



Instituto
Mexicano del
Transporte

COORDINACION DE INFRAESTRUCTURA

INFORME DE INVESTIGACIÓN

PROYECTO No. IE 23/14

ALCANCES DEL MODELO CAL-ME PARA LA ELABORACIÓN DE MODELOS DE
DETERIORO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE PRUEBAS DE DETERIORO
ACELERADO

Responsable del proyecto:

M. I. Roberto-Israel Hernández Domínguez
Investigador

Aprobó:

MC. Rodolfo Téllez Gutiérrez
Coordinador de Infraestructura

Autorizó:

M en I M en C José San Martín Romero
Director General

15 de enero de 2015

Este trabajo fue realizado con la colaboración del Dr. Ángel Mateos Moreno investigador del CEDEX (Centro de Investigación en el Transporte del Ministerio de Fomento del Gobierno Español) y con José Antonio Gómez López, investigador de la División de Laboratorios de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte.

CONTENIDO

1	Introducción.....	4
2	La Herramienta de diseño mecanicista de pavimentos, basada en espectros de daño IMT-PAVEõ	5
3	Consideraciones usadas en el modelo CalME (California Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide).....	9
4	Evolución de los módulos característicos de las capas del pavimento bajo el enfoque recursivo incremental del Modelo CalME.....	12
5	Factibilidad de Incorporación del modelo de fatiga de pavimentos flexibles del modelo CalME dentro del IMT-PAVE.....	12
6	Conclusionesõ õ õ õ õ	13
7	Referencias.....	14

1 INTRODUCCIÓN

Las carreteras son un componente importante de nuestra infraestructura civil; son esenciales para la economía y consumen grandes cantidades de recursos naturales y financieros.

Por lo que, tiene vital importancia el diseño más eficaz, los métodos de construcción y el uso más eficiente de materiales con el fin de reducir al mínimo los gastos y aumentar al máximo los beneficios sociales de la movilidad. Las estructuras con superficies asfálticas constituyen la inmensa mayoría de las carreteras pavimentadas de México.

Los pavimentos asfálticos incluyen aquellos que tienen bases granulares, pavimentos semirrígidos con bases estabilizadas con cemento o con otros materiales, y constituyen el 92 por ciento de las carreteras en México, con aproximadamente 35000 km de la red pavimentada.

Por lo anterior cualquier mejora en los métodos de diseño actuales y en los métodos de construcción puede conducir a grandes ahorros económicos para el país entero, y así mismo para la disminución de efectos nocivos para el medio ambiente.

El fenómeno de roderas en las capas de concreto asfáltico es uno de los principales problemas para el fallo de los pavimentos. El riesgo de formación de roderas de la capa asfáltica es generalmente mayor al principio de la vida de la nueva carretera antes de que ocurra el endurecimiento debido a la oxidación y el tráfico, lo que resulta en importantes aumentos en el costo del ciclo de vida. La predicción de la formación de roderas es importante para determinar las alternativas de diseño más rentables, y la comprensión *in-situ* de mecanismos de acumulación de la deformación serán necesarios para desarrollar la predicción efectiva del desempeño de los modelos y la caracterización de los materiales asociados en laboratorio con el fin de diseñar eficazmente mezclas asfálticas en el nivel apropiado de riesgo para un proyecto determinado. Lo mismo sucede para el segundo fenómeno de deterioro más importante en pavimentos flexibles, el fenómeno de fatiga.

El diseño mecanicista-empírico (ME) es un método de diseño de pavimentos que integra las relaciones empíricas relacionando el deterioro con las respuestas obtenidas a partir de los datos en campo dentro de las predicciones teóricas de la respuesta del pavimento mediante modelos estructurales. Estos modelos estructurales han sido desarrollados en base en las teorías y métodos generalmente aceptados (teoría elástica lineal [LET], Método de elementos finitos [FE], etc.) para determinar la respuesta del pavimento a las condiciones ambientales, el nivel de tráfico y las propiedades de los materiales. Esta información debe ser introducida para predecir las respuestas de pavimento, como deformaciones unitarias, esfuerzos y desplazamientos en lugares críticos de la estructura del pavimento, mediante el uso de los modelos estructurales teóricos desarrollados para predecir el potencial de deterioro por agrietamiento o por deformación permanente. Estas respuestas se utilizan como entrada a las funciones de transferencia empíricas, que se desarrollan generalmente de pruebas aceleradas en pavimentos o resultados de prueba en campo, para predecir el deterioro in situ y el desempeño del pavimento.

Una vez que se establece que las respuestas de pavimento calculadas por los modelos teóricos coinciden suficientemente respuesta medida en el pavimento, se calibran los modelos de función de transferencia basados en las mediciones in situ de desempeño.

Las pruebas aceleradas en el pavimento parecen ser las más importantes fuentes iniciales de información para el desarrollo y la comprobación de los modelos mecanicistas empíricos ME modelos porque el desempeño a largo plazo del pavimento puede ser simulado en un corto período de tiempo. Sin embargo, debido a que los ensayo acelerados de pavimentos son muy caros (aunque no tan caro como pruebas de campo a largo plazo) y no se pueden realizar para todas las posibles alternativas de diseño, se deben desarrollar o mejorar modelos estructurales y pruebas de laboratorio para simular el comportamiento del pavimento real con un costo razonable.

Por lo tanto, los resultados de las pruebas aceleradas de pavimento deben ser utilizados para mejorar estos modelos estructurales y las pruebas de laboratorio relacionadas, en lugar del desarrollo de criterios de diseño empíricos directamente desde las pruebas aceleradas en sí mismas.

El objetivo principal de este estudio es utilizar el modelo Cal-ME para incorporarlo a la metodología de diseño del IMT-PAVE. Ya que este método utiliza la forma recursiva incremental para el desarrollo del deterioro a lo largo del tiempo y puede ser fácilmente calibrado mediante pruebas de deterioro acelerado en pavimentos.

2. LA HERRAMIENTA DE DISEÑO DE MECANICISTA DE PAVIMENTOS, BASADA EN LOS ESPECTROS DE DAÑO.

El IMT-PAVE es una herramienta informática para el diseño de pavimentos mediante una metodología empírico mecanicista que, sin descuidar otros factores, pone un énfasis en el concepto de *espectro de carga* para relacionarlo con el de *espectro de daño*, a través del análisis de esfuerzos y deformaciones en la estructura de pavimento y su correlación con los principales tipos de deterioros que presenta.

Las metodologías empírico - mecanicistas pretenden tener un enfoque más científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, ya que se pueden determinar en laboratorio o en campo. Esta metodología nos permitiría la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por ende, aumentar en gran medida la confiabilidad del diseño.

Las componentes de entrada al proceso de diseño se refieren a la geometría de la estructura; básicamente son los espesores de cada capa; las propiedades de los materiales que conforman cada una de esas capas que serán módulos dinámicos o resilientes y el nivel de tránsito vehicular definido por su espectro de distribución de cargas. La selección del diseño inicial consiste en una primera estimación de valores para esas componentes de entrada.

Definido el diseño inicial, se procede al cálculo de las respuestas estructurales en la sección estructural del pavimento. Estas respuestas estructurales consisten en conocer la distribución de esfuerzos (), deformaciones unitarias () y deflexiones (). El cálculo se realiza básicamente considerando al pavimento como un medio multicapas, en donde el comportamiento de los materiales se apoya en la Teoría de la Elasticidad, con simplificaciones necesarias para su cálculo más eficiente, como se verá más adelante.

A partir de la respuesta estructural en el pavimento se calcula el nivel de daño esperado en el período de diseño, para los dos tipos de deterioro principales que se presentarán; estos son agrietamientos por fatiga y deformaciones permanentes.

Calculados los niveles de deterioro para el período de diseño, se introduce el concepto de vida remanente, el cual es el inverso del daño acumulado en el periodo de diseño y determinará cuando una sección ha excedido o no el valor máximo de daño acumulado.

Como fue expresado anteriormente, la idea fundamental es la de poder garantizar el desempeño del pavimento a lo largo de su vida de proyecto. Esto significa garantizar que los niveles de agrietamiento y de deformación permanente, se mantendrán dentro de un rango ideal, que dependerá de la importancia de la red carretera de que se trate.

Para la obtención de los espectros de daño, se necesita el concepto de daño definido por Miner, 1945, en donde para cada tipo de eje, i , y cada nivel de carga, j , se obtiene el cociente entre el número de repeticiones correspondiente esperado por año, n , y el número de repeticiones admisibles, N , para limitar el desarrollo de un cierto tipo de deterioro. El daño total se calcula con la ecuación (1).

$$D = \sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \quad (1)$$

El coeficiente de Daño, D , así obtenido, está asociado a un cierto tipo de deterioro en el pavimento, como los que se muestran en la Figura xx. El inverso de D representa el tiempo, T (en años), en que se alcanzará el número de repeticiones admisible de ese deterioro y es el que se debe comparar con el período de diseño deseado (usualmente 20 años en pavimentos asfálticos)

Es práctica común el asociar el número de repeticiones admisible con los esfuerzos y deformaciones máximos que se presentan en puntos críticos de la sección estructural de un pavimento. Para agrietamiento por fatiga se toma, por ejemplo, la deformación unitaria de tensión máxima, ϵ_t , en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y, para la deformación permanente de las capas inferiores, la deformación unitaria de compresión máxima, ϵ_c , en la parte superior de las terracerías. El cálculo de esas deformaciones supone un comportamiento elástico de los materiales, lo que es válido en pavimentos ya que los niveles de esfuerzos que se generan al paso de las cargas vehiculares son muy inferiores a la resistencia al esfuerzo cortante.

Para el número de repeticiones admisible para agrietamiento por fatiga, N_f , se utilizan modelos del tipo que se indica en la ecuación (2).

$$N_f = f_1 \epsilon_t^{-f_2} \quad (2)$$

Para el modelo de deterioro por deformación permanente de las capas inferiores la forma matemática es la que se establece similar a la anterior, ecuación (3).

$$N_d = f_4 \epsilon_c^{-f_5} \quad (3)$$

El IMT-PAVE utiliza valores particulares de esos parámetros, definidos en base a su propia experiencia y análisis de otros modelos. El cálculo de esfuerzos y deformaciones se realizó con el método de Odemark, 1949, que permite transformar la estructura de un pavimento en una sección homogénea equivalente. Los resultados obtenidos con esta metodología para las deformaciones unitarias que se requieren son muy similares a los que proporcionan los programas de cómputo existentes basados en la Teoría de Burmister para medios estratificados, además de permitir una programación mucho más sencilla.

La Figura 1.8 muestra el diagrama de flujo general de las etapas necesarias para el cálculo de los Espectros de Daño

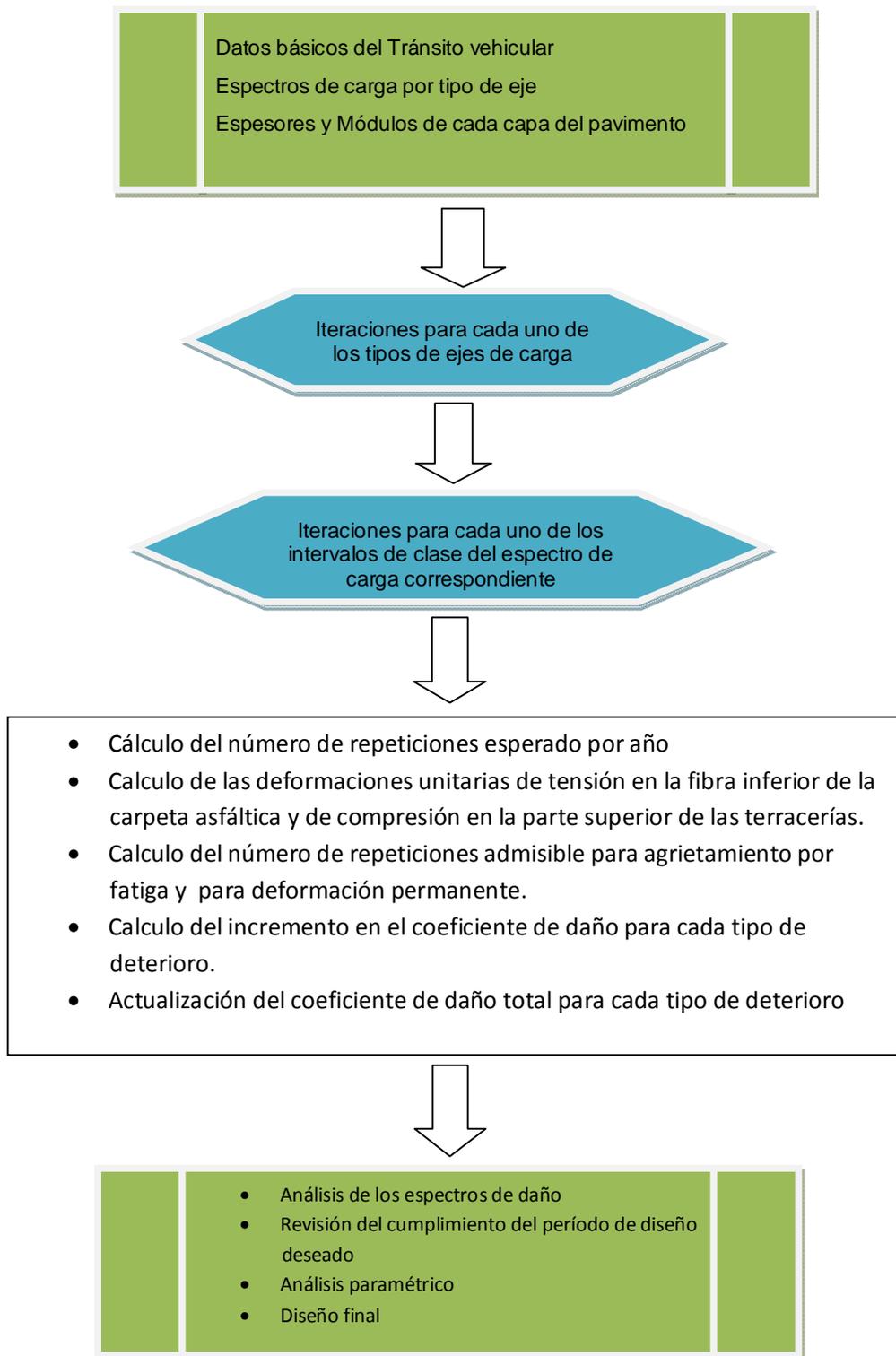


Figura 1. Diagrama de flujo general para el cálculo de los Espectros de Daño.

3. CONSIDERACIONES USADAS EN EL MODELO CAL-ME (California Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide).

Descripción del procedimiento recursivo incremental.

A diferencia del método empírico mecanicista clásico, donde las respuestas del pavimento se calculan solamente para las condiciones iniciales y las relaciones empíricas predicen el número de repeticiones a la falla ya sea por agrietamiento, profundidad de roderas o deformación permanente e IRI. En el procedimiento recursivo incremental la respuesta se calcula para cada incremento y cada carga, y el cambio en la condición del pavimento se predice (en términos del daño) usando el procedimiento de endurecimiento en el tiempo+ (time-hardening). Así para el siguiente incremento la nueva condición del pavimento se usa con el modelo mecanicista para predecir la respuesta.

El procedimiento recursivo incremental trabaja en incrementos de tiempo y utiliza el resultado de un incremento, de forma recursiva, como entrada para el siguiente.

El procedimiento predice las condiciones del pavimento, en términos de módulos de capa, la propagación de grietas, la deformación permanente y la irregularidad (con simulación de Monte Carlo), como una función del tiempo, pero no lleva a cabo un diseño automático, donde sean determinados los espesores de capa necesarios para lograr ciertas condiciones del pavimento al final de la vida de diseño.

La duración predeterminada de cada incremento es de 30 días, pero esto puede ser cambiado por el usuario. El programa seleccionará el día en el centro del primer incremento por ser representativo de las condiciones climáticas durante ese incremento. El día representativo se divide en períodos. La división por defecto es en 5 periodos de 4, 4, 5, 5, y 6 horas, comenzando a las 13 horas (13:00), pudiendo ser modificado por el usuario.

Primero se calculan las temperaturas a diferentes profundidades de la estructura del pavimento, en el periodo de simulación. La temperatura superficial es leída de la base de datos del EICM (con 30 años de datos).

Se calculan en primer lugar, las temperaturas a diferentes profundidades de la estructura del pavimento, en el período de simulación. La temperatura en la superficie se lee de la base de datos del EICM (Enhanced Integrated Climatic Model) con 30 años de datos y las temperaturas a diferentes profundidades se calculan utilizando la temperatura superficial, una temperatura del suelo a profundidad constante y las temperaturas previas. Se lleva a cabo utilizando una

formulación de Galerkin de elementos finitos 1-D con un intervalo de tiempo en diferencias finitas. Se calcula para un año para inicializar el sistema.

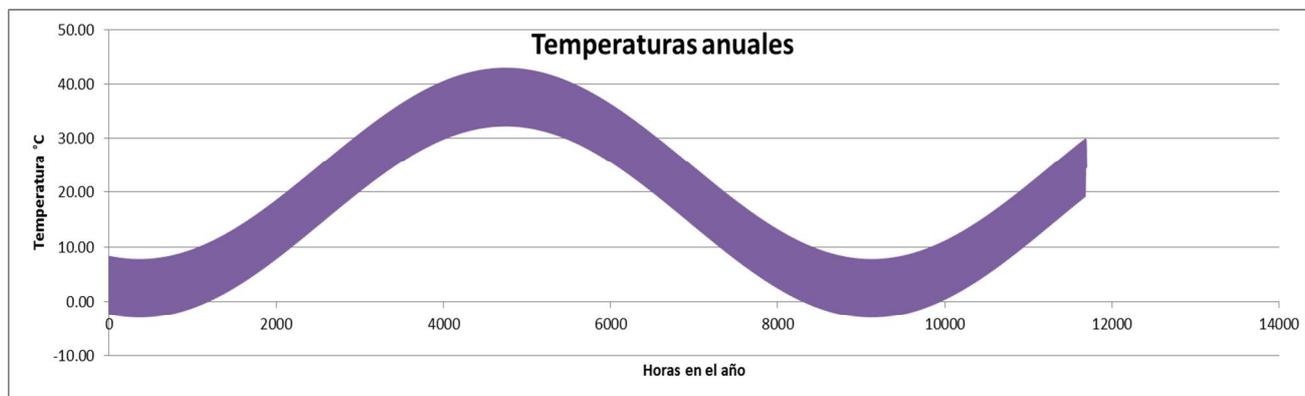


Figura 2. Distribución del modelo de temperaturas a una profundidad h del pavimento, a lo largo del año según el modelo Cal-ME.

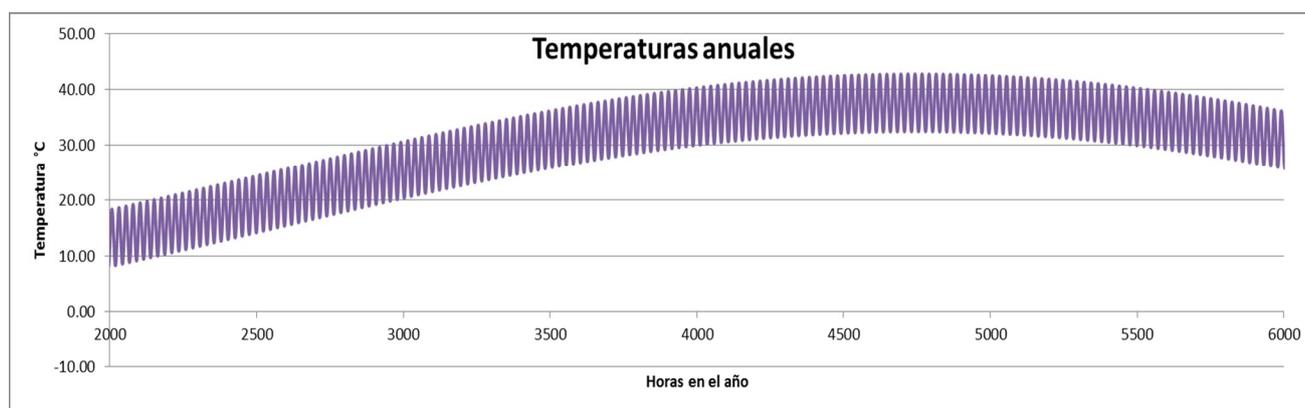


Figura 3. Acercamiento de la figura 2

Para el primer período para el primer incremento de tiempo el programa aplica el espectro de carga una carga a la vez, leída de la tabla de datos WIM. Si el cálculo considera vagueo de las ruedas, la carga se aplica en la primera posición lateral. Se determina entonces la temperatura a un tercio de cada capa asfáltica, con esta temperatura y el tiempo de carga (dependiendo de la velocidad del vehículo y de la profundidad en la estructura) se usa la curva maestra para cada material asfáltico para determinar el módulo de cada capa asfáltica.

El módulo también puede estar influenciado por el daño en la capa existente y por el envejecimiento / endurecimiento. Para los materiales no asfálticos los módulos se modifican según la estación y el tiempo transcurrido después de la descongelación (si procede). Los

módulos de los materiales no confinados también pueden estar influenciados por la rigidez de las capas del pavimento por encima del material y por el nivel de carga.

Para cada carga, en cada posición, los esfuerzos críticos y deformaciones en los materiales se calculan en una línea de referencia. De forma predeterminada la línea de referencia se asume que está en el centro de la rueda individual y de una rueda cuando es un eje dual. Para cada capa el aumento en el daño y en la deformación permanente se calcula utilizando el procedimiento de endurecimiento en el tiempo. Para la siguiente carga o posición las nuevas condiciones de las capas del pavimento se utilizan para determinar los módulos y el incremento en el daño y la deformación permanente.

Cuando se hayan completado todas las posiciones de carga para todas las cargas durante el primer período, las temperaturas y los módulos para el próximo período se calculan y se aplican las cargas de ese periodo, y así sucesivamente hasta que se hayan completado todos los períodos de todos los incrementos en el período de análisis deseado.

Procedimiento del Endurecimiento en el tiempo.

Para los modelos de daño utilizados en el proceso recursivo incremental los parámetros en el lado derecho de la ecuación 1, pueden cambiar de incremento en incremento. En el modelo de daño por fatiga de las capas asfálticas, por ejemplo, la deformación unitaria, el módulo y la temperatura pueden cambiar de un incremento a otro. El primer paso en el proceso es, por lo tanto, para calcular el número "efectivo" de aplicaciones de carga que serán requeridos con los actuales parámetros, para producir la condición al inicio del siguiente incremento.

En el segundo paso la nueva condición, al final del incremento, se calcula para el número "efectivo" de aplicaciones de carga más el número de aplicaciones durante el incremento. Esto debe repetirse para cada carga y posición durante el incremento.

El método puede ser ilustrado por un ejemplo usando la ecuación para la deformación permanente para las capas con materiales no confinados. Si por ejemplo, la deformación permanente de la sub-rasante fue de 2 mm en el inicio del incremento, la deformación unitaria vertical, calculada para la primera carga de rueda en la primera posición era de 800 micro deformaciones, y el módulo de la sub-rasante era de 60 MPa. Entonces, el número efectivo de aplicaciones de carga en el inicio del incremento (en millones) se puede encontrar a partir de:

$$MN_{eff} = \left[\frac{z}{A \left(\frac{800}{\mu \epsilon_{ref}} \right)^{\beta} \left(\frac{60}{E_{ref}} \right)^{\gamma}} \right]^{1/\alpha} \quad (4)$$

Si el número de repeticiones, en millones, de esta carga, en esta posición, es dMN durante el incremento, entonces la deformación permanente después que todas las cargas se aplicaron sería:

$$d_p, mm = A(MN_{eff} + dMN)^\alpha \left(\frac{800}{\mu s_{ref}}\right)^\beta \left(\frac{60}{E_{ref}}\right)^\gamma \quad (5)$$

El proceso debe repetirse de forma recursiva, utilizando la salida de cada cálculo como entrada a la siguiente, para todas las cargas en cada posición, antes de proceder al siguiente incremento de tiempo.

4. EVOLUCIÓN DE LOS MÓDULOS CARACTERÍSTICOS DE LAS CAPAS DEL PAVIMENTOS BAJO EL ENFOQUE RECURSIVO INCREMENTAL DEL MODELO CAL-ME.

El modelo utilizado por Calme considera que el daño por fatiga en las mezclas asfálticas produce un decremento del módulo de rigidez de acuerdo a la siguiente expresión:

El modelo utilizado por Calme considera que el daño por fatiga en las mezclas asfálticas produce un decremento del módulo de rigidez de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\log(E) = \delta + \frac{\alpha \cdot (1 - \omega)}{1 + \exp(\beta + \gamma \log(tr))} \quad (1)$$

Dónde: ω = daño ocasionado en la mezcla.

La siguiente expresión permite calcular ω .

$$\omega = \left(\frac{MN}{MN_p}\right)^\alpha \quad (2)$$

$$\alpha = \exp\left(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot \frac{t}{1+c}\right) \quad (3)$$

$$MN_p = A * \left(\frac{\mu\varepsilon}{\mu\varepsilon_{ref}} \right) * \left(\frac{E}{E_{ref}} \right)^\gamma * \left(\frac{E_i}{E_{ref}} \right)^\delta \quad (4)$$

Dónde: MN: es el número de aplicaciones de carga en millones

$\mu\varepsilon$ = deformación en tensión en la parte inferior de la capa asfáltica.

E = el modulo dañado, en MPa

E_i = el módulo intacto, en Mpa

t = temperatura promedio de la mezcla asfáltica. °C

A, α_0 , α_1 , β , γ , δ = son los parámetros del modelo

$\mu\varepsilon_{ref}$ = deformación de referencia (tensión)

E_{ref} = módulo de referencia, en MPa

5. FACTIBILIDAD DE INCORPORACIÓN DEL MODELO DE FATIGA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES DEL MODELO CAL-ME AL IMT-PAVE.

Todos los modelos arriba descritos fueron incorporados a la forma de análisis de acumulación de daño del IMT-PAVE, permitiendo y dejando listo el modelo de fatiga para ser ajustado mediante sus parámetros de la ecuación de Witczak, para ser obtenidos y validados en laboratorio de acuerdo a las distintas mezclas que se quieran evaluar.

Este informe se complementa con el proyecto de degradación del módulo de rigidez en mezclas asfálticas utilizando el modelo de fatiga según la metodología Cal-ME

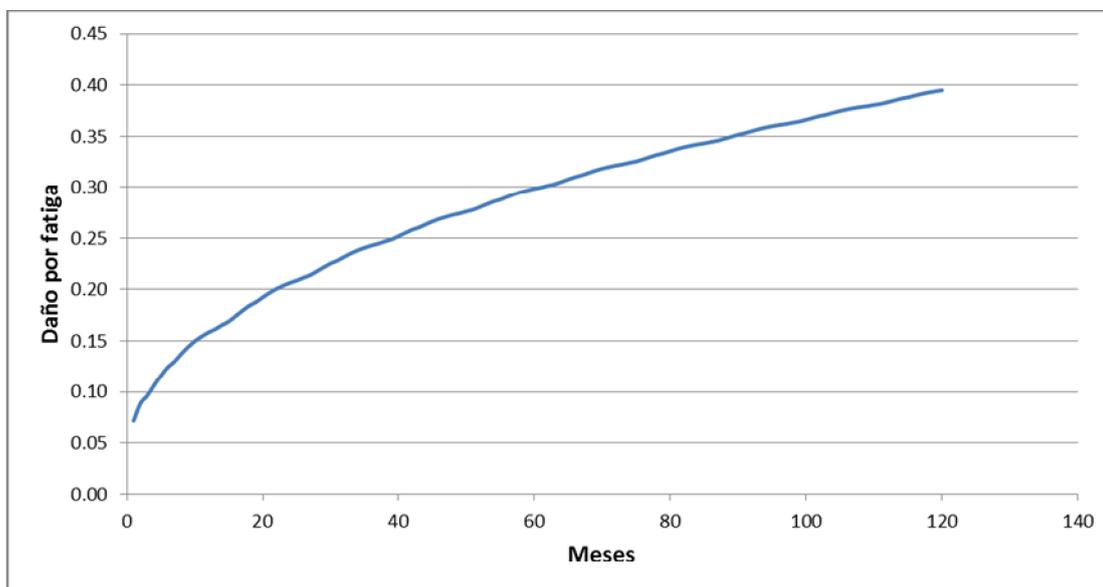


Figura 4. Evolución del daño por fatiga en el IMT-PAVE a lo largo de 10 años de análisis para un diseño de pavimento típico.

6 CONCLUSIONES

Comprender el funcionamiento de la metodología Cal-ME, aporta una parte importante relacionada con los modelos de transferencia o ecuaciones de predicción del deterioro ya que de una manera mucho más tangible en laboratorio pueden ser encontrados los factores de calibración de la ecuación utilizada en el modelo de fatiga, resta ahora esperar a obtener esos modelos, así como seguir la secuencia para incorporar en el futuro el modelo de deformación permanente ya que sigue la misma metodología.

7 REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. AASHTO, Washington, D.C., 2008.
- CalME: A New Mechanistic-Empirical Design Program for Flexible Pavement Rehabilitation. P Ullidtz, et al, corresponding Dynatest International Neverland 32, DK 2600 Glostrup, Denmark. (pullidtz@dynatest.com).
- Ullidtz P., Harvey J., Tsai B y Monismith C. (2006). %Calibration of incremental-Recursive Flexible Damage Models in CalME Using HVS Experiments. Prepared by: University of California, Pavement Research Center.
- Mateos M A, Pérez A J, Cadavid J B y Marrón F J, (2011) %Aplicación del Método Recursivo Incremental CalME a la Evaluación del Estado Estructural de los Pavimentos Bituminosos+ Ingeniería Civil 164/2011.
- Ullidtz P., Harvey J. (2001)%Simulation of West Track Experiment Using CalME+ Prepared by: University of California, Pavement Research Center