

Determinación de leyes y una especificación costarricense para fatiga de mezclas asfálticas en caliente

1^{er} Autor Ing. Luis Guillermo Loría Salazar
Coordinador Laboratorio de Infraestructura Vial
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LANAMME
Universidad de Costa Rica
Apartado 2060
Costa Rica
TELS: (506) – 2075423, (506)-2074396, (506)-207-4382
Fax: (506)-2074440, (506)-207-4442

Investigadores Asociados

Ing. José Pablo Aguiar
Investigador PITRA-LANAMME
LANAMME

Ing. Fabián Elizondo Arrieta
Coordinador del Laboratorio de SUPERPAVE
LANAMME

Ing. Mario Arce Jiménez
Coordinador PITRA
LANAMME

Breve currícul
Ing. Luis Guillermo Loría Salazar

Licenciado en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, 1998

Coordinador Unidad de Estudios Especiales, PITRA-LANAMME, 1999-2001

Consultor en el proyecto “Nuevo Modelo de Control de Plantas Asfálticas”,
Convenio MOPT-FUNDEVI, 1999-2000

Consultor en el proyecto “Nuevo Modelos de Pago en Función de la Calidad”,
Convenio MOPT-FUNDEVI, 1999-2000

Consultor Manual Centroamericano de Construcción de Carreteras y Puentes,
SIECA-LANAMME, 2000-2001

Coordinador del Laboratorio de Infraestructura Vial, LANAMME, 2001-2003
Profesor Universidad de Costa Rica, 2000-2003

Determinación de leyes y una especificación costarricense para fatiga de mezclas asfálticas en caliente

1. INTRODUCCIÓN

Como parte fundamental en la caracterización de las mezclas asfálticas se encuentran los ensayos de fatiga, los cuales se relacionan directamente con la capacidad de soportar carga a largo plazo de una mezcla asfáltica, característica fundamental para el diseño estructural de un pavimento y para poder efectuar un adecuado análisis financiero del mismo.

Dentro de la línea de investigación que está siguiendo el LANAMME, para calibrar los métodos de diseño estructural es básico entender el desempeño a fatiga de la mezcla asfáltica. Sin esta información para las mezclas asfálticas costarricenses, de acuerdo con la materia prima y procesos constructivos propios del país, no es posible tener un conocimiento adecuado del desempeño de las mezclas asfálticas ni del proceso para su diseño estructural.

Para esto, es necesaria la ejecución de “ensayos de desempeño simple”, los cuales están definidos por el NCHRP 465 así: **“Son aquellos métodos de ensayo que con precisión y confiabilidad miden la respuesta de una característica o parámetro de la mezcla que está altamente correlacionada con la ocurrencia de un daño al pavimento (por ejemplo agrietamiento o ahuellamiento) en un rango de tráfico y condiciones de clima”.**

Dada esta definición, no es necesario que el ensayo prediga por completo el efecto o desempeño histórico de la mezcla, pero los resultados pueden permitir la determinación de la habilidad de la mezcla para resistir la fractura o la deformación permanente ante diversas condiciones definidas.

Como objetivo fundamental dentro del estudio se pretende estudiar el comportamiento contra fatiga de capas asfálticas de capa delgada. El método que se utilizará será el de vigas a flexotracción, que se explicará adelante.

Un resultado directo de la investigación, será obtener las curvas maestras de nivel de carga versus deformación unitaria para cada caso estudiado. A partir de este resultado, se efectuará la modelación estructural de diversas capas de rodamiento en sitio mediante el uso de las curvas maestras determinadas.

1.1 Objetivos Generales

- Determinar, con base en el experimento planteado, leyes de fatiga de mezcla asfáltica en caliente, utilizables en el diseño estructural de pavimentos, aplicables a las condiciones de los materiales propios de Costa Rica.
- Determinar rangos de especificación para el desempeño por fatiga de mezclas asfálticas de tipo denso.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar el efecto, sobre la resistencia a fatiga de mezclas asfálticas de tipo denso, de los siguientes factores:
 - Grado de desempeño del ligante asfáltico
 - Envejecimiento del ligante asfáltico, producto del proceso de producción, transporte y colocación de la mezcla asfáltica en caliente.
 - Módulo resiliente a la tensión diametral de la mezcla asfáltica
 - Módulo resiliente dinámico de la mezcla asfáltica
 - Efecto de la temperatura

1.3 Esquema metodológico propuesto

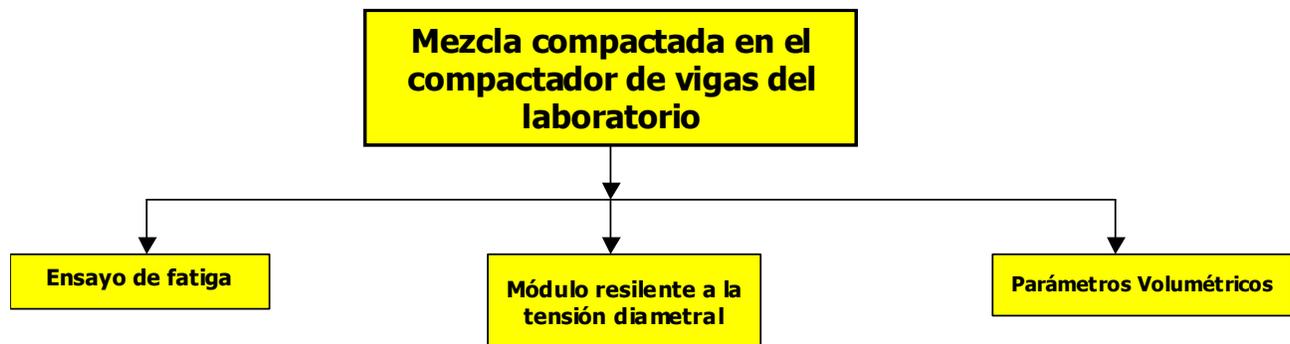


Fig Nº 2: Esquema experimental, mezcla compactada en el compactador de vigas

Para la mezcla compactada mediante el procedimiento Marshall y SUPERPAVE, asfalto y agregados, se seguirán los siguientes ensayos:

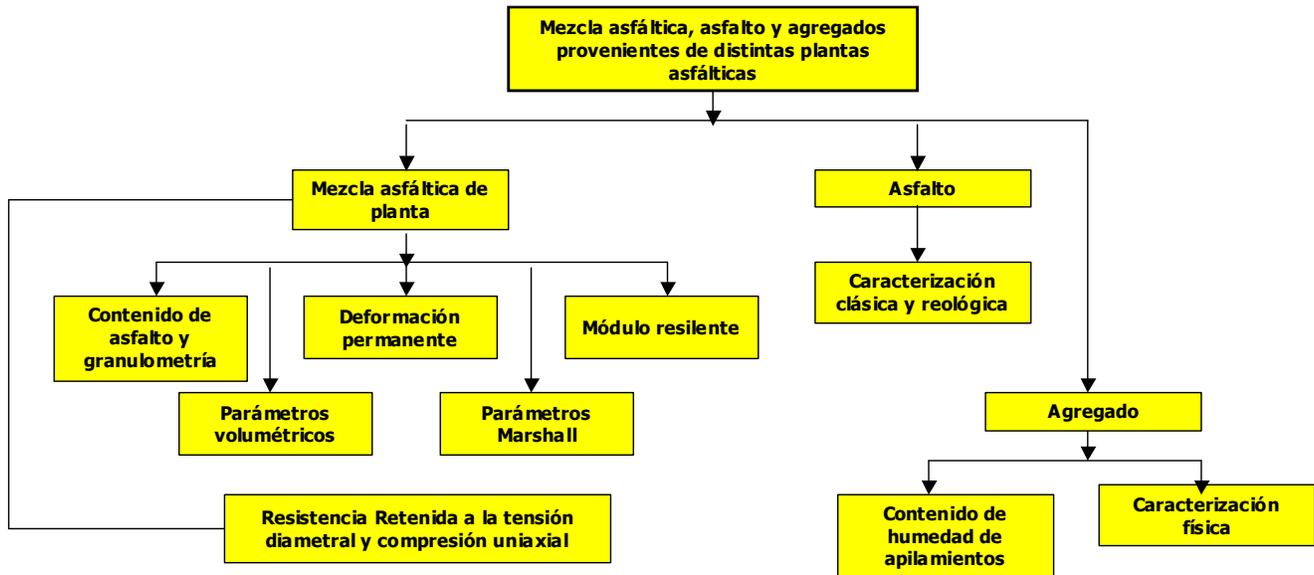


Fig Nº 3: Esquema experimental. Caracterización de la materia prima

2. Marco teórico

La resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica en caliente es de suma importancia, en cuanto a la vida útil de esta, pues uno de las principales modos de falla de los pavimentos asfálticos es el agrietamiento debido a la fatiga. Por lo tanto, una predicción precisa de las propiedades a fatiga de la mezcla asfáltica es de gran utilidad en la predicción de la vida del pavimento.

El agrietamiento por fatiga, originado en la estructura de la mezcla asfáltica, ha sido reconocido como una de las formas de falla más costosas de corregir durante el proceso de rehabilitación de la estructura del pavimento. Si la falla se extiende ampliamente, la rehabilitación podría llevar a remover totalmente la capa asfáltica. **La falla por fatiga ocurre cuando las cargas repetidas de los vehículos generan esfuerzos de tensión de suficiente magnitud para iniciar el agrietamiento que, eventualmente, se propaga hasta la superficie.** Algunos factores que contribuyen a esta forma de falla son una inadecuada estructura del pavimento, materiales de baja calidad en las capas inferiores o una mezcla asfáltica con propiedades inadecuadas.

Actualmente, los pavimentos asfálticos que presentan un buen desempeño en el largo plazo, tienen características que previenen el agrietamiento por fatiga. Primeramente, tienen el suficiente espesor de mezcla asfáltica para limitar los esfuerzos a tensión en la fibra inferior de la capa asfáltica de manera que no inicie el agrietamiento. También tienen sólidas fundaciones que soporten la estructura. Además, la mezcla asfáltica presenta la suficiente flexibilidad para contrarrestar el inicio del agrietamiento, a bajos niveles de esfuerzo a tensión. El ensayo estándar para determinar la resistencia ante la fatiga a escala de laboratorio está definido por:

AASHTO TP 8: Determinación de la vida a fatiga de la mezcla asfáltica compactada en caliente sometida a flexo-tracción.

2.2.1 Diagrama de modelo y de cortante experimental

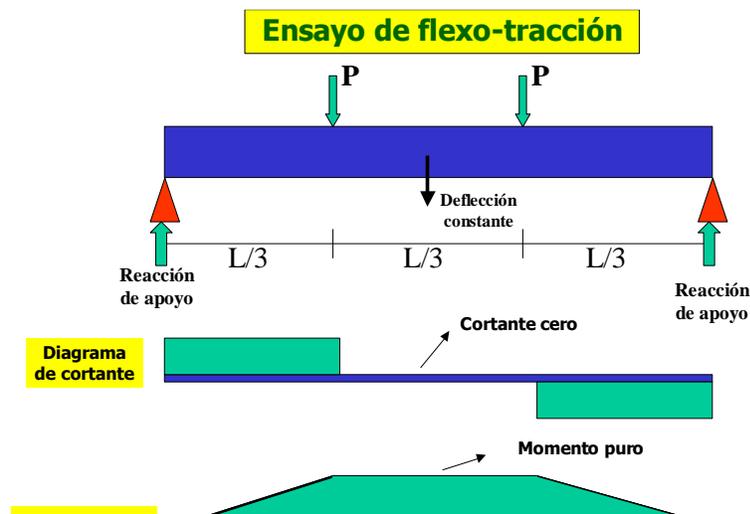


Fig Nº 4: Ensayo de flexotracción

2.2.3 Características más importantes del ensayo

- Protocolo de ensayo: AASHTO TP-8 o ASTM D 4123
- Carga en 4 puntos
- Carga sinusoidal o haversiana a 10 Hz
- Temperatura de ensayo: 20 °C
- Especímenes de 50 mm X 62.5 mm X 375 mm
- El protocolo de ensayo AASHTO TP-8, señala la realización de un condicionamiento del espécimen de 2 horas, a 20 °C.

3. RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYO

Para realizar la investigación se tomaron muestras en varias plantas asfálticas, de modo que la materia prima de la investigación correspondiera con la materia prima con la que se construyen los pavimentos en Costa Rica.

Las muestras fueron compactadas en bloques en el compactador de vigas del LANAMME. Posteriormente, los bloques son cortados con una sierra, para llegar las dimensiones de ensayo, luego son condicionadas 5 días a la temperatura de 85 °C, y antes del ensayo dos horas a la temperatura de ensayo.

A la fecha se han analizado ocho muestras de mezcla asfáltica con tres deformaciones unitarias en cada ensayo.

Los resultados de ensayo se muestran a continuación, para cada una de las muestras ensayadas.

3.1 Resumen de leyes de fatiga para cada caso analizado

Linea de mejor ajuste para el promedio
 $y = -90,185\ln(x) + 1588,2$
 $R^2 = 0,9907$

Comparación entre leyes de fatiga,
 Varias muestras de HMA

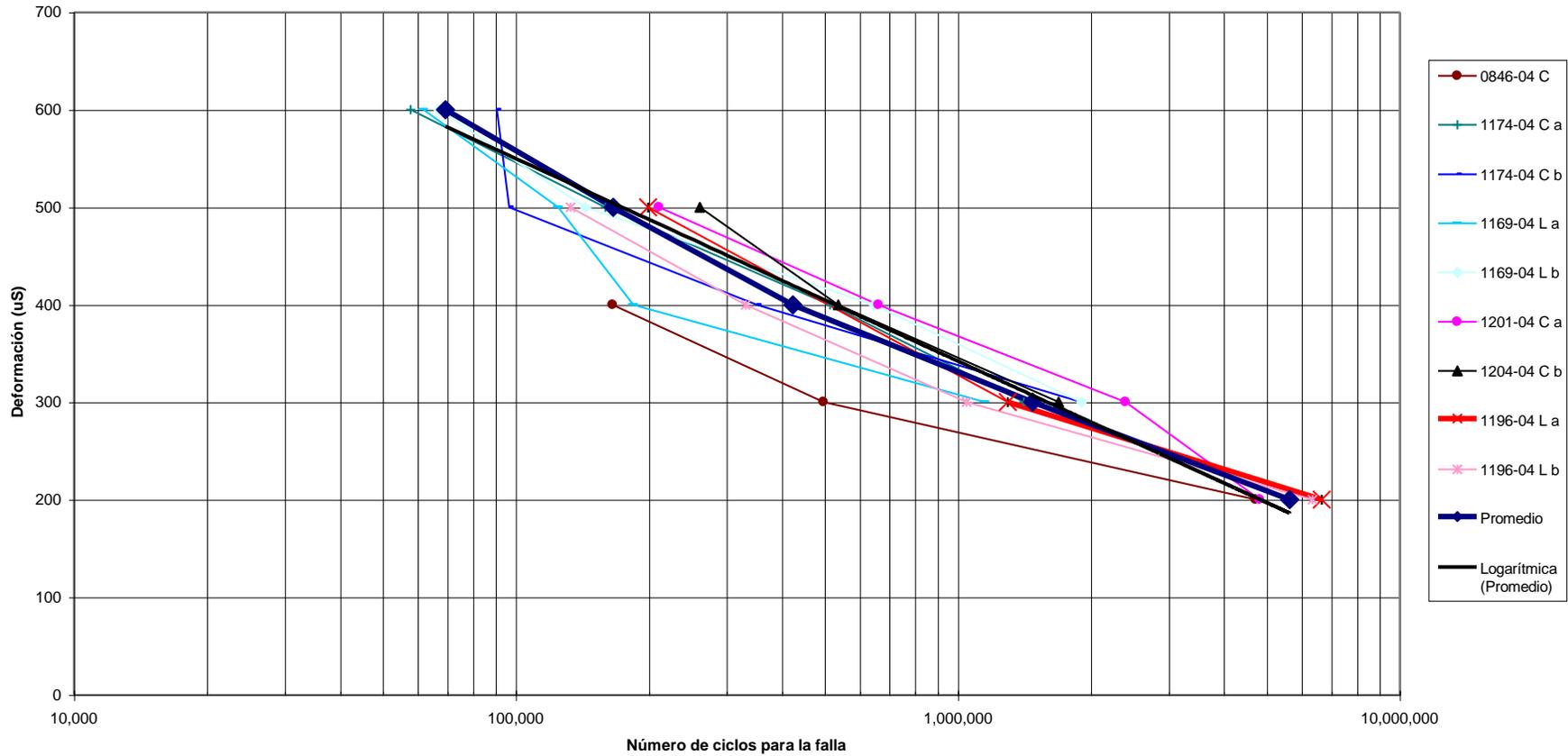


Fig Nº 12: Leyes de fatiga de las 4 muestras analizadas

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYO

De los resultados de ensayo obtenidos, se obtuvieron las siguientes correlaciones.

4.1 Correlación entre factores

	Deformación aplicada	Rigidez a la flexión inicial	Rigidez a la flexión final	Rigidez	Módulo de elasticidad final	Angulo de fase	Energía disipada en primer ciclo	Energía disipada final	Energía total disipada	Esfuerzo de tensión máximo	Ciclos para la falla
Deformación aplicada	1.000	0.140	0.141	-0.091	-0.090	0.475	0.955	0.946	-0.720	0.864	-0.757
Rigidez a la flexión inicial	-	1.000	1.000	0.771	0.770	-0.221	0.322	0.346	0.110	0.547	-0.068
Rigidez a la flexión final	-	-	1.000	0.772	0.771	-0.220	0.323	0.347	0.108	0.548	-0.068
Rigidez	-	-	-	1.000	1.000	-0.360	0.102	0.151	0.001	0.393	0.285
Módulo de elasticidad final	-	-	-	-	1.000	-0.358	0.103	0.152	0.002	0.393	0.286
Angulo de fase	-	-	-	-	-	1.000	0.451	0.400	-0.306	0.242	-0.448
Energía disipada en primer ciclo	-	-	-	-	-	-	1.000	0.996	-0.664	0.937	-0.634
Energía disipada final	-	-	-	-	-	-	-	1.000	-0.669	0.954	-0.616
Energía total disipada	-	-	-	-	-	-	-	-	1.000	-0.639	0.574
Esfuerzo de tensión máximo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.000	-0.577
Ciclos para la falla	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.000

5. DESARROLLO DE MODELOS DE FATIGA

Haciendo uso de la base de datos de fatiga que se ha venido desarrollando a partir de información generada del ensayo de fatiga en vigas, se planteó la posibilidad de desarrollar modelos de predicción de fatiga, con formas similares a los que se han venido manejando a nivel internacional, y que han sido desarrollados previamente en países como Estados Unidos, Inglaterra y Bélgica.

Dichos modelos son generalmente calibrados para satisfacer una ecuación similar a la siguiente forma:

$$N_f = k1 \cdot \varepsilon^{-k2} \cdot S^{-k3} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

e = deformación unitaria

S = rigidez de la mezcla asfáltica

De esta manera se inició un proceso, de modelación mediante regresión, de ecuaciones o leyes de fatiga para las mezclas asfálticas con materia prima costarricense; a saber, agregado y ligante asfáltico de origen nacional, de tal forma que se pueda diseñar y caracterizar de mejor manera los pavimentos asfálticos nacionales.

La primera regresión que se realizó, se adaptó a la forma de la ecuación (1), presentada anteriormente. Esta se modeló a partir de la totalidad de los datos generados en el laboratorio: deformaciones unitarias aplicadas en el rango de 200 a 600 μm .

Del análisis de regresión, se obtuvo la siguiente expresión:

$$N_f = 1,411 \times 10^{17} \cdot \varepsilon^{-4,141} \cdot S^{-0,247} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

e = deformación unitaria, en μm .

S = rigidez de la mezcla asfáltica, en MPa.

De dicha modelación se obtuvo una correlación de 0,964 ($R^2 = 0,930$), lo cual es un indicador de que el modelo predice adecuadamente los ciclos de carga necesarios para la fatiga.

Adicionalmente, se realizó un análisis de coeficientes a partir del cual se determinó que la variable deformación unitaria (ϵ) es significativa para el modelo a más del 99% de confianza. Sin embargo, la variable rigidez (S), se encontró es únicamente significativa al 50% de confianza, por lo que se planteó la posibilidad de formular una ecuación en la que no se incluyera dicho parámetro.

También, al modelo de regresión obtenido, se le aplicó un análisis de varianza (ANOVA) y se determinó, con un nivel de significancia superior al 99%, que dicha regresión es significativa en cuanto a los valores predichos.

Por esta razón, se desarrollaron modelos de fatiga para los 3 distintos rangos de deformación unitaria observados: bajos (deformaciones unitarias inferiores a 300 μ m), intermedios (deformaciones unitarias entre 300 y 500 μ m) y altos (superiores a 500 μ m) con el fin de normalizar los modelos de regresión.

Para el rango bajo de deformaciones, se obtuvo la siguiente expresión:

$$N_f = 4,774 \times 10^{14} \cdot \epsilon^{-3,510} \cdot S^{0,049} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Para el rango intermedio de deformaciones, se obtuvo la siguiente expresión:

$$N_f = 4,714 \times 10^{16} \cdot \epsilon^{-4,008} \cdot S^{-0,201} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Y para el rango alto de deformaciones, se obtuvo la siguiente expresión:

$$N_f = 2,480 \times 10^{21} \cdot \epsilon^{-4,828} \cdot S^{-1,003} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

e = deformación unitaria, en μm .

S = rigidez de la mezcla asfáltica, en MPa.

De las modelaciones anteriores se obtuvieron correlaciones de 0,950 ($R^2 = 0,902$), 0,950 ($R^2 = 0,902$) y 0,936 ($R^2 = 0,875$) para los rangos bajos, intermedios y altos de deformaciones unitarias respectivamente. Las cuales, como se puede ver, son correlaciones altas. Sin embargo, la correlación del modelo planteado originalmente (para todo el rango de deformaciones unitarias) presenta una mejor correlación y pareciera por tanto describir mejor el fenómeno de fatiga.

Adicionalmente, se realizaron análisis de coeficientes de los cuales se determinó que la variable deformación unitaria (u) es significativa para los tres modelos a más del 99% de confianza. Sin embargo, se encontró que la variable rigidez (S), es solo significativa al 15% de confianza para el rango de deformaciones unitarias bajas, al 40% de confianza para el rango intermedio de deformaciones unitarias, y al 95% de confianza para el rango alto de deformaciones unitarias. Esto es de esperarse puesto que la rigidez de la mezcla asfáltica está directamente correlacionada con la resistencia a la deformación.

También, se realizó un análisis de varianza a los tres modelos de regresión y se determinó, con un nivel de significancia superior al 99%, que dichas regresiones son significativas.

A continuación, y dado que para el rango bajo e intermedio de deformaciones unitarias la variable rigidez (S) pareciera no ser tan significativa y como dicha variable en todos los modelos anteriores tiene pesos relativamente bajos en el comportamiento del modelo, se desarrolló un modelo de regresión que involucrara únicamente la variable deformación unitaria (e). De esta manera, se obtuvo la siguiente expresión:

$$N_f = 2,203 \times 10^{16} \cdot \varepsilon^{-4,130} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

e = deformación unitaria, en μm .

De dicha modelación se obtuvo una correlación de 0,964 ($R^2 = 0,929$), lo cual indica de que dicha ecuación brinda una muy alta correlación (prácticamente igual al del modelo que incluye la rigidez de la mezcla; Ecuación 2). De la misma forma, se realizó un análisis de coeficientes del cual se determinó que la variable deformación unitaria (e) es significativa a más del 99% de confianza.

También, se le aplicó un análisis de varianza al modelo de regresión y se determinó, con un nivel de significancia superior al 99%, que dicha regresión es significativa.

Puesto que dicho modelo presenta una excelente correlación, el mismo puede ser usada como una primera aproximación en la determinación de los ciclos a la fatiga pues depende únicamente del parámetro deformación unitaria (e) que puede ser calculado con relativa facilidad mediante técnicas de análisis mecánico – empíricas, o de elemento finito, de la estructura del pavimento.

5.1 MODELO DE FATIGA QUE INCLUYE VACÍOS DE AIRE

A continuación, y debido al efecto del contenido de vacíos de aire en la mezcla (fenómeno ampliamente estudiado) se decidió generar un modelo que incluyera dicha variable.

Se obtuvo la siguiente ley de fatiga:

$$N_f = 9,937 \times 10^{16} \cdot \varepsilon^{-4,158} \cdot S^{-0,012} \cdot V_a^{-0,619} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde:

ε = deformación unitaria, en μm .

S = rigidez de la mezcla asfáltica, en MPa.

V_a = vacíos de aire en la mezcla, en %.

De dicha modelación se obtuvo una correlación de 0,967 ($R^2 = 0,934$), lo cual nos indica que la regresión brinda una excelente modelación.

Adicionalmente, se realizó un análisis de coeficientes del cual se determinó que la variable deformación unitaria (u) y la variable vacíos de aire (V_a) son significativas para el modelo a más del 99% de confianza y al 75% de confianza respectivamente. La variable rigidez (S), se encontró es significativa al 5% de confianza.

También, se le aplicó un análisis de varianza al modelo de regresión y se determinó, con un nivel de significancia superior al 99%, que dicha regresión es significativa.

5.2 MODELO QUE INCLUYE TENSIÓN DIAMETRAL

Ahora, puesto que la introducción al modelo del parámetro vacíos de aire en la mezcla (V_a) produjo buenos resultados, se pensó en introducir al modelo una variable de desempeño. De esta manera, se introdujo el parámetro de resistencia a la tensión diametral al modelo.

Para esto se realizaron tres modelos adicionales; uno para resistencia a la tensión diametral en estado seco, otro para resistencia a la tensión diametral en estado condicionado y el otro para resistencia a la tensión diametral retenida. A continuación se presentan los modelos obtenidos.

El modelo que incluye resistencia a la tensión diametral en estado seco es:

$$N_f = 1,933 \times 10^{22} \cdot \varepsilon^{-4,240} \cdot S^{0,023} \cdot TD^{-1,905} \quad \text{Ecuación (8)}$$

El modelo que incluye resistencia a la tensión diametral en estado húmedo es:

$$N_f = 4,182 \times 10^{58} \cdot \varepsilon^{-4,240} \cdot S^{0,023} \cdot TD^{-14,140} \quad \text{Ecuación (9)}$$

Y el modelo que incluye resistencia a la tensión diametral retenida es:

$$N_f = 4,908 \times 10^{16} \cdot \varepsilon^{-4,240} \cdot S^{0,023} \cdot TD^{-0,163} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

e = deformación unitaria, en μm .

S = rigidez de la mezcla asfáltica, en MPa.

TD = resistencia a la tensión diametral, en kPa.

De las modelaciones anteriores se obtuvieron correlaciones de 0,964 ($R^2 = 0,930$), para los modelos que incluyen resistencia a la tensión diametral en estado seco, resistencia a la tensión diametral en estado húmedo y resistencia a la tensión diametral retenida respectivamente. Las cuales, como se puede ver, son correlaciones muy altas.

Adicionalmente, se realizaron análisis de coeficientes de los cuales se determinó que la variable deformación unitaria (ϵ) es significativa para los tres modelos a más del 99% de confianza. Sin embargo, se encontró que la variable rigidez (S), es solo significativa al 10% de confianza para los tres modelos. También, se evaluó la variable resistencia a la tensión diametral y para los tres modelos se obtuvo que es significativa a más del 40% de confianza.

Se realizó un análisis de varianza a los tres modelos de regresión y se determinó, con un nivel de significancia superior al 99%, que dichas regresiones son significativas.

5.3 MODELOS COMBINADOS

Finalmente, y dado que se observó la relativa significancia, tanto del contenido de vacíos de aire (V_a), así como la resistencia a la tensión diametral (se escogió, por facilidad de ensayo la resistencia a la tensión diametral en estado seco, TD_{SECO}), se decidió desarrollar dos modelos adicionales incluyendo ambos parámetros. La diferencia entre dichos modelos radica en que, debido a la observación previa de significancias relativamente bajas para el parámetro rigidez de la mezcla asfáltica (S), se desarrolló un modelo que incluyera dicho parámetro y otro que no lo tomara en cuenta.

El modelo que excluye el parámetro rigidez de la mezcla asfáltica (S) es:

$$N_f = 1,067 \times 10^{21} \cdot \epsilon^{-4,235} \cdot (V_a \cdot TD_{SECA})^{-1,132} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Y el modelo que incluye el parámetro rigidez de la mezcla asfáltica (S) es:

$$N_f = 1,515 \times 10^{21} \cdot \varepsilon^{-4,240} \cdot S^{0,023} \cdot (V_a \cdot TD_{SECA})^{-1,185} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde:

e = deformación unitaria, en um.

S = rigidez de la mezcla asfáltica, en MPa.

V_a = vacíos de aire en la mezcla, en %.

TD_{SECA} = resistencia a la tensión diametral en estado seco, en kPa.

De las modelaciones anteriores se obtuvieron correlaciones de 0,964 ($R^2 = 0,930$), tanto para el modelo que excluye como el que incluye la rigidez de la mezcla asfáltica (S). Puesto que ambas correlaciones son numéricamente iguales, se corrobora que el efecto de la rigidez de la mezcla no es significativo.

Adicionalmente, se realizaron análisis de coeficientes de los cuales se determinó que la variable deformación unitaria (e) es significativa para ambos modelos a más del 99% de confianza. En lo concerniente al modelo que incluye la variable rigidez (S), se encontró que la misma es solo significativa al 10% de confianza. También, se evaluó la variable compuesta por contenido de vacíos de aire y resistencia a la tensión diametral en estado seco ($V_a \times TD_{SECA}$), y se encontró que esta es significativa al 40% de confianza para ambos modelos.

Igualmente, se realizó un análisis de varianza a ambos modelos de regresión y se determinó, con un nivel de significancia superior al 99%, que dichas regresiones son significativas.

Finalmente, y a manera de resumen, se presentan todos los modelos desarrollados en la Tabla 1.

Resumen de modelos de fatiga para mezclas asfálticas costarricenses.

Forma de la ecuación	Condición	k1	k2	k3	k4	k5	R ²
$N_f = k1 \cdot \varepsilon^{-k2}$	Deformación 200 – 600 μm	2,20308328948706x10 ¹⁶	4,13039033529567	-	-	-	0,929
$N_f = k1 \cdot \varepsilon^{-k2} \cdot S^{-k3}$	Deformación 200 – 600 μm	1,41056286004180x10 ¹⁷	4,14113311828524	0,2466684909141200	-	-	0,930
	Deformación 200 – 300 μm	4,77446385698195x10 ¹⁴	3,51043085595037	-0,0491537811764662	-	-	0,902
	Deformación 300 – 500 μm	4,71439905445966x10 ¹⁶	4,00763968389894	0,2010561167843910	-	-	0,902
	Deformación 500 – 600 μm	2,48037734849106x10 ²¹	4,82775854766504	1,0032792895433600	-	-	0,875
$N_f = k1 \cdot \varepsilon^{-k2} \cdot S^{-k3} \cdot V_a^{-k4}$	Incluye vacíos de aire (V_a)	9,93725865488674x10 ¹⁶	4,15830641280352	0,0124962181443805	0,619304627065985	-	0,934
$N_f = k1 \cdot \varepsilon^{-k2} \cdot S^{-k3} \cdot TD^{-k5}$	Incluye tensión diametral seca	1,93315347621605x10 ²²	4,24026814355693	-0,0225559514084203	-	1,90542504522024	0,930
	Incluye tensión diametral húmeda	4,18226975748367x10 ⁵⁸	4,24026814355691	-0,0225559514084307	-	14,1399078118627	0,930
	Incluye tensión diametral retenida	4,90840764242901x10 ¹⁶	4,24026814355693	-0,0225559514084215	-	0,163380868239155	0,930
$N_f = k1 \cdot \varepsilon^{-k2} \cdot (V_a \cdot TD_{SECA})^{-k4,5}$		1,06718455293764x10 ²¹	4,23499593714070	-	1,131559716967370		0,930
$N_f = k1 \cdot \varepsilon^{-k2} \cdot S^{-k3} \cdot (V_a \cdot TD_{SECA})^{-k4,5}$		1,51516354581022x10 ²¹	4,24026814355693	-0,0225559514084210	1,185145754385020		0,930

6. CONCLUSIONES

6.1 Los primeros modelos matemáticos generados indican que hay una buena correlación entre la deformación aplicada y la energía disipada total. Se requiere de mayor trabajo experimental para tener mayor certeza de los resultados obtenidos y una vez finalizado este proceso se debe hacer una calibración con una pista de ensayo.

6.3 El ensayo debe realizarse a las deformaciones unitarias de 300, 450 y 600 μ S. El uso de una deformación de 200 μ S, provoca problemas en la realización del ensayo.

6.4 El procedimiento de compactación propuesto funciona adecuadamente para llevar los especímenes de ensayo al nivel de vacíos requerido en cada caso.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Witzack et al, Simple Performance Test for Superpave Mix Design. NCHRP 465, National Academy Press, 2002.
2. Flintch, G. Fatigue Testing Procedure. Virginia Tech, 2002.
3. Harvey et al. Fatigue performance of asphalt concrete mixes and its relationship to asphalt concrete pavement performance in California. Berkeley, 1995.
4. Christensen, D. Top-down fatigue cracking of hot-mix asphalt layers. NCHRP Project 1-42, Advanced asphalt technologies, 2003.
5. Brown, E. Endurance limit of hot mix asphalt mixtures to prevent fatigue cracking in flexible pavements. NCHRP Project 9-38, NCAT, 2004.
6. Yann, L. Asphalt material fatigue test under cyclic loading. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Francia, 2003.
7. Planche, J. Evaluation of fatigue properties of bituminous binders. TotalFinaElf, Francia, 2003.
8. Asphalt Institute. Perpetual pavement fatigue study. AI, 2002.

9. Leiva, F. Modelación mecánica para agrietamiento por fatiga de carpetas asfálticas con bases granulares. LANAMME, UCR, 2003.