

Desarrollo de modelos de fatiga para capas asfálticas

Ing. José Pablo Aguiar Moya
Ing. Luis Guillermo Loría Salazar
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica

Con la aparición en el ámbito internacional de nuevas guías de diseño mecanístico-empírico mucho más sofisticadas de diseño de estructuras de pavimentos, estamos en la obligación de estudiarlas y eventualmente, de llegar a ser factible, aplicarlas; pero, ¿Serán dichas guías aplicables a Costa Rica?, ¿Será que dichas guías fueron concebidas y diseñadas para condiciones ambientales, de carga, de tipos de suelos y materiales similares a las de nuestro país? Evidentemente NO

Con el fin de poder usar dichas guías se debe llevar todo un complejo proceso de calibración mediante el cual se adapten los distintos modelos a nuestras condiciones; algo que comúnmente se ha denominado en nuestros países como “tropicalización”, y sin lo cual no se puede pretender tratar de usar estos modelos en Costa Rica.

El ensayo

Para la determinación de las propiedades de fatiga en laboratorio, se ha usado el ensayo de resistencia a la flexo-tracción en vigas (AASHTO T 321-03), con aplicación de deformaciones unitarias constantes.

Para la ejecución de dicho ensayo, se mezclan y compactan bloques de mezcla asfáltica haciendo uso de un compactador de rodillo para laboratorio con el fin de alcanzar los vacíos de aire especificados para la mezcla asfáltica. Dichos bloques son posteriormente cortados para obtener las vigas a ser ensayadas.

A manera de resumen, el método consiste en aplicar cargas cíclicas que inducen deformaciones constantes a las vigas, hasta que las mismas alcancen una rigidez equivalente a la mitad de la rigidez inicial de la mezcla asfáltica, o de ser el caso de aplicarse deformaciones unitarias muy bajas en las que no se logra alcanzar dicha rigidez, el ensayo se detiene a los diez millones de ciclos de carga ($N = 10^7$).



Figura 1. Equipo compactador de vigas

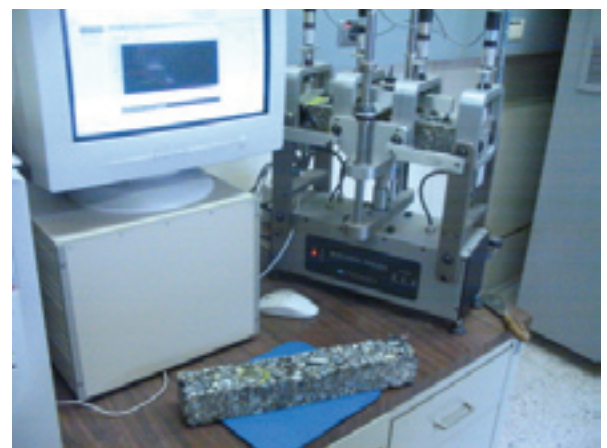


Figura 2. Equipo de fatiga en vigas para laboratorio

Los resultados

De esta forma, en el LanammeUCR se han venido realizando más de 47 ensayos, los que incluyen tanto mezclas de campo, como mezclas remoldeadas en el laboratorio de varias plantas productoras de mezcla asfáltica.

De la información obtenida de los ensayos se puede resaltar los esfuerzos y deformaciones a tensión máximos (σ , ϵ), la rigidez a la flexión total (S), el módulo de elasticidad de la mezcla (E), el ángulo de fase (δ), y la energía disipada por ciclo y acumulada (como indicador de elasticidad de la mezclas asfálticas).

El desarrollo de los modelos

Como se vio anteriormente, ya se cuenta con una base de datos considerable, por lo que se ha iniciado un proceso de desarrollo de modelos mediante los cuales se pueda llegar a predecir adecuadamente el desempeño a fatiga de nuestras mezclas asfálticas.

Para iniciar, nos hemos basado en modelos con formas similares a los que se han venido manejando a nivel internacional, y que han sido desarrollados previamente en muchos países tanto de América del Norte, como de Europa y América del Sur, entre otros. Esto con el fin de poder hacer una comparación del nivel de predicción que brindan los modelos que se están desarrollando.

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

$$N_f = k_1 \cdot \epsilon^{-k_2} \cdot S^{-k_3}$$

Ecuación (1)

Donde:

ϵ = deformación unitaria

S = rigidez de la mezcla asfáltica

De esta manera se ha dado inicio a un proceso de modelación de ecuaciones o leyes de fatiga para las mezclas asfálticas con materia prima costarricense (agregado y ligante asfáltico de origen nacional) mediante análisis de regresión (para la banda inferior de un intervalo de predicción al 95%); de tal forma que se pueda diseñar y caracterizar de mejor manera los pavimentos asfálticos de Costa Rica.

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 modelación:

$$N_f = 4,345 \times 10^{16} \cdot \epsilon^{-4,0651} \cdot S^{-0,260}$$

Ecuación (2)

Donde:

ϵ = 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 llevar la mezcla asfáltica a la falla por fatiga.

Adicionalmente, se realizó un análisis de coeficientes a partir del cual se determinó que la variable deformación unitaria (ϵ) es significativa en el modelo a más del 99% de confianza. Sin embargo se encontró que la variable rigidez (S), 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

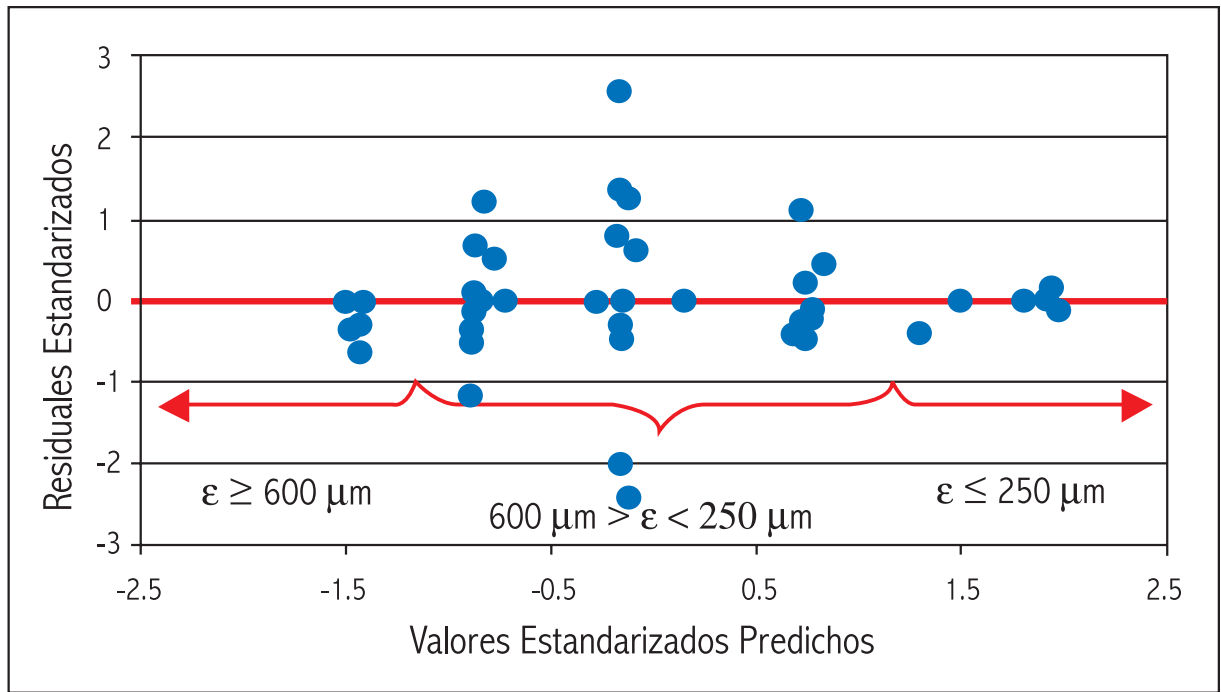


Figura 3. Valores residuales estandarizados para el modelo

regresión es significativa en cuanto a los valores predichos.

A continuación, y dado que, como se observó anteriormente, la variable rigidez (S) pareciera no ser tan significativa estadísticamente en el modelo, se buscó desarrollar un modelo de regresión que involucrara únicamente la variable deformación unitaria (ϵ). De esta manera, se obtuvo la siguiente expresión:

$$N_f = 9,269 \times 10^{15} \cdot \epsilon^{-4,116} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

ϵ = deformación unitaria, en μm .

De dicha modelación se obtuvo una correlación de 0,964 ($R^2 = 0,929$), lo cual nos indica que dicha ecuación nos 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 (ϵ) 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, se podría sugerir, para proyectos de bajo volumen de tránsito que el mismo (en futuras etapas, cuando se cuente con bases de datos más extensas, y calibraciones con tramos de prueba a escala real) sea usado como una primera aproximación en la determinación de los ciclos de carga necesarios para llevar la mezcla asfáltica a la falla por fatiga, pues, depende únicamente del parámetro deformación unitaria (ϵ) que puede ser calculado con relativa facilidad mediante técnicas de análisis mecánico — empírico, o de elemento finito para estructuras de pavimento nuevo, y mediante mediciones de deflectómetros y retrocálculos, o ensayos en laboratorio de muestras de campo, para pavimentos ya existentes.

Modelo de fatiga que incluye vacíos de aire

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

Se obtuvo la siguiente ley de fatiga:

$$N_f = 9,937 \times 10^{16} \cdot \varepsilon^{-4,158} \cdot S^{-0,012} \cdot V_a^{-0,619}$$

Ecuación (4)

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 a partir del cual se determinó que la variable deformación unitaria (ε) y la variable vacíos de aire (V_a) son significativas en el modelo a más del 99% de confianza y al 75% de confianza respectivamente. La variable rigidez (S), se encontró 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.

Modelo que incluye tensión diametral

Ahora, puesto que la introducción en el modelo del parámetro vacíos de aire en la mezcla (V_a) produjo buenos resultados, se pensó en introducir al modelo una variable de desempeño que se pudiera determinar con facilidad. 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 presenta el modelo que incluye la resistencia a la tensión diametral en estado seco, pues es el que presentó una mejor correlación:

$$N_f = 1,933 \times 10^{22} \cdot \varepsilon^{-4,240} \cdot S^{0,023} \cdot TD^{-1,905}$$

Ecuación (5)

Donde:

ε = deformación unitaria, en μm .

S = rigidez de la mezcla asfáltica, en MPa.

TD = resistencia a la tensión diametral, en kPa.

De la modelación anterior se obtuvo una correlación de 0,964 ($R^2 = 0,930$) la cual, como se ha mencionado anteriormente es una alta correlación.

Adicionalmente, se realizó un análisis de coeficientes del cual se determinó que la variable deformación unitaria (ε) es significativa a más del 99% de confianza. Sin embargo, se encontró que la variable rigidez (S) es solo significativa al 10% de confianza. También, se evaluó la variable resistencia a la tensión diametral y se determinó que la misma es significativa a más del 40% de confianza.

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

También se desarrollaron modelos que incluyen tanto tensión diametral en estado seco, como los vacíos de aire en la mezcla (incluyendo y excluyendo la rigidez de la mezcla) que no se muestran acá, pues tienen correlaciones muy similares a los modelos que incluyen los parámetros individualmente.

En la Figura 4, se presenta un resumen de los modelos mencionados anteriormente. En la misma

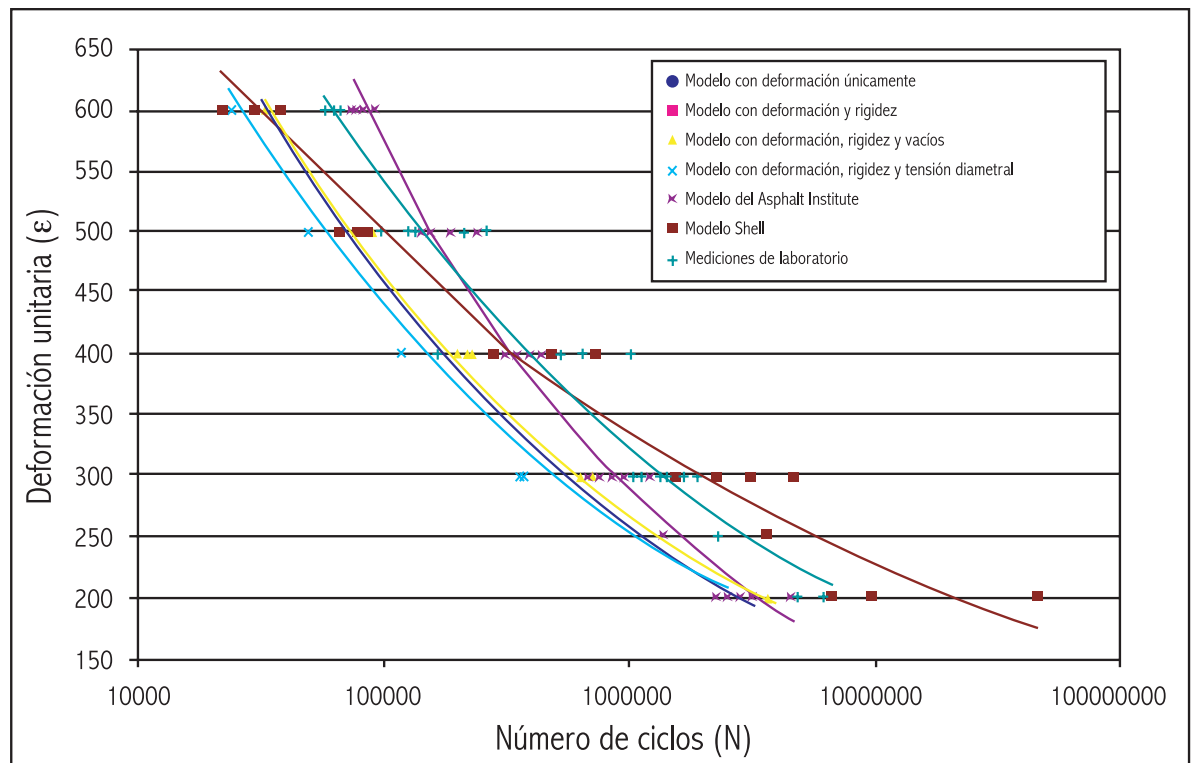


Figura 4. Resumen de modelos preliminares de fatiga desarrollados

figura se incluyen tanto el modelo desarrollado por el Asphalt Institute, así como el modelo desarrollado por Shell (hay que hacer la aclaración de que los modelos desarrollados en laboratorio para nuestras condiciones no pueden ser comparados directamente con modelos como los de la Shell o el Asphalt Institute, pues no cuentan con una calibración de campo).

Como se puede observar, ambos modelos internacionales sobreestiman, en algunos casos considerablemente, los ciclos de carga necesarios para llevar nuestras mezclas asfálticas a la falla por fatiga. Además se resalta que nuestros modelos están por debajo de los internacionales y que estos corresponden a la banda inferior al 95% de una distribución normal, con lo que se espera que dichos modelos incluyan la mayoría de las observaciones experimentales realizadas.

Conclusiones

A manera de conclusión se quiere resaltar la importancia de que ya se estén desarrollando en el país modelos de caracterización por desempeño, tanto para mezclas asfálticas, así como para bases estabilizadas y granulares; todo esto en aras de que cada día que pasa, el diseñador de pavimentos tenga más herramientas para poder garantizar estructuras de pavimentos resistentes y durables, con altos índices de funcionalidad para los usuarios de las vías, quienes son, en última instancia, los verdaderos beneficiados.

También se quiere recalcar, que dichos modelos son aún preliminares, y que aún falta camino por recorrer para que dichos modelos puedan ser aplicables. Una de las principales limitantes de los mismos es que fueron generados a partir de información medida únicamente en laboratorio, y que aún no han sido calibrados con mediciones del desempeño de pavimentos a escala real, lo cual, como se mencionó anteriormente, es el siguiente paso lógico.