

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

PROYECTO: LM-PI-UMP-019-R1

EVALUACIÓN DE RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO POR FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL ENFOQUE DE ENERGÍA DISIPADA

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
Enero, 2014

Documento generado con base en el Art. 6, inciso g) de la Ley 8114 y lo señalado en el Cap. IV, Art. 66 Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT.

Preparado por: Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-
LanammeUCR jose.aguiar@ucr.ac.cr



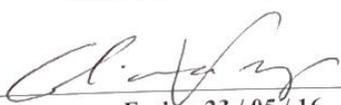
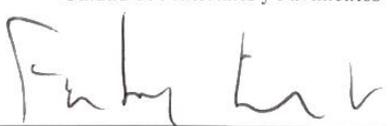
1. Informe LM-PI-UMP-019-R1	2. Copia No. 1	
3. Título y subtítulo: EVALUACIÓN DE RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO POR FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL ENFOQUE DE ENERGÍA DISIPADA	4. Fecha del Informe ENERO, 2014	
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen <p><i>Uno de los retos para la metodología de diseño mecanístico-empírica ha sido el desarrollo de modelos adecuados para la predicción de la resistencia al agrietamiento por fatiga, uno de los principales modos de falla de los pavimentos flexibles. Tradicionalmente, el comportamiento a fatiga ante cargas repetitivas ha sido representado ajustando una curva del número de repeticiones a la falla para diferentes niveles de esfuerzo o deformación. Sin embargo, este enfoque requiere de constante calibración, ya que la relación entre el número de ciclos a la falla y la respuesta estructural no es única, sino que depende además de las propiedades de los materiales y el modo de carga. El enfoque de energía disipada se basa en el cálculo de una propiedad fundamental (denominada PV) para la determinación de la resistencia a la fatiga, creando una relación única independiente de estas variables. En esta investigación se utilizaron datos históricos del ensayo de fatiga a flexotracción para validar la relación entre el PV y el número de ciclos a la falla y se evaluaron varios modelos para la predicción de este parámetro. Finalmente, se propuso una ecuación simplificada para el cálculo de la resistencia a la fatiga que puede ser aplicada al diseño estructural de pavimentos. Este trabajo se limitó a los datos correspondientes a ensayos realizados a 20°C, pero de contar con más información la metodología puede ser ampliada para incluir el efecto de la temperatura.</i></p>		
10. Palabras clave fatiga, energía disipada, mezcla asfáltica	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 28
13. Preparado por: Ing. Adriana Vargas Nordebeck, Ph.D. Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 23 / 05 / 16		
14. Revisado por: Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D. Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 23 / 05 / 16	15. Revisado por: Ing. Fabricio Leiva Villacorta, Ph.D. Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 23 / 05 / 16	16. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria Salazar, Ph.D. Coordinador General PITRA  Fecha: 23 / 05 / 16

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
RESUMEN EJECUTIVO	5
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 OBJETIVO GENERAL	6
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
1.3 MARCO TEÓRICO	7
<i>1.3.1 ANTECEDENTES EN COSTA RICA</i>	<i>9</i>
<i>1.3.2 CONCEPTO DE ENERGÍA DISIPADA</i>	<i>11</i>
2. METODOLOGÍA Y ALCANCE.....	13
2.1 RECOLECCIÓN DE DATOS	13
2.2 CONTROL DE CALIDAD	14
2.3 CÁLCULO DEL PV	15
2.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	18
3. RESULTADOS	18
3.1 RELACIÓN PV-N _F	18
3.2 MODELO DE PREDICCIÓN DE PV	20
3.3 APLICACIÓN AL DISEÑO DE PAVIMENTOS	24
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	26
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ENSAYO DE FATIGA A FLEXOTRACCIÓN: A) ESQUEMA Y B) EQUIPO (2)	6
FIGURA 2. CURVA TÍPICA DE FATIGA A FLEXOTRACCIÓN (2)	8
FIGURA 3. MODELOS PRELIMINARES DE FATIGA DESARROLLADOS PARA MEZCLAS DE COSTA RICA (3)	10
FIGURA 4. CURVA DE HISTÉRESIS ESFUERZO-DEFORMACIÓN (7).....	12
FIGURA 5. CURVA RDEC TÍPICA CON TRES ZONAS DE COMPORTAMIENTO (10).....	13
FIGURA 6. EJEMPLO DE CURVA DE ENERGÍA DISIPADA VERSUS NÚMERO DE CICLOS DE CARGA PARA RESULTADOS A) DESEABLES Y B) ELIMINADOS DEL ANÁLISIS.....	15
FIGURA 7. GRÁFICA TÍPICA DE DATOS CRUDOS DE RDEC VERSUS EL NÚMERO DE CICLOS DE CARGA (7)	16
FIGURA 8. EJEMPLO DE CURVA DE-LC AJUSTADA (7)	16
FIGURA 9. RELACIÓN PV-NF PARA MEZCLAS DE COSTA RICA A 20°C	19
FIGURA 10. COMPARACIÓN ENTRE PV CALCULADO Y PV MEDIDO EN EL ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN	20
FIGURA 11. COMPARACIÓN ENTRE PV DEL MODELO (ECUACIÓN 11) Y PV MEDIDO EN EL ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN	21
FIGURA 12. MODELOS DE FATIGA AJUSTADOS UTILIZANDO EL ENFOQUE DE ENERGÍA DISIPADA.....	24
FIGURA 13. COMPARACIÓN ENTRE N_F CALCULADO (ECUACIÓN 17) Y N_F MEDIDO EN EL ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN	25
FIGURA 14. COMPARACIÓN ENTRE N_F CALCULADO (ECUACIÓN 18) Y N_F MEDIDO EN EL ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN	26

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.MODELOS DESARROLLADOS PARA LA PREDICCIÓN DE PV	23
--	----

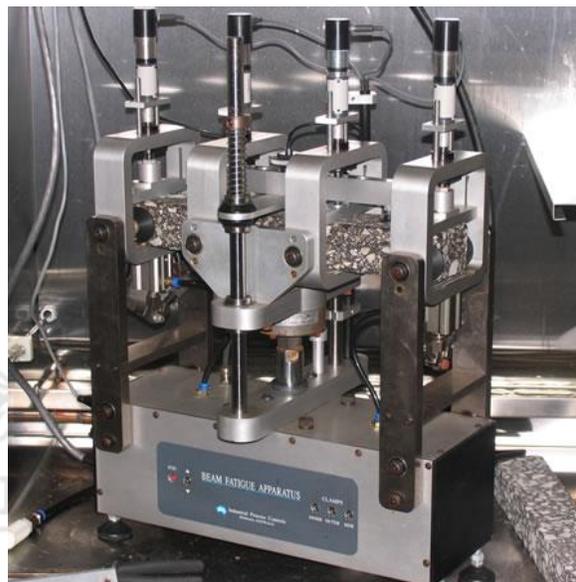
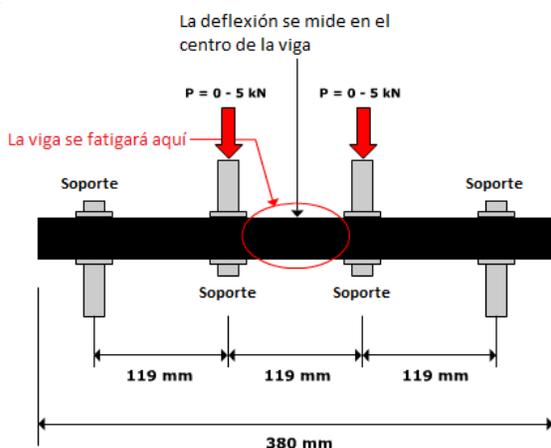
RESUMEN EJECUTIVO

Uno de los retos para la metodología de diseño mecánico-empírica ha sido el desarrollo de modelos adecuados para la predicción de la resistencia al agrietamiento por fatiga, uno de los principales modos de falla de los pavimentos flexibles. Tradicionalmente, el comportamiento a fatiga ante cargas repetitivas ha sido representado ajustando una curva del número de repeticiones a la falla para diferentes niveles de esfuerzo o deformación. Sin embargo, este enfoque requiere de constante calibración, ya que la relación entre el número de ciclos a la falla y la respuesta estructural no es única, sino que depende además de las propiedades de los materiales y el modo de carga. El enfoque de energía disipada se basa en el cálculo de una propiedad fundamental (denominada PV) para la determinación de la resistencia a la fatiga, creando una relación única independiente de estas variables. En esta investigación se utilizaron datos históricos del ensayo de fatiga a flexotracción para validar la relación entre el PV y el número de ciclos a la falla y se evaluaron varios modelos para la predicción de este parámetro. Finalmente, se propuso una ecuación simplificada para el cálculo de la resistencia a la fatiga que puede ser aplicada al diseño estructural de pavimentos. Este trabajo se limitó a los datos correspondientes a ensayos realizados a 20°C, pero de contar con más información la metodología puede ser ampliada para incluir el efecto de la temperatura.

1. INTRODUCCIÓN

El agrietamiento por fatiga es uno de los principales modos de falla de los pavimentos flexibles. Este tipo de falla generalmente inicia en el extremo inferior de la capa asfáltica debido a la acumulación del daño provocado por las altas deformaciones sufridas bajo la aplicación de cargas repetitivas. La grieta se propaga y eventualmente aparece en la superficie conforme se continúan aplicando las cargas (1).

La resistencia al agrietamiento por fatiga está influenciada por las propiedades de los materiales de la mezcla asfáltica, así como por factores estructurales del pavimento. A nivel de laboratorio, la evaluación de la resistencia a la fatiga se concentra en los aspectos relacionados con las propiedades de los materiales. Existen diversos protocolos de ensayo utilizados para determinar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica al agrietamiento, de los cuales el más común es el ensayo a flexotracción, mostrado en la Figura 1. Esta prueba fue diseñada para simular la flexión experimentada por la capa asfáltica en una estructura de pavimento. Los resultados relacionan el número de ciclos a la falla con el nivel de deformación unitaria o esfuerzo aplicado.



(a)

(b)

Figura 1. Ensayo de fatiga a flexotracción: a) Esquema y b) Equipo (2)

El análisis tradicional de los resultados del ensayo de flexotracción tiene la desventaja de no presentar una relación única entre la resistencia al agrietamiento por fatiga (representada por el número de ciclos a la falla) y el nivel de deformación o esfuerzo aplicado, ya que esta depende además de las propiedades de la mezcla, lo cual requiere de una calibración para cada tipo de material estudiado. Adicionalmente, el ensayo presenta una alta variabilidad, lo cual dificulta la interpretación de los resultados.

A partir de estas desventajas, han surgido otros enfoques para la evaluación de la resistencia a la fatiga que buscan uniformizar los parámetros para distintos tipos de materiales y representar de forma más precisa el desempeño en el campo. Uno de estos enfoques se basa en el concepto de energía disipada, la cual puede ser calculada a partir de los datos obtenidos del ensayo de flexotracción.

1.1 Objetivo general

El objetivo principal de este estudio fue utilizar el concepto de energía disipada para caracterizar la resistencia al agrietamiento por fatiga de mezclas asfálticas de Costa Rica.

1.2 Objetivos específicos

- Desarrollar una relación entre el parámetro basado en la energía disipada y el número de ciclos a la falla obtenidos a partir del ensayo de fatiga a flexotracción.
- Identificar las propiedades de la mezcla que afectan significativamente el parámetro basado en la energía disipada y desarrollar un modelo para la predicción del parámetro en función de estas propiedades.

1.3 Marco teórico

La evaluación del comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas en el laboratorio se realiza comúnmente mediante el ensayo de flexotracción. Este ensayo aplica cargas sinusoidales a una frecuencia de 5 a 10 Hz en los puntos tercios de un espécimen prismático (viga) acondicionado a una temperatura de 20°C, hasta alcanzar la falla. La carga aplicada produce un momento flector constante en el tercio central del espécimen. Cada ciclo incluye una carga aplicada en la dirección opuesta, forzando el espécimen a regresar a su posición original. El ensayo puede realizarse a un nivel de esfuerzo constante o a deformación constante. Para ensayos donde el esfuerzo es controlado, la falla ocurre cuando el espécimen se agrieta, mientras que cuando la deformación es controlada, el criterio de falla corresponde a una disminución del 50% de la rigidez de la viga con respecto a la rigidez inicial, medida a los 50 ciclos. El número de ciclos a la falla (N_f) es un indicador de la resistencia al agrietamiento de la mezcla.

La caracterización de la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas permite desarrollar modelos para la predicción del desempeño de los pavimentos flexibles. Típicamente estos modelos relacionan los esfuerzos o deformaciones en la capa asfáltica con el número de repeticiones a la falla, combinando la observación fenomenológica y los datos obtenidos de ensayos de laboratorio. La Figura 2 muestra una curva típica del comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas. A través de los años los investigadores han desarrollado diversos modelos matemáticos para predecir este comportamiento, sin que ninguno de ellos se haya adoptado de manera definitiva para el diseño de pavimentos. Además, cualquiera de los modelos propuestos deber ser calibrado para las condiciones específicas en las cuales se desea aplicar, requiriéndose un minucioso proceso de observación y procesamiento de datos.

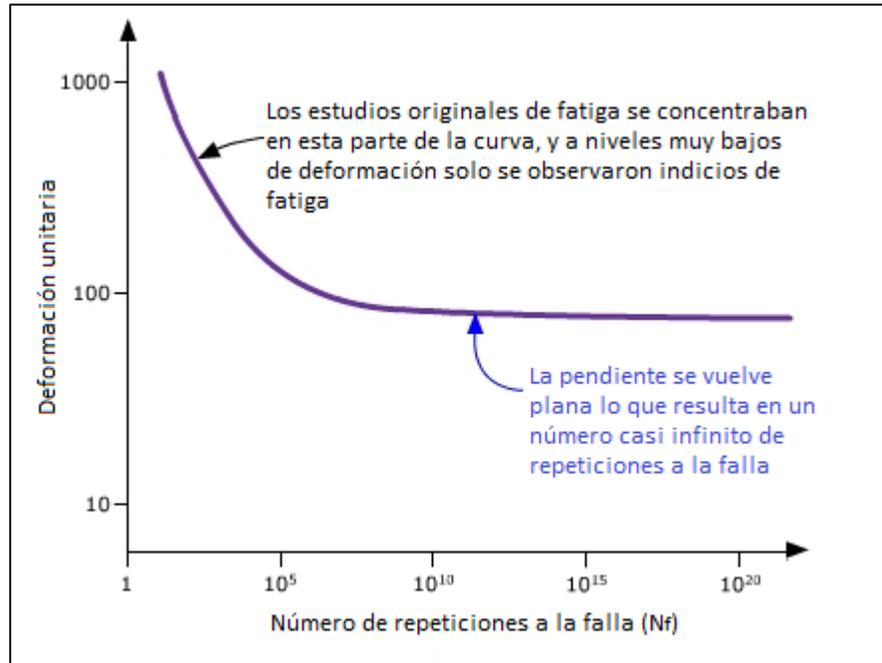


Figura 2. Curva típica de fatiga a flexotracción (2)

Los modelos más simples y más ampliamente utilizados se muestran en las Ecuaciones 1 y 2.

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{k_2} \quad \text{Ecuación 1.}$$

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{k_2} \quad \text{Ecuación 2.}$$

donde:

N_f = número de repeticiones a la falla

ε (o σ) = deformación unitaria (o esfuerzo) aplicado

k_1 , k_2 = coeficientes de regresión obtenidos experimentalmente

Otros modelos incluyen además propiedades de los materiales, tales como rigidez o módulo, y parámetros volumétricos (contenido de asfalto, contenido de vacíos, vacíos llenos de asfalto, etc.). Sin embargo, el uso del parámetro N_f como indicador de la resistencia a la fatiga no provee una explicación clara del mecanismo de falla de la mezcla, ni una relación fundamental entre las propiedades del material y los efectos de la carga.

1.3.1 Antecedentes en Costa Rica

Desde hace varios años, el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) ha realizado ensayos de fatiga a flexotracción con muestras representativas de mezclas asfálticas típicas de Costa Rica con el fin de calibrar o desarrollar modelos para predecir la resistencia al agrietamiento por fatiga. Aguiar y Loría (3) utilizaron resultados de tanto mezclas de campo como mezclas remoldeadas en el laboratorio de varias plantas productoras de mezcla asfáltica para estimar N_f , tomando como referencia un modelo similar al propuesto por Finn et al. (4):

$$N_f = k_1 \varepsilon^{-k_2} S^{-k_3} \quad \text{Ecuación 3.}$$

donde:

ε = deformación unitaria

S = rigidez de la mezcla asfáltica

k_1, k_2, k_3 = coeficientes de regresión obtenidos experimentalmente

Adicionalmente, se estudiaron modelos que incorporaron los parámetros vacíos de aire en la mezcla (V_a) y tensión diametral (TD) en la Ecuación 3. En la Figura 3 puede observarse como los modelos obtenidos difieren significativamente de otros modelos internacionales utilizados ampliamente para el diseño de pavimentos, como los desarrollados por el Instituto del Asfalto y Shell. Dichos modelos sobreestimaron los ciclos de carga necesarios para llevar las muestras a la falla, lo cual recalca la importancia de realizar calibraciones o desarrollar nuevas ecuaciones que permitan una mejor estimación del desempeño.

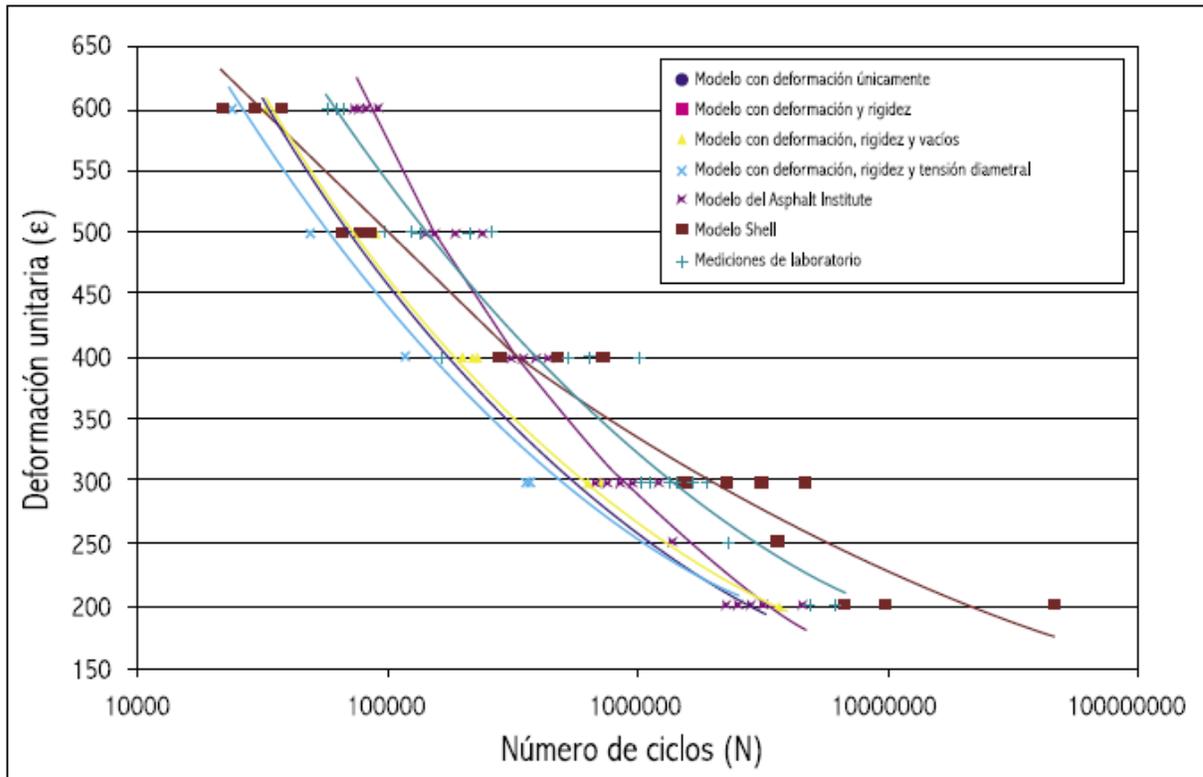


Figura 3. Modelos preliminares de fatiga desarrollados para mezclas de Costa Rica (3)

Elizondo y Jiménez (6) utilizaron muestras de 13 mezclas asfálticas provenientes de 5 zonas distintas del país para generar modelos de regresión con base en el modelo de Finn et al. (Ecuación 3) y una ecuación de la forma:

$$N_f = k_1 (\varepsilon_t)^{k_2} (E^*)^{k_3} (\%Asf)^{k_4} (\%Va)^{k_5} \quad \text{Ecuación 4.}$$

donde:

ε_t = deformación unitaria

E^* = módulo dinámico de la mezcla asfáltica

$\%Asf$ = porcentaje de asfalto

$\%Va$ = porcentaje de vacíos de aire

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 = coeficientes de regresión obtenidos experimentalmente

Se determinó que de los dos modelos, la Ecuación 4 proporciona un mejor ajuste (R^2 ajustado = 0.90) y que además, el parámetro E^* no necesariamente debe ser medido del ensayo de módulo dinámico, sino

que también puede ser estimado a partir de propiedades de la mezcla asfáltica (vacíos de aire, porcentaje pasando la malla No. 8) y temperatura. Sin embargo se observó que los coeficientes de regresión estimados varían significativamente de acuerdo al tipo de mezcla.

1.3.2 Concepto de energía disipada

Ante la aplicación de cargas cíclicas a un material, parte de la energía empleada es recuperada y otra parte es disipada en forma de trabajo mecánico, generación de calor, o daño. Para cargas cíclicas en un material lineal viscoelástico, la energía disipada en un ciclo dado puede calcularse mediante la Ecuación 5:

$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \phi_i \quad \text{Ecuación 5.}$$

donde:

W_i = energía disipada en el ciclo i

σ_i = nivel de esfuerzo en el ciclo i

ε_i = nivel de deformación en el ciclo i

ϕ_i = ángulo de fase en el ciclo i

De manera gráfica, la energía disipada es representada por el área dentro de la curva de histéresis, formada por la relación entre esfuerzo y deformación para cada ciclo de carga y descarga, como se muestra en la Figura 4. El daño por fatiga está relacionado con la energía disipada en el espécimen durante el ensayo (5).

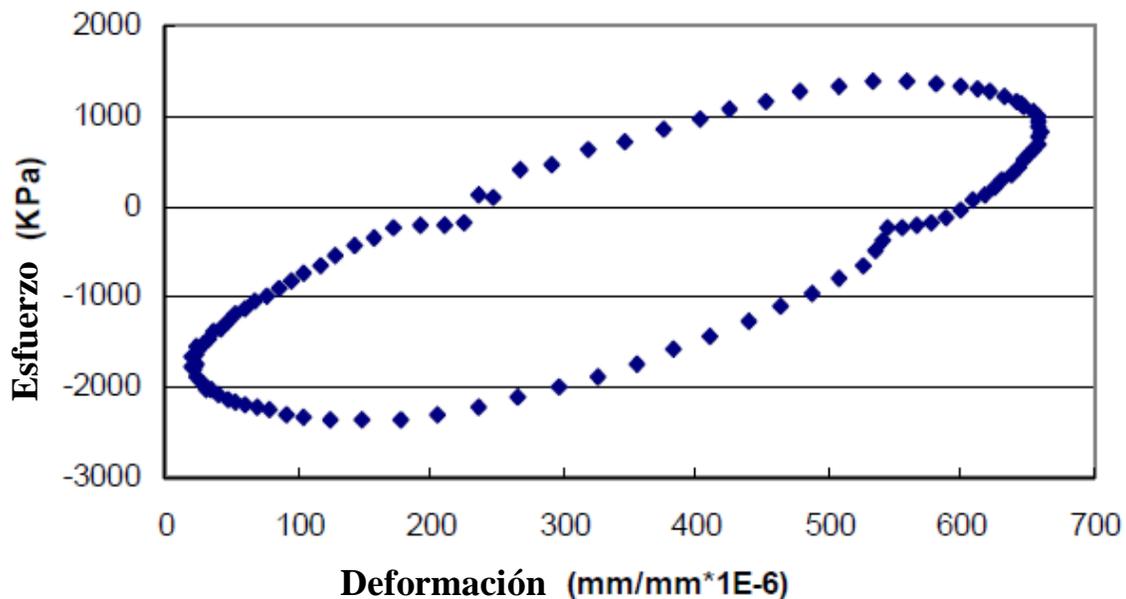


Figura 4. Curva de histéresis esfuerzo-deformación (7)

El parámetro W_i puede incluir energía disipada a través de comportamientos pasivos, tal como energía térmica, la cual no contribuye a la propagación de la grieta y no debe considerarse para la determinación de la falla por fatiga (8). Ghuzlan y Carpenter (9) propusieron el concepto de razón de cambio de la energía disipada (RDEC, por sus siglas en inglés) para definir la falla por fatiga en mezclas asfálticas. Este principio elimina la energía disipada asociada a los mecanismos que no producen daño al comparar solamente el cambio de energía entre ciclos consecutivos. La razón de cambio está dada por la Ecuación 6:

$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} \quad \text{Ecuación 6.}$$

donde:

$RDEC$ = razón de cambio de la energía disipada por ciclo de carga

DE_n = energía disipada producida en el ciclo de carga n, kPa

DE_{n+1} = energía disipada producida en el ciclo de carga n+1, kPa

La curva de daño representada por el $RDEC$ vs. el número de ciclos de carga puede dividirse en tres etapas (9, 10). La Figura 5 muestra una curva típica de $RDEC$ en la que puede observarse como inicialmente la razón de cambio disminuye rápidamente hasta desarrollar un valor constante. Este

plano (etapa II) indica un periodo en el cual hay un porcentaje relativamente constante de energía aplicada siendo convertida en daño y se extiende a través de la vida de servicio del material hasta alcanzar un aumento dramático en *RDEC*, el cual es una señal de falla verdadera (etapa III).

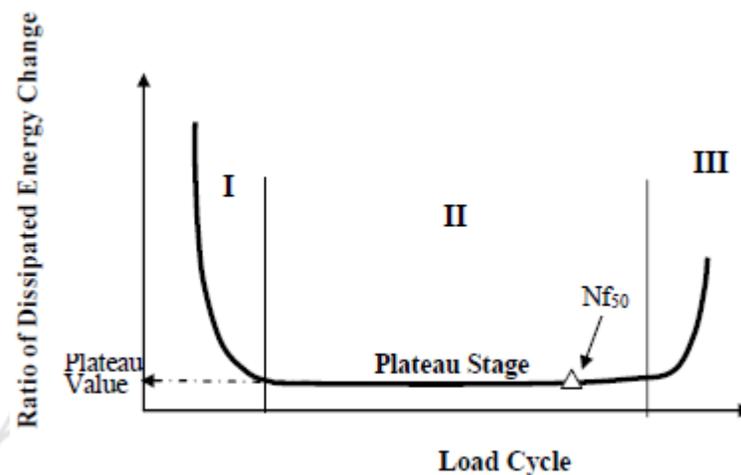


Figura 5. Curva RDEC típica con tres zonas de comportamiento (10)

En la etapa II puede distinguirse un "valor de plano" (PV por sus siglas en inglés), definido como el valor de *RDEC* que corresponde al ciclo donde se alcanza una reducción del 50% en la rigidez (criterio de falla tradicional). El parámetro PV es significativo porque tiene una relación única con la resistencia a la fatiga para diferentes mezclas, modos y niveles de carga (9).

2. METODOLOGÍA Y ALCANCE

Para cumplir con los objetivos planteados se utilizaron datos históricos obtenidos del ensayo de fatiga a flexotracción, de acuerdo a la norma AASHTO T 321, *Método estándar para la determinación de la vida a fatiga de especímenes compactados mediante la aplicación de cargas cíclicas en flexotracción*. Los ensayos se realizaron bajo la condición de deformación constante, para diversos niveles de deformación en un rango de 200 a 800 μ s.

2.1 Recolección de datos

Como primer paso, se procedió a la recolección de datos históricos del ensayo de fatiga a flexotracción. Se lograron recopilar un total de 617 archivos de datos crudos de ensayos realizados en el

Propuesta LM-PI-UMP-019-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 13 de 28
----------------------------	--------------------------------------	-----------------

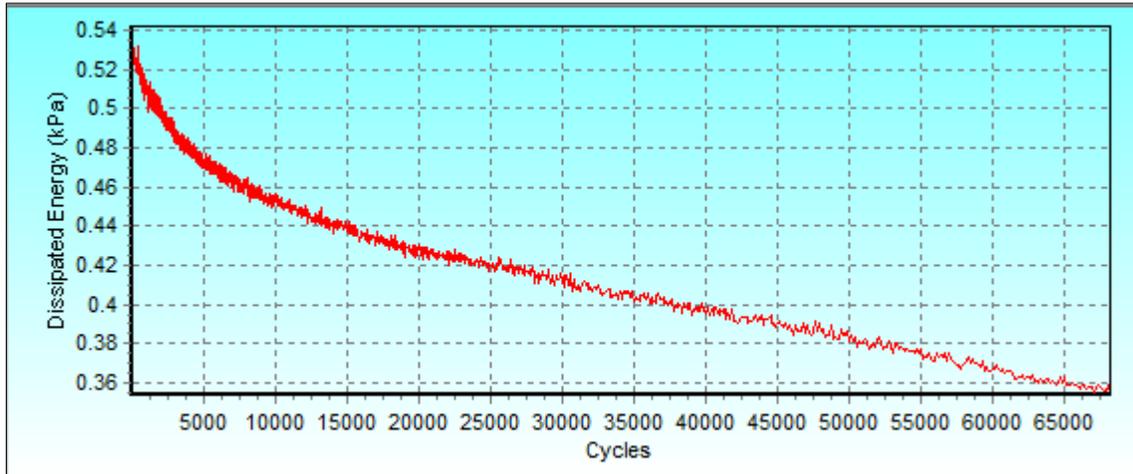
LanammeUCR entre 2004 y 2013. Los datos incluyeron tanto mezclas producidas en laboratorio como mezclas producidas en planta. Cabe mencionar que dentro de las muestras incluidas en este estudio se encuentran mezclas que no han sido de uso tradicional en el país, como mezclas de granulometría abierto o mezclas asfálticas modificadas, pero que fueron producidas con materiales locales y cuya aplicación está permitida en el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2010). En algunos casos fue posible obtener información de las propiedades de la mezcla, pero esta no se encontraba disponible para todas las muestras.

Para esta investigación se utilizaron solamente los resultados de ensayos realizados a una temperatura de 20°C, con un criterio de falla del 50% de reducción de la rigidez con respecto a la rigidez inicial.

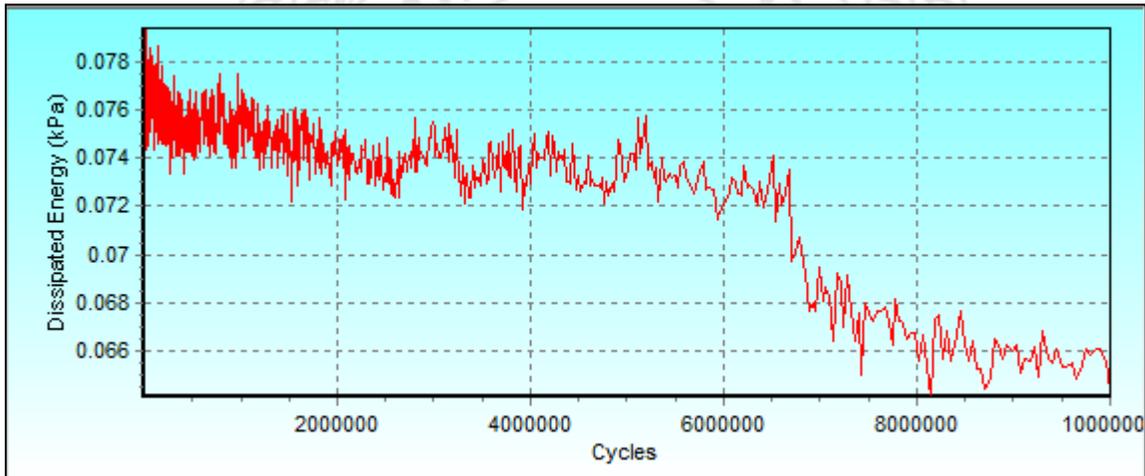
2.2 Control de calidad

Para asegurar la validez de los datos utilizados, se realizó un extenso proceso de control de calidad. Para cada ensayo realizado en el laboratorio se genera un archivo con los datos crudos. En algunas ocasiones puede ocurrir un error durante la prueba y aunque los resultados sean desechados y el ensayo sea repetido, el archivo siempre es almacenado, por lo que el control de calidad fue importante para evitar incluir resultados erróneos dentro del análisis.

El control de calidad se centró en dos aspectos: verificación del criterio de falla N_{50} y revisión de la curva de energía disipada versus ciclos de carga, que como se verá en la siguiente sección, es fundamental para el cálculo del PV. Para el primer punto, se obtuvieron los valores de rigidez inicial y rigidez final y se verificó que la diferencia entre los dos valores fuera de aproximadamente 50%. Por otro lado, la revisión de la curva de energía disipada se hizo de manera visual, buscando que esta tuviera una forma descendente bien definida. Ensayos donde se generaron curvas erráticas no fueron incluidos dentro del análisis. La Figura 6 muestra ejemplos de curvas con tendencias típicas utilizables para el análisis y tendencias erráticas no aptas para esta investigación.



(a)



(b)

Figura 6. Ejemplo de curva de energía disipada versus número de ciclos de carga para resultados a) deseables y b) eliminados del análisis

2.3 Cálculo del PV

El parámetro PV se obtuvo para cada uno de los ensayos válidos de acuerdo al procedimiento descrito por Shen y Carpenter (7). La metodología consiste en los siguientes pasos:

- *Obtener la relación entre la energía disipada y el número de ciclos de carga (curva DE-LC).* Debido al ruido en el ensayo, los datos crudos de energía disipada no son directamente utilizables, pues pueden causar ambigüedad en el cálculo del *RDEC* y PV, como se muestra en la Figura 7. Se recomienda utilizar un procedimiento de ajuste para obtener la ecuación de la curva DE-LC, la cual generalmente está descrita por una relación exponencial, como puede

observarse en la Figura 8. Para mantener consistencia en los resultados, se recomienda utilizar solamente el segmento de la curva DE-LC con el mayor R^2 para obtener la pendiente exponencial, el cual es el parámetro de interés. Generalmente, se elimina la primera parte de la curva y el ajuste se realiza en el segmento restante, que es más relevante y significativo para el desempeño a fatiga en el largo plazo. Sin embargo, el segmento utilizado no debe ser menor que la mitad de la vida de fatiga (N_{f50}) para asegurar que la tendencia de la curva DE-LC es representada adecuadamente.

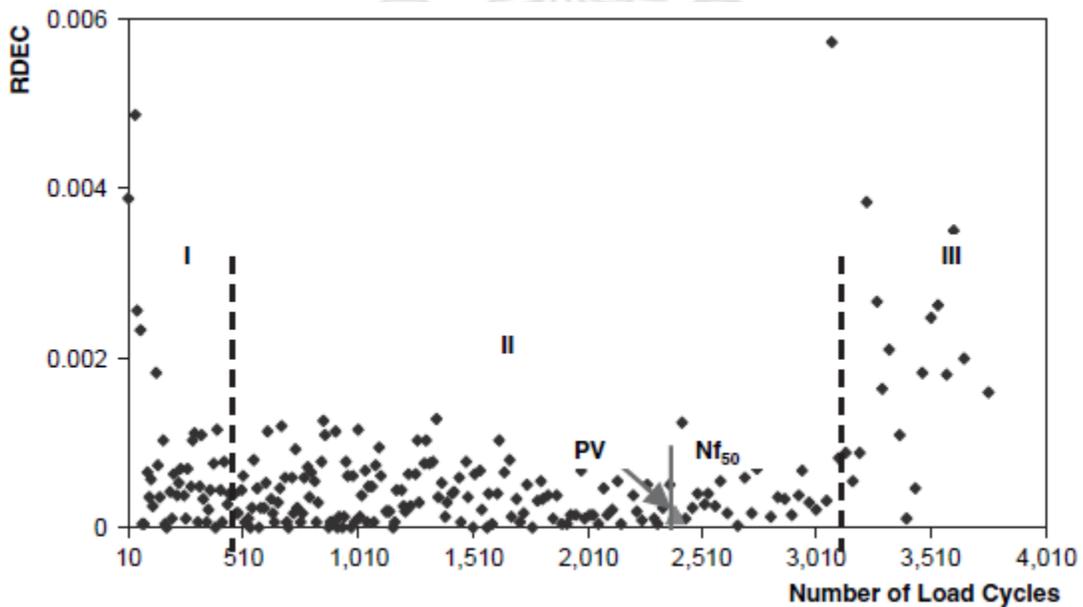


Figura 7. Gráfica típica de datos crudos de RDEC versus el número de ciclos de carga (7)

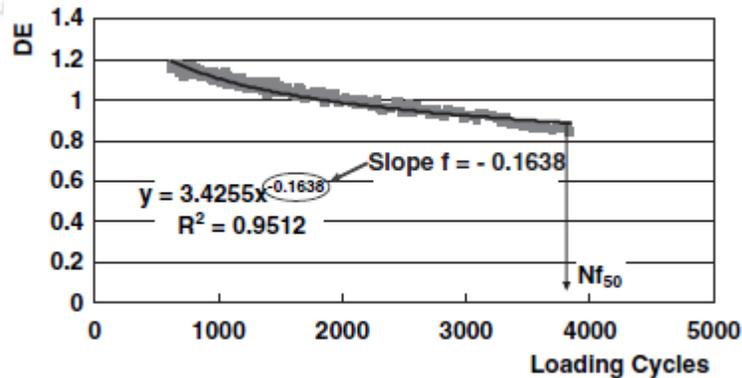


Figura 8. Ejemplo de curva DE-LC ajustada (7)

- *Calcular el RDEC.* Por definición, el RDEC es la razón del cambio en la energía disipada entre dos ciclos de carga, dividida entre el número de ciclos entre ambos puntos. De esta manera, la razón del cambio en la energía disipada promedio por ciclo de carga puede escribirse como:

$$RDEC_a = \frac{DE_a - DE_b}{DE_a * (b - a)} \quad \text{Ecuación 7.}$$

donde:

$RDEC_a$ = razón del cambio en la energía disipada promedio del ciclo a, comparada con el siguiente ciclo b

a, b = ciclos de carga a y b, respectivamente. La cantidad típica de ciclos entre los ciclos a y b para el cálculo de $RDEC$ es de 100 ($b - a = 100$). Cantidades mayores como 1000 o 10000 pueden usarse cuando el cambio en la energía disipada cada 100 ciclos es muy pequeño.

DE_a, DE_b = energía disipada producida en los ciclos de carga a y b, respectivamente

Bajo el supuesto de que la ecuación de la regresión de la curva DE-LC es de la forma exponencial Ax^k , el $RDEC$ promedio a 100 ciclos puede calcularse mediante la Ecuación 8:

$$RDEC_a = \frac{1 - \left(1 + \frac{100}{a}\right)^k}{100} \quad \text{Ecuación 8.}$$

donde k es la pendiente exponencial de la curva DE-LC.

- *Calcular el PV.* En el enfoque de energía disipada, el PV se define como el RDEC en el punto de falla donde se alcanza una reducción del 50% de la rigidez (N_{f50}). El PV puede calcularse utilizando la Ecuación 9:

$$PV = \frac{1 - \left(1 + \frac{100}{N_{f50}}\right)^k}{100} \quad \text{Ecuación 9.}$$

De esta manera, el valor de PV depende solamente de la pendiente exponencial obtenida de la regresión de la curva DE-LC, k, y el punto de falla definido, N_{f50} . Ambos valores pueden obtenerse fácilmente a partir de los datos del ensayo de fatiga a flexotracción.

2.4 Análisis estadístico

Una vez obtenidos los valores de PV para todas las muestras, se llevó a cabo un análisis estadístico para validar la relación entre PV y la resistencia a la fatiga desarrollada por Shen y Carpenter (7). Adicionalmente, utilizando una base de datos reducida, se exploraron diferentes modelos para establecer una relación entre el PV y diferentes propiedades de la mezcla válida para mezclas asfálticas de Costa Rica.

3. RESULTADOS

3.1 Relación PV- N_f

Para desarrollar una relación entre el PV y el número de ciclos a la falla se utilizó la base de datos completa (435 puntos), ya que solamente se requerían los datos crudos de los ensayos de fatiga a flexotracción. Tal y como lo plantearon Shen y Carpenter (7), esta relación es independiente de las propiedades de la mezcla, por lo que en este paso no fue necesario conocer datos adicionales de los materiales.

La Figura 9 muestra la relación entre el PV y la vida de fatiga de las muestras. Puede observarse como los datos siguieron la tendencia esperada y se encuentran muy cercanos a la curva obtenida por Shen y Carpenter. La ecuación de la curva de las mezclas de Costa Rica (Ecuación 10) tiene pendiente e intercepto ligeramente menores que los de la ecuación original, lo cual indica que existe mayor diferencia entre ambas ecuaciones a mayor número de ciclos a la falla.

$$PV = 0.3244N_f^{-1.0435}$$

Ecuación 10.

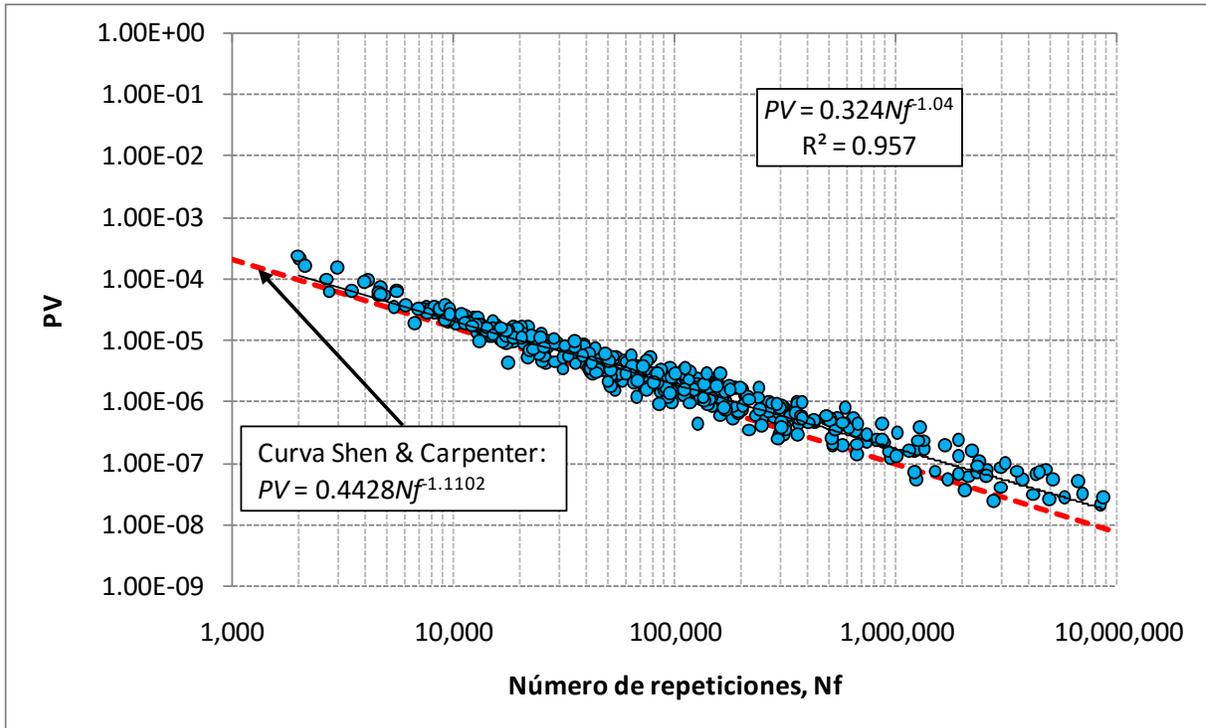


Figura 9. Relación PV-Nf para mezclas de Costa Rica a 20°C

En la Figura 10 se muestra una comparación entre los valores de PV obtenidos a partir de los datos del ensayo de fatiga a flexotracción y el PV calculado mediante la ecuación original de Shen y Carpenter. En general, los datos tienden a alinearse sobre la línea de igualdad; sin embargo es evidente que la variabilidad aumenta a valores bajos de PV, asociados con alta resistencia a la fatiga. Puede concluirse que sí existe una relación exponencial entre el PV y el número de repeticiones, y que la diferencia en los coeficientes de la ecuación original y los obtenidos para las mezclas de Costa Rica es producto de la variabilidad de los datos.

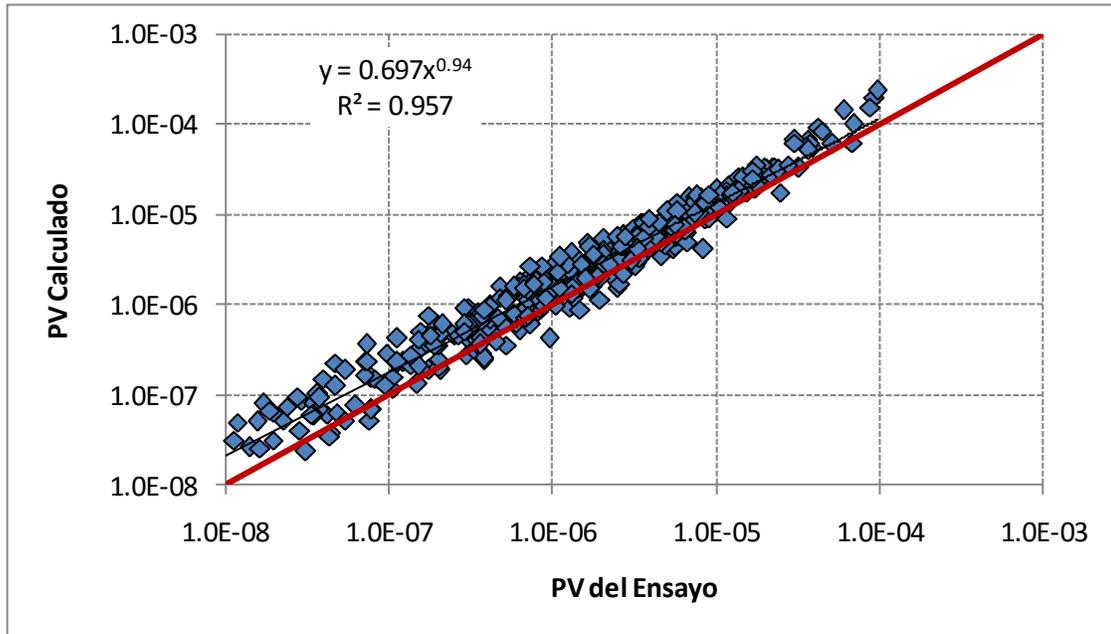


Figura 10. Comparación entre PV calculado y PV medido en el ensayo a flexotracción

3.2 Modelo de predicción de PV

Shen y Carpenter propusieron un modelo de predicción del PV basado en las propiedades de los materiales y las respuestas de carga. La Ecuación 9 muestra la relación entre el PV y otros parámetros propios de la mezcla y el ensayo (7):

$$PV = 44.422\varepsilon^{5.140}S^{2.993}VP^{1.850}GP^{-0.4063} \quad \text{Ecuación 11.}$$

donde:

ε = deformación unitaria, mm/mm

S = rigidez de la mezcla a 20°C y 10 Hz, MPa

VP = parámetro volumétrico, $VP = \frac{AV}{AV+V_b}$

AV = porcentaje de vacíos en la mezcla, %

V_b = contenido de asfalto en volumen, $V_b = 100 \times \frac{G_{mb} \times P_{ac}}{G_b}$

G_{mb} = gravedad específica bruta de la mezcla

P_{ac} = porcentaje de asfalto por peso total de la mezcla, %

G_b = gravedad específica bruta del asfalto

$$GP = \text{parámetro granulométrico}, GP = \frac{P_{NMS} - P_{PCS}}{P_{200}}$$

P_{NMS} = porcentaje de agregado pasando la malla del tamaño máximo nominal

P_{PCS} = porcentaje de agregado pasando la malla de control primario

P_{200} = porcentaje de agregado pasando la malla No. 200

Para poder verificar esta relación para las mezclas de Costa Rica se contó con una base de datos reducida, con 167 puntos estadísticos. Esto se debió a que como se mencionó anteriormente, no todas las muestras ensayadas tenían disponible la información necesaria para el cálculo del PV a partir de la Ecuación 11. La Figura 11 presenta una comparación entre el PV calculado mediante el modelo propuesto y el PV real medido del ensayo. En promedio, los datos se encuentran sobre la línea de igualdad; sin embargo se observa una alta variabilidad, particularmente a valores bajos de PV.

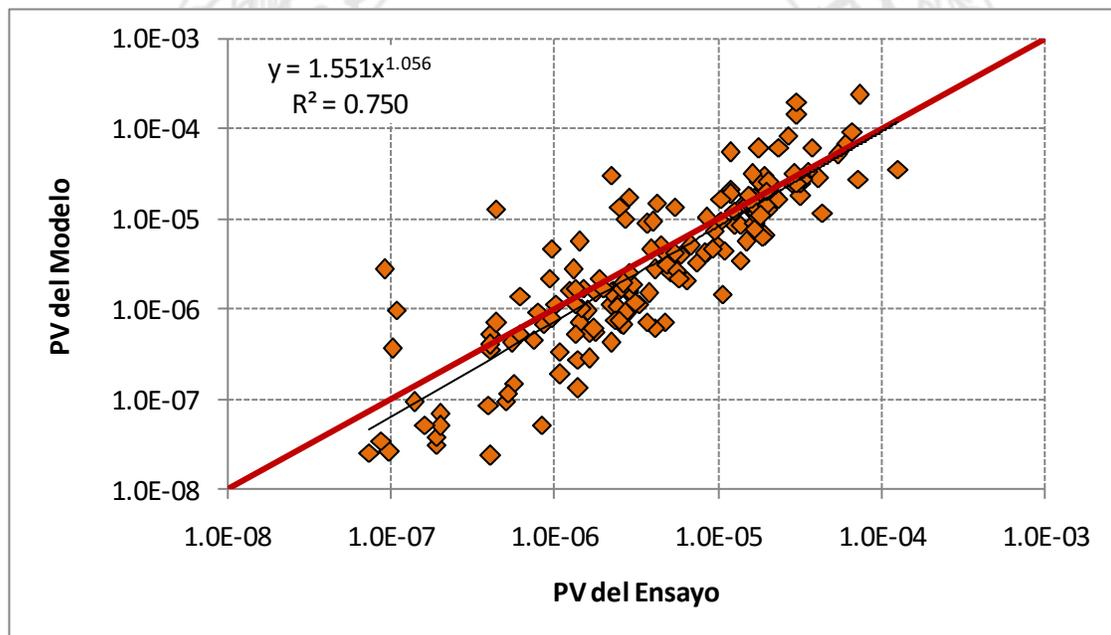


Figura 11. Comparación entre PV del modelo (Ecuación 11) y PV medido en el ensayo a flexotracción

Con el fin de obtener un modelo mejorado y acorde a las características propias de Costa Rica, se procedió a evaluar la relación entre el PV y distintos parámetros de los materiales y respuestas de carga. Como punto de partida, se utilizaron los parámetros de la Ecuación 11 para obtener una ecuación calibrada. Además, se estudió la posibilidad de utilizar parámetros distintos a la rigidez para

caracterizar la mezcla asfáltica, ya que el cálculo de S requiere de la realización del ensayo de fatiga a flexotracción. La caracterización de la mezcla por medio de otros ensayos podría simplificar la evaluación de la resistencia al agrietamiento por fatiga. Para ello se incluyeron en el análisis el módulo dinámico (E^*) y ángulo de fase (ϕ) medidos a 20°C y 10 Hz, así como módulo resiliente (MR) a 25°C y tensión diametral (TD) a 25°C.

La Tabla 1 muestra las variables consideradas para varios modelos, así como el modelo ajustado y su respectivo coeficiente de determinación (R^2) y los cuadrados medios del residual (MS_{Res}). Para seleccionar las variables significativas para cada modelo se utilizó el procedimiento de regresión *stepwise*, el cual es un proceso iterativo que añade o elimina variables basado en el t estadístico de sus coeficientes estimados. Puede verse que todos los modelos propuestos tienen valores altos de R^2 y R^2_{aj} , lo que indica que un alto porcentaje de la variación observada en el PV es explicada por el modelo.

La Ecuación 10 es básicamente un ajuste del modelo de Shen y Carpenter, donde el parámetro volumétrico resultó no ser una variable significativa. Las Ecuaciones 13 y 14 utilizan el módulo dinámico de la mezcla como medida de rigidez; la primera de ellas incluye propiedades del material, mientras que la segunda caracteriza la mezcla asfáltica únicamente por medio de su módulo dinámico y ángulo de fase. Aunque la Ecuación 13 tiene valores de R^2 y MS_{Res} ligeramente más favorables, la Ecuación 14 permite reducir la información requerida y aún así obtener una buena aproximación del PV.

En el cuarto modelo estudiado (Ecuación 15) la rigidez de la mezcla fue caracterizada por medio del módulo resiliente, por lo que como en los dos modelos anteriores, no es necesario realizar el ensayo de flexotracción, el cual requiere de un mayor período de tiempo para la fabricación, acondicionamiento y falla de especímenes. Finalmente, el modelo propuesto en la Ecuación 16 es función de la tensión diametral, una propiedad que se obtiene a partir de un ensayo mucho más simple, rápido y utilizando equipo que está fácilmente disponible en laboratorios de diseño.

Tabla 1. Modelos desarrollados para la predicción de PV

Ec.	Variables	Modelo ajustado	R ²	R ² _{aj}	MS _{Res}
12	ε, S, VP, GP	$PV = 10^{9.505} \varepsilon^{6.0612} S^{1.5091} VP^{1.4684}$	0.824	0.821	0.140
13	ε, E*, VP, GP	$PV = 5.6 \times 10^{-4} \varepsilon^{5.8268} E^{4.7652} VP^{0.7341} GP^{-1.1644}$	0.837	0.833	0.132
14	ε, E*, φ	$PV = 10^{7.426} \varepsilon^{5.806} E^{2.3163} \phi^{-2.7170}$	0.835	0.832	0.135
15	ε, MR, VP, GP	$PV = 10^{8.415} \varepsilon^{5.6690} MR^{1.2663}$	0.802	0.800	0.150
16	ε, TD	$PV = 10^{8.365} \varepsilon^{5.8175} TD^{1.7278}$	0.785	0.783	0.163

Como se mencionó anteriormente, una ventaja del análisis de resistencia al agrietamiento por fatiga mediante el enfoque de energía disipada es la existencia de una relación única entre el PV y el número de ciclos a la falla. Gracias a esto se obtiene una mayor uniformidad en los resultados, independientemente del tipo de mezcla estudiado o las condiciones del ensayo. La Figura 12 presenta los modelos desarrollados en la Tabla 1 en función de la deformación unitaria. Puede observarse cómo la línea de mejor ajuste es prácticamente la misma para todos los casos, lo cual representa una mejora respecto a estudios anteriores, donde los valores del modelo ajustado variaban considerablemente para cada ecuación, como se mostró en la Figura 3. Esto significa que para un nivel de deformación dado, el valor de PV puede estimarse de manera consistente utilizando cualquiera de los modelos propuestos. Es de esperarse que al reducir la variabilidad entre modelos se pueda mejorar la estimación del desempeño de los pavimentos ante el agrietamiento por fatiga.

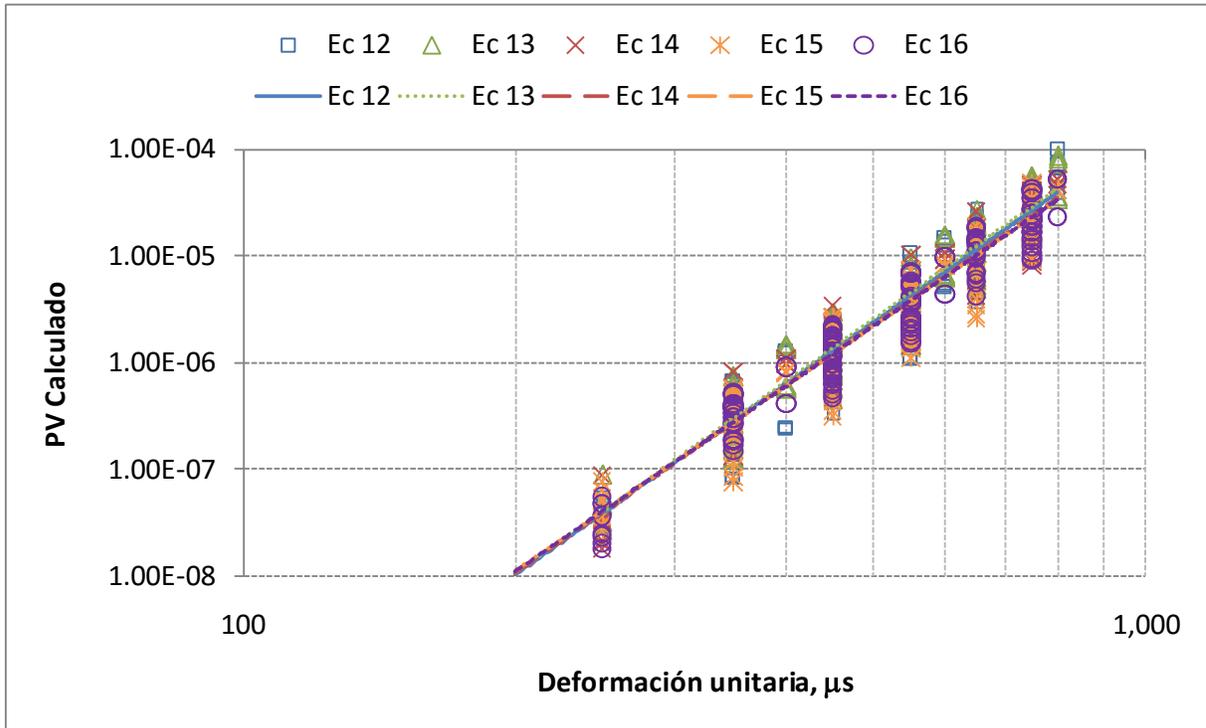


Figura 12. Modelos de fatiga ajustados utilizando el enfoque de energía disipada

3.3 Aplicación al diseño de pavimentos

A partir de la relación PV-Nf (Ecuación 10) y cualquiera de los modelos de predicción de PV mostrados en la Tabla 1

Tabla 1, puede construirse una ecuación para el cálculo de la vida de fatiga (N_f) en función de las variables correspondientes. Tomando el caso más simple (Ecuación 16) donde se utiliza el ensayo más sencillo para caracterizar la rigidez de la mezcla, la resistencia a la fatiga se expresaría como una función de la deformación unitaria y la tensión diametral (TD) en kPa:

$$N_f = 3.28 \times 10^{-9} \varepsilon^{-5.5749} TD^{-1.6557} \quad \text{Ecuación 17.}$$

En la Figura 13 se observa una comparación entre los valores de N_f calculados con la Ecuación 17 y los medidos durante el ensayo de flexotracción. En general, los resultados se aproximan a la línea de igualdad para el rango de valores estudiado.

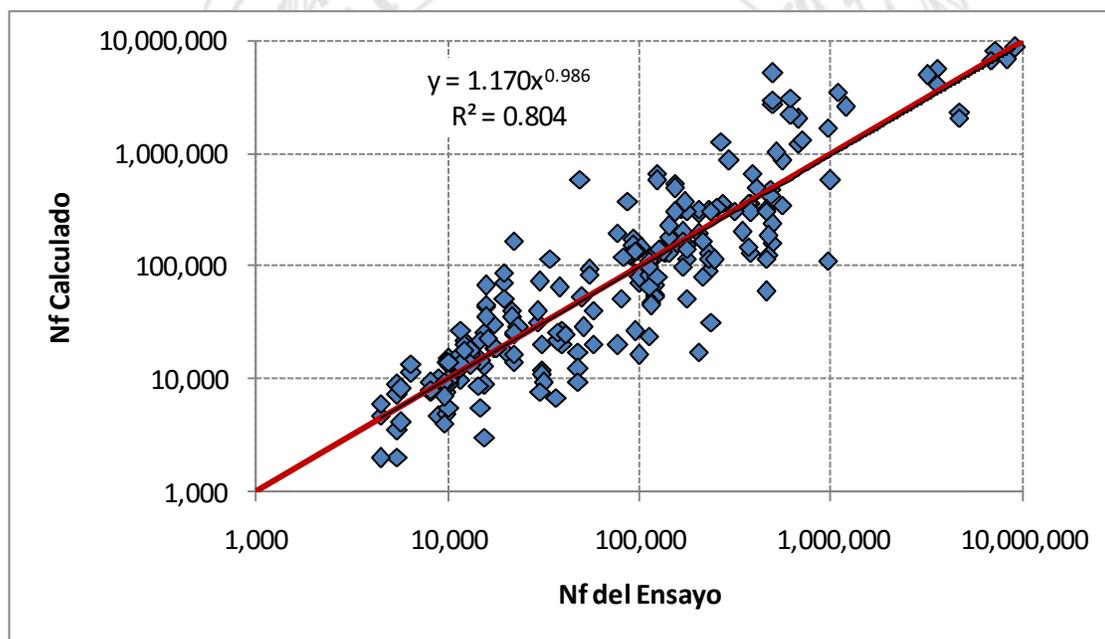


Figura 13. Comparación entre N_f calculado (Ecuación 17) y N_f medido en el ensayo a flexotracción

De esta manera, para una estructura de pavimento dada, la respuesta estructural (en este caso deformación unitaria) puede obtenerse mediante modelación, y las propiedades del material (tensión diametral) son datos provenientes del diseño de mezcla. Con esta información, el número de ciclos a la falla puede ser calculado y comparado con el número de repeticiones requerido. Del mismo modo, si se desea utilizar el modelo con el mejor ajuste (Ecuación 15), la resistencia a la fatiga estaría expresada en

términos de la deformación unitaria, el módulo dinámico y los parámetros volumétrico y granulométrico:

$$N_f = 441.78 \varepsilon^{-5.5838} E^{-4.5664} VP^{-0.7035} GP^{1.1158} \quad \text{Ecuación 18.}$$

La Figura 14 muestra como nuevamente los resultados del N_f calculado versus N_f medido se aproximan a la línea de igualdad, y en este caso presentan una menor dispersión. La selección del modelo a utilizar para la predicción de N_f dependerá del nivel de precisión deseado, así como de la capacidad de realizar los diferentes ensayos propuestos.

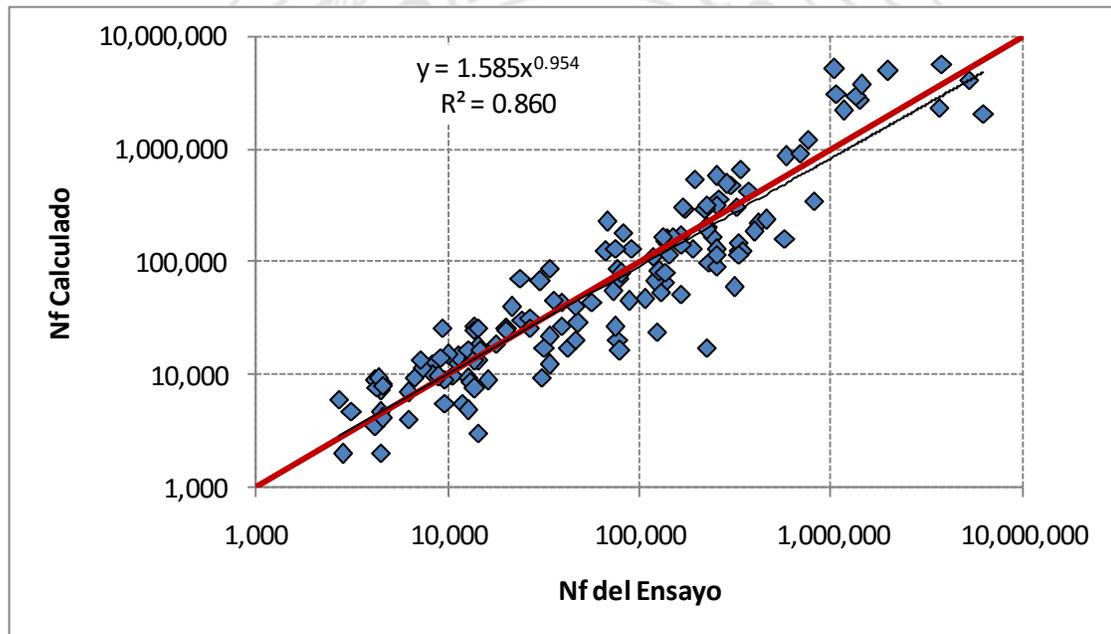


Figura 14. Comparación entre N_f calculado (Ecuación 18) y N_f medido en el ensayo a flexotracción

Cabe destacar que las Ecuaciones 17 y 18 (y cualquier otra que se derive por medio de la metodología descrita) están basadas en la resistencia a la fatiga observada en el laboratorio y deben ser calibradas con datos de campo antes de poder ser implementadas. Sin embargo, el procedimiento base establecido en esta investigación es una alternativa útil para estimar la vida de fatiga de un pavimento flexible.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Propuesta LM-PI-UMP-019-R1	Fecha de emisión: 26 de Mayo de 2016	Página 26 de 28
----------------------------	--------------------------------------	-----------------

Esta investigación evaluó la resistencia al agrietamiento por fatiga de mezclas asfálticas de Costa Rica utilizando el concepto de energía disipada. A partir de los resultados, se alcanzaron las siguientes conclusiones:

- Se validó la existencia de una relación única de forma exponencial entre el parámetro PV (obtenido a partir del concepto de energía disipada) y el número de ciclos a la falla, N_f .
- El PV puede expresarse como una función de la respuesta de carga y propiedades de la mezcla asfáltica. Se ajustaron varios modelos en los que se obtuvieron valores de R^2 por encima de 0.80. Uno de los modelos tiene la ventaja de utilizar la tensión diametral como medida de la rigidez de la mezcla, lo que simplificaría la obtención de los datos para el cálculo del PV.
- A partir de las relaciones obtenidas, fue posible obtener una ecuación para la predicción del número de ciclos a la falla por fatiga, que puede ser incorporada en el diseño estructural de pavimentos flexibles una vez calibrada con datos de campo.

Se sugieren las siguientes recomendaciones como parte de futuros trabajos de investigación:

- Los modelos obtenidos se basan en ensayos de fatiga realizados a 20°C. Se recomienda incorporar el efecto de la temperatura para la estimación de la resistencia a la fatiga. Los datos históricos de ensayos realizados a distintas temperaturas son limitados, por lo que deben realizarse más pruebas de laboratorio, no sólo de flexotracción sino de tensión diametral, módulo dinámico u otro que se considere conveniente, para robustecer la base de datos.
- El monitoreo de secciones a escala natural es fundamental para la calibración de los modelos y su eventual incorporación al método de diseño estructural.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Roberts, F.L. Kandhal, P.S. Brown, E.R. Lee, D.Y. & Kennedy, T.W. Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction. NAPA Education Foundation, Lanham, MD, Third Edition (2009).
2. Pavement Interactive. <http://www.pavementinteractive.org/article/flexural-fatigue/>. Accesada 4 de febrero de 2014.
3. Aguiar, J.P., Loría, L.G. "Desarrollo de Modelos de Fatiga para Capas Asfálticas". Revista Infraestructura Vial. Vol. 18, No. 15 (2006) pp. 18-22.

4. Finn, F. N., Sraf, C., Kulkarni, R., Nair, K., Smith, W., and Abdullad, A. "The Use of Prediction Subsystems for the Design of Pavement Structures." *Proceedings of Fourth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, University of Michigan, Ann Arbor, MI, (1977) pp. 3-38.
5. Tayebali, A., Rowe G., Sousa, J. "Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixtures". *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 61 (1992) pp. 333-360.
6. Elizondo, F., Jiménez, M. "Calibración de un Modelo para Evaluar la Susceptibilidad al Agrietamiento por Fatiga de Mezclas Asfálticas en Costa Rica". *XVII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*. Antigua Guatemala, Guatemala (2003).
7. Shen, S.; Carpenter, S. "Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing." *Dept. of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Advanced Transportation Research and Engineering Laboratory, ATREL* (2007).
8. Shen, S.; Carpenter, S. "An Energy Approach for Airport Pavement Low Damage Fatigue Behavior". FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, New Jersey (2007).
9. Ghuzlan, K.; Carpenter, S. "Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing". *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1723, National Research Council, Washington, D.C.(2000) pp. 141-149.
10. Carpenter, S. H., Ghuzlan, K.; Shen, S. "A Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavement." *Journal of the Transportation Research Board*, No. 1832, National Research Council, Washington, D.C. (2003) pp. 131-138.