

# Los efectos de la forma de la onda de carga en la estimación de la vida a la fatiga de la capa asfáltica en la estructura del pavimento

## The influence of the wave loads in the estimation of life to the fatigue of asphalt layer in pavement structure

M. Gaertner \*, J. Staub de Melo <sup>1\*</sup>, J. Villena\*\*

\* Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, BRASIL

\*\* Universidade Federal do Paraná, Curitiba, BRASIL

Fecha de Recepción: 10/07/2018

Fecha de Aceptación: 02/01/2019

PAG 136-145

### Abstract

*The phenomenon of fatigue can be considered as one of the main causes of the asphalt surface course failure. The Four Point Bending Apparatus is the widespread equipment used to determine the fatigue resistance of asphalt mixtures. Worldwide there are several standard procedures that rule this test. The main difference between them remains in the waveform, in which the load is applied, and in the failure criteria. This paper reports the influence from the waveform, haversine or sinusoidal, on the fatigue resistance of an asphalt mixture. In addition, through numerical simulation, it was evaluated the influence of the models obtained in the design of the thickness of the asphalt layer required for the structure of a pavement. The conclusion is that the use of haversine waves in fatigue tests results in a fatigue life of the asphalt surface layer almost 67 times bigger than the ones found on sinusoidal tests.*

*Keywords: Flexible pavements; asphalt mixture; waveforms; fatigue failure; numerical simulation*

### Resumen

El fenómeno de fatiga como unos de los principales mecanismos de deterioro de las capas asfálticas. El ensayo de fatiga a flexión por cuatro puntos de apoyo es uno de los procedimientos más utilizados para determinar la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas. Existen, a nivel internacional, diversas normas que estandarizan este tipo de ensayo, las cuales se diferencian básicamente por la forma de la onda de carga aplicada y por el criterio de rotura utilizado. Este artículo tiene como objetivo presentar los resultados de la influencia del tipo de onda de carga utilizada, haversine o sinusoidal, en la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, como también, la influencia de los modelos de fatiga obtenidos en la previsión de la rotura por fatiga de la capa asfáltica en una estructura de un pavimento flexible. Al final, se concluyó que la vida útil de la capa asfáltica estimada utilizando los modelos obtenidos en el ensayo con ondas con forma haversine fue 67 veces mayor que cuando estimada con los modelos de los ensayos realizados con carga sinusoidal.

**Palabras clave:** Pavimentos flexibles, mezclas asfálticas, onda de carga, rotura por fatiga, simulación numérica

## 1. Introducción

En lo que se refiere a las características de fatiga de las mezclas asfálticas, existen actualmente diversos equipos para realizar esta evaluación, entre ellos, el que realiza el ensayo de probetas a flexión en cuatro puntos de apoyo, el cual es uno de los equipos más utilizados en el mundo. En Europa la estandarización de este ensayo está a cargo de la norma (EN 12697-24, 2004a), en Australia por la norma (AG-PT/T233, 2006) de la guía Austroads y en EUA por las normas (ASTM D7460, 2010) y (AASHTO T321, 2014). Las diferencias entre las normas están relacionadas principalmente a la forma de la onda de carga utilizada y el criterio de rotura adoptado. El procedimiento europeo y la norma norteamericana de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) indican el uso de ondas de carga de forma sinusoidal. La norma australiana y la norteamericana de la ASTM, recomiendan el uso de cargas de forma haversine.

Así, diversas investigaciones sobre la resistencia de fatiga de mezclas asfálticas han utilizado la forma de carga haversine (Hernández et al., 2013) (Cooper et al., 2017) (Goli et al., 2017) (Mamlouk et al., 2012), y otras han utilizado la forma de carga sinusoidal (Varma et al., 2016) (Rasouli et al., 2018) (Melo and Trichês, 2017) (Melo et al., 2018), mostrando que no hay un consenso entre los investigadores sobre cuál es la forma de la onda que debe ser utilizada para realizar el ensayo. Por consiguiente, debe tenerse cuidado en la comparación de los modelos de fatiga obtenidos por procedimientos estandarizados que utilizan cargas con formas de onda diferentes pues puede existir una gran disparidad entre los resultados obtenidos, principalmente, cuando las cargas son aplicadas con la finalidad de estimar la rotura de fatiga de la capa asfáltica de una estructura de pavimento.

Este artículo presenta los resultados de un estudio comparativo sobre la influencia de las formas de onda haversine y sinusoidal en los modelos de resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, y su repercusión e impacto en la estimativa de rotura a fatiga de la capa asfáltica en la estructura de un pavimento flexible.

<sup>1</sup> Autor de Correspondencia:

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, BRASIL  
E-mail: joao.victor@ufsc.br

## 2. Materiales

Para este estudio fue elaborada una mezcla asfáltica en la cual fueron utilizados los siguientes materiales: agregados minerales (formación rocosa metamórfica de tipo gneis), cal hidratada (CH-1, de tipo dolomítica) y ligante asfáltico del tipo asfalto-caucho (con adición de 20% de polvo de caucho triturado de neumáticos). La curva granulométrica utilizada para el diseño de la mezcla asfáltica se encaja en la banda IV-B del Asphalt Institute. Esta curva está compuesta por 39.6% de agregado grueso (pasante por el tamiz de 3/4" (ASTM) y retenido en el tamiz #4 (ASTM)), 53.2% de agregado fino (pasante por el tamiz #4 (ASTM) y retenido en el tamiz #200 (ASTM)) y 7.2% de filler mineral (pasante por el tamiz #200 (ASTM)).

El diseño de la mezcla asfáltica fue realizado para soportar las condiciones de tráfico pesado según el método Marshall. Los procedimientos adoptados para el diseño, siguieron las recomendaciones de las normas (ASTM D6926,

2016) y (ASTM D6927, 2015). Una vez concluida la etapa de diseño, la mezcla asfáltica mostró las siguientes características volumétricas: porcentaje de ligante óptimo de 6.1%; volumen de aire (Va) de 4.20%; vacíos llenos con asfalto (VFA) de 77.2%; estabilidad de 11444 N; flujo de 13.4 (0.25 mm); vacíos en el agregado mineral (VMA) de 14.1%; y, relación filler/asfalto de 1.18.

Concluido el diseño de las mezclas en el laboratorio, fueron fabricadas placas para extracción de las probetas prismáticas. La compactación de las placas fue realizada en la mesa compactadora del IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux). Las placas de mezcla asfáltica endurecida fueron cortadas con sierra circular extrayendo cinco probetas prismáticas por cada placa; las probetas tienen las siguientes dimensiones: 5.08 x 6.35 x 38.1 cm ( $\pm$  0.1 mm). Los procedimientos de compactación de las placas y extracción de las probetas se muestran en la (Figura 1).



**Figura 1.** Procedimiento para la compactación de las placas y extracción de las probetas: (a) compactación, (b) placa compactada, (c) corte de la placa e (d) probetas prismáticas extraídas

En total, fueron extraídas 30 probetas. No obstante, después de un proceso de clasificación basado en las dimensiones y volumen de aire (Va), fueron seleccionadas 26 probetas; dos fueron utilizadas para realizar el ensayo de módulo complejo y las otras 24 para realizar el ensayo de fatiga. Estas probetas fueron divididas en dos grupos, de 12 probetas por cada grupo, para los ensayos de fatiga, un grupo para los ensayos con onda haversine y el otro para los ensayos con onda sinusoidal.

## 3. Método

### 3.1 Caracterización del comportamiento viscoelástico lineal y determinación de los modelos de fatiga de la mezcla asfáltica

Primero se determinaron los parámetros reológicos de la mezcla asfáltica que caracterizan su comportamiento en el

dominio de la viscoelasticidad lineal. Los parámetros reológicos ( $E_\infty$ ;  $E_0$ ;  $\tau$ ;  $k$ ;  $h$ ;  $\delta$ ;  $A_0$ ;  $A_1$ ;  $A_2$ ) determinados en esta fase, son parte del modelo matemático e reológico de Huet & Sayegh (H&S) (Huet, 1963), representado matemáticamente por la (ecuación 1) y pudiendo ser calculado de forma alternativa por las (ecuación 2), (ecuación 3) y (ecuación 4). El modelo de H&S fue utilizado en la etapa de simulación numérica de la estructura del pavimento, que fue necesaria para estimar la vida útil de la capa asfáltica.

$$E^*(i\omega\tau(\theta)) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (1)$$

$$E^*(i\omega\tau(\theta)) = \sqrt{E_1(i\omega\tau(\theta))^2 + E_2(i\omega\tau(\theta))^2} \quad (2)$$

$$E_1(i\omega\tau(\theta)) = E_0 + \frac{\frac{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} \cos(k\frac{\pi}{2}) + (i\omega\tau(\theta))^{-h} \cos(h\frac{\pi}{2})}{E_\infty - E_0}}{\left(\frac{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} \cos(k\frac{\pi}{2}) + (i\omega\tau(\theta))^{-h} \cos(h\frac{\pi}{2})}{E_\infty - E_0}\right)^2 + \left(\frac{\delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} \sin(k\frac{\pi}{2}) + (i\omega\tau(\theta))^{-h} \sin(h\frac{\pi}{2})}{E_\infty - E_0}\right)^2} \quad (3)$$

$$E_2(i\omega\tau(\theta)) = \frac{\frac{\delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} \sin(k\frac{\pi}{2}) + (i\omega\tau(\theta))^{-h} \sin(h\frac{\pi}{2})}{E_\infty - E_0}}{\left(\frac{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} \cos(k\frac{\pi}{2}) + (i\omega\tau(\theta))^{-h} \cos(h\frac{\pi}{2})}{E_\infty - E_0}\right)^2 + \left(\frac{\delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} \sin(k\frac{\pi}{2}) + (i\omega\tau(\theta))^{-h} \sin(h\frac{\pi}{2})}{E_\infty - E_0}\right)^2} \quad (4)$$

Donde:  $E^*$  = módulo complejo;  $E_1$  = parámetro real;  $E_2$  = parámetro imaginario;  $E_\infty$  = módulo complejo infinito;  $E_0$  = módulo estático;  $i$  = número complejo;  $\tau$  = tiempo de relajación de los amortiguadores,  $\tau(\theta) = e^{(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2)}$ ;  $\theta$  = temperatura;  $\omega$  = frecuencia angular;  $f$  = frecuencia;  $k$ ,  $h$  = parámetros de los elementos parabólicos;  $\delta$  = constante adimensional;  $A_0$ ,  $A_1$  e  $A_2$  = parámetros escalares.

Los parámetros reológicos fueron determinados a partir de los datos de módulo complejo de la mezcla asfáltica, realizado a diversas frecuencias (0.1; 0.2; 0.5; 1; 2; 5; 10; y, 20 Hz) y temperaturas (0; 5; 10; 15; 20; 25; y, 30 °C) (EN 12697-26, 2004b) y con ayuda del programa Viscoanalyse del IFFSTAR.

Después de determinados parámetros de H&S, las probetas prismáticas fueron ensayadas para estimar la resistencia a la fatiga a flexión en a puntos de apoyo. Un grupo de probetas fue ensayado con ondas de carga de forma sinusoidal y el otro con ondas de tipo haversine. Todos los ensayos fueron realizados a deformación controlada, a 20 °C y con frecuencia de 10 Hz. El criterio de rotura fue el mismo para ambos grupos, reducción de la rigidez a 50% del valor inicial.

Una vez terminados los ensayos de fatiga de todas las probetas, fueron determinados los modelos para cada una de las formas de onda de carga ensayadas (haversine y sinusoidal). En esta investigación se utilizó el enfoque fenomenológico (curva de Wöhler) para obtener las leyes de fatiga del material.

### 3.2 Simulación numérica

El objetivo de esta última etapa fue de estimar la vida útil de la capa asfáltica en la estructura del pavimento, en función de los modelos de fatiga determinados para diferentes tipos de onda de carga (haversine y sinusoidal). Así, fue realizada la simulación numérica de la estructura del pavimento con el programa ViscoRoute 2.0, desarrollado por el IFFSTAR. Para la simulación, fueron considerados los siguientes parámetros: la temperatura de la capa asfáltica y su comportamiento viscoelástico lineal (modelo matemático y reológico de Huet & Sayegh), y la dinámica del efecto de las cargas de un eje simple de doble rueda de 8.2 toneladas.

Las características de la estructura del pavimento y de la carga actuante sobre la misma fueron utilizadas como datos de entrada para alimentar el programa. La estructura del pavimento simulado tiene las características mostradas en la (Tabla 1) y está conformado por las siguientes capas: capa asfáltica con 6 cm de espesor y temperatura de 20 °C; capa de base con 14 cm de espesor; subbase con 60 cm de espesor; y, suelo de fundación con espesura infinita. La razón para haber fijado la temperatura de la capa asfáltica en 20 °C en la simulación numérica, fue para que exista similitud con la temperatura utilizada en los ensayos de fatiga en laboratorio, la cual fue de 20 °C.

Tabla 1. Estructura del pavimento utilizada en la simulación numérica

Capas	Comportamiento reológico	Espesor (cm)	Módulo (MPa)	Poisson (v)
Capa asfáltica (20 °C)	Viscoelástico lineal	6	*	0.30
Base	Elástico lineal	14	333	0.35
Subbase	Elástico lineal	60	132	0.35
Suelo de fundación	Elástico lineal	Infinito	124	0.45

\* Módulo determinado por el programa ViscoRoute 2.0 según los parámetros del modelo reológico de Huet-Sayegh, en función de la temperatura de la capa asfáltica y de la velocidad de las cargas

Al respecto de las cargas dinámicas actuantes en la estructura, fue considerado un eje simple de doble rueda de 8.2 toneladas (United States Army Corps of Engineers - USACE), circulando a la velocidad de 72 km/h, las ruedas de cada par están separadas por una distancia de 32 cm, la carga por rueda es de 2.05 toneladas, el área de contacto entre la rueda y la superficie del pavimento es circular con 366 cm<sup>2</sup> y presión de contacto de 5.6 kgf/cm<sup>2</sup>. La velocidad de

72 km/h fue definida, en la simulación numérica, para que hubiera similitud con la frecuencia de ensayo utilizada en los ensayos de fatiga en laboratorio la cual fue de 10 Hz, que corresponde a, aproximadamente, 20 m/s (72 km/h) (Chabot et al., 2010). La estructura del pavimento y el esquema de cargas están mostrado en la (Figura 2).

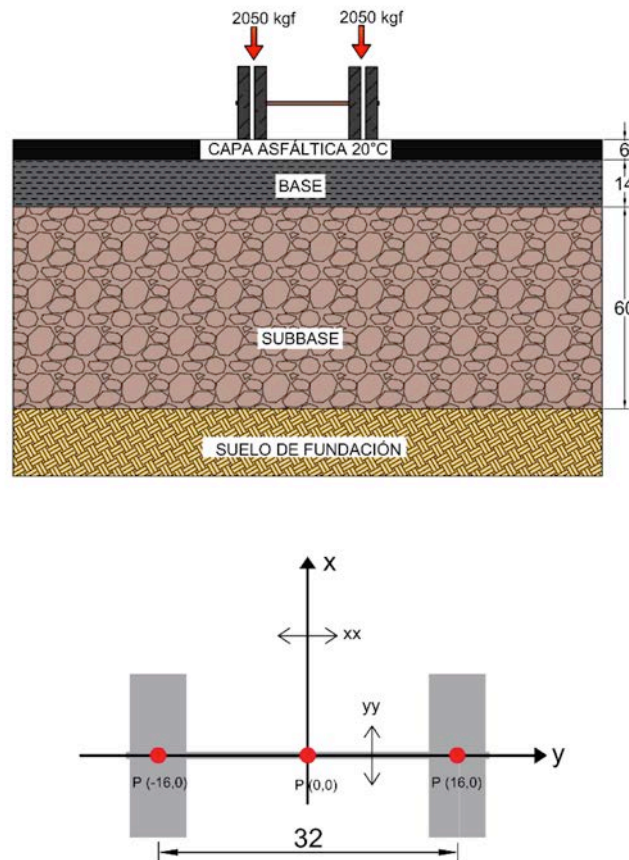


Figura 2. Representación del eje actuante sobre la estructura del pavimento (dimensiones en centímetros)

Como dato de salida del programa, fue obtenido el máximo valor de la microdeformación de tracción en la cara inferior de la capa asfáltica, en el punto P (-16, 0) (Figura 2). Con el valor de la microdeformación, fue posible estimar el número de repeticiones de carga, causado por el eje de 8.2 toneladas, que llevaría a la rotura por fatiga de la capa asfáltica; considerando los modelos de fatiga determinados en laboratorio (con onda haversine y onda sinusoidal).

Con esos resultados, fue posible medir la influencia del tipo de onda de carga utilizada en los ensayos de fatiga de laboratorio en la estimativa de la vida útil de la capa asfáltica en la estructura del pavimento.

## 4. Presentación y discusión de resultados

### 4.1 Caracterización del comportamiento viscoelástico lineal y determinación de los modelos de fatiga de la mezcla asfáltica

Para caracterizar el comportamiento viscoelástico lineal de la mezcla asfáltica fue realizado el ensayo de módulo complejo a diferentes temperaturas y frecuencias de carga, a deformación controlada (50  $\mu\text{m/m}$ ). Con los datos fue posible determinar los parámetros viscoelásticos del

SPANISH VERSION.....

modelo de Huet-Sayegh:  $E_{\infty} = 21345.2$  MPa,  $E_0 = 42.3043$  MPa,  $\tau = 0.01701$ ,  $k = 0.21359$ ,  $h = 0.53921$ ,  $\delta = 2.04866$ ,  $A_0 = 0.0743558$ ,  $A_1 = -0.376794$  and  $A_2 = 0.0016876$ . Estos parámetros pueden describir el comportamiento viscoelástico lineal de la mezcla de asfalto a cualquier temperatura y frecuencia, a través de las (Ecuación 1), (Ecuación 2), (Ecuación 3) y (Ecuación 4).

En esta etapa, aún, fueron realizados los ensayos de resistencia a la fatiga a flexión a cuatro puntos de apoyo. Fueron ensayadas 12 probetas con onda de carga haversine mientras que otras 12 probetas fueron ensayadas con onda de carga sinusoidal. La (Tabla 2) muestra los resultados obtenidos. Para cada probeta se indica el número de ciclos para el cual se alcanzó la mitad de la rigidez inicial (criterio de rotura) y la microdeformación inicial definida para el ensayo.

**Tabla 2.** Resultados de los ensayos de fatiga

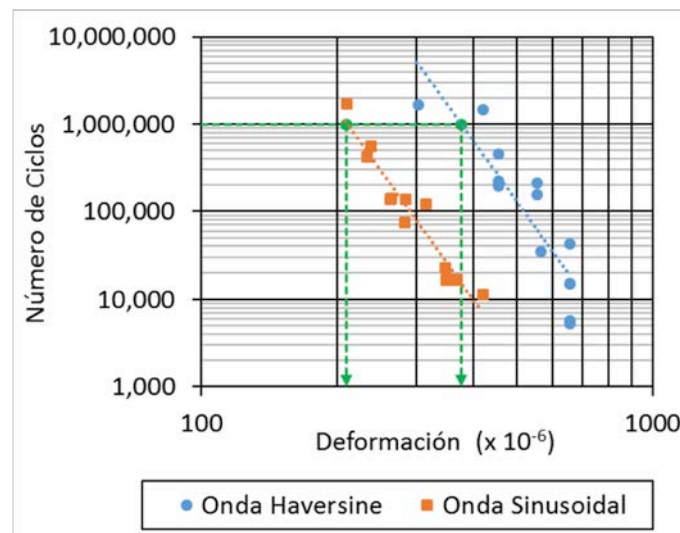
Probeta	Deformación de tracción ( $\times 10^{-6}$ )	Número Total de Ciclos	
		Onda Sinusoidal	Onda Haversine
1	365	17634	-
2	346	17365	-
3	281	145133	-
4	416	12074	-
5	231	440302	-
6	311	128509	-
7	235	587950	-
8	261	148228	-
9	280	79013	-
10	260	146097	-
11	344	23456	-
12	208	1787890	-
13	450	-	208120
14	650	-	15970
15	550	-	165950
16	450	-	234420
17	650	-	44430
18	650	-	5590
19	416	-	1529000
20	650	-	5940
21	560	-	36120
22	550	-	224520
23	300	-	1758370
24	450	-	480460

Con los resultados de la (Tabla 2) fueron generados los modelos de fatiga según el análisis fenomenológico, para cada uno de los dos grupos de probetas, de acuerdo con la

forma de la onda de carga. Los modelos son mostrados en la (Tabla 3) y en la (Figura 3).

**Tabla 3.** Modelos de fatiga obtenidos

Forma de la onda	Modelos de fatiga	R <sup>2</sup>
Onda sinusoidal	$N_f = 5.33 \times 10^{22} \epsilon_t^{-7.20}$	0.927
Onda haversine	$N_f = 3.61 \times 10^{24} \epsilon_t^{-7.20}$	0.779



**Figura 3.** Curvas de fatiga en función de la forma de onda utilizada en el ensayo.

Se puede verificar, cuando se analizan los modelos (Figura 3) y (Tabla 3), la existencia de un factor de “traslación” entre estos, en el eje de las abscisas, puesto que las pendientes de las curvas son casi iguales. Es posible verificar que para un nivel de deformación similar (valor en X), la vida de fatiga medida con ondas sinusoidales es un valor “Y”, y que la vida de fatiga medida en el ensayo con ondas haversine es un valor bastante superior a “Y”. Eso significa que, ensayos realizados con ondas sinusoidales o haversine, realizados con las mismas condiciones de temperatura, frecuencia y criterio de rotura, tendrán diferentes resistencias a la fatiga diferentes. Por ejemplo, para un número de ciclos igual a 1000000, la microdeformación ( $\epsilon_6$ ) en el modelo haversine es igual a 377  $\mu\text{m/m}$ , mientras que en el modelo sinusoidal es de 210  $\mu\text{m/m}$ . Eso significa que el diseño mecánico del pavimento estará influenciado por la elección de la forma de la onda de carga aplicada a ser

usada en el ensayo de laboratorio. De ahí que, el diseño mecánico de capas asfálticas, considerando los modelos de fatiga obtenidos con ondas sinusoidales, dará como resultado capas más espesas que aquellas cuyo diseño fue realizado con modelos de fatiga obtenidos con ondas haversine. La magnitud de esta diferencia se caracteriza por el factor de “traslación” de los modelos, en el eje de las abscisas; este valor fue estimado en 1.8. Esto significa que para ensayos realizados con ondas haversine, la resistencia a fatiga estimada será equivalente a la determinada para ensayos con ondas sinusoidales con una microdeformación inicial 1.8 veces menor. Aplicando el factor de “traslación” encontrado en el modelo haversine (dividiendo todas las microdeformaciones entre 1.8), el modelo pasa a ser  $N_f = 5.45 \times 10^{22} \epsilon_t^{-7.20}$ , es decir, igual al modelo sinusoidal. La Figura 4 muestra el efecto de la aplicación del factor de “traslación” en el modelo haversine.



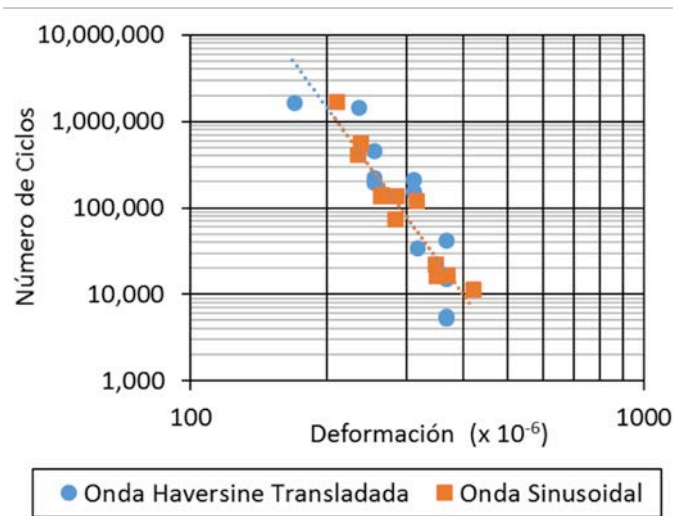


Figura 4. Aplicación del factor de “traslación” en el modelo de fatiga con onda haversine

De esa manera, se encontró que ensayos realizados con ondas haversine generan resultados semejantes a los obtenidos con ondas sinusoidales con, aproximadamente, la mitad de la amplitud inicial establecida (factor de “traslación” de 1.8), esto significa que existe una fuerte correlación entre los resultados de los ensayos. Como fue explicado antes, en el ensayo con ondas sinusoidales, la probeta se deforma en los dos sentidos en relación a la línea neutra, y su posición neutra, la cual se localiza en la mitad de la distancia entre las posiciones extremas, no cambia durante el ensayo. En el ensayo con ondas haversine, la probeta es flexionada en una única dirección en relación a su línea neutra. Entonces, se puede explicar la diferencia entre los modelos obtenidos, debido al comportamiento viscoso de la mezcla asfáltica. La forma de onda haversine se mantiene solamente durante los ciclos iniciales del ensayo, en los otros ciclos, la probeta sufre una deformación permanente y su posición neutra es rápidamente desplazada en el mismo sentido de la deformación. Como la señal de la deformación no se altera y tiende a traer la probeta para la posición neutra inicial, debido al desplazamiento de la línea neutra, el pulso termina por transformarse en sinusoidal, con amplitud similar a la mitad de la amplitud inicial establecida. Por consiguiente, la carga pierde la forma haversine durante el ensayo. Otro indicio de este fenómeno puede ser observado al final del ensayo, cuando la carga es retirada, puesto que las probetas ensayadas con carga de forma haversine continúan levemente curvadas, debido a la deformación permanente sufrida.

La (Figura 5) muestra la respuesta de la carga de una probeta sometida al pulso haversine para 650  $\mu\text{m/m}$ . Se puede observar que en 50º ciclo, la fuerza ascendente es proporcional a la fuerza descendente; tal proporcionalidad permanece durante todo el ensayo, según lo que se puede verificar en la respuesta a las cargas para el 100º y 5000º ciclo. Este es un indicativo más de que el ensayo haversine con 650  $\mu\text{m/m}$  es, en realidad, un ensayo sinusoidal a deformación controlada de aproximadamente 361  $\mu\text{m/m}$  (650  $\div$  factor de “traslación”), puesto que la probeta al sufrir la deformación permanente al inicio del ensayo, desplaza su línea neutra, y la carga armónica comienza a oscilar alrededor de esta nueva posición.

No obstante, se debe hacer hincapié en que la deformación permanente sufrida por la probeta está directamente relacionada con las características viscoelásticas del material que fue ensayado y que, estas características, se manifiestan significativamente a temperaturas intermedias (20 °C). Así, este efecto, observado en la investigación, debe ser evaluado de mejor forma caso el ensayo de fatiga fuese realizado a temperaturas más bajas, en las que el comportamiento de la mezcla asfáltica estaría regido, principalmente, por la componente elástica del material. En el caso de que se trabaje con materiales perfectamente elásticos, no ocurriría la deformación permanente en el inicio del ensayo y, en consecuencia, no habría el desplazamiento de la línea neutra, permitiendo la perfecta aplicación de un pulso haversine.

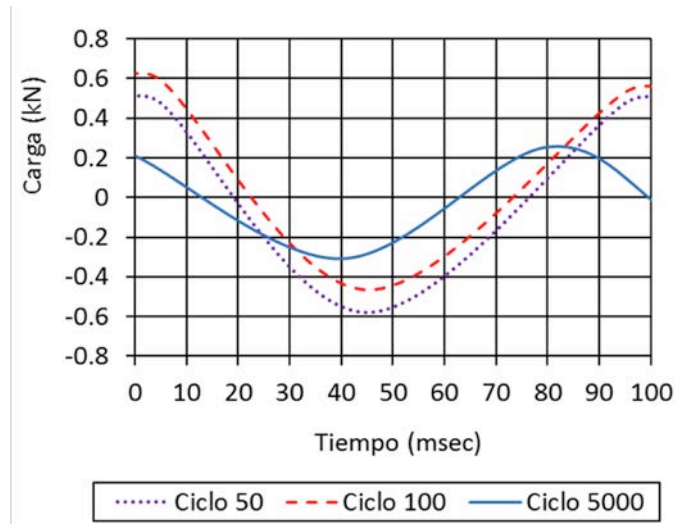


Figura 5. Respuesta de carga de una probeta ante un pulso haversine

De este modo, se puede concluir que, para ensayos realizados con ondas del tipo haversine, la amplitud de la deformación de entrada en el programa no es una deformación real que está siendo aplicada a la probeta durante el ensayo. La deformación real es, aproximadamente, la mitad de la amplitud de la deformación de entrada. Por eso, para que se obtengan valores coherentes a través de los ensayos con ondas con forma haversine, bastará utilizar, en la construcción del modelo de fatiga, aproximadamente la mitad de la amplitud de la deformación de entrada del ensayo, es decir, aplicar un factor de “traslación”, que para este caso fue de 1,8.

#### 4.2 Simulación numérica

A partir de la simulación numérica, se verificó que la mayor microdeformación de tracción generada fue de 230.85  $\mu\text{m/m}$ , y ocurre en el momento en que el eje actuante está exactamente encima del punto de análisis. Definido el mayor valor, este fue utilizado para alimentar los modelos de fatiga y permitió obtener el número de repeticiones del paso del eje de 8.2 toneladas, necesario para causar la rotura por fatiga de la capa asfáltica (20 °C). La (Tabla 4) muestra los resultados obtenidos cuando fueron utilizados los modelos con onda haversine, sinusoidal y haversine trasladado.

Tabla 4. Desempeño de la capa asfáltica ante la fatiga

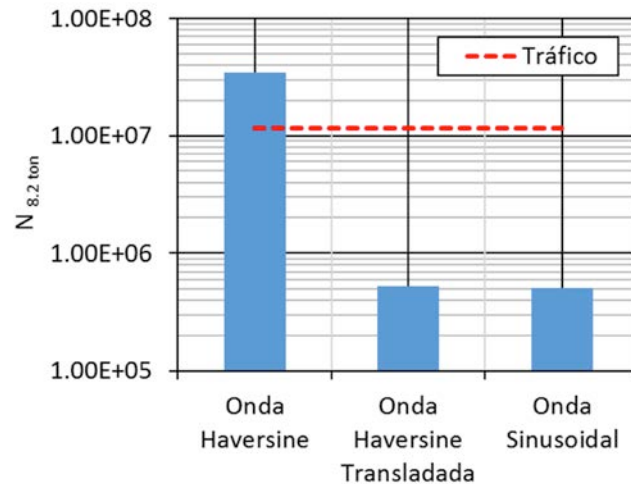
Forma de la carga	Modelos de Fatiga	$\epsilon_t = 230.85 \mu\text{m/m}$
Onda sinusoidal	$N_f = 5.33 \times 10^{22} \epsilon_t^{-7.20}$	$N_{8.2 \text{ ton}} = 5.14 \times 10^5$
Onda haversine	$N_f = 3.61 \times 10^{24} \epsilon_t^{-7.20}$	$N_{8.2 \text{ ton}} = 3.48 \times 10^7$
Onda haversine trasladada (corregida por el factor de 1.8)	$N_f = 5.45 \times 10^{22} \epsilon_t^{-7.20}$	$N_{8.2 \text{ ton}} = 5.25 \times 10^5$

En la (Tabla 4), se puede ver la diferencia en el valor estimado de rotura por fatiga de la capa cuando se usa el modelo haversine o sinusoidal. En función del número de repeticiones de carga del eje de 8.2 toneladas, el modelo haversine estima, equivocadamente, que la mezcla asfáltica va a resistir, aproximadamente, 67 veces más a la fatiga que cuando calculada la vida útil por el modelo sinusoidal; esta diferencia es muy significativa. Sin embargo, realizándose la corrección del modelo de fatiga con el factor de “traslación” encontrado en esta investigación, las previsiones se igualan. Para destacar con más énfasis esta diferencia entre los

modelos, según la (Figura 6), considerando hipotéticamente que el espesor del pavimento fuese diseñado para diez años, la previsión de tráfico de vehículos es de  $1.16 \times 10^7$  repeticiones de ejes de 8.2 toneladas, llevando a la conclusión de que la espesura de la capa asfáltica fue bien diseñada según el modelo haversine. Es más, esta capa tendrá la capacidad de resistir un mayor volumen de tráfico durante su vida útil. Por otra parte, según el modelo sinusoidal, la capa asfáltica está subdimensionada para las cargas esperadas y la rotura por fatiga ocurriría antes de lo proyectado por el diseño del pavimento.



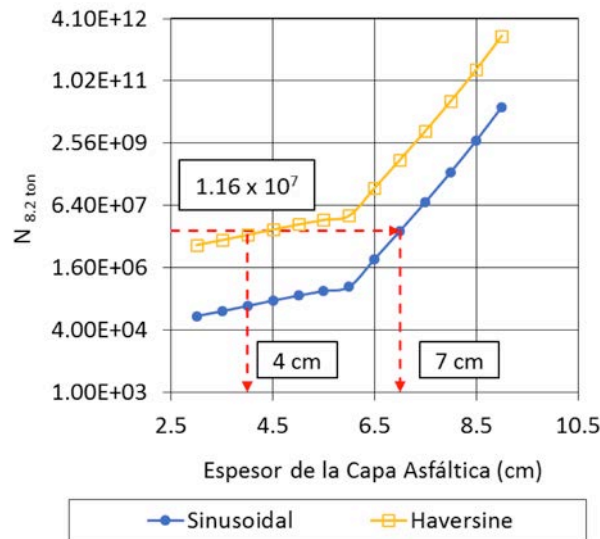




**Figura 6.** Vida útil de la capa asfáltica prevista por los modelos de fatiga versus la previsión de tráfico hipotético

Evaluando los resultados en función del espesor mínimo de la capa asfáltica necesario para que el volumen de tráfico previsto ( $1.16 \times 10^7$ ), sería necesario, por lo menos, siete centímetros de capa, cuando el modelo utilizado para el análisis fuese sinusoidal (Figura 7); el espesor existente, de seis centímetros, estaría subdimensionado. Por otro lado,

según la (Figura 7), cuando utilizado el modelo haversine, una capa asfáltica con cuatro centímetros sería suficiente para resistir al tráfico esperado, indicando que el espesor existente (seis centímetros) estaría sobredimensionado; esta estructura no tendría riesgo de sufrir daños por fatiga durante el tiempo de vida del proyecto (10 años).



**Figura 7.** Vida de fatiga en función del espesor de la capa

El análisis mostrado en la (Figura 7), comprueba la gran diferencia en el diseño de la capa asfáltica en función de la forma de la onda de carga utilizada en el ensayo de resistencia a fatiga en laboratorio. En la simulación numérica realizada, llama la atención la diferencia significativa de tres centímetros de espesor entre la capa diseñada con el modelo

sinusoidal contra la diseñada con el modelo haversine. Con este último modelo, la capa asfáltica del pavimento tendría un espesor 43% menor que el del modelo sinusoidal. Esa reducción significativa de espesor daría como resultado una estructura de pavimento que duraría apenas los primeros años de lo estimado para el proyecto.

## 5. conclusiones

Con base en los resultados presentados fue posible elaborar las siguientes conclusiones:

Los resultados de resistencia a la fatiga muestran diferencias expresivas en función del tipo de onda de carga utilizada. Los ensayos realizados con onda haversine presentan resistencia a la fatiga mucho mayor a aquellos realizados con onda sinusoidal;

Existe un factor de “traslación” entre los modelos de fatiga obtenidos con la carga sinusoidal y haversine que para el caso estudiado fue de 1.8;

El ensayo de fatiga a flexión a cuatro puntos de apoyo no es capaz de reproducir continuamente una señal de forma haversine para materiales viscoelásticos;

La realización de ensayos de fatiga en materiales viscoelásticos con onda haversine lleva a determinar modelos de fatiga equivocados, que necesitan ser ajustados para la deformación real que está ocurriendo en el ensayo;

Los resultados de la simulación numérica realizada, comprobaron que la forma de la onda utilizada para definir la resistencia a la fatiga de una mezcla asfáltica, tiene mucha influencia en la previsión de la vida útil de la capa asfáltica de la estructura del pavimento;

Pavimentos diseñados con base en ensayos con onda haversine tiene espesores bastante inferiores a los dimensionados con base en ensayos de onda sinusoidal, es decir, el espesor de la capa de estos últimos resulta subdimensionado;

Se recomienda el uso de cargas sinusoidales para realizar ensayos de fatiga a flexión a cuatro puntos de apoyo.

## 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 (2014).** T321 Standard method of test for determining the fatigue life of compacted asphalt mixtures subjected to repeated flexural bending. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- AG:PT (2006).** T233 Fatigue life of compacted bituminous mixes subject to repeated flexural bending. Austroads Guide to Pavement Technology (AG:PT).
- ASTM (2010).** D7460 Standard test method for determining fatigue of compacted asphalt concrete subjected to repeated flexural bending. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM (2015).** D6927 Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM (2016).** D6926 Standard practice for preparation of asphalt mixture specimens using Marshall apparatus. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- 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, 11(2): 227-250, doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690274>.
- Cooper Jr. S. B., Mohammad L. N., Elseifi M. A. (2017).** Laboratory performance of asphalt mixtures containing recycled asphalt shingles and re-refined engine oil bottoms. Journal of Materials in Civil Engineering, 29(9): 04017106, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001904](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001904).
- EN (2004a).** 12697-24 Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 24: resistance to fatigue. European Standard (EN).
- EN (2004b).** 12697-26 Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 26: stiffness. European Standard (EN).
- Goli H., Hesami S., Ameri M. (2017).** Laboratory evaluation of damage behavior of warm mix asphalt containing steel slag aggregates. Journal of Materials in Civil Engineering, 29(6): 04017009, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001832](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001832).
- Hernández N., Hernández J., Martínez R. (2013).** First steps for the perpetual pavement design: through the analysis of the fatigue life. In: VIII Congreso Mexicano Del Asfalto, Cancún, México.
- Huet C. (1963).** Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. Faculté Des Sciences de Paris, France.
- Mamlouk M. S., Souliman M. I., Zeiada W. A., Kaloush K. E. (2012).** Refining conditions of fatigue testing of hot mix asphalt. Advances in Civil Engineering Materials, 1(1): 1-13, doi: <https://doi.org/10.1520/ACEM20120018>.
- Melo J. V. S., Trichês G. (2017).** Evaluation of properties and fatigue life estimation of asphalt mixture modified by organophilic nanoclay. Construction and Building Materials, 140: 364-373, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.143>.
- Melo J. V. S., Trichês G., Rosso L. T. (2018).** Experimental evaluation of the influence of reinforcement with Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) on the properties and fatigue life of hot mix asphalt. Construction and Building Materials, 162: 369-382, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.033>.
- Rasouli A., Kavussi A., Qazizadeh M. J., Taghikhani A. H. (2018).** Evaluating the effect of laboratory aging on fatigue behavior of asphalt mixtures containing hydrated lime. Construction and Building Materials, 164: 655-662, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.003>.
- Varma K. R., Padmarekha A., Anjaneyulu M. V. L. R., Krishnan J. M. (2016).** Influence of post - processing methods for ranking of fatigue life of bituminous mixture. Transportation Research Procedia, 17: 567-575, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.111>.

