

Evaluación empírico-mecánica de las estructuras de pavimentos flexibles comparando herramientas computacionales y datos de pruebas de fatiga en laboratorio

Ing. Breno Salgado Barra, M.Sc.; Ing. Leto Momm, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC),
Brasil

Resumen

El objetivo principal de este artículo es evaluar el desempeño mecánico de las estructuras de pavimentos flexibles proyectadas con el uso de la metodología adoptada en Brasil por el Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes (DNIT). Este método adopta el principio de conversión de los volúmenes de tráfico generados a partir de diferentes intensidades de espectros de carga a aquel relacionado con una carga por ejes equivalentes de 8,2 t. Los datos diferentes al volumen de tráfico utilizados para proyectar las estructuras de los pavimentos evaluados fueron extraídos de búsquedas realizadas por el Instituto Militar de Ingeniería (IMI). Estos estudios fueron relacionados con el proyecto de carretera denominado BR-163 (Santarém-Cuiaba), localizado en la Región Amazónica. Esta carretera constituirá una importante ruta para el transporte de producción brasileña de soya destinada a la exportación, a partir de los puertos de la región norte del país. A partir de los datos de tráfico obtenidos, fue posible calcular los niveles de deformación generados en cada capa de las estructuras del pavimento, utilizando herramientas computacionales de dimensionamiento, tales como los programas ELSYM5 y el EVERSTRESS 5.0. Análisis especiales fueron descubiertos para la fibra inferior de las capas superficiales, con el fin de comparar el efecto dañino del tráfico tanto por la metodología de DNIT como a través de las curvas de fatiga descubiertas en el laboratorio. Las ecuaciones de fatiga consideraron las microdeformaciones de tracción generadas por el eje de carga equivalente de 8,2 t y por una serie de ejes variando de 17,0 t a 26,0 t.

Palabras clave: ejes de carga, volumen de tráfico, diseño, pavimento, microdeformaciones, fatiga.

Abstract

The main target of this paper is to evaluate the mechanical performance of asphalt concrete pavement structures designed using the method adopted by the Brazilian National Department of Transportation Infrastructure (DNIT). This method adopts the conversion principle of traffic volumes generated from different intensities of load spectra to those related to an equivalent single axle load (ESAL) of 8.2tf. The traffic volume data used to design the relevant pavement structures was taken from research studies conducted by the Brazilian Military Institute of Engineering. These studies were concerned with a highway project, called BR-163, located in the Amazon Region. This highway would constitute an important route to transport the Brazilian soy production for international exportation from Brazil's northern ports. From the traffic data, it was possible to obtain the strain levels generated in every layer of the various pavement structures, using computerized pavement design tools, such as ELSYM 5 and EVERSTRESS 5.0. Special analyses were

developed for the bottom of the surface layers to compare traffic damage effect calculated by the DNIT empirical method and that provided by a laboratory fatigue equation. The fatigue equation comprised tensile microstrains generated by the 8.2tf ESAL and by a series of tandem axle loads ranging from 17.0 to 26.0tf.

Keywords: axle load, traffic volume, design, pavement, microstrain, fatigue.

Introducción

Una condición importante a ser considerada cuando un pavimento está siendo proyectado es verificar si la estructura de multi-capas es capaz de soportar las intensidades de las cargas que se solicitarán durante un período de proyecto estimado.

A lo largo del trazado de esta carretera hay varias propiedades e industrias produciendo soya en gran escala, siendo exportada para el mercado mundial. Actualmente, las condiciones del pavimento son precarias y sin ningún mantenimiento hecho en muchos tramos, provocando el aumento de los costos finales de los productos y consecuentemente la pérdida de competitividad con otros países. Últimamente, esta carretera ha sido integrada en un proyecto del gobierno federal, con el intento de desarrollar la Región Amazónica, en que muchos estudios han sido realizados con el fin de construir una estructura de pavimento definitiva.

Entretanto, la metodología del dimensionamiento de los pavimentos adoptada en Brasil por el Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes [4], está basada en la conversión de los volúmenes de tráfico generados a partir de diferentes intensidades de espectros de carga a un número equivalente a las pasadas de un eje simple de rueda doble (ESRD) de 8,2 t, no considerando la acumulación de daños impuestos por la intensidad real de las cargas aplicadas sobre las estructuras del pavimento en el campo.

Basado en los volúmenes de tráfico estimados a partir de los estudios efectuados por el Instituto Militar de Ingeniería (IMI) para una flota de camiones denominados en Brasil como bi-trens [3], también conocidos como multi-trailers [8], dos estructuras de pavimento fueron proyectadas utilizando la metodología del dimensionamiento de DNIT [4]. Las dos estructuras fueron analizadas con el uso de herramientas computacionales, como los programas ELSYM5 [9] y el EVERSTRESS 5,0 [11]. Las cargas por eje consideradas fueron cinco, siendo la del ESRD equivalente a 8,2 t, y una serie de ejes comparados con 17 t, 20 t, 23 t y 26 t. Estas cargas fueron usadas para calcular las microdeformaciones resultantes de la tracción generada en la fibra inferior de la capa superficial.

Los resultados de las microdeformaciones de tracción calculados a partir de los análisis mecanísticos lineales fueron insertados en curvas de fatiga obtenidas en laboratorio [7], con el intento de establecer comparaciones entre los volúmenes de tráfico estimados por la metodología del dimensionamiento del DNIT [4] y los provenientes de las curvas como herramientas de dimensionamiento.

Estructuras de pavimento y datos de entrada de los análisis

Las estructuras de pavimento proyectadas con el uso de la metodología de dimensionamiento del DNIT [4] consistirán en estructuras de multi-capas compuestas por una capa superficial de concreto asfáltico y capas inferiores subdivididas como se muestra en la Tabla 1.

Como se puede observar en la Tabla 1, se consideraron dos estructuras de pavimento para las simulaciones, siendo la única diferencia el espesor de la capa superficial (estructuras 1 y 2). Esto puede ser explicado, en función de que el menor espesor recomendado por el método de diseño de pavimentos del DNIT (4), es un valor determinado de 12,5 cm (estructura 1) cuando el volumen de tráfico total estimado fuese igual o mayor de $5,0 \times 10^7$. Sin embargo, considerando un mejor control de la capa superficial durante los procedimientos de ejecución en campo, así como la comparación de resultados con otro valor de espesor mayor al mínimo especificado, el valor de 15,0 cm (estructura 2) fue también utilizado y analizado

Además de eso, estas estructuras de pavimento fueron concebidas con base en el volumen de tráfico correspondiente a un ESRD equivalente a 8,2 t,

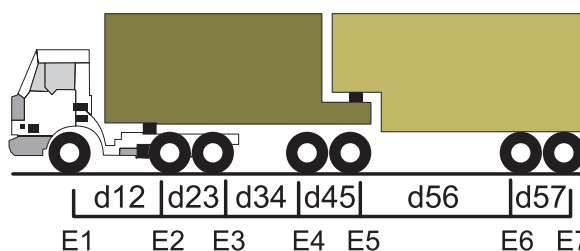
Capa	Espesor (cm)	Coefficientes de Poisson (ν)	Módulos Resilientes (MPa)
Concreto Asfáltico	12,5 y 15,0	0,30	6000
Base de piedra graduada	15,0	0,32	1000
Sub-base de suelo no tratado	15,0	0,40	200
Capa de refuerzo con suelo fino no-tratado	15,0	0,42	120
Sub-suelo (suelo arcilloso)	semi-infinito	0,45	60

estimado en $1,3 \times 10^8$ al final del vigésimo segundo año, tomado por el IMI como el período total de vida útil del proyecto de pavimentación de la BR-163 (del 2007 al 2029). Los cálculos concernientes al tráfico llevaron en consideración una flota circulante de bi-trens [3], también conocidos como multi-trailers [8] (Figura 1). El factor de equivalencia considerado fue de 22,50 (3 x 7,50 de cada eje comparado), de acuerdo con los estudios de tráfico conducidos por el IMI.

En los análisis mecanísticos lineales, las herramientas computacionales ELSYM5 [9] y EVERSTRESS 5,0 [11] fueron utilizadas. El propósito del uso de ambos software fue comparar los resultados obtenidos y verificar la veracidad de estos valores durante los análisis hechos.

Configuración de un camión bi-tren (multi-trailer) [3]

Figura 1



Configuraciones de Cargas por Eje:

d12, d34, d56 > 2,40m

1,20 m < d23, d45, d67, ≤ 2,40 m

E1: eje simple de rueda simple

E2E3 = E4E5 = E6E7: eje de carga tandem

Los materiales que constituyen las capas inferiores de las estructuras de pavimento mencionadas en la Tabla 1 son recursos naturales típicos existentes en los depósitos situados en las proximidades del proyecto de carretera BR-163. Los datos de entrada utilizados, tales como módulo resiliente y coeficiente de Poisson, fueron extraídos de estudios conducidos por Huang [5] y Medina y Motta [6] (Tablas 2 y 3).

Las configuraciones de las cargas por eje consideradas en los análisis mecánicos lineales fueron de un ESRD equivalente a 8,2 t, tanto como las variaciones de ejes comparados con 17 t, 20 t, 23 t y 26 t (Figura 2). La carga por eje junto con otras variables, como la presión

de inflado de la llanta, la carga por rodada y el radio de contacto son mostradas en la Tabla 4. Los valores entre paréntesis corresponden a las cargas por semi eje.

La deformación fue calculada en tres diferentes posiciones, mostradas en la Figura 2, para una determinación más acertada del valor crítico de aplicación de la carga.

Considerando una carga de semi-eje, los siguientes espaciamientos y coordenadas fueron usados: 32,0 cm (espaciamento entre las ruedas dobles), $x = 0,0$; $y = 0,0$ (coordenadas de un cargamento aplicado abajo de una rueda), $x = 10,80$ cm; $y = 0,0$ (distancia del eje de una rueda hasta su borde), y $x = 16,0$ cm; $y = 0,0$ (distancia del eje de una rueda al centro de la rueda doble). Para la serie de ejes comparados, una coordenada adicional fue utilizada: $x = 0,0$; $y = 0,60$ cm, con el fin de obtener datos referentes a las microdeformaciones generadas en el centro de los conjuntos de ruedas dobles.

En la cota vertical, los valores de “z” fueron 12,5 cm y 15,0 cm, o sea, apenas una fibra inferior de la capa asfáltica superficial.

Datos de las microdeformaciones de las capas superficiales

Las mayores microdeformaciones de tracción desarrolladas en la fibra inferior de la capa asfáltica para las dos estructuras consideradas, utilizando los programas ELSYM 5 [9] y EVERSTRESS 5,0 [11] son mostradas en la Tabla 5.

Los resultados expuestos fueron obtenidos a partir de las más severas condiciones de aplicación de carga en la fibra inferior de las capas superficiales de ambas estructuras de pavimento (1 y 2), después de haber sido analizadas todas las respuestas provistas por las simulaciones mecánicas lineales, considerando las coordenadas de evaluación de los puntos mencionados más adelante. En las cotas verticales (12,5 cm y 15,0 cm, respectivamente), fue observado que en todos los casos considerados, el mayor valor de microdeformación de tracción obtenido fue en las coordenadas $x = 0,0$; $y = 0,0$, o sea, inmediatamente por abajo de la rueda de los ejes de carga, lo mismo para los ejes comparados.

Se hace notar que la intención de este estudio es comparar los volúmenes de tráfico obtenidos por la metodología de diseño del pavimento, en la cual la superposición de los efectos de aplicación de carga no

Tabla 2 Valores típicos de coeficientes de Poisson [5]

Material	Coefficiente de Poisson (ν)
Mezcla asfáltica densa	0,30 a 0,40
Materiales granulares no-tratados	0,30 a 0,40
Suelos finos	0,30 a 0,50
Suelos arcillosos saturados	0,40 a 0,50

Tabla 3 Valores de módulo resiliente [6]

Material	Módulo Resiliente (MPa)
Mezcla Asfáltica	3000 a 6000
Materiales granulares	400 a 5000
Suelos (sub-base, refuerzo y sub-suelo)	50 a 300

Tabla 4 Datos de entrada correspondientes a la configuración de las cargas de eje

Carga por eje (t)	Carga por rodada (t)	Presión de inflado de la llanta (kPa)	Radio de contacto (cm)
8,2 (4,1)	2 050	559 960	10,70
17,0 (8,5)	2 125	579 573	10,70
20,0 (10,0)	2 501	682 543	10,70
23,0 (11,5)	2 875	784 532	10,70
26,0 (13,0)	3 250	886 521	10,70

es tomada en consideración, de las que resultan las curvas de fatiga en laboratorio.

Desarrollo del análisis

Así mismo teniendo la estimación del cálculo en cuanto al volumen de tráfico total concerniente al ESRD equivalente a 8,2 t, había la necesidad de calcular los volúmenes de tráfico debido a las condiciones reales de aplicación de la carga en el campo, esto es, considerando las cargas no equivalentes por eje de 17 t, 20 t, 23 t y 26 t. A partir del estudio realizado por el IMI, el volumen de tráfico para las variaciones de cargas por eje deberían ser directamente proporcionales a la cantidad de producto (en este caso, la soya) que será transportada por la carretera BR-163 durante el período del proyecto estimado (del 2007 al 2029).

Para obtener estas cantidades de soya, el primer paso fue calcular el producto del volumen medio diario (VMD) de tráfico (en una dirección) transportado por una flota de bi-trens (multi-trailers) por el número total de días en el año, resultando un volumen medio anual (VMA) de tráfico.

De acuerdo con las consideraciones hechas por el IMI para el proyecto de la carretera BR-163, cada bi-tren (multi-trailer) transportaría una cantidad de soya que pesará 40 t (distribuidas a lo largo de los tres ejes), siendo posible calcular la cantidad total de soya, la cual será transportada por la BR-163 hasta el final del período del proyecto, al multiplicar el VMA correspondiente a cada año por 40 t.

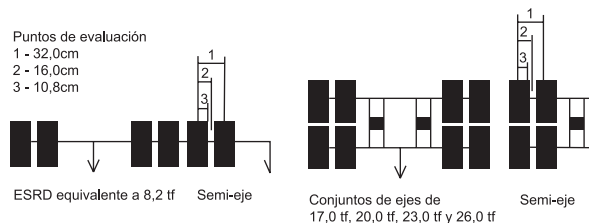
Los resultados del volumen de tráfico tanto para las variaciones de eje (17 t, 20 t, 23 t, y 26 t) como para el ESRD equivalente a 8,2 t son mostradas en la Tabla 6.

Una vez determinadas las microdeformaciones de tracción y los volúmenes de tráfico (Tabla 5 y 6), es posible comparar los resultados obtenidos por las curvas laborales de fatiga de Momm [7].

Para obtener los volúmenes de tráfico a partir de las curvas de fatiga de mezcla asfáltica en laboratorio, que tendrían sus datos comparados a los presentados en la Tabla 6, fue analizado un universo de nueve curvas de fatiga calculadas por Momm (7), para que fuese seleccionada una de estas curvas. Para el cálculo de estas curvas y consecuentemente de las ecuaciones representativas, las pruebas de fatiga seguirán a los procedimientos del "Laboratoire Central des Ponts

Configuración de las cargas por eje y datos de entrada referentes a las cotas horizontales de evaluación

Figura 2



et Chaussées" (LCPC), siendo normalizados por la "Asociation Francaise de Normalization" [1], esto es, obtenida a partir de dos puntos de la prueba de fatiga a flexión ejecutados en modo continuo con una señal de carga sinusoidal; luego, se simula una señal real de deformación que es generada en la parte inferior de las capas asfálticas superficiales de los pavimentos en el campo, en el momento de la aplicación de la carga por un vehículo sobre una estructura de pavimento [2]. La ecuación 1 fue escogida para representar los datos referentes a las curvas laborales de fatiga.

$$N = 3,1779(1000)^{-6,1875}(ms)^{-6,1875} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

N = volumen de tráfico,
 ms = microdeformación (x 10⁻⁶).

La ecuación 1, obtenida por Momm [7], presentó un R² igual a 0,88, el cual fue determinado a través de cálculos de regresión, correspondiente a la función que más se ajusta a los puntos (potencial), comprendió los resultados de los volúmenes de tráfico a partir de la curva de fatiga, considerando los valores de las microdeformaciones de tracción (ms) expuestos en la Tabla 5.

Valores de microdeformación de tracción en la parte inferior de las capas superficiales

Tabla 5

Carga por Eje (t)	Microdeformación (x 10 ⁻⁶)	
	Estructura del Pavimento 1 (12,5cm de espesor)	Estructura del Pavimento 2 (15,0cm de espesor)
8,2	85,47	76,05
17,0	177,10	157,61
20,0	208,42	185,47
23,0	239,64	213,26
26,0	270,87	241,05

Tabla 6

Volúmenes de tráfico y cantidades de soya estimadas

Año	Carga por eje					Soya (Millones de ton.)
	8,2t	17,0t	20,0t	23,0t	26,0t	
2007	3,1 x 10 ⁶	4,1 x 10 ⁵	3,5 x 10 ⁵	3,1 x 10 ⁵	2,8 x 10 ⁵	5,4
2008	6,6 x 10 ⁶	4,8 x 10 ⁵	4,1 x 10 ⁵	3,7 x 10 ⁵	3,3 x 10 ⁵	6,4
2009	1,1 x 10 ⁷	5,4 x 10 ⁵	4,7 x 10 ⁵	4,1 x 10 ⁵	3,7 x 10 ⁵	7,2
2010	1,5 x 10 ⁷	5,9 x 10 ⁵	5,2 x 10 ⁵	4,6 x 10 ⁵	4,1 x 10 ⁵	7,9
2011	2,0 x 10 ⁷	6,4 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	5,0 x 10 ⁵	4,4 x 10 ⁵	8,6
2012	2,5 x 10 ⁷	6,9 x 10 ⁵	6,0 x 10 ⁵	5,3 x 10 ⁵	4,8 x 10 ⁵	9,2
2013	3,1 x 10 ⁷	7,3 x 10 ⁵	6,4 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	5,1 x 10 ⁵	9,8
2014	3,6 x 10 ⁷	7,7 x 10 ⁵	6,7 x 10 ⁵	6,0 x 10 ⁵	5,3 x 10 ⁵	10,3
2015	4,3 x 10 ⁷	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,2 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,8
2016	4,9 x 10 ⁷	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,9
2017	5,5 x 10 ⁷	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,2 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,8
2018	6,1 x 10 ⁷	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,8
2019	6,7 x 10 ⁷	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,8
2020	7,3 x 10 ⁷	8,2 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,9
2021	7,9 x 10 ⁷	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,8
2022	8,5 x 10 ⁷	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,8
2023	9,1 x 10 ⁷	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,8
2024	9,7 x 10 ⁷	8,2 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,9
2025	1,0 x 10 ⁸	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,9
2026	1,1 x 10 ⁸	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,9
2027	1,2 x 10 ⁸	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,9
2028	1,2 x 10 ⁸	8,2 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,9
2029	1,3 x 10 ⁸	8,1 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵	6,3 x 10 ⁵	5,6 x 10 ⁵	10,9

de pavimento convirtiendo las diferentes intensidades de espectros de carga en apenas una carga de ESRD equivalente a 8,2 t. Es importante resaltar que varias metodologías de dimensionamiento de pavimentos utilizan el principio de cargas equivalentes, como por ejemplo, las provistas por el DNIT [4], United States Army Corps of Engineers [10] y la National Cooperative Highway Research Program [8]. Esto se debe a que la acumulación de daños en las estructuras de pavimento es extremadamente más elevada que la producida por el ESRD equivalente a 8,2 t, especialmente en la fibra inferior de las capas superficiales.

Las afirmaciones descritas en el párrafo anterior son sustentadas cuando se comparan los volúmenes de tráfico basados en la metodología de dimensionamiento del DNIT [4] con los calculados por la curva laboratorial de fatiga (ecuación 1), para el mismo ESRD equivalente a 8,2 t. Las estructuras de pavimento 1 y 2 resistirán poco más que los primeros tres años después de haber sido abiertas al tráfico, o sea, del 2007 con intervalo entre los años 2009 y 2010.

El peor escenario se presenta cuando las comparaciones son hechas entre los valores concernientes a las variaciones de los ejes de 17 t, 20 t, 23 t y 26 t. Es estos casos, ninguno de los volúmenes de tráfico calculados con el uso de la ecuación abarcan la variación de los valores exhibidos en la Tabla 6, indicando que las estructuras del pavimento 1 y 2 resistirán más que el primer año y fallarán debido a la fatiga de las capas asfálticas superficiales.

Conclusiones

La comparación de los datos provistos por la metodología de dimensionamiento del DNIT [4] (Tabla 6), basada en los volúmenes de tráfico de las búsquedas conducidas por el IMI, con los obtenidos a partir de la curva laboratorial de fatiga (ecuación 1) indicó que el principio de convertir el volumen de tráfico relacionado a los espectros reales de cargas generados por un ESRD equivalente a 8,2 t (ó cualquier eje de carga equivalente) es bastante inadecuado como conducta para ser adoptada en el dimensionamiento de las estructuras de pavimento.

Tabla 7

Volúmenes de tráfico calculados con base en la curva laboratorial de fatiga de mezclas asfálticas

Carga por Eje	Volumen de Tráfico para la Estructura del Pavimento 1 (12,5cm de espesor)	Volumen de Tráfico para la Estructura del Pavimento 2 (15,0cm de espesor)
8,2t	1,3 x 10 ⁷	2,7 x 10 ⁷
17,0t	1,4 x 10 ⁵	2,9 x 10 ⁵
20,0t	5,2 x 10 ⁴	1,1 x 10 ⁵
23,0t	2,2 x 10 ⁴	4,5 x 10 ⁴
26,0t	1,0 x 10 ⁴	2,1 x 10 ⁴

Los resultados de los volúmenes de tráfico calculados con base en la ecuación 1 se muestran en la Tabla 7.

Discusión de resultados

Observando y comparando los datos mostrados en las Tablas 6 y 7, se puede inferir que no es adecuado evaluar el comportamiento mecánico de una estructura

La diferencia de las intensidades correspondientes a las cargas aplicadas sobre las estructuras del pavimento, luego, directamente proporcional a la grandeza de las acumulaciones de daño generadas a lo largo de las capas, principalmente en la fibra inferior de las capas superficiales, provee una dispersión entre los resultados de los volúmenes de tráfico basados en el principio de ejes equivalentes, en relación a aquellos que reflejan las condiciones de aplicación de carga que realmente ocurren en el campo, tornándose fácil entender la razón del porqué tantas estructuras de pavimento resistieran tan poco tiempo luego de haber sido abiertas al tráfico. La receptibilidad de estos análisis comprendiendo el uso de la ecuación 1, a partir de la curva laboratorial de fatiga y válida a otras situaciones de estructuras de pavimento, resguardando, obviamente, la sustitución de los valores referentes a cada caso, debido a que son provistos por pruebas de fatiga ejecutados sobre los parámetros de deformación y señales de carga que realmente reflejan la condición de aplicación de la carga que todas las estructuras de pavimento están sujetas en el campo.

El proyecto de estructuras de pavimento considerando las condiciones reales de aplicación de carga que ocurren en el campo, con la ayuda de herramientas computacionales, tales como el ELSYM 5 [9] y EVERSTRESS 5,0 [11], juntamente con la curva laboratorial de fatiga (ecuación 1), parece ser el procedimiento más adecuado para preveer el comportamiento mecánico de las estructuras del pavimento en lugar de los métodos empíricos, como los provistos por el DNIT [4], USACE [10], ó así mismo las metodologías mecánicas de dimensionamiento, como la de NCHRP [8], que adoptan el principio de ejes equivalentes de carga.

Bibliografía

1. AFNOR NF P 98-261-1, Essais Relatifs aux Chaussées: Détermination de la Résistance en Fatigue des Mélanges Hydrocarbonés - Partie 1: Essai par Flexion à Flèche Constante. Association Française de Normalisation. France, 1993.
2. De La Roche C., Module de Rigidité et Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux. Thèse de Doctorat. École Central de Paris, 1996.
3. DNIT, Pesos Máximos Admitidos: Resoluções CONTRAN 12/98 e 104/98; Lei 7.408/85. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Ministério dos Transportes, Brasil, 2005.
4. DNIT, Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2ª Edição. Editado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). Ministério dos Transportes, Brasil, 1996.
5. Huang Y. H., Pavement Analysis and Design. Published by University of Kentucky, USA, 1993.
6. Medina J. and L.M.G. Motta, Mecânica dos Pavimentos. Editado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). 2ª Edição. Rio de Janeiro, RJ, 2005.
7. Momm L., Estudo dos Efeitos da Granulometria Sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e Seu Comportamento Mecânico. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, SP, 1998.
8. NCHRP, Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures 1-37A. Final Report, Part 2: Design Inputs. Prepared for National Cooperative Highway Research Program/ Transportation Research Board/ National Research Council. Published by ARA, Inc., ERES Consultant Division. Champaign, Illinois, 2004.
9. U.C. Berkeley, ELSYM 5: Layered Elastic Pavement System. University of California at Berkeley. Berkeley, CA, 1986.
10. USACE, Pavement Design for Roads, Streets, Walks, and Open Storage Areas. TM 5-822-5/AFM 88-7. Chapter 8: Flexible Pavement Design. Published by United States Army Corps of Engineers. USA, 1992.
11. WSDOT, EVERSTRESS 5.0: A Layered Elastic Analysis Program. Washington State Department of Transportation. Washington, D.C., 1999.