Instituto
Mexicano del
Transporte

COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA

INFORME DE INVESTIGACIÓN

PROYECTO No. IE 21/14:

DEGRADACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ EN MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZANDO EL MODELO DE FATIGA SEGÚN LA METODOLOGÍA CALME

Responsable del proyecto:

M en I José Antonio Gómez López
Investigador del Área de Asfaltos y Mezclas Asfálticas

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 proyecto fue realizado en la División de Laboratorios de Infraestructura por los investigadores, M en I José Antonio Gómez López, M en I Roberto Israel Hernández Domínguez, Dr Horacio Delgado Alamilla y M en C Mayra Flores Flores.

Resumen

Existen tres tipos de deterioros que se presentan en los pavimentos asfálticos los cuales son, 1) el agrietamiento por fatiga, debido a la aplicación repetida de las cargas del tránsito, 2) las deformaciones permanentes y 3) fracturamiento por bajas temperaturas, los últimos dos son debidos fundamentalmente a cuestiones de temperatura. En el presente trabajo los autores se avocan principalmente a estudiar la evolución y el ajuste de la reducción del módulo de rigidez de mezclas asfálticas ensayadas en vigas cargadas en cuatro puntos, basados en la metodología Empírico-Mecanicista Recursiva Incremental para el diseño de pavimentos flexibles denominada Calme en la cual las propiedades de los materiales para el pavimento son actualizadas en términos de daño debido a la degradación que sufre la mezcla tras la aplicación de las cargas. Se presentan resultados de diferentes mezclas asfálticas ensayadas en el Instituto Mexicano del Transporte los cuales corresponden tanto a módulos dinámicos como a ensayes de flexión en cuatro puntos. Se utiliza el modelo de daño por fatiga, propuesto por Calme para mezclas asfálticas en caliente, así mismo se muestran los resultados obtenidos para las diferentes mezclas asfálticas utilizadas en el estudio.

Contenido

Lista de figuras 5

Lista de tablas 6

1.- Introducción 7

2.- Modelo de daño por fatiga propuesto por Calme 8

3.- Materiales utilizados en el estudio 10

4.- Pruebas de desempeño y análisis de resultados 13

4.1 Módulo dinámico y curva maestra de mezclas asfálticas estudiadas 13

4.2 Modelo de daño por fatiga para mezclas asfálticas 16

4.3 Predicción del número de repeticiones ε_6 para las mezclas estudiadas 19

Conclusiones 22

Bibliografía 23

Lista de figuras

Figura 1 Materiales utilizados en el estudio, TMN 19 mm 12

Figura 2 Módulos dinámicos para mezclas mexicanas estudiadas 15

Figura 3 Aplicación de metodología Calme en los ajustes de reducción de módulos de rigidez 17

Figura 4 Ajustes en la reducción del módulo de rigidez, Metodología Calme 19

Figura 5 Evolución de la deformación con el número de ciclos 21

Lista de Tablas

Tabla 1 Características de los agregados empleados en el estudio 11

Tabla 2 Características de las mezclas asfálticas 13

Tabla 3 Parámetros de ajuste para las mezclas asfálticas para la generación de la Curva Maestra, se indica la expresión para determinación de at 16

Tabla 4 Parámetros del modelo de daño por fatiga en las mezclas asfálticas obtenidas con Calme 18

Tabla 5 Valor de la magnitud de la microdeformación para ε_6 21

1. Introducción

Actualmente existen diferentes metodologías para el diseño de pavimentos flexibles las cuales requieren como dato fundamental el módulo dinámico de la mezcla a utilizar. Quizá la más conocida es la Guía de Diseño de Pavimentos Empírica-Mecanicista (MEPDG, por sus siglas en inglés) la cual fue desarrollada por AASHTO. La MEPDG considera a la estructura del pavimento a través de su vida de diseño y considera su desempeño a través de varios modelos de deterioro. Un agravante es el que corresponde al modelo de fatiga en el cual la MEPDG no considera la degradación que va presentando la mezcla asfáltica por el fenómeno de fatiga, ya que el modelo considera un daño acumulativo el cual es lineal y no es actualizado con lo que realmente sucede en la carretera.

La Universidad de California a través de su departamento de investigación en carreteras ha desarrollado una metodología para el diseño de pavimentos denominado Calme, el cual contempla diferentes modelos de deterioro con daño recursivo incremental para el diseño de pavimentos. Los modelos de deterioro más importantes son: el de fatiga en mezclas asfálticas, deformación permanente en mezclas asfálticas, deformación permanente en materiales de capas intermedias (granulares y suelos) y el de reflexión de grietas en sobrecarpetas de concreto asfáltico.

El fenómeno de fatiga es uno de los principales deterioros presentes en las mezclas asfálticas que conforman las capas de rodamiento de los pavimentos, el cual ocurre bajo la acción repetida del tránsito. La repetición de las cargas produce una pérdida en la rigidez del material hasta llegar a la falla. La resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas corresponde con su capacidad para soportar las cargas repetidas sin fallar o agrietarse. La vida de los pavimentos está directamente relacionada con este fenómeno el cual deberá ser estudiado correctamente para asegurar un adecuado diseño estructural.

Aunque la fatiga ha sido estudiada por diferentes autores este fenómeno aún no es completamente entendido. Diferentes métodos son aplicados en laboratorio para caracterizar la fatiga de mezclas bituminosas considerando pruebas homogéneas y no homogéneas como es

el caso de los resultados de pruebas en ensayes de vigas cargadas en cuatro puntos y que serán tratadas más adelante.

Los ensayes que se realizaron para este estudio, corresponden a vigas sometidas a flexión y cargadas en cuatro puntos las cuales fueron ensayadas utilizando carga del tipo sinusoidal y con control de deformación, a una temperatura de 20 °C y una frecuencia de 10 Hz. La deformación fue medida por medio de un lvdt el cual se encuentra en la parte inferior y al centro del claro de la viga a ensayar. Los ensayes pueden ser realizados bajo otras condiciones pues el equipo permite trabajar con diferentes frecuencias y además tiene cámara ambiental para la temperatura deseada.

Las características de fatiga de mezclas asfálticas son usualmente representadas como relaciones entre la deformación axial inicial y el número de repeticiones de carga a la falla determinada de pruebas ejecutadas a diferentes niveles de deformación. EL comportamiento a la fatiga puede ser caracterizado por la pendiente y el nivel relativo de la deformación axial contra el número de repeticiones de carga en la falla (curva de Wöhler).

2. Modelo de daño por fatiga propuesto por Calme

Actualmente muchas carreteras se encuentran sometidas a altos niveles de tránsito además de la carga que pudiera estar incluso por encima de lo especificado por el reglamento produciendo elevados esfuerzos en las fibras inferiores de la carpeta asfáltica los cuales a su vez producen niveles altos de deformación a la tensión. Este fenómeno es justamente el que está asociado a la fatiga de la mezcla asfáltica pues se manifestará como agrietamiento el cual inicia primeramente con el fisuramiento, posteriormente se dá la coalescencia para generar las grietas y finalmente la falla del elemento el cual en el último de los casos hace que se desarrolle el deterioro conocido como piel de cocodrilo.

La metodología Calme para el diseño de pavimentos considera la expresión sigmoidal para módulo dinámico enunciada en MEPDG (Ullidtz, 2006 y 2010). Calme considera que la mezcla asfáltica se va deteriorando con la repetición de las cargas de los vehículos acelerándose el

daño si las pasadas de los mismos corresponden a vehículos más pesados. Calme introduce el parámetro ⍰ el cual está asociado con el daño a la mezcla asfáltica.

Calme incluye un método Recursivo-Incremental en el cual las propiedades del material para el pavimento son actualizadas en términos de rigidez de la mezcla de la capa así como la simulación del progreso de la vida del pavimento. El acercamiento recursivo incremental requiere de un modelo para describir la degradación de la rigidez de cada capa causada por el daño por fatiga bajo las condiciones de carga por tránsito. EL objetivo del presente trabajo es mostrar la aplicación del modelo de daño por fatiga para mezclas asfálticas en caliente desarrollado por Calme y la obtención de los parámetros del modelo utilizando la información obtenida de módulo de rigidez a la flexión de las vigas ensayadas en cuatro puntos.

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.

$$\log(\square) = \square + \frac{\square * (\square\square\ \square)}{\square\square\ \square\square\square^{\ \square\square\ \square\square\square(\square\square)}} \qquad (1)$$

Donde: ⍰ = daño ocasionado en la mezcla.

La siguiente expresión permite calcular ⍰.

$$\square = \square^{\frac{\square\ \square}{\square\ \square_{\square}}\square^{\square}} \qquad (2)$$

$$\square = \square\square\square^{\square\square_{\square}\ \square\ \square_{\square} * \frac{\square}{\square^{\circ}\square}\square} \qquad (3)$$

$$\square\ \square_{\square} = \square * \square^{\frac{\square\square}{\square\square_{\square\square\square}}\square} * \square^{\frac{\square}{\square_{\square\square\square}}\square^{\square}} * \square^{\frac{\square_{\square}}{\square_{\square\square\square}}\square^{\square}} \qquad (4)$$

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

⍰⍰ = deformación en tensión en la parte inferior de la capa asfáltica.

E = el modulo dañado, en MPa

Ei = el módulo intacto, en Mpa

t = temperatura promedio de la mezcla asfáltica. °C

A, $\square_{\square}$, $\square_{\square}$, $\square$, $\square$, $\square$ = son los parámetros del modelo

$\square\square_{\square\square\square}$ = deformación de referencia (tensión)

$\square_{\square\square\square}$ = módulo de referencia, en MPa

Las expresiones anteriores se utilizaron para determinar la evolución de la reducción del módulo de rigidez que presentan las mezclas asfálticas estudiadas y ensayadas en pruebas a flexión en cuatro puntos. Los resultados obtenidos se muestran en párrafos posteriores.

3. Materiales utilizados en el estudio

Los materiales utilizados para la realización de los ensayes de módulo dinámico y de flexión en vigas en cuatro puntos corresponden a materiales granulares los cuales son producto de la trituración de la roca y corresponden a aquellos que frecuentemente son utilizados en la práctica mexicana para la construcción de carreteras, en este caso mezclas asfálticas en caliente. El asfalto utilizado es el convencional el cual tiene una denominación AC20 teniendo en pruebas de reología una clasificación correspondiente a un grado PG 64-22. El mismo asfalto también fue modificado con polímero tipo SBS con el fin de evaluar el comportamiento de las mezclas y evaluar su desempeño tanto en módulo dinámico como en los ensayes de flexión en vigas cargadas en cuatro puntos. También se fabricaron otras mezclas en las que se utilizó el asfalto modificado con polímero pero al cual se le adicionó un modificador del asfalto en tres diferentes proporciones. Se fabricaron cinco tipos de mezcla con la misma granulometría con tamaño máximo nominal de agregado de ¾ò. Se fabricaron adicionalmente dos mezclas con granulometría diferente con tamaño nominal de ¾ù Toda la caracterización de los materiales así como la fabricación de probetas y ensayos fueron realizados en el Instituto Mexicano del Transporte.

En la Tabla 1 se presentan las características de los agregados así como los respectivos porcentajes de material que constituyeron a las mezclas en estudio.

Tabla 1 Características de los agregados empleados en el estudio.

Prueba	**Norma**	**Banco El Sauz**	**Banco La Cañada**	**Especificación (SCT-México)**
Gravedad específica, Gsb	ASTM C127-12	2.648	2.612	2.4 mín
Absorción, %	ASTM C127-12	1.48	3.01	---
Desgaste de Los Ángeles	ASTM C131-06	10 %	12 %	30 % máx
Micro-Deval	ASTM D 6928-06	6 %	9 %	15 %
Intemperismo acelerado	ASTM C142-04	1 %	6 %	15 % máx
Caras fracturadas	ASTM D 5821-06	90 %	94 %	15 % máx
Partículas alargadas	ASTM D 4791-05	0 %	0 %	3:1 , 15 % máximo, planas + alargadas
Partículas planas		2 %	5 %	
Desprendimiento por fricción	RA 08/10	86 %		90 % mín
Azul de metileno	AASHTO T 330-07		8	12 mg/g máx
Equivalente de arena	ASTM D2419-02	56 %		50 % mín
Angularidad, agregado fino	ASTM C 1252-03	47 %	46 %	40 % mín

En el estudio se consideran diferentes mezclas asfálticas que fueron elaboradas con materiales producto de la trituración de la roca de dos bancos, así como con granulometrías distintas (Figura1). Las mezclas son llamadas: AC20, AM, AM1, AM2, AM3, S12 y S20. Las primeras 5 mezclas fueron fabricadas con materiales del banco denominado ñLa Cañadaò y las mezclas S12 y S20 con materiales del banco ñEl Sauzò La distribución granulométrica de AC20, AM, AM1, AM2 y AM3 es la misma. Es necesario señalar que las mezclas denominadas S12 y S20

no cumplen con las especificaciones enunciadas en la normativa mexicana tal y como se observa en la Figura 1.

El asfalto base para la fabricación de las mezclas es el denominado AC20 y es el más común en México, éste fue suministrado por la Refinería de Salamanca.

La mezcla asfáltica AC20 contiene asfalto convencional, la AM asfalto con polímero tipo SBS, y las AM1, AM2 y AM3 asfalto con SBS y con un aditivo mejorador de adherencia el cual se añadió con diferentes porcentajes. Las mezclas S12 y S20 se elaboraron con AC20. Las granulometrías utilizadas se muestran en la Figura 1. Las características de las mezclas asfálticas se presentan en la Tabla 2.

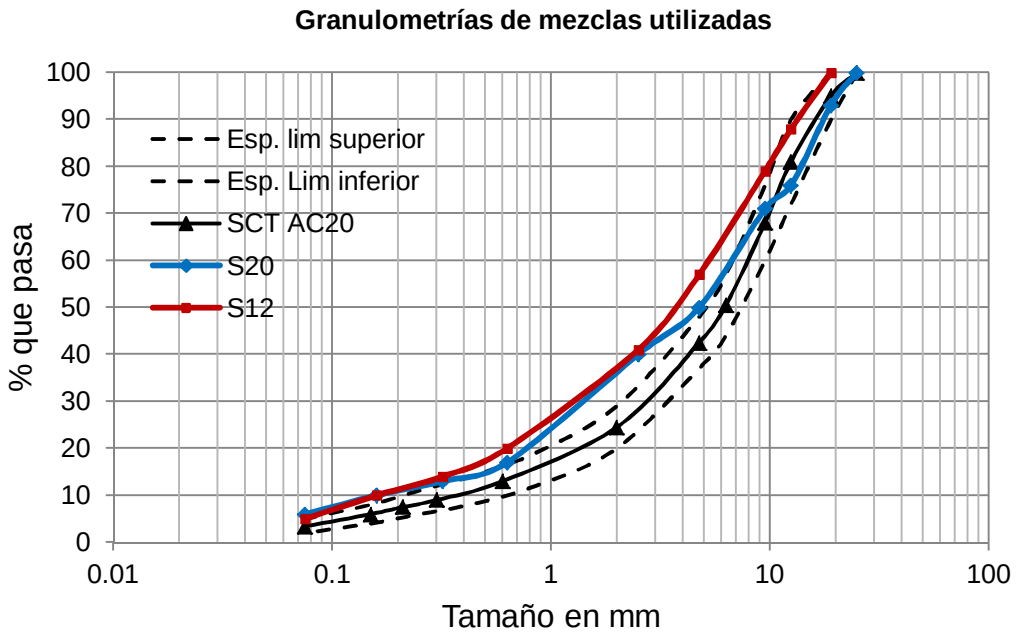

Figura 1 Materiales utilizados en el estudio, TMN 19 mm.

Tabla 2. Características de las mezclas asfálticas.

Características	AC 20	AM	AM1	AM2	AM3	S-20	S-12
% C.A.	5.4	5.02	5.02	5.02	5.02	4,8	5,2
Gmb	2.301	2.293	2.282	2.301	2.286	2,349	2,338
Gmm	2.443	2.437	2.437	2.437	2.437	2,445	2,454
%VA	5.80	5.9	6.4	5.6	5.2	3,91	4,70
%VAM	16.65	16.62	17.03	16.34	16.88	13,77	14,91
%VFA	65.17	64.55	62.42	65.74	63.27	71,60	68,48
%Filler/Asfalto	0.72	0.73	0.73	0.73	0.73	1,39	1,12

4. Pruebas de desempeño y análisis de resultados

4.1 Módulo dinámico y curva maestra de mezclas asfálticas estudiadas

Una de las características fundamentales de las mezclas asfálticas es la relacionada a su módulo dinámico el cual está relacionado al comportamiento que pueda presentar la mezcla asfáltica cuando sea colocada como superficie de rodamiento en una carretera. La mezcla asfáltica deberá ser resistente a las acciones del tránsito debido a que estará sometida a esfuerzos de tensión importantes los cuales le pueden ocasionar serios problemas relacionados a deformaciones permanentes y a agrietamiento por fatiga fundamentalmente, no significa lo anterior que no esté expuesta a problemas de fracturamiento térmico.

Para la determinación de la curva maestra de las mezclas asfálticas utilizadas se consideró el modelo sigmoidal enunciado por MEPDG.

$$\log(E_i) = \alpha + \frac{\beta}{1 + e^{\gamma - \delta \log(t_i)}} \qquad (5)$$

Donde: E_i = es el módulo complejo en MPa.

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ = constantes determinadas experimentalmente.

ŭ = mínimo valor de módulo,

ŭ + Ŭ= máximo valor de módulo,

Log = logaritmo en base 10.

tr = frecuencia reducida. Hz

$tr = a_t * \omega$

$\log(tr) = \log \omega + \log a_t$

La ecuación sigmoidal considera cuatro parámetros y toma como base la dependencia que tiene la curva maestra al valor de frecuencia reducida.

Los parámetros de calibración δ y α dependen de la granulometría del material, contenido de asfalto y vacíos de aire. Los parámetros β y γ dependen de las características del asfalto y de la magnitud de δ y α; ƀ y ɔ son parámetros que describen la forma de la función sigmoidal

Las pruebas de módulo dinámico se realizaron haciendo un barrido de frecuencias a 25, 10, 5, 1, 0.5 y 0.1 Hz y a temperaturas de -10, 4, 21, 37 y 54 °C. Las curvas maestras fueron determinadas a una temperatura de referencia de 21 °C.

Para la determinación de los parámetros enunciados en la ecuación 5 se utilizó la herramienta ñsolverò de excel hasta lograr que la suma de las diferencias de los cuadrados de los módulos obtenidos en laboratorio con los de la expresión sigmoidal en los análisis correspondientes fuera mínima. En el caso del parámetro δ, este se determinó considerando que la mezcla no pueda disminuir abajo de 200 MPa (recomendación Calme) valor que corresponde a una mezcla asfáltica muy deteriorada cuyo valor suelen presentar los suelos.

En la Figura 2 se presentan las curvas maestras donde se aprecian los módulos correspondientes a las diferentes mezclas estudiadas.

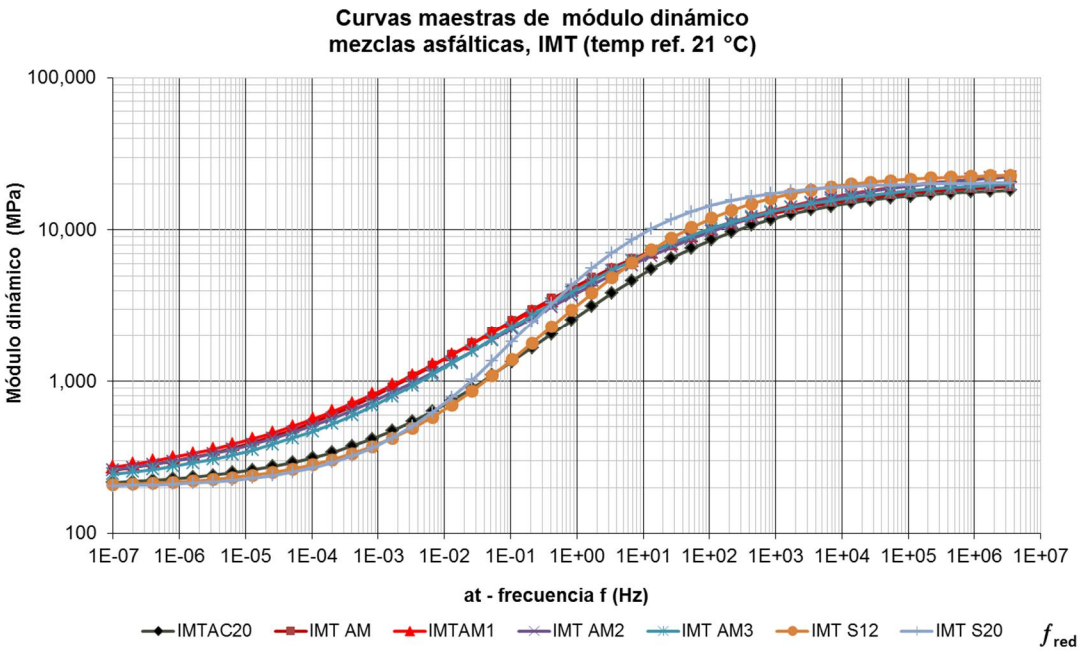

Figura 2 Módulos dinámicos para mezclas mexicanas estudiadas.

De la Figura 2 puede observarse que no existen diferencias significativas entre las mezclas asfálticas en cuanto a módulos para bajas temperaturas, es decir, a altas frecuencias. Comienza a presentarse una diferencia importante para el caso de altas temperaturas, bajas frecuencias. Entre las mezclas que contienen el modificador tipo SBS realmente no hay ventajas de una respecto a otra, lo cual significa que el mejorador de adherencia no tiene un efecto significativo que haga que mejore los módulos. Realmente donde se presenta la ventaja de las mezclas que contienen el modificador SBS es cuando se comparan contra la mezcla denominada IMTAC20 pues es a altas temperaturas donde se observan sus bondades. Los valores que presentan las mezclas se encuentran entre los 3000 MPa y los 5000 MPa para condiciones normales, temperatura de referencia de 21 °C y frecuencias intermedias. Es necesario señalar que a bajas frecuencias pueden presentarse problemas de deformaciones permanentes (temperaturas altas), a frecuencias altas el fracturamiento térmico (bajas temperaturas), y a frecuencias intermedias, que es el caso de estudio el fenómeno conocido como fatiga.

Tabla 3. Parámetros de ajuste para las mezclas asfálticas para la generación de la Curva Maestra, se indica la expresión para determinación de at.

Mezcla asfáltica	**Expresión at (ax^2+bx+c)**				α	β	δ	γ
	ax^2	bx	c	R^2				
IMT AC20	0.0004	-0.1276	2.5109	0.9966	1.98535	-0.27405	2.30103	-0.62349
AM	0.0009	-0.1545	2.8299	0.9962	2.02190	-0.66287	2.30103	-0.49745
AM1	0.0005	-0.1345	2.6530	0.9979	2.11201	-0.51264	2.30103	-0.45718
AM2	0.0006	-0.1355	2.5637	0.9989	2.10971	-0.44093	2.30103	-0.46983
AM3	0.0005	-0.1347	2.6365	0.9985	2.03306	-0.59303	2.30103	-0.52621
S12	0.0008	-0.1534	2.7649	0.9990	2.07196	-0.32363	2.30103	-0.72129
S20	0.0008	-0.1221	1.7613	0.9998	2.01202	-0.43763	2.30103	-0.86061

Los parámetros obtenidos son consistentes pues no presentan variaciones significativas. En el caso de α más δ son parámetros que definen el máximo y el mínimo valor de módulo dinámico en las mezclas asfálticas. Los coeficientes de determinación también muestran buenos resultados (R^2 cercanos a la unidad).

4.2 Modelo de daño por fatiga para mezclas asfálticas

Para la obtención de los parámetros señalados en la Tabla 4 y elaboración de Figuras 3 y 4 se utilizaron las ecuaciones 1 a 4 señaladas en párrafos anteriores.

Los ensayes de fatiga se realizaron de acuerdo a lo estipulado en el procedimiento AASHTO T321, el módulo de rigidez inicial de la mezcla corresponde al obtenido en el ciclo 50 y el módulo de rigidez a la falla es el clásico, que corresponde a la disminución del módulo de rigidez inicial en un 50%.

La Figura 3 ilustra el comportamiento de una mezcla asfáltica en estudio y los ajustes en la reducción del módulo de rigidez a la flexión obtenidos con la metodología Calme. Es necesario señalar que el nivel de microdeformación de referencia utilizado corresponde a 100 $\mu\varepsilon$ los cuales son valores que suelen presentarse con facilidad en mezclas asfálticas en operación. El módulo de rigidez a la flexión mínimo utilizado es considerando la recomendación que hace la metodología Calme, en este caso $E_{mín}$ de 200 MPa, que corresponde a valores de mezclas ya muy dañadas (similares a módulos en suelos). Se puede observar en la Figura 3 que los datos de laboratorio y los del modelo Calme prácticamente son idénticos.

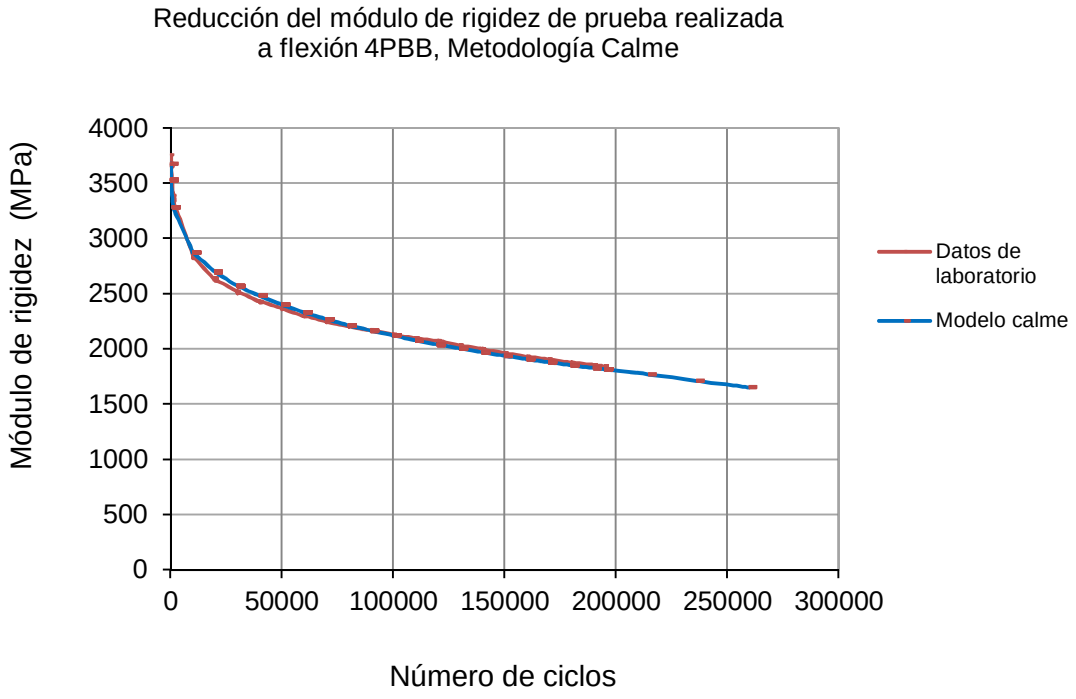

Figura 3. Aplicación de metodología Calme en los ajustes de reducción de módulos de rigidez.

Todos los ajustes se hicieron utilizando la herramienta de excel denominada solver para lograr la optimización. Los valores de los parámetros mostrados en la Tabla 4 corresponden a las siete mezclas en estudio, considerando las 25 vigas ensayadas a flexión y cargadas en cuatro puntos. Las pruebas a flexión se realizaron de acuerdo al procedimiento AASHTO T 321, a diferentes niveles de deformación, 300, 400, 500, 650 y 700 microdeformaciones, a una sola temperatura de 20 °C y con una onda sinusoidal con una frecuencia de 10 Hz.

Tabla 4. Parámetros del modelo de daño por fatiga en las mezclas asfálticas obtenidas con Calme.

Mezcla asfáltica	α_0	α_1	**A**	β	γ	δ	$\mu\varepsilon_{ref}$	**E_{ref} MPa**
IMT AC20	-0.451	-0.030	392245	-6.405	0.317	-0.854	100	3000
AM	-0.732	-0.030	62346	-4.939	0.621	-0.854	100	3000
AM1	-0.844	-0.030	58562354	-7.376	2.586	-0.854	100	3000
AM2	-0.501	-0.030	25538	-5.009	-0.520	-0.854	100	3000
AM3	-1.089	-0.030	279828	-2.277	5.477	-0.854	100	3000
S12	-0.654	-0.030	1307102	-6.229	0.822	-0.854	100	3000
S20	0.068	-0.030	5156973	-8.247	-5.491	-0.854	100	3000

Los errores obtenidos para la obtención de los parámetros (Tabla 4) por tipo de mezcla van desde un mínimo de 1.13% hasta un máximo de 3.45% con un promedio general de 2.24 %. Dichos valores indican el buen desempeño de las mezclas en sus diferentes tipos cuando son analizadas bajo la metodología Calme. La mayoría de las pruebas fueron realizadas hasta que el módulo de rigidez a la flexión inicial se reducía hasta el 50 %, correspondiendo este punto al N_{f50} el cual en la literatura enuncian como la falla del elemento. Hubo algunos otros en donde el ensayo se prolongó hasta más del N_{f50}, de tal manera que se llegó realmente a la fase tres que corresponde a la etapa en que existe agrietamiento severo y como tal la falla del elemento. La Figura 4 muestra el caso en donde la metodología Calme sólo se ajustó considerando la falla tradicional. Parece que los ajustes con la metodología Calme indican que la vida a la fatiga va más allá del número de repeticiones esperadas con el N_{f50}.Los valores para α_1 son los mismos debido a que la temperatura permanece constante (20 °C), El módulo de referencia E_{ref} de 3000 MPa corresponde con los valores típicos de las mezclas ensayadas y el valor de δ corresponde al valor mínimo considerado (200 MPa).

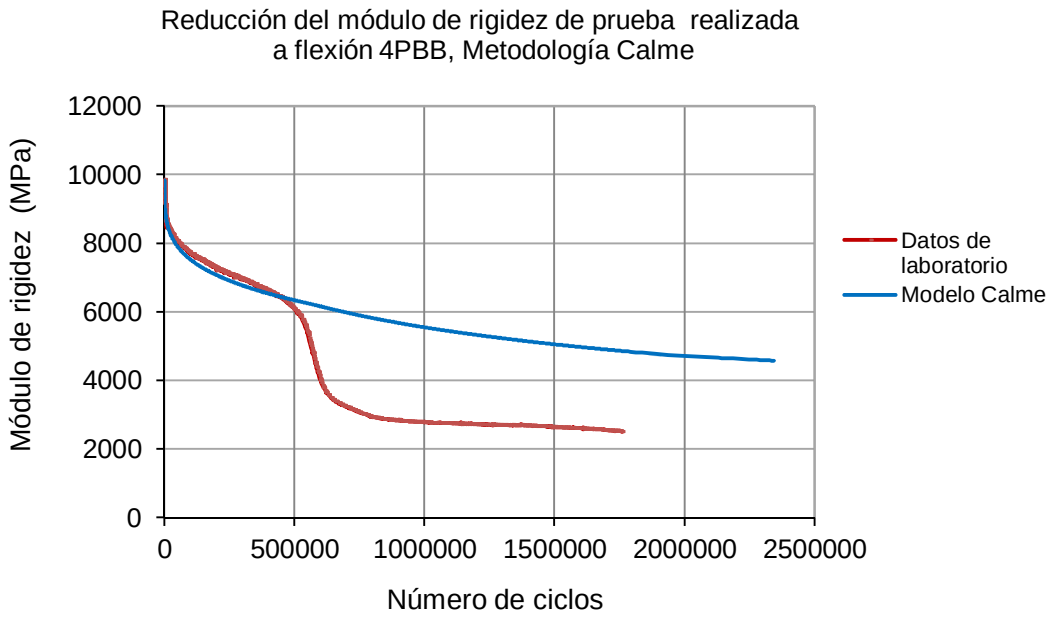

Figura 4 Ajustes en la reducción del módulo de rigidez, Metodología Calme.

Es evidente que en la Figura 4 el elemento falló y el escalón corresponde al acomodo interno de la mezcla asfáltica. El ajuste se realizó considerando la disminución hasta el 50 % respecto al valor inicial.

Existen más modelos considerados en la metodología Calme que serán contemplados para etapas posteriores, pues en su momento se realizarán ensayos en campo utilizando el HVS (Heavy Vehicle Simulator) así como Deflectómetro de Impacto (FWD) pues en México se está tratando de implementar metodologías Empírico-Mecanicista Recursivo Incremental como la señalada por Calme. Lo anterior es con el fin de que mejore el comportamiento y desempeño de las carreteras del país y hacer nuevas metodologías de diseño de pavimentos.

4.3 Predicción del número de repeticiones ε_6 para las mezclas estudiadas

Los ensayes de fatiga en vigas cargadas en cuatro puntos de acuerdo a AASHTO T 321, se realizaron para diferentes niveles de microdeformaciones 300, 400 500, 650 y 700 $\mu\varepsilon$ (microdeformaciones) como se aprecia en la Figura 5. También se muestran las ecuaciones

obtenidas al realizar los ajustes correspondientes. Es evidente que es necesario realizar más ensayes en las diferentes mezclas ensayadas para obtener expresiones que definan aún mejor el comportamiento de las mezclas mencionadas. Aunque si vale señalar que los coeficientes son muy similares a los que muestran autores que han trabajado con pruebas de fatiga. Especialmente el parámetro k_2 que toma valores principalmente entre -4.0 y -6.0. En la Tabla 5 se presentan los valores de ε_6 para las mezclas estudiadas. El valor de ε_6 promedio corresponde a 329 $\mu\varepsilon$ (microdeformaciones).

La expresión obtenida corresponde con la ecuación clásica que define el comportamiento a fatiga.

$$N_f = k_1 \varepsilon^{k_2} \qquad (6)$$

Donde:

N_f= número de repeticiones esperadas

k_1 y k_2 = parámetros de ajuste (del material)

ε = nivel de microdeformaciones

En la Figura 5 se aprecia cómo evoluciona la fatiga de acuerdo a las microdeformaciones impuestas durante el ensayo. Se observa que prácticamente todos los resultados corresponden a una familia de curvas que si no tienen la misma pendiente, de alguna manera presentan un comportamiento similar pues los módulos de rigidez inicial son muy parecidos, y en consecuencia es de esperar que independientemente de si la mezcla asfáltica es modificada o no soporten el similares niveles de microdeformaciones para el caso de ε_6. Lo anterior, podría atribuirse a que los agregados son muy parecidos y que contienen prácticamente la misma granulometría (tamaño nominal máximo de 19 mm). La mezcla AC20 con la expresión obtenida requeriría una aplicación de 343 $\mu\varepsilon$ para que soporte un millón de aplicaciones, en cambio la AM1 requeriría de 372 $\mu\varepsilon$. Cabe señalar que la mezcla S12 presenta la menor pendiente.

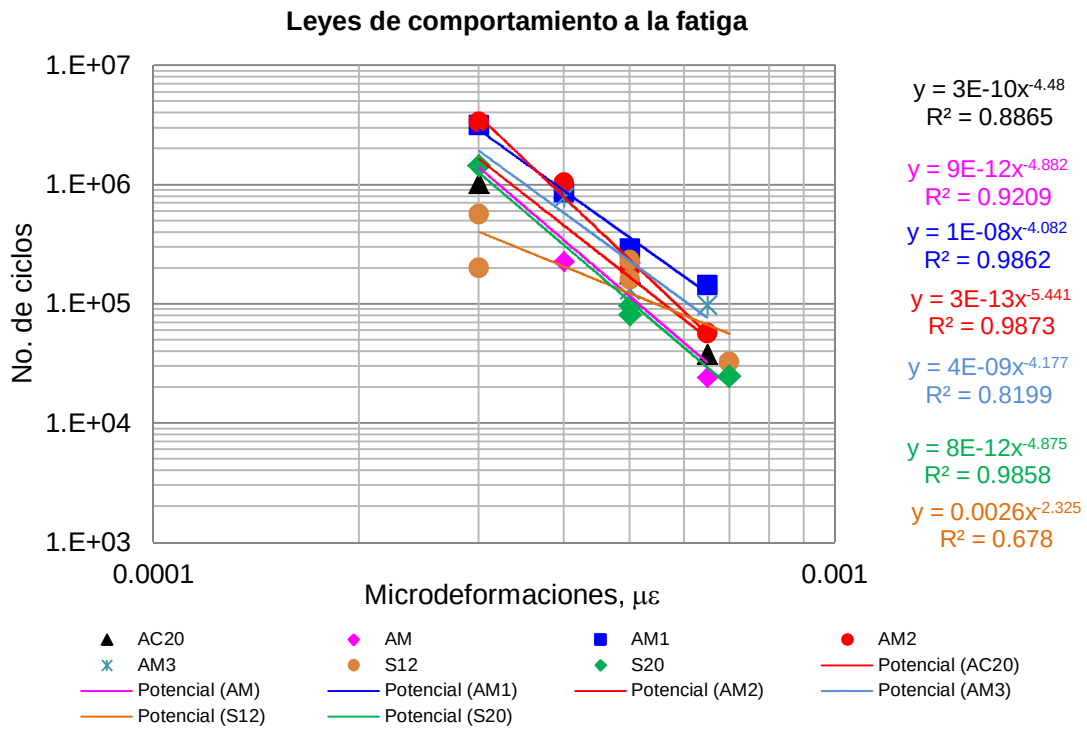

Figura 5 Evolución de la deformación con el número de ciclos.

Tabla 5. Valor de la magnitud de la microdeformación para ε_6.

	Ecuación	**Predicción ε_6 ($1E^{-06}$)**
AC20*	$3E\text{-}10\ x^{-4.48}$	342.8
AM	$9E\text{-}12\ x^{-4.882}$	322.4
AM1	$1E\text{-}08\ x^{-4.082}$	**371.7**
AM2	$3E\text{-}13\ x^{-5.441}$	394.1
AM3	$4E\text{-}09\ x^{-4.177}$	357.3
S12	$0.0026\ x^{-2.32}$	203
S20	$8E\text{-}12\ x^{-4.875}$	311.1
	promedio	329

*Mezcla de referencia.

Conclusiones

Con los análisis efectuados se evidencia que la metodología Calme permite realizar los ajustes en la reducción de los módulos de rigidez de las mezclas asfálticas, independientemente del nivel de microdeformaciones a la cual se haya realizado el ensaye así como el tipo de mezcla del que se trate.

Los parámetros obtenidos presentan buen comportamiento pues los valores de dispersión, error promedio obtenido, se consideran aceptables considerando que son diferentes mezclas con diferente cemento asfáltico e incluso modificando ligeramente la granulometría como es el caso de las muestras S12 y S20

Es necesario realizar mayor investigación con el fin de profundizar en el comportamiento de mezclas asfálticas e implementar las metodologías con daño recursivo-incremental en México para mejorar el diseño de pavimentos.

Referencias

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice. AASHTO, Washington, D.C., 2008.

ASTM D7460-10. Standar Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending.

Di Benedetto, H., De La Roche, C., Baaj, H., Pronk, A., & Lundström, R. Fatigue of bituminous mixtures. Materials and Structures, 2004, vol. 37(3), p. 202-216. http://dx.doi.org/10.1007/BF02481620

European Commission. COST 333 ñDevelopment of New Bituminous Pavement Design Methodò Final Report of the Action. European Commission, Directorate General Transport, Brussels, 1999.

Hopman P C, Kunst PAJC, & Pronk AC. A renewed interpretation method for fatigue measurements, verification of Minerôs Rule. In: 4th Eurobitumen Symposium in Madrid, 1989, vol. 1, p. 557-561.

Mateos M A, Pérez A J, Cadavid J B y Marrón F J, (2011) ñAplicación del Método Recursivo Incremental CalME a la Evaluación del Estado Estructural de los Pavimentos Bituminososò Ingeniería Civil 164/2011.

Pronk AC y Hopman P C. Energy dissipation: The leading factor of fatigue, highway research: sharing the benefits. In: Proceedings of the Conference, the United States Strategic Highway Research Program, London, 1990. p. 225-237.

Prowell, B., Brown, E., Anderson, R. M., Swamy, J. S. D. A. K., Von Quintus, H., Shen, S., & Maghsoodloo, S. Validating the fatigue endurance limit for hot mix asphalt. NCHRP Report 646. Transportation Research Board, National Academies of Sciences, 2010.

Rowe, G. M. Performance of asphalt mixtures in the trapezoidal fatigue test. Asphalt Paving Technology, 1993, vol. 62, p. 344-346.

Rowe, G. M., & Bouldin, M. G. ñImproved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixturesò In: Proceedings of 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress, Barcelona, 2000, vol. 1, p. 754-763.

Shen, S., Airey, G. D., Carpenter, S. H., & Huang, H. A dissipated energy approach to fatigue evaluation. Road Materials and Pavement Design, 2006, vol. 7(1), p. 47-69.

Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt (HMA) AASHTO Designation TP 62-07.

Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending, AASHTO Designation T 321-07.

Tsai, B. W., Harvey, J. T., & Monismith, C. L. High Temperature Fatigue and Fatigue Damage Process of Aggregate-Asphalt Mixes. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002, vol. 71, p. 345-385.

Tsai, B. W., Harvey, J. T., & Monismith, C. L. Using the three-stage Weibull equation and tree-based model to characterize the mix fatigue damage process. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2005, vol. 1929, no 1, p. 227-237.

Ullidtz P., Harvey J., Basheer I., Jones D.,Wu R., Lea J. y Lu Q. (2010). ñCalME: A New Mechanistic-EMpirical Design Program for Flexible Pavement Rehabilitationò TRB 2010, Annual Meeting CD-ROM.

Ullidtz P., Harvey J., Tsai B y Monismith C. (2006). ñCalibration of incremental-Recursive Flexible Damage Models in CalME Using HVS Experiments. Prepared by: University of California, Pavement Research Center.

Wu R., Signore J. M. y Harvey J.(2010). ñSummary of SPTC Pooled-Fund Study for Sharing and Evaluation of CalME Flexible Pavement Design Softwareò Prepared by University of California, Pavement Reserch Center.