

Aplicación de enfoques de análisis y criterios de rotura en ensayos de fatiga y su influencia en la predicción de la vida útil de la capa de rodadura asfáltica en la estructura del pavimento

Use of analysis approaches and failure criteria on fatigue tests and their influence to estimate the lifespan of the asphalt surface layer on pavement structures

J. Staub de Melo ^{1*}, I. Buzzi Torres ^{*}, J. Villena ^{**}

* Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, BRAZIL

** Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, BRAZIL

Fecha de Recepción: 28/11/2018

Fecha de Aceptación: 08/04/2019

PAG 268-277

Abstract

The obtaining of fatigue models of asphalt mixtures, are part of the procedures of advanced characterization of the material and are used for the design of pavements. However, there are several approaches to analysis and failure criteria that can be used. These approaches and criteria may not produce the same models of fatigue, resulting in different thicknesses of the asphalt surface in the pavement structure. This study presents the results of the influence of two approaches of analysis (phenomenological and accumulated dissipated energy) and two criteria of rupture (conventional and Pronk & Hopman) in obtaining fatigue models of the asphalt mixture, and its repercussion in the estimation of useful life of the asphalt surface in the pavement structure. The results show that the phenomenological approach is more conservative than the accumulated dissipated energy, as well as the Pronk & Hopman criterion in relation to the conventional criterion, that is, the type of approach and the criterion of rupture adopted will directly affect the final thickness of the projected asphalt surface.

Keywords: Asphalt mix, fatigue resistance, analysis approaches, rupture criteria, numerical simulation

Resumen

Obtener los modelos de fatiga de mezclas asfálticas es parte de los procedimientos de caracterización avanzada de este material y los mismos son utilizados para el diseño del pavimento. No obstante, existen diversos enfoques de análisis y criterios de rotura que pueden ser utilizados. Estos enfoques y criterios pueden producir modelos de fatiga diferentes y, en consecuencia, capas asfálticas con espesores diferentes en la estructura del pavimento. Este estudio presenta los resultados de la influencia de dos enfoques de análisis, fenomenológico y de energía disipada acumulada, y dos criterios de rotura, convencional y de Pronk & Hopman, en la obtención de los modelos de fatiga de la mezcla asfáltica, y su repercusión en la estimación de la vida útil de la capa en la estructura del pavimento. Los resultados muestran que el enfoque fenomenológico es más conservador que el de energía disipada acumulada, como también lo es el criterio de Pronk & Hopman en relación al criterio convencional, es decir, el tipo de enfoque y el criterio de rotura adoptado repercutirán directamente en el espesor final de la capa diseñada.

Palabras clave: Mezcla de asfalto, resistencia a la fatiga, enfoques de análisis, criterios de rotura, simulación numérica

1. Introducción

Los pavimentos asfálticos generalmente no muestran roturas bruscas o repentinas, si no, deterioraciones funcionales y estructurales acumuladas en el momento en que son solicitados por cargas dinámicas. Por eso, es importante estudiar el origen de esas manifestaciones patológicas para perfeccionar el desempeño mecánico y funcional del pavimento (Bernucci et al., 2010).

El fenómeno de fatiga es uno de esos mecanismos de degradación que consiste en la sollicitación de un determinado material a cargas cíclicas con bajos niveles de tensión y deformaciones (Khalid, 2000). La flexión alternada y repetida en la capa de rodadura asfáltica, causada por las sollicitaciones dinámicas del tráfico de vehículos, provoca tensiones de tracción y compresión en el material, promoviendo la nucleación y el crecimiento de microgrietas en su interior, las cuales comprometen la vida útil a medida que el número de aplicaciones de carga avanza (Melo, 2014).

En ese contexto, obtener los modelos de fatiga de la mezcla asfáltica permite la previsión del desempeño de la

capa de rodadura asfáltica en la estructura del pavimento, relacionada con la rotura por fatiga, y en consecuencia, un diseño más confiable del espesor necesario de la capa, en función del volumen de tráfico y del horizonte de proyecto que la carretera debe tener (Melo, 2014).

Existen, sin embargo, diversos ensayos que sirven para definir la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, en los que pueden ser adoptados diferentes enfoques de análisis y criterios de rotura. Algunos ejemplos de estos ensayos son: flexión en cuatro puntos, flexión en dos puntos, uniaxial de tracción-compresión, tracción indirecta, etc. (Zeida, 2012). Con relación a los enfoques de análisis y criterios de rotura, gran parte de las normas (AASHTO T321, 2014); (EN 12697-24, 2018) especifica el enfoque fenomenológico y el criterio de rotura convencional de 50% de la reducción del módulo inicial del material. No obstante, este enfoque de análisis y este criterio de rotura, a pesar de ser constantemente empleados en la concepción de los modelos de fatiga, no proporcionan una descripción detallada de los mecanismos de degradación del material (Sybilski y Bankowski, 2007). Por eso, diversos investigadores (Ameri et al., 2017); (Shadman y Ziari, 2017); (Pasetto y Baldo, 2017); (Dondi et al., 2013) están aplicando otros enfoques y criterios de rotura, más

¹Autor de correspondencia:
Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis-SC, BRASIL
E-mail: joao.victor@ufsc.br

mecanicistas, de entre los cuales están los que se basan en la energía disipada.

Este artículo presenta los resultados de un estudio que trata sobre la influencia de la aplicación de diferentes enfoques de análisis y criterios de rotura en la ley de fatiga de la mezcla asfáltica, y su repercusión, en la vida útil estimada de la capa de rodadura asfáltica en la estructura del pavimento.

2. Materiales

Para desarrollar este estudio fue diseñada una mezcla asfáltica en laboratorio y obtenidas diez probetas prismáticas (38.1 cm x 6.35 cm x 5.08 cm), para realizar los ensayos de fatiga y módulo complejo en el ensayo de flexión en cuatro puntos de apoyo. Para el diseño y producción de la mezcla fueron utilizados los siguientes materiales: ligante asfáltico, agregados minerales y cal hidratada CH-1 dolomítica, clasificada como Tipo II según la (AASHTO M303, 2014).

2.1 Ligante asfáltico

El ligante asfáltico utilizado fue de tipo convencional con las siguientes características: penetración de 55 décimos de milímetro (ASTM D5, 2013); punto de ablandamiento de 50.2 °C (ASTM D36, 2014); viscosidad aparente de 4.12 poise a 135 °C, 2.07 poise a 150 °C y 0.85 poise a 175 °C (ASTM D4402, 2015); índice de susceptibilidad térmica de -

0.92 Performance Grade (PG) de 64-22 conforme la (Tabla 3) de la norma (AASHTO M320, 2017).

2.2 Agregados minerales

Los agregados minerales son de origen basáltica con las siguientes propiedades: 100%/100% de angularidad del agregado grueso (ASTM D5821, 2017); 49.18% de angularidad del agregado fino (ASTM C1252, 2017); 9.59 de partículas planas y alargadas (ASTM D4791, 2019), 61.2% de terrones de arcilla (ASTM T176, 2017); 11.58% de dureza (ASTM C131, 2014); 2.14 de sanidad (ASTM C88, 2018); ausencia de partículas deleznable (AASHTO T112, 2017); 2.953 g/cm³, 2.880 g/cm³, 0.849% de gravedad específica real, aparente y absorción del agregado grueso, respectivamente (ASTM C127, 2015); 2.974 g/cm³ de gravedad específica real del agregado fino (DNER-ME 084, 1995) y 2.804 g/cm³ de gravedad específica real del filler (DNER-ME 085, 1994).

2.3 Curva granulométrica

La definición de la curva granulométrica se basó en los criterios del método Superpave para un tamaño máximo nominal de 19 mm. Así, la curva granulométrica estuvo constituida de 56.7% de agregado grueso (que pasa por el tamiz de ¾" y es retenido en el tamiz N° 4), 37.9% de agregado fino (que pasa por el tamiz N° 4 y es retenido en el tamiz N° 200) y 5.4% de filler (que pasa por el tamiz N° 200 y es retenido en el fondo). La composición del filler fue de 3.9% de polvo de piedra y 1.5% de cal hidratada. La composición granulométrica es mostrada en la (Figura 1).

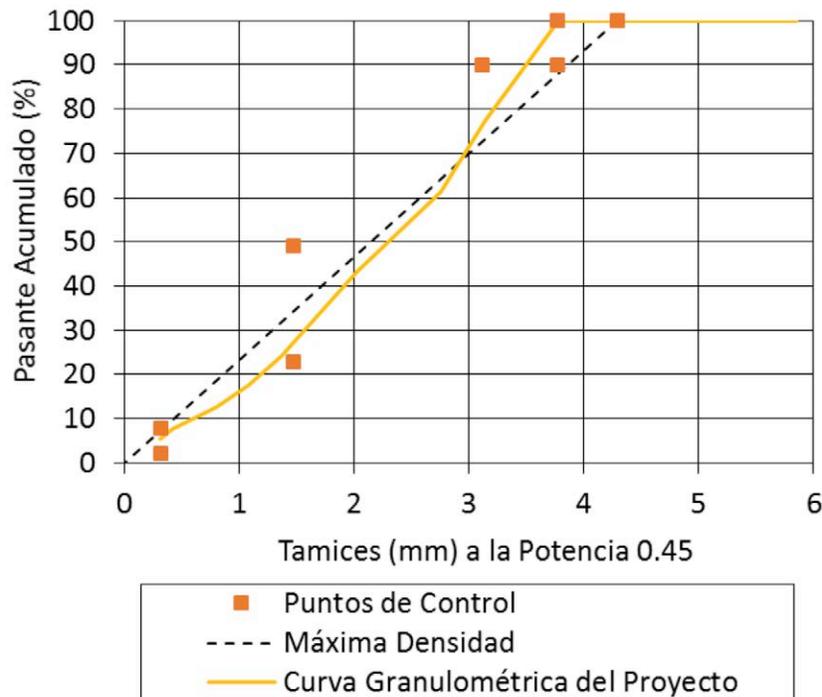


Figura 1. Composición granulométrica de la mezcla de agregados



2.4 Diseño de la mezcla asfáltica

El diseño de la mezcla asfáltica fue realizado en el compactador giratorio Superpave, para un volumen de tráfico pesado ($N_{\text{inicial}} = 9$ giros; $N_{\text{proyecto}} = 125$ giros; $N_{\text{máximo}} = 205$ giros). Los procedimientos adoptados para el diseño, siguieron las recomendaciones de las normas (AASHTO M323, 2017) y (AASHTO R35, 2017). Fueron fijados los siguientes parámetros: ángulo de giro de 1.25° , esfuerzo vertical de 600 kPa y velocidad de giro de 30 rpm. El contenido óptimo de ligante atendió los siguientes criterios: volumen de aire (V_a) en $N_{\text{inicial}} > 11\%$, en $N_{\text{proyecto}} = 4\%$ y en $N_{\text{máximo}} > 2\%$; vacíos en el agregado mineral (VMA) $\geq 13\%$; vacíos llenos con asfalto (VFA) entre 65% y 75%; y, relación filler/asfalto entre 0.8 a 1.6. La mezcla diseñada fue sometida al ensayo de daño inducido por humedad, Lottman modificado, (AASHTO T283, 2018).

La mezcla diseñada tuvo las siguientes características: contenido de ligante de 4.45%, V_a de 4.01%, VMA de 14.12%, VFA de 71.57% y relación filler/asfalto de 1.37, atendiendo a todos los criterios del método Superpave. Los

resultados del ensayo de daño inducido por humedad mostraron una reducción de 5% de la resistencia a la tracción, valor inferior al límite de 30% fijado por la norma.

2.5 Obtención de las probetas prismáticas

Una vez diseñada la mezcla en laboratorio, fue realizada la compactación de placas de mezcla asfáltica que sirvieron para la obtención de probetas prismáticas con las siguientes dimensiones: 38.1 cm x 6.35 cm x 5.08 cm. La compactación de las placas fue realizada en la mesa compactadora del LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), actualmente llamado IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux). El proceso de compactación se basó en la norma francesa (AFNOR NF P 98-250-2, 1991). Fueron compactadas dos placas de 60 cm x 40 cm x 9 cm; de cada placa fueron extraídas, con sierra circular, 5 probetas prismáticas. La (Figura 2) muestra las etapas del proceso de compactación y extracción de las probetas.

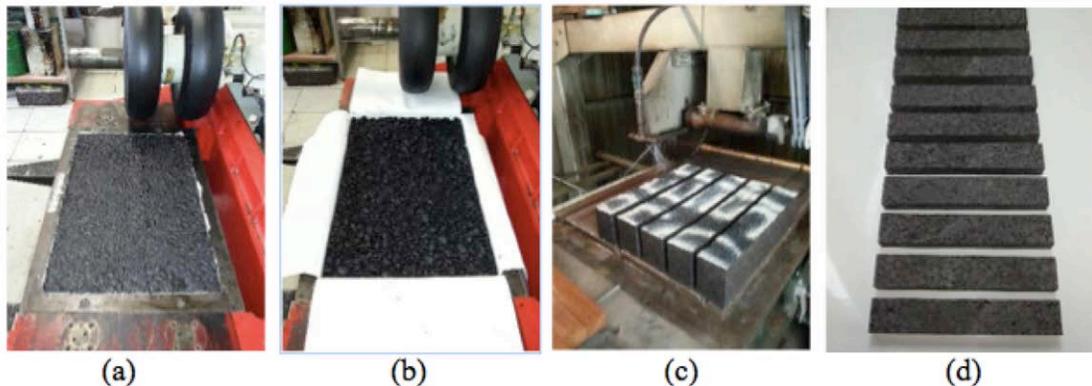


Figura 2. Obtención de las probetas: a) compactación; b) placa compactada; c) corte de la placa; y, d) probetas prismáticas

3. Métodos

Una vez obtenidas las probetas, los métodos utilizados en el presente estudio tuvieron la siguiente estructura:

3.1 Determinación de la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica

En esta etapa fue determinado, inicialmente, el módulo dinámico de la mezcla asfáltica según las recomendaciones de la norma (EN 12697-26, 2018) y a continuación, la resistencia a la fatiga según la norma (EN 12697-24, 2018); ambos ensayos fueron realizados en la máquina de fatiga de flexión a cuatro puntos de apoyo. De diez probetas producidas, fueron seleccionadas ocho, y de estas ocho, dos fueron utilizadas para obtener el módulo dinámico y seis para el ensayo de fatiga. El ensayo de módulo dinámico fue realizado con frecuencia de 10 Hz, temperatura de 20 °C, deformación controlada de 50 $\mu\text{m/m}$ y carga

sinusoidal continua. Los ensayos de resistencia a la fatiga fueron realizados con frecuencia de 10 Hz, temperatura de 20 °C, carga sinusoidal continua, deformación controlada y criterio de rotura igual a la reducción de 80% del módulo inicial (siendo que el módulo inicial fue determinado en el centésimo ciclo), con la finalidad de que sea posible aplicar los diferentes enfoques de análisis y criterios de rotura en los datos obtenidos en el ensayo.

3.2 Obtención de los modelos de fatiga

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de fatiga, fueron aplicados, a los datos, dos criterios diferentes de rotura por fatiga: el criterio convencional y el de Pronk & Hopman. El criterio de rotura convencional define la falla como el momento en el que el módulo del material se reduce al 50% de su valor inicial. En el criterio de Pronk & Hopman, se plotea la tasa de energía disipada en función del número de ciclos de carga; el punto de falla es igual al número de ciclos que son necesarios para que la tasa de la energía

SPANISH VERSION.....

disipada se desvíe de una línea recta tangente al primer segmento de la curva. Según el criterio de Pronk & Hopman, la tasa de energía disipada puede ser calculada por la (Ecuación 1). Los criterios de rotura son mostrados en la (Figura 3).

$$ER = n \times \frac{w_o}{w_n} = \frac{n [\pi \varepsilon_o \sigma_o \text{sen}(\delta_o)]}{\pi \varepsilon_n \sigma_n \text{sen}(\delta_n)} \quad (1)$$

Donde: ER = tasa de energía disipada en el ciclo n; n = número de ciclos de carga; w_n = energía disipada en el ciclo n; w_o = energía disipada inicial (50º ciclo); ε_o = deformación inicial; σ_o = tensión inicial; δ_o = ángulo de fase inicial; ε_n = deformación para el ciclo n; σ_n = tensión para el ciclo n; δ_n = ángulo de fase para el ciclo n.

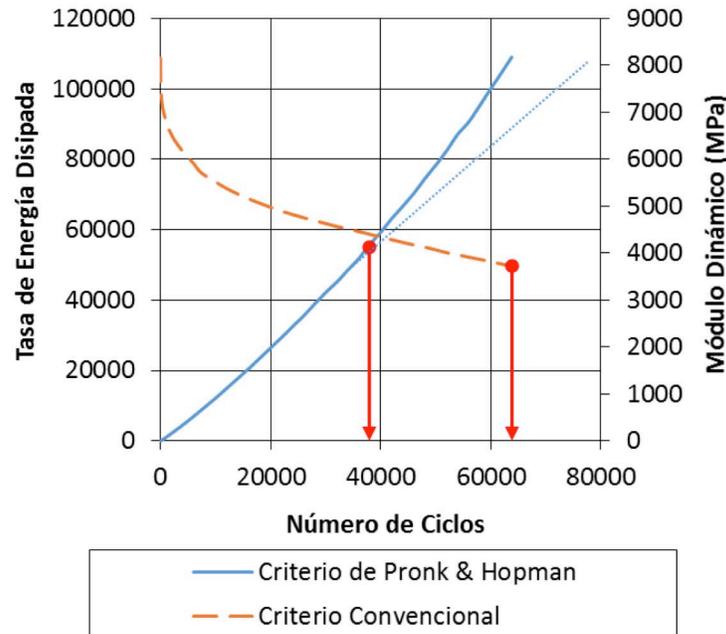


Figura 3. Representación de los criterios de rotura convencional y de Pronk & Hopman

Después de que los criterios de rotura fueron aplicados, para cada criterio, fueron obtenidos los modelos de fatiga con los dos enfoques de análisis, el fenomenológico y el de energía disipada acumulada. En el enfoque fenomenológico, el modelo de fatiga fue obtenido relacionando las microdeformaciones y el número de ciclos de rotura, es decir, por medio de la curva de Wöhler (Ecuación 2).

$$N_f = k_1 (\varepsilon_t)^{-k_2} \quad (2)$$

Donde: N_f = número de ciclos para la rotura; ε_t = microdeformación de tracción; k_1 y k_2 = constantes.

En el enfoque de la energía disipada acumulada, el modelo de fatiga fue desarrollado como siendo la relación entre la energía disipada acumulada y el número de ciclos, ambos en el momento de la rotura por fatiga; el modelo es mostrado en la (Ecuación 3).

$$N_f = A(W_{ac})^2 \quad (3)$$

Donde: W_{ac} = energía disipada acumulada en la rotura; N_f = número de ciclos para la rotura; Z y A = constantes.

3.3 Estimación de la vida de fatiga de la capa de rodadura asfáltica en la estructura del pavimento

En la etapa final del estudio, fue estimada la vida de fatiga de la capa de rodadura asfáltica en la estructura de un pavimento, utilizando los diferentes modelos de fatiga obtenidos. El objetivo de esta etapa fue poner en evidencia la influencia de los diferentes métodos de análisis y criterios de rotura en la estimación de la vida útil de la capa de rodadura asfáltica bajo el efecto de las cargas dinámicas.

Con ese propósito, se realizó una simulación numérica utilizando el programa ViscoRoute (desarrollado por el IFSTTAR/França), el cual considera los parámetros viscoelásticos de la capa de rodadura asfáltica. El programa incluye, también, como datos de entrada, la velocidad de las cargas y la temperatura de la mezcla asfáltica. Para la simulación, fue considerado un eje simple de rueda doble de 8.2 toneladas circulando a la velocidad de 72 km/h, velocidad equivalente a una frecuencia de ensayo de 10 Hz



(Chabot et al., 2010), con una distancia de 32 cm entre las ruedas, carga por rueda de 2050 kgf, área circular de contacto entre la rueda y el pavimento de 366 cm² y presión de contacto de 5.6 kgf/cm². La temperatura de la capa de rodadura asfáltica fue considerada igual a 20 °C; esta temperatura fue la misma utilizada en el ensayo de

resistencia a la fatiga y módulo dinámico. Para la estructura del pavimento fueron definidas las siguientes características: capa de rodadura asfáltica de 18 cm, base de 18 cm, subbase de 20 cm y subrasante infinita. La (Tabla 1) presenta los parámetros utilizados en la simulación numérica.

Tabla 1. Características de la estructura del pavimento

Capas	Comportamiento Reológico	Módulo (MPa)	Ángulo de Fase (°)	Poisson (ν)
Capa de rodadura asfáltica (20 °C y 10 Hz)	Viscoelástico Lineal	7895*	24.4*	0.30
Base	Elástico Lineal	260	-	0.35
Subbase	Elástico Lineal	210	-	0.35
Subrasante	Elástico Lineal	180	-	0.35

* Resultados obtenidos en el ensayo de módulo dinámico de la mezcla asfáltica (20 °C y 10 Hz)

Como dato de salida del programa ViscoRoute fue obtenida la microdeformación de tracción en la cara inferior de la capa de rodadura asfáltica a 20 °C. Luego, se utilizaron los modelos de fatiga para verificar el número de ciclos que serían necesarios para que el eje de 8.2 toneladas pudiera causar la rotura por fatiga de la capa de rodadura asfáltica, considerando los diferentes enfoques de análisis y criterios de rotura.

En el caso del enfoque fenomenológico, para poder estimar la rotura por fatiga de la capa de rodadura asfáltica, fue necesario alimentar los modelos con la microdeformación de tracción obtenida en el programa ViscoRoute. En el caso del enfoque de energía disipada acumulada, el procedimiento fue realizado de una forma diferente, siguiendo las cuatro etapas descritas a continuación:

Etapas 1: obtención, a partir de los resultados de laboratorio de resistencia a la fatiga, del modelo matemático que relaciona la energía disipada inicial (W_i) y la energía disipada acumulada (W_{ac}) en el momento de la rotura (un modelo para cada criterio).

Etapas 2: determinación, a través de la (Ecuación 4), de la energía disipada inicial (W_i), ocasionada en la capa de rodadura asfáltica a 20 °C por el paso del eje simples de doble rueda de 8.2 toneladas a la velocidad de 72 km/h (10 Hz).

$$W_i = \pi \varepsilon_t^2 |E^*| \text{sen} \delta_i \quad (4)$$

Donde: W_i = energía disipada inicial; ε_t = microdeformación de tracción obtenida por el programa ViscoRoute; $|E^*|$ = módulo dinámico de la mezcla asfáltica a 20 °C y 10 Hz; δ_i = ángulo de fase de la mezcla asfáltica a 20 °C y 10 Hz. Donde, $|E^*|$ y δ_i fueron obtenidos en el ensayo de módulo dinámico de la mezcla asfáltica ver (Tabla 1).

Etapas 3: previsión de la energía disipada acumulada (W_{ac}) en el momento de la rotura de la capa de rodadura asfáltica, a través del uso de la energía disipada inicial (W_i) calculada en la Etapa 2 y de los modelos obtenidos en la Etapa 1.

Etapas 4: estimación del número de ciclos que el eje de 8.2 toneladas debería aplicar a la capa de rodadura asfáltica para causar la rotura por fatiga. La estimación fue posible mediante la inserción de la energía disipada acumulada (W_{ac}), obtenida en la Etapa 3, en los modelos de fatiga del enfoque de energía disipada acumulada.

4. Presentación y discusión de resultados

4.1 Determinación de la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica

Para el ensayo de resistencia a la fatiga, se utilizó la máquina de flexión a cuatro puntos de apoyo, siguiendo las recomendaciones de la norma (EN 12697-24, 2018). En total, fueron ensayadas seis probetas a fatiga. La (Tabla 2) presenta el número de ciclos (N_i) en el cual se alcanzó el criterio de rotura evaluado y la respectiva reducción del módulo inicial.

Tabla 2. Número de ciclos y reducción del módulo inicial para los diferentes criterios

Probeta	Deformación (x 10 ⁶)	Criterio Convencional		Criterio de Pronk & Hopman	
		Número de Ciclos (N _f)	Reducción del Módulo Inicial (%)	Número de Ciclos (N _f)	Reducción del Módulo Inicial (%)
1	150	204386	50.0	93685	35.2
2	100	1719490	50.0	750855	36.3
3	200	63775	50.0	23000	40.2
4	150	202653	50.0	75568	36.8
5	200	44220	50.0	16000	37.2
6	100	1483987	50.0	678393	40.9

En la (Tabla 2), es posible verificar que todos los números de ciclos determinados por el criterio de Pronk & Hopman son más conservadores que los determinados con el criterio convencional. El criterio de Pronk & Hopman presenta, en promedio, una reducción de 59.2% del número de ciclos que son necesarios para alcanzar la rotura por fatiga, comparado con el criterio convencional; es decir, este criterio considera que el material asfáltico resiste menos al fenómeno de fatiga. En lo que respecta al porcentaje de reducción del módulo inicial, el criterio de Pronk & Hopman presenta valores menores que 50%, aproximadamente 37.8% (varianza de 5.1%), comprobando el conservadurismo de este criterio.

4.2 Obtención de los modelos de fatiga

Con los valores de ruptura obtenidos a través de los diferentes criterios analizados, se construyeron los modelos de fatiga del material. Fueron evaluados dos enfoques de análisis, el fenomenológico y el de energía disipada acumulada. Para cada enfoque fueron construidas dos ecuaciones de fatiga, una para cada criterio de ruptura analizado: convencional y Pronk & Hopman. La (Figura 4) y la (Figura 5) muestran las curvas de fatiga obtenidas.

La (Tabla 3) presenta los modelos de fatiga obtenidos para cada uno de los enfoques de análisis y criterios de rotura.

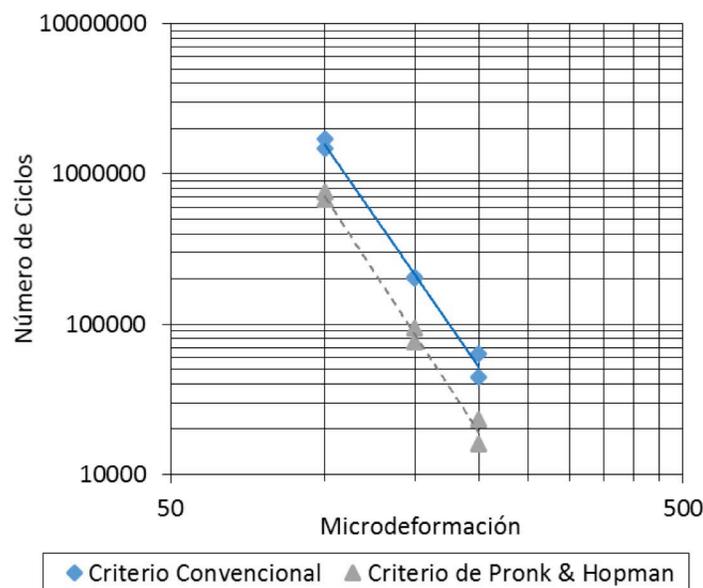


Figura 4. Curva de fatiga: enfoque fenomenológico



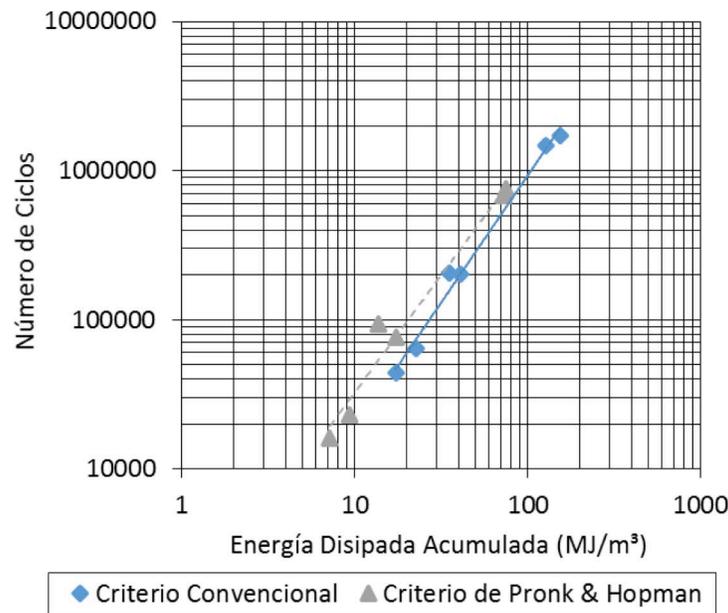


Figura 5. Curva de fatiga: enfoque de energía disipada acumulada

Tabla 3. Modelos de fatiga

Criterio	Enfoque Fenomenológico	Enfoque de la Energía Disipada Acumulada
Convencional	$N_f = 1.094 \times 10^{16} \varepsilon_t^{-4.922}$	$N_f = 3.627 \times 10^2 W_{ac}^{1.703}$
Pronk & Hopman	$N_f = 1.963 \times 10^{16} \varepsilon_t^{-5.221}$	$N_f = 8.637 \times 10^2 W_{ac}^{1.574}$

Tanto en la (Figura 4) y la (Figura 5) como en la (Tabla 3), se verifica, considerando el enfoque fenomenológico, que el criterio de Pronk & Hopman produce un modelo que refleja una resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica menor que la obtenida por el criterio convencional. Esta diferencia tiende a reducirse cuando la microdeformación disminuye y tiende a aumentar cuando la microdeformación se incrementa; este comportamiento está caracterizado por la inclinación de los modelos. De forma general, para las amplitudes de las microdeformaciones que los pavimentos sufren en campo, es evidente que el criterio de Pronk & Hopman es más conservador que el criterio convencional en el enfoque fenomenológico. En el caso del abordaje de energía disipada acumulada, el modelo generado por el criterio de Pronk & Hopman muestra un mejor desempeño ante la fatiga para el mismo valor de energía disipada acumulada. No obstante, debido a la inclinación de los modelos, para valores energéticos acumulados mayores a 840 MJ/m^3 , el criterio convencional de rotura tiende a mostrar una resistencia a la fatiga mayor que la obtenida para el criterio de Pronk & Hopman. Es necesario, sin embargo,

realizar la simulación numérica de la estructura del pavimento para evaluar, de forma concreta y clara, la influencia de los criterios de rotura y de los métodos de análisis en la estimación del a vida útil de la capa de rodadura asfáltica frente a la fatiga.

4.3 Estimación de la vida ante la fatiga de la capa de rodadura asfáltica en la estructura del pavimento

En esta etapa, con auxilio de la simulación numérica, se determinó el número de aplicaciones del eje de 8.2 toneladas ($N_{8.2 \text{ ton}}$) necesario para romper la capa asfáltica por fatiga; este número fue determinado para ambos enfoques de análisis y criterios de rotura. Como resultado de la simulación numérica, se obtuvo un valor de microdeformación de tracción de $70.7 \mu\text{m/m}$ en la cara inferior de la capa de rodadura asfáltica (20°C), ocasionada por el paso del eje simple de doble rueda de 8.2 toneladas a 72 km/h (20 m/s). Para este valor de microdeformación, la (Tabla 4) presenta la vida útil estimada de la capa de rodadura asfáltica frente a la fatiga según el enfoque fenomenológico, para ambos criterios de rotura.

Tabla 4. Vida útil de la capa de rodadura asfáltica, frente a la fatiga, según el enfoque

Criterios	Modelo de Fatiga	$N_{8.2 \text{ ton}}$ ($\epsilon_t = 70.7 \mu\text{m/m}$)
Convencional	$N_f = 1.094 \times 10^{16} \epsilon_t^{-4.922}$	8.633×10^6
Pronk & Hopman	$N_f = 1.963 \times 10^{16} \epsilon_t^{-5.221}$	4.336×10^6

Se puede constatar, según los resultados de la (Tabla 4), que la vida útil de la capa de rodadura estimada según el criterio de rotura convencional es mayor que el estimado por el criterio de Pronk & Hopman. Esto podría indicar que es más conservador considerar la falla por fatiga según el criterio basado en la energía disipada (Pronk & Hopman). Para que el valor estimado por el criterio de Pronk & Hopman se iguale al valor estimado por el criterio convencional, la capa de rodadura debería ser 2.29 cm a más gruesa, lo que reduciría la microdeformación de tracción para $61.96 \mu\text{m/m}$ e igualaría el $N_{8.2 \text{ ton}}$ de los dos criterios.

Este aumento en el espesor, para el criterio de Pronk & Hopman, correspondería a un incremento de 12.72% sobre el espesor de 18 cm.

Con relación al enfoque de energía disipada acumulada, para que el método sea aplicado, fue obtenida, en primer lugar, con base en los resultados de laboratorio de resistencia a la fatiga, el modelo matemático de energía disipada inicial (W_i) versus la energía disipada acumulada (W_{ac}), para cada criterio de rotura, como muestra la (Figura 6).

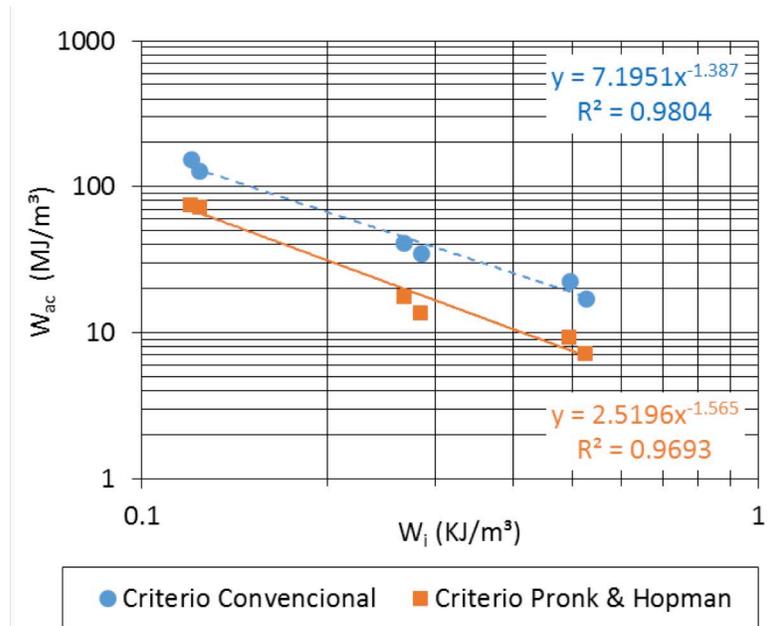


Figura 6. Relación entre la energía disipada inicial y la energía disipada acumulada para los diferentes criterios de rotura

Luego, fue calculada, con la (Ecuación 4), la energía disipada inicial (W_i) ocasionada por el paso del eje de 8.2 toneladas sobre la capa de rodadura asfáltica a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, es decir, considerando la microdeformación de tracción de 70.7

$\mu\text{m/m}$, módulo dinámico de 7895 MPa y ángulo de fase de 24.4° . Con el valor de la energía disipada inicial ($W_i = 0.051215 \text{ kJ/m}^3$), se obtuvo, por los modelos presentados en la (Figura 6), el valor de la energía disipada acumulada para



SPANISH VERSION.....

el criterio convencional ($W_{ac} = 443.7 \text{ MJ/m}^3$) y para el criterio de Pronk & Hopman ($W_{ac} = 263.7 \text{ MJ/m}^3$); estos valores fueron utilizados en los modelos de fatiga del enfoque energético. La (Tabla 5) presenta la vida útil estimada, frente

a la fatiga, de la capa de rodadura asfáltica según el enfoque de energía disipada acumulada, para ambos criterios de rotura.

Tabla 5. Vida útil, frente a la fatiga, de la capa de rodadura asfáltica según el enfoque de energía disipada acumulada

Criterios	Modelo de Fatiga	$N_{8.2 \text{ ton}}$
		$W_{ac} = 443.7 \text{ MJ/m}^3$ (Conv.) $W_{ac} = 263.7 \text{ MJ/m}^3$ (P&H)
Convencional	$N_f = 3.627 \times 10^2 W_{ac}^{1.703}$	1.168×10^7
Pronk & Hopman	$N_f = 8.637 \times 10^2 W_{ac}^{1.574}$	5.587×10^6

Según la (Tabla 5), en relación al enfoque de energía disipada acumulada, se puede concluir que el criterio de Pronk & Hopman es más conservador que el criterio convencional. En cuestión de espesor de la capa de rodadura asfáltica, para que el valor estimado de los criterios fuese igual, sería necesaria una capa de 20.62 cm, cuando el criterio utilizado fuese el de Pronk & Hopman, es decir, un incremento de 2.62 cm, o 14.56%, de espesor de la capa utilizada para el criterio convencional.

Finalmente, comparando el enfoque fenomenológico con el de energía disipada acumulada, se verifica que la previsión de rotura por fatiga de la capa de rodadura asfáltica por el enfoque energético es 26.10% y 22.39% mayor que el fenomenológico, cuando se compara el criterio convencional y el de Pronk & Hopman, respectivamente. Estos resultados dejan en evidencia que el enfoque y el criterio de rotura adoptado van a influenciar, directamente, el diseño del espesor de la capa de rodadura asfáltica en la estructura del pavimento.

5. Conclusión

Los estudios realizados en esta investigación constataron que los enfoques de análisis y los criterios de rotura ejercen influencia en la previsión de la vida útil de la capa de rodadura, frente a la fatiga, en la estructura del pavimento.

Fue comprobado que el criterio de rotura de Pronk & Hopman lleva a determinar una vida útil de la capa de rodadura menor al determinado por el criterio convencional, para ambos enfoques estudiados. Al respecto, se concluye que la aplicación del criterio de Pronk & Hopman es más conservador, resultando en capas de rodadura con mayor espesor.

Con relación al desempeño de la capa de rodadura frente a los dos enfoques de análisis considerados, se comprobó que el enfoque de energía disipada acumulada prevé una vida útil mayor, para ambos criterios de rotura. Por consiguiente, se concluye que el enfoque energético es menos conservador que el fenomenológico.

Cuando el enfoque de energía disipada acumulada es utilizado para estimar la vida útil, frente a la fatiga, de la capa de rodadura, los resultados son, aproximadamente, 24% mayores a los determinados por el enfoque fenomenológico. Esto quiere decir que, en el diseño del espesor de la capa de rodadura, el enfoque energético presentará espesores menores a los determinados por el enfoque fenomenológico.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Rede Temática do Asfalto/Petrobras por la inversión realizada en el Laboratório de Pavimentação de la Universidade Federal de Santa Catarina y a la misma universidad por el apoyo e incentivo a las investigaciones académicas.

7. Referencias

- AASHTO M303 (2014).** American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard specification for lime for asphalt mixtures, AASHTO Designation: M303-14.
- AASHTO M320 (2017).** American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard specification for performance-graded asphalt binder, AASHTO Designation: M320-17.
- AASHTO M323 (2017).** American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard specification for Superpave volumetric mix design, AASHTO Designation: M323-17.
- AASHTO R35 (2017).** American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard practice for Superpave volumetric design for hot-mix asphalt (HMA), AASHTO Designation: R35-17.
- AASHTO T112 (2017).** American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for clay lumps and friable particles in aggregate, AASHTO Designation: T112-17.
- AASHTO T176 (2017).** American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soils by use of the sand equivalent test, AASHTO Designation: T176-17.
- AASHTO T283 (2018).** American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage, AASHTO Designation: T283-18.
- AASHTO T321 (2014).** American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard method of test for determining the fatigue life of compacted asphalt mixtures subjected to repeated flexural bending, AASHTO Designation: T321-14.
- AFNOR NF P 98-250-2 (1991).** Association Française de Normalisation. Essais relatifs aux chaussées - préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 2: compactage des plaques, AFNOR Designation: 98-250-2-91.
- Ameri, M.; Seif, M.; Abbasi, M.; Molayem, M.; KhavandiKhavi, A. (2017).** Fatigue performance evaluation of modified asphalt binder using of dissipated energy approach, *Construction and Building Materials*, 136, 184-191.
- ASTM C1252 (2017).** American Society for Testing and Materials. Standard test methods for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture and grading), ASTM Designation: C1252-17.
- ASTM C127 (2015).** American Society for Testing and Materials. Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate, ASTM Designation: C127-15.
- ASTM C131 (2014).** American Society for Testing and Materials. Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine, ASTM Designation: C131-14.
- ASTM C88 (2018).** American Society for Testing and Materials. Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate, ASTM Designation: C88-18.
- ASTM D36 (2014).** American Society for Testing and Materials. Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus), ASTM Designation: D36-14.
- ASTM D4402 (2015).** American Society for Testing and Materials. Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer, ASTM Designation: D4402-15.
- ASTM D4791 (2019).** American Society for Testing and Materials. Standard test method for flat particles, elongated particles, or flat and elongated particles in coarse aggregate, ASTM Designation: D4791-19.
- ASTM D5 (2013).** American Society for Testing and Materials. Standard test method for penetration of bituminous materials, ASTM Designation: D5-13.
- ASTM D5821 (2017).** American Society for Testing and Materials. Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate, ASTM Designation: D5821-17.
- ASTM 176 (2017).** American Society for Testing and Materials. Standard Method of Test for Plastic Fines in Graded Aggregates and Soils by Use of the Sand Equivalent Test.
- Bernucci, L. B. et al., (2010).** Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros, Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro, Brasil.
- Chabot, A.; Chupin, O.; Deloffre, L.; Duhamel, D. (2010).** Viscoroute 2.0: a tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement, *Road Materials and Pavements Design*.
- DNER-ME 084 (1995).** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Agregado miúdo – determinação da densidade real, DNER Designação: ME 084-95.
- DNER-ME 085 (1994).** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real, DNER Designação: ME 085-94.
- Dondi, G.; Pettinari, M.; Sangiorgi, C.; Zoorob, S. E. (2013).** Traditional and dissipated energy approaches to compare the 2PB and 4PB flexural methodologies on a Warm Mix Asphalt, *Construction and Building Materials*, 47, 833-839.
- EN 12697-24 (2018).** European Standard. Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 24: resistance to fatigue, EN Designation: 12697-24-18.
- EN 12697-26 (2018).** European Standard. Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 26: stiffness, EN Designation: 12697-26-18.
- Khalid, H. A. (2000).** Comparison between bending and diametral fatigue tests for bituminous materials, *Materials & Structures*, 33(7), 457-465.
- Melo, J. V. S. (2014).** Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Pasetto, M.; Baldo, N. (2017).** Dissipated energy analysis of four-point bending test on asphalt concretes made with steel slag and RAP, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(5), 446-453.
- Shadman, M.; Ziari, H. (2017).** Laboratory evaluation of fatigue life characteristics of polymer modified porous asphalt: A dissipated energy approach, *Construction and Building Materials*, 138, 434-440.
- Sybilski, D.; Bankowski, W. (2007).** Energetic method as an alternative for conventional method in fatigue life analysis of bituminous mixtures, *Pavement Technology Division, Road and Bridge Research Institute, Poland*.
- Zeida, W. (2012).** Endurance limit for HMA based on healing phenomenon using viscoelastic continuum damage analysis, Doctorate-thesis, Arizona State University. USA.

