante densificación en la mezcla bituminosa y un envejecimiento apreciable. El gráfico a) de la Figura 6 recoge los módulos obtenidos mediante el cálculo inverso para el pavimento bituminoso, junto con los resultados de los ensayos de laboratorio de la mezcla gruesa de la capa de base y del microaglomerado de la capa de rodadura. En dicho gráfico pueden observarse los siguientes aspectos:

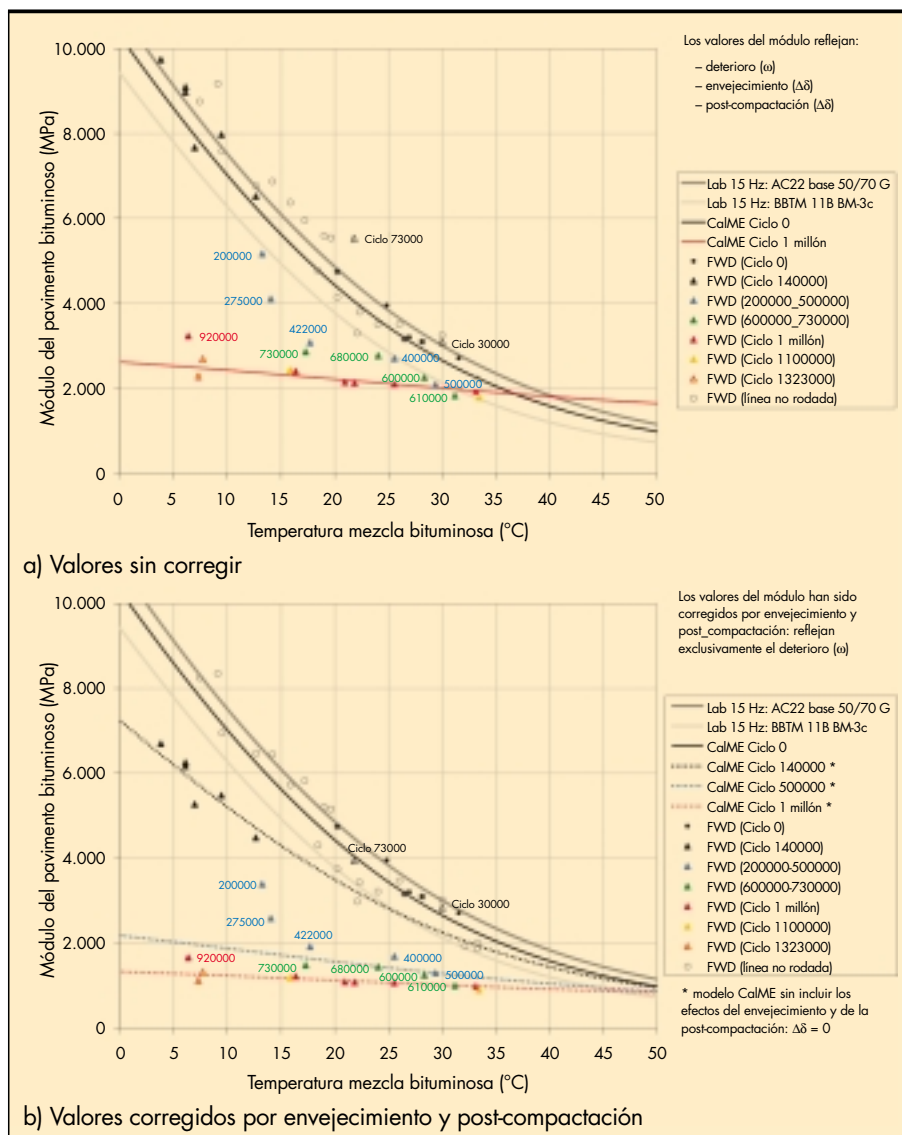


FIGURA 6. Módulo del pavimento obtenido mediante cálculo inverso a partir del ensayo de deflectómetro de impacto (FWD).

- La fatiga de la mezcla bituminosa, en términos de reducción efectiva del módulo del pavimento, es clara para las bajas temperaturas, pero no lo es para las altas.
- Los resultados del cálculo inverso a lo largo de la vida útil de la sección tienden a converger a los valores originales para temperaturas por encima de 35°C.

Ambos aspectos son compatibles con las hipótesis del modelo CalME y, en particular, con el efecto combinado del daño, el envejecimiento y la densificación bajo las cargas del tráfico, que se traduce en un aumento del módulo mínimo de la mezcla bituminosa (a altas temperaturas) así como en una reducción progresiva de la pendiente de la curva "módulo vs temperatura". De hecho, existe una relación directa entre el comportamiento observado en la Figura 6.a) y el indicado en la Figura 2 en términos de cambios en la curva maestra durante la vida útil de un firme.

4.2. DESARROLLO DEL DAÑO A LO LARGO DEL ENSAYO

En el gráfico b) de la Figura 6 se presentan los módulos del pavimento tras la corrección por envejecimiento y densificación, que se lleva a cabo dividiendo el valor original por 10^{Δδ}. Ahora el efecto de la fatiga se pone de manifiesto para todo el rango térmico, si bien continúa siendo más apreciable para las bajas temperaturas. Nótese una vez más el paralelismo con el comportamiento indicado en la Figura 2.

A partir de dichos módulos corregidos, y mediante la comparación con los valores de la curva maestra original (material intacto), puede cuantificarse el daño mediante la aplicación de la ecuación [6] recogida a continuación.

$$\omega = \frac{\log\left(\frac{E}{E_i}\right)}{\log\left(\frac{E_{min}}{E_i}\right)} \quad (6)$$

siendo:

- ω daño o fatiga.
- E_i módulo de la mezcla bituminosa intacta (curva maestra original) para las condiciones del ensayo in-situ.

E módulo del pavimento tras la corrección.
E_{min} valor mínimo del módulo de la mezcla bituminosa, 10⁶.

Los valores de ω obtenidos mediante este procedimiento para el pavimento anterior se presentan en la Figura 8.

4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO CalME A PARTIR DE ENSAYOS IN-SITU

Tal como se indica con anterioridad, la principal incógnita a la hora de aplicar a firmes en servicio el modelo de fatiga CalME calibrado en el laboratorio, es el factor de traslación (SF). Este factor puede determinarse empíricamente a partir de una o varias auscultaciones estructurales.

En el caso particular reflejado en la Figura 7 se realizaron cinco auscultaciones consecutivas con el deflectómetro de impacto, con el fin de reducir al máximo el efecto de la variabilidad inherente al ensayo propiamente dicho así como al proceso de cálculo inverso y de corrección de los resultados (en la práctica y para firmes en servicio, se emplearían todas las auscultaciones disponibles hasta un momento determinado). El objetivo era evaluar el potencial del modelo para predecir el deterioro futuro del firme en base a datos de comportamiento previo que, en este caso, correspondían al ciclo 140.000. Tal como se observa en la Figura 7, las predicciones de CalME –una vez obtenido SF para el ciclo 140.000– fueron excelentes, siendo capaz de reproducir el proceso de acumulación de daño in-situ bajo condiciones ambientales variables.

La aplicación del modelo CalME, sin embargo, no está exenta a día de hoy de ciertas limitaciones. Una de las más importantes, que queda patente en la Figura 7, es la predicción del daño durante los primeros ciclos de la vida del firme. El modelo CalME predice un importante descenso de la rigidez del pavimento al comienzo de la vida útil, y esto es debido a que refleja la caída que experimenta el módulo de la mezcla bituminosa durante los primeros ciclos de un ensayo de fatiga en laboratorio. En definitiva, el modelo no hace otra cosa que reflejar el patrón de los ensayos utilizados para su calibración previa. Sin embargo, a día de hoy está aceptado que el rápido

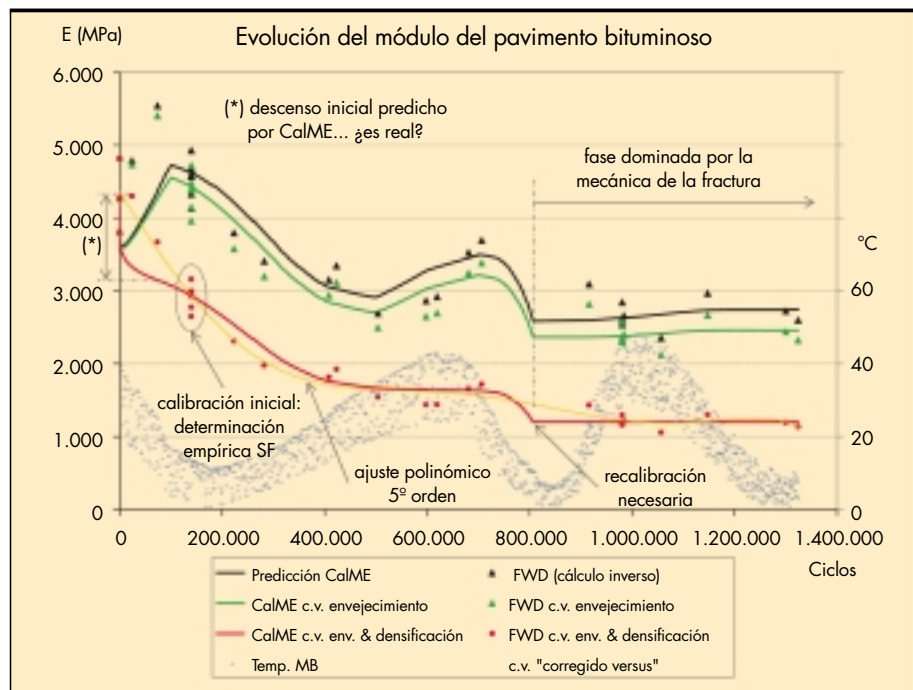


FIGURA 7. Determinación empírica del factor de traslación.

descenso inicial del módulo en los ensayos de fatiga está principalmente relacionado con el calentamiento, la tixotropía y otros efectos secundarios que nada tienen que ver con el daño (13). Como consecuencia, CalME predice un descenso de rigidez que no refleja la realidad. La solución a este problema no pasa tanto por la modificación de este modelo como por un avance en el conocimiento de los procesos físicos que tienen lugar en los ensayos de fatiga, al margen del daño propiamente dicho.

Otra limitación importante es la predicción del comportamiento para niveles muy avanzados de deterioro, tal como refleja la Figura 7 a partir del ciclo 800.000. Se trata en realidad de una limitación inherente a cualquier modelo que, al igual que CalME, esté basado en la mecánica de los medios continuos, que son la práctica totalidad de los existentes a día de hoy para los firmes. Ello es debido a que la hipótesis de continuidad es incompatible con la presencia de fisuras discretas en la mezcla bituminosa. De esta forma, CalME predice un descenso de la rigidez hasta llegar al valor mínimo de $10^{\delta+\Delta\delta}$ para los valores del módulo sin corregir y de 10^{δ} tras la corrección por envejecimiento y post-compactación. El valor del parámetro δ , determinado a partir de ensayos de rigidez en laboratorio, no tiene por qué ser representativo de un pavimento altamente deteriorado, y de hecho típicamente no lo será. En la práctica, la rigidez del pavimento tiende a estabilizarse en torno a un valor mínimo que ha de ser determinado a partir de un ensayo de deflexión in-situ.

4.4. PREDICIÓN DE LA FISURACIÓN DEL PAVIMENTO: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

En el marco del diseño mecánico-empírico de firmes, una función de transferencia es una expresión matemática que relaciona un parámetro de “daño continuo” con una cantidad objetiva de deterioro. Tanto el modelo CalME como la guía MEPDG incorporan funciones de transferencia con el fin de predecir la cantidad de fisuración en función del daño del pavimento bituminoso (ω). En ambos procedimientos, las expresiones incluyen como parámetro el espesor de mezclas bituminosas, lo que viene a reconocer el período de tiempo necesario para que las fisuras iniciadas en el fondo del pavimento sean

visibles en la superficie. La función de transferencia del modelo CalME tiene la siguiente expresión:

$$Cr(\%) = \frac{\omega_i^{\alpha_c} - 1}{\omega_i^{\alpha_c} - \frac{100}{Cr_i} + \left(\frac{100}{Cr_i} - 1\right) \cdot \omega^{\alpha_c}} \cdot 100 \quad (7)$$

$$\omega_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_{AC}}{h_{ref}}\right)^{\alpha_i}} \quad (8)$$

siendo:

- ω daño o fatiga.
- ω_i daño al inicio de la fisuración.
- h_{AC} espesor conjunto de mezclas bituminosas.
- $Cr_i, h_{ref}, \alpha_i, \alpha_c$ parámetros del modelo.

Es evidente que cualquier función de transferencia representa una tremenda simplificación de la realidad; baste para ello considerar que se intenta predecir una variable como la fisuración, cuyo desarrollo está basado fundamentalmente en la mecánica de la fractura, a partir de otra como el daño, cuya obtención se basa en la hipótesis de continuidad. Así mismo existen una serie de variables que no están recogidas de forma explícita en la expresión de la función de transferencia y que, sin embargo, influyen de forma significativa en el problema; la más importante de ellas es el envejecimiento del betún. La relevancia de esta variable ha sido demostrada experimentalmente a lo largo de varias décadas. De hecho, algunos estudios como los llevados a cabo por Kandhal y Koehler (14) indican que puede ser precisamente el envejecimiento del betún, y no el daño, el que determina el inicio de la fisuración en firmes en servicio.

Dadas las circunstancias expuestas, una predicción si quiera de la tendencia de la fisuración hubiera sido considerada como satisfactoria por parte de los autores del presente artículo. Aun así, los resultados obtenidos fueron excelentes para todas las secciones, tal como muestra el ejemplo de la Figura 8. En esta predicción se utilizaron los parámetros recomendados por el procedimiento CalME para firmes de nueva construcción, dado que un análisis de sensibilidad indicaba que los resultados no mejoraban de forma significativa con otros valores. No obstante,

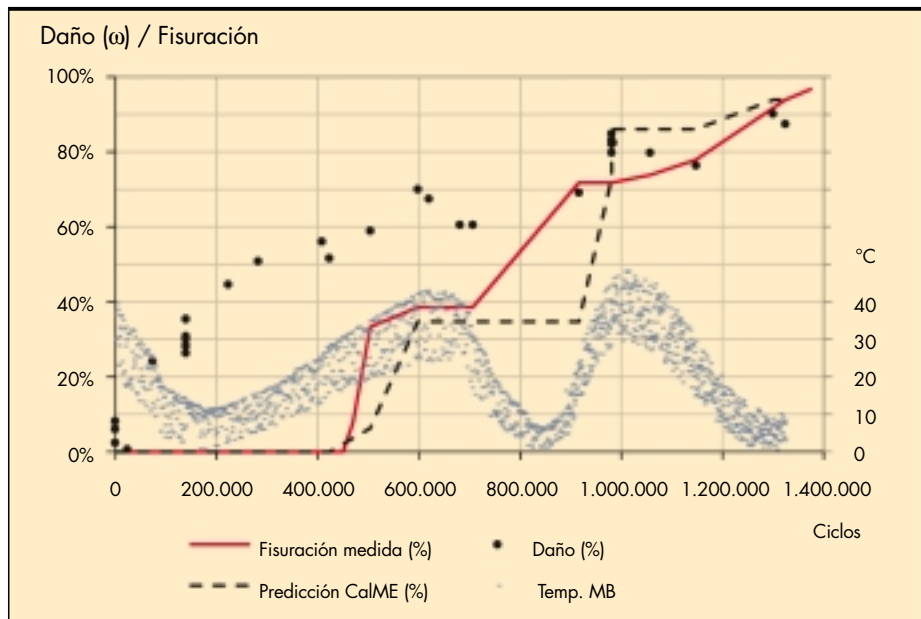


FIGURA 8. Evolución del daño (ω) y la fisuración del pavimento bituminoso.

es preciso tener en cuenta que el espesor conjunto de mezclas bituminosas, h_{AC} , y en particular el espesor equivalente de la capa de rodadura con un alto contenido de betún modificado BM-3c, fue determinado con el fin de ajustar el inicio de la fisuración prevista por el modelo al ciclo en que ésta efectivamente tuvo lugar (ecuación [8]). Para el caso reflejado en la Figura 8, dicho ajuste es equivalente a forzar que el inicio de la fisuración predicha por CalME tenga lugar después del ciclo 400.000. De esta forma pudo determinarse el espesor equivalente de la capa de rodadura en términos de retraso en el proceso de avance de las fisuras hacia la superficie del firme, que resultó ser de casi siete veces su espesor real en comparación con la mezcla gruesa empleada en la capa de base.

5. CONCLUSIONES

Los métodos recursivo-incrementales presentan indudables ventajas frente a los métodos "clásicos" de diseño analítico. Una de las más importantes es que proporcionan una predicción del comportamiento del firme, esto es, de la evolución en el tiempo de los diferentes mecanismos de deterioro.

Uno de los procedimientos recursivo-incrementales de mayor aceptación a nivel internacional es el programa CalME, cuyo modelo de fatiga convencional de la mezcla bituminosa (de abajo hacia arriba) ha sido validado para condiciones ambientales y mezclas bituminosas españolas. Este modelo predice la evolución en el tiempo de la rigidez del pavimento bituminoso y de su nivel de deterioro.

El modelo CalME ha de ser calibrado inicialmente a partir de ensayos de módulo dinámico y de fatiga de la mezcla bituminosa en el laboratorio. Posteriormente, y de cara a su aplicación a firmes en servicio, ha de introducirse un factor de traslación (*shift factor*) que puede determinarse empíricamente a partir de los resultados, convenientemente procesados, de una o varias auscultaciones estructurales. No obstante, dicha determinación no está exenta de dificultades. En particular, la evaluación del estado estructural del pavimento a partir de ensayos de deflexión ha de tener en cuenta que la evolución del módulo de la mezcla bituminosa en un firme en servicio no está sólo determinada por su nivel de deterioro: tanto el envejecimiento del betún como la densificación bajo las cargas del tráfico constituyen factores clave a considerar.

La gran ventaja del modelo CalME es que puede ser recalibrado conforme se vaya disponiendo de nueva información sobre el estado de deterioro del pavimento bituminoso, ya sea sobre su rigidez o sobre su nivel de fisuración. De esta forma, constituye una potente herramienta de cara a cumplir el objetivo último de la auscultación estructural, que no es sólo la determinación del estado del firme en un momento en particular, sino también proporcionar una predicción fiable de su futuro comportamiento. Dicha fiabilidad constituye la premisa de cualquier estrategia de optimización de los recursos disponibles para garantizar la funcionalidad de un firme a lo largo de su vida de servicio.

6. AGRADECIMIENTOS

El estudio presentado en este artículo no hubiera sido posible sin la contribución de la Dirección General de Carreteras a través del Tercer Ensayo de Explanadas en la Pista del CEDEX, cuyos trabajos han sido dirigidos por D^a Mercedes Gómez Álvarez en el marco de la Encomienda de Gestión de la citada Dirección al CEDEX correspondiente al período 2005-2008.

Los autores también desean expresar su gratitud al Prof. Per Ullidtz, sin cuyo apoyo no hubiera sido posible el desarrollo de esta investigación, así como a la Universidad de California y al Departamento de Transporte del Estado de California.

7. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Applied Research Associates, Inc. "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures". National Cooperative Highway Research Program, Report 1-37A, Transportation Research Board, Washington, DC, marzo 2004.
- (2) CalME v. 1.0 Help file, California Department of Transportation, Julio 2010.
- (3) Andrei D., M. W. Witzczak y M. W. Mirza. "Development of a revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures". Inter Team Rep. NCHRP 1-37A, Univ. de Maryland, College Park, 1999.
- (4) Mirza M. W., y M. W. Witzczak. "Development of a Global Aging System for Short and Long Term Aging of Asphalt Cements". Journal of the Association of the Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, 1995.
- (5) Ullidtz P., J. Harvey, V. Kanekanti, B. W. Tsai y C. L. Monismith. "Calibration of Mechanistic-Empirical Models Using the California Heavy Vehicle Simulators". Proceedings of the 10th International Conference on Asphalt Pavements. CD-ROM. Québec, Canada, Agosto 2006.
- (6) Ullidtz P., J. Harvey, B. W. Tsai y C. L. Monismith. "Calibration of Incremental-Recursive Flexible Damage Models in CalME Using HVS Experiments". UCPRC-RR-2005-06, Departamento de Transporte de California, 2006.
- (7) Leahy R. B., R. G. Hicks, C. L. Monismith y F. N. Finn. "Framework for Performance—Based Approach to Mix Design and Analysis". Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, Association of Asphalt Paving Technologists, Minneapolis, MN, 1995.
- (8) Prowell B., E. Brown, R. Anderson, J. Daniel, H. Von Quintus, S. Carpenter, S. Bhattacharjee y S. Maghsoodloo. "Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt". NCHRP Report 646, Transportation Research Board, Washington, DC, 2010.
- (9) Prowell B. D. "Estimate of Fatigue Shift Factors between Laboratory Tests and Field Performance". 89th Annual Meeting of The Transportation Research Board, Transportation Research Board, Washington, DC, 2010.
- (10) Said S. F. "Variability in Roadbase Layer Properties Conducting Indirect Tensile Test". Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements, Vol. 2. Universidad de Washington, Seattle, WA, Agosto 1997.
- (11) Pierce L. M., N. C. Jackson y J. P. Mahoney. "Development and Implementation of a Mechanistic, Empirically Based Overlay Design Procedure for Flexible Pavements". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1388, Transportation Research Board, Washington, DC, 1993.
- (12) Pronk A. C., M. R. Poot, M. M. J. Jacobs y R. F. Gelpke. "Haversine Fatigue Testing in Controlled Deflection Mode. Is it Possible?". 89th Annual Meeting of The Transportation Research Board, Transportation Research Board, Washington, DC, 2010.
- (13) Di Benedetto H., C. de La Roche, H. Baaj, A. Pronk y R. Lundström. "Fatigue of bituminous mixtures". Materials and Structures, Vol. 37, 2004.
- (14) Kandhal P. y W. Koehler. "Significant Studies on Asphalt Durability: Pennsylvania Experience" Journal of the Transportation Research Board, No. 999, Transportation Research Board, Washington, DC, 1984.