

IAG109-01-2013
CALIBRACIÓN DE UN MODELO PARA VALORAR LA
SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO POR FATIGA DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS EN COSTA RICA
CALIBRAÇÃO DUM MODELO PARA AVALIAR A SUSCETIBILIDADE
AO TRINCAMENTO POR FADIGA DE MISTURAS ASFALTICAS NA
COSTA RICA

Fabián Elizondo Arrieta
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica,
LanammeUCR
San José, Costa Rica
fabian.elizondo@ucr.ac.cr

Mónica Jiménez Acuña
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica,
LanammeUCR
San José, Costa Rica
monica.jimenez@ucr.ac.cr

Resumen

Una de las fallas más comunes de los pavimentos en Costa Rica es el agrietamiento por fatiga, este fenómeno se define como un fisuramiento longitudinal a lo largo de la huella (área de contacto entre la llanta del vehículo y el pavimento) producto de la aplicación reiterada de esfuerzos de tensión en la parte inferior de la capa asfáltica, debilitándola y llevándola progresivamente a la falla. Existen varias ecuaciones propuestas para modelar el comportamiento de una mezcla asfáltica y generar criterios de falla para agrietamiento por fatiga. Uno de los modelos más generales relaciona la deformación unitaria que se genera en la fibra inferior de la capa rueda (ϵ) y la rigidez de la mezcla asfáltica (E) con el número de repeticiones de carga requeridos para alcanzar la falla (N). Una de las limitantes para la correcta aplicación de estos modelos es el poder cuantificar la rigidez real de la mezcla asfáltica (E), requiriendo para esto realizar ensayos con equipos más sofisticados y costosos, que actualmente no son de uso común en nuestros laboratorios. Finalmente se propone un modelo general de agrietamiento por fatiga calibrado para las mezclas producidas en Costa Rica, utilizando una regresión que correlaciona propiedades generales de la mezcla asfáltica (contenido de asfalto, granulometría, temperatura de la mezcla y vacíos de aire) con su rigidez. El uso de este modelo permite valorar de manera sencilla la susceptibilidad al agrietamiento y cuantificar el efecto de las propiedades y características de la mezcla asfáltica en su desempeño.

Resumo

Uma das falhas mais comuns dos pavimentos na Costa Rica são as trincas por fadiga, este fenômeno é definido como um fissuramento longitudinal ao longo das trilhas de roda do pavimento (área de contato entre o pneu do veículo e o pavimento) produto da aplicação repetida

de tensões de tração na parte inferior da camada de asfalto, enfraquecendo e tomando-lhe progressivamente à falha. Existem várias equações propostas para modelar o comportamento de uma mistura de asfalto e gerar critérios de falha de trincamento por fadiga. Um dos modelos mais gerais considera a relação da deformação unitária gerada na fibra inferior da camada de rolamento (ϵ) e a rigidez da mistura asfáltica (E) com o número de repetições de carga necessários para alcançar a falha (N). Uma das limitações para a correta aplicação destes modelos é quantificar a rigidez real da mistura asfáltica (E), exigindo para isto testes com equipamentos mais sofisticados e caros, os quais não estão atualmente em nossos laboratórios. Finalmente, propõe-se um modelo geral de trincamento por fadiga calibrado para misturas asfálticas produzidas na Costa Rica, utilizando uma regressão que correlaciona as propriedades gerais da mistura asfáltica (teor de asfalto, graduação, temperatura da mistura e vazios de ar) com sua rigidez. O uso deste modelo permite avaliar facilmente a susceptibilidade ao trincamento e quantificar o efeito das características da mistura asfáltica no desempenho.

INTRODUCCION

El agrietamiento por fatiga es una de las fallas más importantes y comunes de los pavimentos en Costa Rica, una vez generada la falla tiene implicaciones significativas; a partir de su aparición se presenta un deterioro acelerado de la estructura del pavimento producto del ingreso de la humedad a las distintas capas del pavimento degradando y contaminando los materiales componentes de la estructura y finalmente se refleja en la serviciabilidad, el confort, la seguridad y finalmente su vida útil. El interpretar mejor este fenómeno mediante modelos que son calibrados para nuestras condiciones y valorar el efecto que la composición y propiedades de la mezcla asfáltica tienen en el desempeño de la estructura, permite una valoración más objetiva de este fenómeno, mejorando la calidad de los diseños estructurales de pavimentos al predecir mejor la evolución del deterioro, y cuantificar el efecto de las variables que influyen en esta fenómeno.

El agrietamiento por fatiga se define como un fisuramiento longitudinal a lo largo de la huella (área de contacto entre la llanta del vehículo y el pavimento) producto de la aplicación reiterada de esfuerzos de tensión en la parte inferior de la capa asfáltica, debilitándola y llevándola progresivamente a la falla. Existen distintos modelos de fatiga desarrollados alrededor del mundo para predecir el agrietamiento por fatiga.

Ensayos en laboratorio muestran claramente que existe una relación entre la deformación unitaria a tensión en la fibra última de una viga ensayada a flexión y la susceptibilidad a la fatiga. Esta relación observada ha sido extrapolada al pavimento, proponiendo que la deformación unitaria a tensión en la parte inferior de una capa de concreto asfáltico (ϵ_0) está relacionada con el número de repeticiones de carga para la aparición de la grieta en el pavimento. Esta relación ha sido expresada mediante la siguiente forma, Pell 1989:

$$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\epsilon_0} \right)^{K_2} \quad (1)$$

Bonnaure et al. 1980 y Finn et al. 1977 notaron diferencias en el coeficiente de esta ecuación para diferentes temperaturas. Ellos propusieron una fórmula de fatiga utilizando el módulo como se presenta a continuación:

$$N_f = K_1 (\varepsilon_0)^{K_2} (E^*)^{K_3} \quad (2)$$

Donde

E^* es el módulo dinámico de rigidez de la MAC,
 ε es la deformación unitaria a tensión,
 K_1 , K_2 y K_3 son constantes de regresión de los datos.

Introduciendo el módulo de rigidez dinámico dentro de la relación de fatiga pareciera cuantificarse algunas de las diferencias vistas en los coeficientes durante los ensayos de laboratorio al variar la temperatura.

Para tomar en cuenta variaciones en la deformación unitaria, la hipótesis de daño de Miner ha sido utilizada en conjunto con este modelo fenomenológico de fatiga, Miner 1945. La hipótesis de Miner es representada como un factor de daño relativo donde la grieta ocurrirá cuando la suma de los daños de los factores (distintas deformaciones unitarias) se iguale a 1. La hipótesis de daño de Miner se presenta a continuación:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (3)$$

Donde:

D_i = daño relativo durante algún periodo i ,
 n_i = número de aplicaciones de carga durante el periodo i , y
 N_i = número de aplicaciones de carga último que el pavimento puede soportar.

Para utilizar la aproximación de Miner, N_i es determinado mediante la ecuación de fatiga

Existen tres coeficientes que necesitan ser determinados: K_1 , K_2 y K_3 como se muestra en las ecuaciones (1) y (2). Valores diferentes se encuentran en la literatura para el coeficiente K_3 , Finn et al. 1977 encontraron que el coeficiente (K_3) debía ser **-0,854** mientras Bonnaure et al. 1980 encontraron que el coeficiente (K_3) podría corresponder a dos valores **-1,4 y -1,8** basado en el modo de carga. El coeficiente K_2 corresponde a un valor generalmente mayor a 3, mientras que valores de K_1 varían significativamente entre modelos, debido a que es afectado por un factor de ajuste entre los resultados de laboratorio y el desempeño real en campo que depende de condiciones propias del país o estado, como son las características del tránsito y el clima.

Existen varios modelos generados a partir de estas relaciones que toman en cuenta propiedades de la mezcla asfáltica, siendo posible cuantificar de manera indirecta el efecto de las características de la mezcla asfáltica en el desempeño por fatiga. La relación de fatiga del Instituto del asfalto (AI) fue desarrollado con base en datos de fatiga de laboratorio para secciones seleccionadas de la "AASHO road test" por el Instituto del asfalto en 1982, y Finn et al. 1977. La siguiente relación de fatiga fue desarrollada por el instituto del asfalto 1982:

$$N_f = 18,4 \times (C) (4.325 \times 10^{-3} (\varepsilon_i))^{-3.291} |E^*|^{-0,854} \quad (4)$$

Donde:

N_f = Número de cargas de eje equivalente de 18,000lb,
 ϵ_t = deformación unitaria a tensión en la capa asfáltica, (in/in),
 E^* = modulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi), y
 C = función del volumen de vacíos y asfalto.
 18,4 = factor de ajuste campo - laboratorio

La relación de fatiga de la ecuación (4) fue modificado para tomar en cuenta el efecto de los vacíos de aire y del contenido de asfalto de la mezcla. Esto lo realizaron al introducir el factor de corrección (C), igual a:

$$C = 10^M \quad (5)$$

Donde:

$$M = 4,84 \left(\frac{V_b}{V_v + V_b} - 0,69 \right) \quad (6)$$

Donde:

V_b = volumen de asfalto, porcentaje, y
 V_v = volumen de vacíos de aire, porcentaje.

El valor de M fue desarrollado con base en datos de fatiga de laboratorio por Pell y Cooper 1975. Puede verse como el valor de C fue fijado como 1 cuando el volumen de asfalto iguala a 11 y el volumen de vacíos de aire se iguala a 5. Puede notarse como la vida a fatiga se reduce al incrementar el contenido de vacios de aire o reduciendo el contenido de asfalto en la mezcla asfáltica.

Por su parte existen modelos desarrollados con el objetivo de poder predecir la rigidez o módulo dinámico con base en propiedades de la mezcla asfáltica. Witczak et al. 1999 desarrolla para la Guía de Diseño Mecánico Empírica de los Estados Unidos un modelo para predecir la curva maestra de módulo dinámico de mezclas asfálticas basado en propiedades como contenido de asfalto, vacíos de aire, granulometría, viscosidad y frecuencia de aplicación de carga, esta ecuación se presenta a continuación:

$$E^* = -1,249937 + 0,02923 \rho_{200} - 0,001767 (\rho_{200})^2 - 0,002841 \rho_4 - 0,058097 V_a - 0,82208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3,871977 - 0,0021 \rho_4 + 0,003958 \rho_{38} - 0,000017 (\rho_{38})^2 + 0,00547 \rho_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351 \log(f) - 0,393532 \log(\eta))}} \quad (7)$$

Donde:

E^* = modulo dinámico, 10^5 psi,
 η = viscosidad del asfalto a la temperatura y grado de envejecimiento de interés,
 f = frecuencia de carga, Hz,
 V_a = contenido de vacíos de aire, %
 V_{beff} = contenido efectivo de asfalto, % por volumen,
 P_{34} = % retenido acumulado en la malla de 3/4in (19mm),

P_{38} = % retenido acumulado en la malla de 3/8in (9,5mm),
 P_4 = % retenido acumulado en la malla de N°4in (4,76mm),
 P_{200} = % pasando la malla N°200 (0,075mm)

Basado en la teoría y conceptos expuestos se plantea generar un modelo de predicción del fisuramiento por fatiga calibrado para mezclas asfálticas en Costa Rica basado fundamentalmente en propiedades y características de la mezcla asfáltica. El contar con este modelo permitirá valorar la resistencia al agrietamiento por fatiga utilizando información proveniente de ensayos de uso común para la caracterización de mezclas asfálticas en Costa Rica y sin requerir el uso de ensayos que demandan equipos más sofisticados que actualmente no se encuentran en la mayoría de laboratorios del país, dificultando la aplicación de los modelos expuestos. Con este modelo de fácil aplicación será posible una valoración más objetiva de susceptibilidad a la fatiga de nuestras mezclas al mismo tiempo que se podrá valorar el efecto de las distintas variables en el desempeño de la mezcla asfáltica.

CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES Y ENSAYOS REALIZADOS

Mezclas asfálticas analizadas

Un total de 13 mezclas asfálticas representativas de las distintas mezclas producidas en Costa Rica fueron analizadas en este estudio. Las mezclas eran provenientes de 5 zonas distintas del país, lo que implica 5 fuentes distintas de agregado. En general los agregados son producto de la trituración de piedras de río, a continuación se presentan los rangos para las propiedades del agregado para las distintas mezclas estudiadas.

Tabla 1: Rangos para las propiedades del los agregados

Propiedad	Rango
Abrasión de los agregados ensayo LA	19 - 26%
Equivalente de arena	71 - 77%
Índice de durabilidad finos	70 - 85%
Índice de durabilidad gruesos	81 - 93%
Sanidad en sulfato de sodio finos	1 - 3.9%
Sanidad en sulfato de sodio gruesos	1 - 6%
Caras fracturadas	99 - 100%
Partículas planas y elongadas	0.3 - 4.41%
Gbs agregado grueso	2.573 - 2.622
Gbs de agregado fino	2.633 - 2.653
Abs agregado grueso	1.8 - 2.37%
Abs de agregado fino	1.63 - 2.5%

De las 13 mezclas analizadas, 12 de ellas correspondían a granulometrías de tamaño máximo nominal de 12,5mm (1/2”), con % pasando la malla de 2,36mm (N°8) menores a 40% (% pasando N°8 entre 29% y 39%, promedio 33%) siendo caracterizadas como mezclas densas gruesas, una de las mezclas analizadas correspondía a una mezcla de tamaño máximo nominal de 9,5mm (3/8”), con un % pasando la malla de 2,36mm (N°8) de 48.8% categorizada como una mezcla densa fina. Los contenidos de asfalto (PTM) se encontraban en el rango entre 5,1 y 6,3%

para las mezclas de TMN 12.5mm, mientras la mezcla de TMN de 9.5mm presentaba un contenido de asfalto alrededor de 7,0%.

Un único tipo de asfalto fue utilizado para su fabricación, siendo este un asfalto AC30 a continuación se presentan los rangos para las propiedades características del asfalto utilizado para la fabricación de las mezclas asfálticas

Tabla 2: Rangos para las propiedades del asfalto AC30

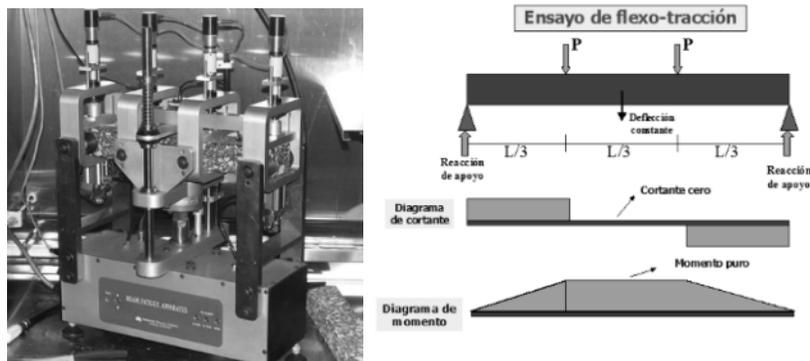
Propiedad	Rango	Rango	
		max.	Min.
Densidad a 25°C	g/cm ³	1,0413	1,0237
Punto de inflamación para asfaltos	°C	348	259
Viscosidad dinámica de asfaltos 135°C	cSt	576,0	454,9
Penetración a 25°C	1/10mm	67,4	48,2
Solubilidad en tricloroetileno	%	99,99	99,94
Pérdida por calentamiento TFOT	%	0,26	0,03
Pérdida por calentamiento RTFOT	%	0,46	0,10
Viscosidad absoluta a 60°C	Poise	3550	2950
Viscosidad absoluta a 60°C postpérdida	Poise	8720	6700
Ductilidad a 25°C postpérdida	cm	100	87

Todas las mezclas asfálticas analizadas fueron diseñadas mediante el método de diseño Marshall, con una energía de compactación de 75 golpes por cara.

Ensayo a escala de laboratorio

El ensayo utilizado a escala de laboratorio fue el de vigas a flexo-tracción, figura 1. Este ensayo consiste en una pequeña viga simplemente apoyada (380 mm de largo x 50 mm de espesor x 63 mm de ancho) sometida a esfuerzos de flexo-tracción mediante cargas aplicadas en los tercios medios de la viga, generando un cortante igual a cero en el tramo central de la viga y momento puro de magnitud constante. El ensayo específico para este estudio se realizó a deformación unitaria constante.

Figura 1: Diagrama viga a flexo-tracción



El ensayo de flexo-tracción en vigas fue realizado a tres temperaturas 10, 20 y 30°C y cuatro niveles de deformación 350, 450, 550 y 650µs (algunas mezclas fueron evaluadas a 250, 450, 550 y 750µs), la velocidad de carga utilizada fue de 10Hz.

ANÁLISIS REALIZADOS

Modelos de regresión por planta

Como se describió previamente, un total de 13 mezclas asfálticas provenientes de 5 zonas distintas del país se incluyeron en el conjunto de datos para el análisis. La modalidad de deformación controlada se utilizó en estos ensayos y el modelo de deformación unitaria- módulo fue planteado para describir todas las mezclas. La tabla 3 contiene los coeficientes de regresión K_1 , K_2 y K_3 para el modelo de fatiga tradicional, ecuación (2).

Tabla 3: Coeficientes de regresión para el modelo deformación unitaria módulo – E (MPa) y ϵ ($\mu\text{s}/10^6$)

N°	Codigo	Region	%Asf (PTM)	% Pas N°8	%Pas N°200	log (K_1)	K_2	K_3	R^2 ajustado
1	ME-U1	Central	5,5%	31,6%	6,08%	23,11088	-5,542	-0,961	0,979
2	ME-U2	Central	5,1%	31,1%	6,22%	26,11457	-6,525	-1,099	0,904
3	HS-S	Pacifico sur	5,7%	34,0%	7,81%	26,40105	-4,857	-2,472	0,967
4	HS-A1	Pacifico central	6,0%	31,4%	5,82%	23,61244	-5,571	-1,032	0,969
5	CB-T1	Central	6,3%	39,8%	5,00%	29,99688	-6,028	-2,556	0,912
6	PA	Central	6,2%	38,1%	6,69%	25,70436	-5,514	-1,679	0,981
7	PB	Central	7,9%	48,8%	9,22%	24,24006	-5,204	-1,334	0,940
8	HS-G1-M	Caribe	5,2%	35,3%	6,70%	36,32716	-7,539	-3,275	0,924
9	HS-R	Pacifico sur	5,7%	32,0%	3,70%	30,26369	-7,170	-1,732	0,908
10	HS-G2	Pacifico central	5,3%	37,0%	6,60%	22,27881	-5,234	-1,016	0,965
11	HS-G3	Caribe	5,0%	28,8%	5,00%	23,28884	-4,949	-1,431	0,592
12	HS-G4-M	Caribe	5,9%	29,0%	5,00%	33,48739	-5,462	-3,679	0,711
13	CB-T2	Central	6,0%	34,9%	5,90%	24,84743	-5,554	-1,483	0,894

Como se observa de la tabla 3 los coeficientes K_2 (entre 4.9 y 7.5) y K_3 (entre 0.96 y 3.6) presentan valores muy dispersos entre las mezclas evaluadas, evidenciando una correlación muy variable entre la deformación unitaria y la rigidez de la mezcla, con la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga. En su totalidad los coeficientes obtenidos tienen magnitudes mayores comparativamente con el modelo del Instituto del Asfalto ($K_2 = -3.291$ y $K_3 = -0.854$), esto implica una tasa mayor de variación en el número de repeticiones para la falla ante un cambio en la deformación unitaria o el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica.

Modelos de regresión generales

Adicionalmente, se desarrollaron dos modelos generales para las mezclas asfálticas analizadas, el primero con base en el en la ecuación (2) y un segundo modelo general basado en la ecuación (8), la en la tabla 4 se muestran los coeficientes de regresión para ambos modelos generales.

$$N_f = K_1 (\epsilon_t)^{K_2} (E^*)^{K_3} (\%Asf)^{K_4} (\%Va)^{K_5} \quad (8)$$

Donde:

N_f = Número de cargas de eje equivalente de 18,000lb,

ϵ_t = deformación unitaria a tensión en la capa asfáltica, (in/in),

E^* = módulo dinámico de la mezcla asfáltica (psi),

%Asf = Porcentaje de asfalto, y
 %Va = Porcentaje de vacíos de aire

Tabla 4: Coeficientes de regresión para modelos generales de fatiga - E (MPa) y ϵ ($\mu\text{s}/10^{-6}$)

Modelo	Codigo	log (K ₁)	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	R ² ajustado
$N_f K_1 (\epsilon_i)^{K_2} (E^*)^{K_3}$	FCR-1	26,03137	-5,858	-1,528	NA	NA	0,839
$N_f K_1 (\epsilon_i)^{K_2} (E^*)^{K_3} (\%Asf)^{K_4} (\%Va)^{K_5}$	FCR-2	29,4160	-5,858	-1,664	3,226	-0,856	0,905

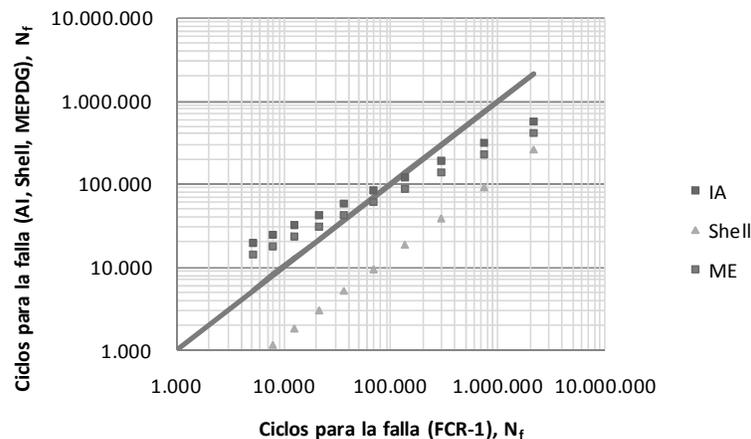
De los resultados del análisis ANOVA y de la significancia para cada una de las variables se concluye que el modelo es significativo, así como las variables que explican el modelo, lo anterior con más de un 99% de confianza, Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros estadísticos para los modelos generales

Modelo	Codigo	F ₀	Valor crítico F	Significancia			
				e	E	%Asf	%Va
$N_f K_1 (\epsilon_i)^{K_2} (E^*)^{K_3}$	FCR-1	3,63E+02	1,67E-55	9,934E-20	2,471E-53	NA	NA
$N_f K_1 (\epsilon_i)^{K_2} (E^*)^{K_3} (\%Asf)^{K_4} (\%Va)^{K_5}$	FCR-2	3,34E+02	6,25E-69	8,76E-65	1,74E-27	1,40E-08	1,30E-10

La susceptibilidad a la fatiga medida a través de los modelos generales desarrollados de los ensayos de laboratorio fue comparada con los modelos del Instituto del Asfalto, Shell y la Guía Mecánica Empírica de los Estados Unidos. La Figura 2 muestra la comparación de la vida a fatiga calculada a través del modelo de fatiga general FCR-1 con los modelos mencionados, el análisis se llevó a cabo para una mezcla con módulo de 3000MPa y deformaciones unitarias entre los 250 y 700 μs .

Figura 2: Comparación del modelo general desarrollado con otros modelos internacionales



Al comparar el Modelo General desarrollado (FCR-1) con el Modelo del Instituto del Asfalto, el modelo FCR-1 presenta una mayor tasa de variación en los ciclos de falla ante un cambio de la deformación unitaria, explicado por las diferencias del exponente K₂. Para deformaciones unitarias menores el modelo del IA subestima el número de ciclos para la falla, mientras que a deformaciones unitarias mayores sobrestiman el número de ciclos. Comportamiento similar ocurre con el modelo MEPDG, dado que este se basa en el modelo del IA con una variación en el

factor de ajuste que tiende reducir ligeramente el número de ciclos para la falla de las mezclas asfálticas.

Por su parte al comparar el modelo FCR-1 con el modelo de la Shell, estos presentan una tasa de variación similar del número de ciclos para la falla ante un cambio en la deformación unitaria, comportamiento acorde con las similitudes del exponente K2, sin embargo el modelo de la Shell subestima el número de repeticiones para la falla. De lo anterior se concluye que ambos modelos utilizados frecuentemente para el diseño estructural de pavimentos en Costa Rica, presentan comportamientos distintos a los obtenidos para las mezclas analizadas.

Modelo de regresión general basado en propiedades y características de la mezcla asfáltica

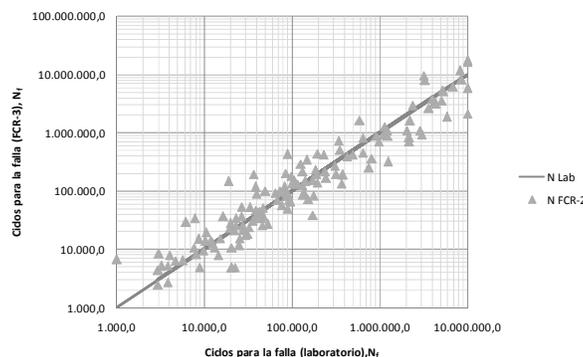
El modelo de transferencia de fatiga basado en propiedades y características de la mezcla asfáltica requirió generar un modelo de predicción de la rigidez o módulo dinámico con base en las características de la mezcla asfáltica. Basados en el modelo de Witczack se definieron las variables de la mezcla asfáltica que pudieran estar relacionadas con su rigidez, a saber viscosidad del asfalto, frecuencia de carga, contenido de asfalto, granulometría y vacíos de aire. Por tratarse de mezclas asfálticas dentro de un ámbito limitado, caracterizados por un único tipo de asfalto, granulometrías con TMN de 12.5 de tipología densa gruesa (% pas N°8 > 40%), y agregados con características similares, se logró simplificar el modelo de predicción de la rigidez, ECR-1, el cual presenta una correlación aceptable, $R^2=0,77$, Tabla 5.

Tabla 5: Coeficientes de regresión E_{pred} y $N_f=f(E_{pred})$

Modelo	Codigo	log (K ₁)	K ₂	K ₃	K ₄	R ² ajustado
$E_{pred} K_1(T^{\circ}C)^{K_2}(\%A)^{K_3}(\%N^{\circ}8)^{K_4}$	ECR-1	4,20823	-1,034	-0,311	-0,519	0,770
$N_f K_1(\varepsilon_r)^{K_2}(E_{pred})^{K_3}(\%As)^{K_4}(\%A)^{K_5}$	FCR-3	29,33425	-5,531	-1,820	3,445	0,893

Utilizando la regresión para la predicción de la rigidez se desarrolló un modelo general de fatiga basado en la deformación unitaria ε y propiedades de la mezcla asfáltica. Con base en el R^2 ajustado =0,893 se concluye que este modelo muestra una buena correlación con el comportamiento real de la mezcla asfáltica analizadas, estos resultados de muestran gráficamente en la Figura 3.

Figura 2: Ciclos para la falla Laboratorio vrs Modelo general FCR-3



CONCLUSIONES

El modelo de fatiga propuesto por el Instituto del Asfalto y la Guía de Diseño Mecánico Empírica de los Estados Unidos (MEPDG) subestiman el número de ciclos para la falla para deformaciones unitarias bajas, mientras que a deformaciones unitarias mayores sobrestiman el número de ciclos para la falla.

El modelo de la Shell subestima el número de ciclos para la falla.

Se propone un modelo general de fatiga que predice adecuadamente el comportamiento real de las mezclas analizadas (R^2 ajustado = 0.893). Este modelo está basado en la deformación unitaria a tensión, y propiedades de la mezcla asfáltica: porcentaje de asfalto, vacíos de aire, temperatura y % pasando la malla N°8.

El modelo propuesto es de fácil aplicación, permite una valoración más objetiva de susceptibilidad a la fatiga al mismo tiempo que se podrá valorar el efecto de las distintas variables en el desempeño de la mezcla asfáltica.

REFERENCIAS

Yang H, H. Pavement Analysis and Design. Second Edition, *Kentucky, 2002*.

Carpenter, S. (2006). Fatigue Performance of IDOT Mixtures, Research Report FHWA-ICT-07-007. Illinois Center of Transportation. Illinois, ISSN#0197-9191

Adhikary, S., You, Z. (2010). Fatigue Evaluation of Asphalt Pavement Using Beam Fatigue Apparatus. *Technology and Interface Journal*, Vol. 10, No. 3, ISSN#1523-9926.