

Artículo de Investigación/Research Article

Influencia de la Rigidez de la Subrasante y las Capas Granulares sobre la Vida a Fatiga de Mezclas Asfálticas

Influence of Subgrade and Unbound Granular Layers Stiffness on Fatigue Life of Hot Mix Asphalts - HMA

Hugo A. Rondón-Quintana¹
Wilmar D. Fernández-Gómez²
Jesús A. Hernández-Noguera³

Recibido: 22 de enero de 2013

Aceptado: 24 de junio de 2013

-
- 1 Doctor en Ingeniería, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá-Colombia
harondonq@udistrital.edu.co
 - 2 Doctor en Ingeniería, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá-Colombia
wfernandez@udistrital.edu.co
 - 3 Doctor en Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM, Ciudad de México-México
JHernandezN@iingen.unam.mx

Resumen

Cuando se intenta predecir la vida a fatiga de mezclas asfálticas en caliente, los principales factores que se evalúan son: el modo de carga y el tipo de ensayo aplicado, métodos de compactación de la muestra, parámetros de diseño de la mezcla (granulometría y tipo de agregado pétreo, contenido de finos, tipo de cemento asfáltico, etc.) y las variables asociadas al medio ambiente (principalmente humedad, temperatura, envejecimiento). En el presente estudio se evaluó, a través de simulación computacional, la influencia que tienen las capas granulares y la subrasante en la vida a fatiga de capas asfálticas de estructuras de pavimentos flexibles. Para caracterizar y determinar los parámetros mecánicos de las capas granulares de subrasante, base y subbase se emplearon las ecuaciones más utilizadas actualmente para tal fin en el mundo. La temperatura media anual promedio - TMAP- utilizada en las simulaciones fue de 14°C. Como conclusión general se reporta que la rigidez de las capas granulares y la subrasante inciden de manera significativa en la resistencia a fatiga de mezclas asfálticas. Así mismo, el empleo de una u otra ecuación reportada en la literatura de referencia para caracterizar capas granulares puede hacer variar la vida a fatiga entre 4,6 y 48,5 veces, modificando el espesor de las capas del pavimento en su diseño.

Palabras clave

Fatiga, mezclas asfálticas, capas granulares, subrasante, pavimento flexible.

Abstract

The mainly factors studied to predict fatigue life of hot mix asphalt-HMA in flexible pavements are the loading effect, type of test, compaction methods, design parameters of HMA (e.g., particle size and size distribution curve, fine content, type of bitumen) and the variables associated with the environment (mainly moisture, temperature, aging). This study evaluated through a computer simulation, the influence of the granular layers and subgrade on the fatigue life of asphalt layers in flexible pavement structures. Mechanics parameters of granular layers of subgrade, base and subbase were obtained using the mathematical equations currently used for this purpose in the world. The emphasis of the study was the city of Bogotá, where the average annual temperature is 14°C and soils predominantly clay, generally experience *CBR* magnitudes between 1% and 4%. General conclusion: stiffness of the granular layers and subgrade significantly affect the fatigue resistance of HMA mixtures. Likewise, the use of different equations reported in reference literature in order to characterize granular layers may vary the fatigue life between 4.6 and 48.5 times, varying the thickness of the pavement layers in the design.

Keywords

Fatigue, asphalt mixtures, unbound granular layers, subgrade, flexible pavement.

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de fatiga por carga es uno de los principales mecanismos de daño de mezclas asfálticas en servicio (Hsu & Tseng, 1996; Martono et al., 2007; Masad et al., 2008; Tarefder et al., 2008; Xiao et al., 2009; Christensen & Bonaquist, 2012; Hajj et al., 2012; Rondón & Reyes, 2012; Miljković, 2013; Wen & Li, 2013), ocurre en las capas ligadas del pavimento, y para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica, producto de las cargas impuestas por el parque automotor (cargas repetidas). Adicionalmente es uno de los principales mecanismos de degradación que se intentan controlar en las metodologías empíricas y mecanicistas de diseño (p.e., Shell, 1978; Asphalt Institute, 1982; Austroads, 1992; Aashto, 1993; NCHRP, 2004; Schukla & Das, 2008).

El paso continuo de vehículos hace que la capa asfáltica flexione, generando esfuerzos de tensión en el extremo inferior de la misma. Esta repetición de carga hace que la mezcla asfáltica pierda rigidez y origina la aparición de deformaciones plásticas a tracción que a su vez conducen a la formación de microfisuras. Ante la continuidad de las repeticiones de carga y la disminución de la rigidez, se produce la coalescencia de las microfisuras que lleva a la formación de una fisura visible (macrofisura) a nivel de la rasante. Una vez aparezca superficialmente la grieta, la vida del pavimento disminuye de manera exponencial porque penetra más fácilmente el agua y el aire. El proceso de agrietamiento se origina en el extremo inferior de la capa asfáltica (zona donde el esfuerzo de tensión es mayor) y se propaga de manera ascendente hacia la superficie del pavimento, en donde se refleja como fisuras paralelas direccionadas en el sentido longitudinal de la vía, las cuales ante la repetición de las cargas de tránsito se propagan formando piezas angulares que desarrollan un aspecto parecido a la piel de cocodrilo.

En Colombia, son escasas las investigaciones que se han realizado sobre el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas debido principalmente a la falta de equipos para llevar a cabo mediciones en campo y en laboratorio, y al escaso presupuesto destinado para

actividades de investigación. Esta situación explica el escaso conocimiento sobre el tema en el país y la inexistencia de un modelo propio que caracterice el comportamiento a la fatiga a partir de las propiedades (mecánicas, químicas, reológicas y físicas) de los materiales, las condiciones del medio ambiente y el comportamiento del tráfico. En general, los ensayos de fatiga de mezclas asfálticas consisten en someter una muestra, de geometría específica, a solicitaciones repetitivas e idénticas para determinar el número de ciclos de carga que puede soportar (Di Benedetto y De la Roche, 2005). Este número de ciclos de carga soportados antes de la falla, se denomina vida a la fatiga. De acuerdo con Epps & Monismith (1972), Rao Tangella *et al.*, (1990), Di Benedetto *et al.*, (2004) y Di Benedetto & De la Roche (2005), la respuesta a la fatiga de mezclas asfálticas se ve afectada principalmente por (estados del conocimiento sobre el tema pueden ser consultados en Rondón & Reyes, 2011, 2011a, 2012): métodos de compactación de la muestra, modo de carga y el tipo de ensayo aplicado, parámetros de diseño de la mezcla (granulometría y tipo de agregado pétreo, contenido de finos, tipo de cemento asfáltico, etc.) y variables asociadas al medio ambiente (principalmente humedad y temperatura).

En síntesis, cuando se analiza la respuesta de mezclas asfálticas al fenómeno de fatiga, los investigadores intentan establecer cómo evoluciona la vida a fatiga de estos materiales con las variables mencionadas con anterioridad. De los documentos consultados en la presente investigación, ningún estudio ha reportado de manera cuantitativa, la influencia de las capas granulares del pavimento y la subrasante sobre la resistencia al fenómeno de fatiga de mezclas asfálticas, a pesar de que *in situ*, es evidente que las capas asfálticas experimentan deformaciones a tracción que evolucionan con base en la rigidez de la plataforma que las soporta. Por lo anterior, en este estudio se analizó, a través de simulación computacional, la influencia de la rigidez de la capas granulares y la subrasante sobre la vida a fatiga de mezclas asfálticas en servicio. Para hacer el análisis del estudio se tuvo en cuenta:

Los métodos de diseño de pavimentos, utilizan como parámetro mecánico para caracterizar la subrasante, el módulo resiliente (M_r). En Colombia, este parámetro se obtiene en laboratorio empleando equipos triaxiales cíclicos sobre suelos inalterados o sobre

materiales compactados, siguiendo los lineamientos especificados por el Instituto Nacional de Vías - INVIAS (2007, INV. E-156-07). El módulo resiliente indica que tan rígido es un material bajo carga cíclica del tipo resiliente (con periodo de reposo entre ciclos de carga) y es un parámetro de gran importancia cuando el diseño de pavimentos se realiza por métodos mecanicistas. Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en un pavimento, al utilizar este parámetro el comportamiento de la subrasante se supone como si fuera un medio elástico lineal. Como en la práctica es de difícil determinación experimental el cálculo de esta variable de estado, ya sea por falta de equipos o definición acertada de trayectorias de esfuerzo, lo que se hace es correlacionarla con el valor del *CBR* a través de ecuaciones empíricas (Rondón, 2008). Algunas de ellas se presentan en (1) a (8), Heukelom & Foster (1960) y Heukelom & Klomp (1962):

$$M_r = 5409CBR^{0.711} \text{ o } M_r = 1500CBR \text{ (psi), para } CBR < 10 \% \quad (1)$$

Una ecuación similar a (1) fue propuesta por Poulsen & Stubstad (1980) para caracterizar subrasantes en Dinamarca: $M_r = 10CBR^{0.73}$ (MPa). Green & Hall (1975) (recomendado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos - USACE):

$$M_r = 5409CBR^{0.711} \text{ (psi)} \quad (2)$$

Uzan et al. (1977):

$$M_r = 14CBR \text{ (MPa), para } CBR < 10 \% \quad (3)$$

Powell et al. (1984):

$$M_r = 17,6CBR^{0.64} \text{ (MPa), para } CBR < 12\% \quad (4)$$

Lister & Powell (1987) reportaron una ecuación la cual es recomendada por la nueva metodología mecánico-empírica de diseño NCHRP (2004) y por el método de diseño INVIAS (2007a):

$$M_r = 2555CBR^{0,64} \text{ (MPa), para } CBR < 10\% \quad (5)$$

Ayres (1997):

$$M_r = 21CBR^{0,65} \text{ (MPa)} \quad (6)$$

Reyes (2003), ecuación recomendada para utilizar en el Método Racional para Bogotá D.C. del IDU y la Universidad de Los Andes (2002):

$$M_r = 5CBR \text{ (MPa)} \quad (7)$$

El MOP de Chile en el año 2004, recomendó entre otras ecuaciones la siguiente:

$$M_r = 22,1CBR^{0,55} \text{ (MPa), para } 12 < CBR < 80 \% \quad (8)$$

Ecuaciones similares a (1-8) pueden ser encontradas en la literatura (p.e., Brown & Selig, 1991; Garnica *et al.*, 2002; Sawangsu-riya & Edil, 2005) como se puede observar en la Fig. 1. Por lo tanto, para el caso colombiano, donde existe variedad de composición y tipos de suelos, escoger arbitrariamente una ecuación empírica puede conducir a diseños de estructuras sub o sobredimensionadas. Otras correlaciones del módulo resiliente de subrasantes con otros factores, tales como la resistencia a la compresión confinada, ensayos de deflectometría, clasificación del suelo, densidad y *CBR* se pueden consultar en Fredlund *et al.*, 1977; Powell *et al.*, 1984; Brown & O'Reilly, 1990; Drumm *et al.*, 1990; Lee *et al.*, 1995, 1997 y Rondón & Reyes, 2011a.

Pasando al caso de los materiales granulares que conforman bases y subbases, el módulo resiliente también se puede obtener por medio de múltiples ecuaciones empíricas (p.e., 9-12).

$$E_{subb} = E_{subr} [5.35 \log h + 0.62 \log E_{subr} - 1.56 \log E_{subr} \log h - 1.13] \quad (9)$$

$$E_{base} = E_i [8.05 \log h + 0.84 \log E_i - 2.1 \log E_i \log h - 2.21] \quad (10)$$

$$E_{base} = 0.206h^{0.45} E_i \quad \text{Dormon y Metcalf (1965), válida}$$

para $2 < \frac{E_{base}}{E_i} < 4$ (11)

$$E_{subb} = E_{subr}(1 + 0.003h) \quad (12)$$

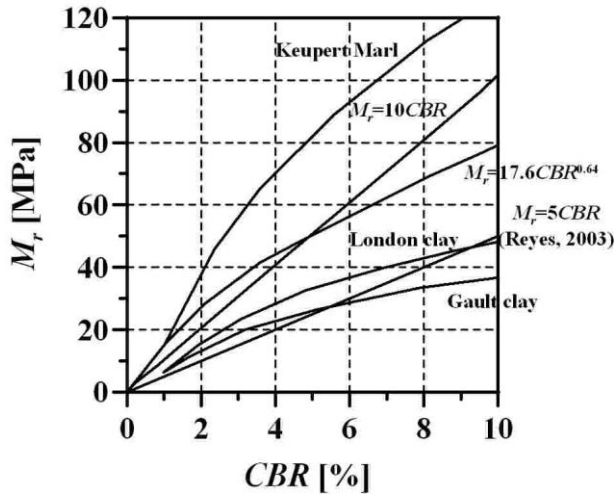


Fig. 1. Relación entre el CBR y el módulo resiliente (Mr). Fuente: Autores

La ecuación (10) puede ser utilizada de igual forma para el cálculo del módulo de la subbase. E_{base} , E_{subb} , E_{subr} y E_i son los módulos de base, subbase, subrasante y de la capa subyacente, respectivamente medidos en kg/cm^2 para el caso de (9-11) y en MPa para (12). h es el espesor de la capa granular donde se quiere medir el módulo en cm para el caso de (9-10), y en mm para (11-12). Este tipo de ecuaciones son obtenidas por lo general asumiendo que las capas granulares son elásticas y utilizando medidas de deflexión in situ (Rondón & Reyes, 2011a).

El énfasis del estudio fue la ciudad de Bogotá D.C., en donde la temperatura media anual promedio -TMAP- es de $14^{\circ}C$ aproximadamente y los suelos, predominantemente arcillosos, experimentan por lo general magnitudes de CBR entre 1 % y 4 %.

2. METODOLOGÍA

La vida a fatiga o número de ciclos de falla de mezclas asfálticas se calculó en el presente estudio utilizando (13), la cual es la recomendada por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y la Universidad de los Andes (2002) para diseñar estructuras de pavimentos flexibles por método mecanicista en Bogotá D.C. Ecuaciones similares reportadas en la literatura de referencia pueden ser consultadas en Rondón & Reyes (2011, 2011a, 2012). En esta ecuación NE puede ser entendido como una vida a fatiga ya que representa el número de ejes equivalentes de 130 kN que circula en el periodo y carril de diseño, y fue la variable calculada en el estudio.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b k_c \times k_s \times k_t \times k_r \quad (13)$$

A continuación se describe el significado y la forma como se obtuvieron los parámetros de (13). ε_6 y b son la amplitud de la deformación necesaria para que el material falle a 10^6 ciclos de carga y la pendiente de la ley de fatiga respectivamente, en un ensayo bajo deformación controlada. En el presente estudio se propuso la utilización de los siguientes valores con base en el manual de diseño del IDU y la Universidad de los Andes (2002): $\varepsilon_6=100 \times 10^{-6}$ y $b=-0,2$ (para una temperatura de ensayo $T=10^\circ\text{C}$). k_c es un parámetro que tiene en cuenta que el comportamiento que experimenta el material en laboratorio es diferente al de in situ (por lo general la vida a fatiga de una mezcla asfáltica es mayor en campo que en el laboratorio). Para capas de rodadura y base asfáltica la magnitud del k_c puede suponerse como 1,1 y 1,3 respectivamente. k_s tiene en cuenta que la resistencia a fatiga de la capa ligada depende de la rigidez de la capa que la soporta (plataforma). Entre menos rígida sea la capa que soporta la capa ligada, esta última experimentará mayor deformación a tracción en la fibra inferior y por lo tanto tenderá a agrietarse más fácilmente. $k_s = 1,0, 1/1,1$ y $1/1.2$ cuando la rigidez de la plataforma sobre la que se apoya la capa ligada es superior a 120 MPa, entre 50 y 120 MPa y menor a 50 MPa respectivamente. Cuando el ε_6 y b son obtenidos en el

laboratorio a una temperatura T y la temperatura media anual promedio de la zona donde se construirá el pavimento $TMAP$ es diferente, ε_t debe ser corregido a través del parámetro k_t utilizando (14):

$$k_t = \sqrt{\frac{M_r(T)}{M_r(TMAP)}} \quad (14)$$

$M_r(T)$ y $M_r(TMAP)$ son los módulo resilientes de la mezcla asfáltica medido a la temperatura T y $TMAP$ respectivamente. k_r introduce el factor de seguridad al diseño (tiene en cuenta el grado de incertidumbre al calcular las variables de diseño) a través de (15) y (16):

$$k_r = 10^{-ub\delta} \quad (15)$$

$$\delta = \sqrt{S_N^2 + S_H^2 \left(\frac{0,02}{b}\right)^2} \quad (16)$$

u es el fractil de la ley normal centrada y se determina a través de la probabilidad de falla sugerida por el diseñador (ver Tabla 1), b es la pendiente de la ley de fatiga del material y δ es la desviación estándar. S_N es la desviación estándar de la ley de fatiga del material expresada en logaritmo decimal del número de ciclos y S_H es la desviación estándar de los espesores del material colocados in situ. Valores recomendados de ε_6 , b , S_N y S_H pueden ser consultados en IDU y Universidad de los Andes (2002).

ε_t es la deformación a tracción máxima que puede experimentar la capa ligada (capa asfáltica) en la fibra inferior y fue estimada empleando el programa analítico DEPAV (programa académico de versión libre y gratuita elaborada por los ingenieros Murgueito, A., Benavides, C. A. y Solano, E., (1994) en la Universidad del Cauca). Este programa calcula esfuerzos y deformaciones en cada una de las capas del pavimento a partir de la introducción al mismo de la carga, la presión y área de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales y el espesor de cada capa. El compor-

tamiento de los materiales se supone elástico-lineal empleando un sistema multicapa, por lo tanto los parámetros de entrada son el módulo resiliente y la relación de Poisson - ν . La ecuación constitutiva elástica-lineal se adopta debido a que es la utilizada en el mundo para el diseño de pavimentos, ya que ha demostrado ser confiable a la hora de predecir estados de esfuerzo-deformación en estas estructuras viales. Adicionalmente se utiliza debido a la simplicidad para la determinación de sus parámetros mecánicos, y a que en un pavimento, las capas que lo conforman están sometidas a niveles de carga pequeños en comparación con su resistencia.

Tabla 1. Fractil u . Fuente: Autores

pf [%]	U
50	0,0
30	-0,52
25	-0,674
20	-0,841
15	-1,037
10	-1,282
7	-1,476
5	-1,645
2	-2,054
1	-2,327

En el método de diseño propuesto por el IDU y la Universidad de los Andes (2002), el eje de referencia es un eje simple de 130 kN el cual distribuye dicha carga en 4 llantas (dos llantas en cada esquina del eje). La distancia entre llantas se supone igual a 37,5 cm. Cada llanta transmite al pavimento 32,5 kN, las cuales a su vez las distribuyen sobre la capa de rodadura suponiendo un área de contacto circular de 25 cm de diámetro, generando una presión de contacto de 662 kPa. El módulo resiliente de la capa asfáltica E se calculó con base en (17) propuesta por Rondón & Reyes (2012a), la cual fue desarrollada con base en 360 ensayos de módulo y fatiga realizados sobre mezclas asfálticas utilizadas en la ciudad de Bogotá D.C.:

$$E = \exp(a + bT^2) + \left[\exp(c + d\sqrt{T}) + (e + fT^3)\sqrt{F} \right]^2 \quad (17)$$

T es la temperatura en °C, F es la frecuencia de carga en Hz y $a-f$ son parámetros obtenidos por regresión (ver Tabla 2). La ecuación (17) es válida para un rango de temperatura entre 10 a 30°C y frecuencias de carga de 0 a 10 Hz (velocidad aproximada de vehículos entre 0,01 a 70 km/h). Para el caso de Bogotá D.C. con TMAP=14°C y $F=8,6$ Hz (obtenida en el espesor medio de la capa asfáltica, velocidad aproximada de 60 km/h y tiempo de aplicación de carga de 0,0187 segundos), el módulo de la capa asfáltica se estableció como 6086 MPa, con base en (17). ν se supuso igual a 0,35 durante la simulación (valor recomendado por IDU y Universidad de los Andes, 2002).

Tabla 2. Variables para simular la rigidez de la mezcla MDC-2 en función de T y F .
Fuente: Rondón & Reyes, 2012a

a	b	c	d	e	f
8,78	-0,0035	5,26	-0,63	12,4	-1,75x10 ⁻⁴

Para evaluar el efecto de la rigidez de la subrasante y las capas granulares sobre la vida a fatiga (NE) de la capa asfáltica, se emplearon (2) y (7). Estas ecuaciones fueron utilizadas debido a que en la literatura de referencia consultada presentan el rango de valores más alto y bajo de estimación del M_r con el CBR . Es decir, se tuvo en cuenta en el estudio, el efecto de utilizar dos ecuaciones diferentes para el cálculo de la rigidez de la subrasante, y cómo la utilización de una u otra, hacen variar el NE de la capa asfáltica analizada. Para el caso de las capas granulares de subbase y base, las ecuaciones utilizadas fueron (9) y (10) respectivamente. Como en Bogotá es muy común la utilización de subrasante mejorada con 35 cm de Rajón (debido al bajo CBR que experimentan las subrasantes arcillosas), en las simulaciones la rigidez de esta capa se calculó con base en (11). En la simulación entonces aparecen cinco capas (se incluye la subrasante) y se supone $\nu=0,30$ y $0,50$ para granulares no tratados (base, subbase y subrasante mejorada) y subrasante arcillosa con alto contenido de agua respectiva-

mente (valores recomendados por IDU y Universidad de los Andes, 2002).

En síntesis se realizaron las siguientes simulaciones para evaluar la influencia de la rigidez de los granulares sobre la vida a fatiga de mezclas asfálticas:

Simulación 1: Se escogieron los valores mínimos (simulación 1a) y máximos (simulación 1b) típicos de espesores de capas granulares y capa asfáltica que presentan estructuras de pavimento flexible en Bogotá D.C. (ver Tabla 3, h_{CA} , h_{BG} , h_{SBG} y h_{Subr} son el espesor de la capa asfáltica, base, subbase y subrasante mejorada). En esta simulación se utilizó (7) para caracterizar el M_r de la subrasante, haciendo variar el CBR entre 1% y 4%.

Tabla 3. Espesores de capas utilizados en la Simulación 1. Fuente: Autores

Simulación	h_{CA} [cm]	h_{BG} [cm]	h_{SBG} [cm]	h_{Subr} [cm]
1a	8	0	10	35
1b	30	30	30	35

Simulación 2: Se ejecutó nuevamente la simulación 1 pero haciendo la caracterización de la subrasante a través de (2). Las Tablas 4 y 5 resumen los parámetros generales utilizados durante las simulaciones 1a y 1b respectivamente.

3 RESULTADOS

En las Fig. 2 y 3, se presenta la evolución del número de ejes equivalentes de 130 kN (NE) que son capaces de resistir las estructuras de pavimentos flexibles compuestas por capas asfálticas de 8 cm y 30 cm respectivamente. El espesor de granulares (h granulares) se varió entre 45 cm ($h_{BG}=0$, $h_{SBG}=10$ cm, $h_{Subr}=35$ cm) y 95 cm ($h_{BG}=30$, $h_{SBG}=30$ cm, $h_{Subr}=35$ cm) tal como se explicó en el capítulo de metodología.

Tabla 4. Parámetros utilizados para la simulación 1a. Fuente: Autores

Carga				
Presión de carga [MPa]	Radio de carga [cm]		Distancia entre llantas [cm]	
0.662	12,50		37,50	
Relación de Poisson				
ν	CA	BG, SBG, Subr	Subrasante	
	0,35	0,30	0,50	
Rigidez de capas para subrasante (2)				
CBR [%]	1	2	3	4
Rigidez CA [MPa]			6086	
Rigidez BG [MPa]	-	-	-	-
Rigidez SBG [MPa]	147,07	205,43	246,51	278,47
Rigidez Subr. [MPa]	107,24	175,54	234,2	287,4
Rigidez Subrasante [MPa]	37,30	61,05	81,45	99,93
Rigidez de capas para subrasante (7)				
CBR [%]	1	2	3	4
Rigidez CA [MPa]			6086	
Rigidez BG [MPa]	-	-	-	-
Rigidez SBG [MPa]	31,51	54,89	75,19	93,50
Rigidez Subr. [MPa]	14,38	28,75	43,13	57,51
Rigidez Subrasante [MPa]	5	10	15	20

En las figuras se observa lo siguiente: De manera obvia, un incremento en la vida a fatiga de la capa asfáltica cuando se aumenta el espesor y la rigidez de las capas granulares y la subrasante. Para el caso de $h_{CA}=30$ cm y espesor de granulares de 95 cm, la vida a fatiga incrementa 4,6, 5,65, 7,34 y 10,4 veces cuando se utiliza la ecuación (2) en vez de la (7) para caracterizar la subrasante con *CBR* igual a 4%, 3%, 2% y 1% respectivamente. Para el mismo espesor de granulares, este incremento es de 5, 7, 11 y 22,3 veces, cuando $h_{CA}=8$ cm, con *CBR* iguales a 4%, 3%, 2% y 1% respectivamente.

Tabla 5. Parámetros utilizados para la simulación 1b. Fuente: Autores

Carga				
Presión de carga [MPa]	Radio de carga [cm]		Distancia entre llantas [cm]	
0,662	12,50		37,50	
Relación de Poisson - ν				
ν	CA	BG, SBG, Subr	Subrasante	
	0,35	0,30	0,50	
Rigidez de capas para subrasante (2)				
CBR [%]	1	2	3	4
Rigidez CA [MPa]	6086			
Rigidez BG [MPa]	415,73	477,24	505,66	520,32
Rigidez SBG [MPa]	178,93	229,62	256,96	272,28
Rigidez Subr. [MPa]	107,24	175,54	234,20	287,35
Rigidez Subrasante [MPa]	37,30	61,05	81,45	99,93
Rigidez de capas para subrasante (7)				
CBR [%]	1	2	3	4
Rigidez CA [MPa]	6086			
Rigidez BG [MPa]	165,90	239,77	290,84	329,64
Rigidez SBG [MPa]	45,12	75,66	100,70	122,17
Rigidez Subr. [MPa]	14,38	28,75	43,13	57,51
Rigidez Subrasante [MPa]	5	10	15	20

Para el caso de $h_{CA}=30$ cm y espesor de granulares de 45 cm, la vida a fatiga incrementa en promedio 7,49 veces cuando se utiliza (2) en vez de (7) para caracterizar la subrasante con *CBR* entre 1 % y 4 %. Para el mismo espesor de granulares, este incremento es de 32,3, 37, 41,8 y 48,5 veces, cuando $h_{CA}=8$ cm con *CBR* iguales a 4 %, 3 %, 2 % y 1 % respectivamente. Con respecto a la rigidez de la subrasante, para el caso de $h_{CA}=30$ cm y espesor de granulares de 95 cm, si el suelo cambia el *CBR* desde 4 % hasta 1 %, la capa asfáltica puede experimentar una disminución de la vida fatiga de 56,1 % y 80,7 % cuando se utilizan (2) y (7) respectivamente. Para

las mismas condiciones reportadas anteriormente, dicha disminución en la vida a fatiga es de 54,4 % y 89,8 % cuando $h_{CA}=8$ cm.

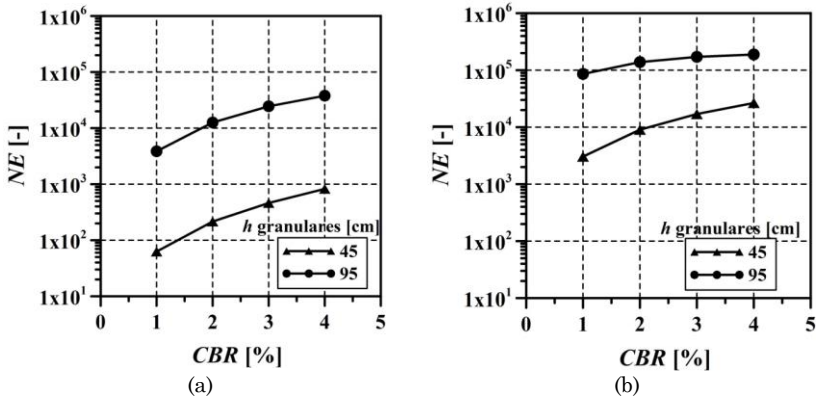


Fig. 2. Evolución de NE con el CBR de la subrasante para capa asfáltica de 8 cm. a) ecuación (7), b) ecuación (2). Fuente: Autores

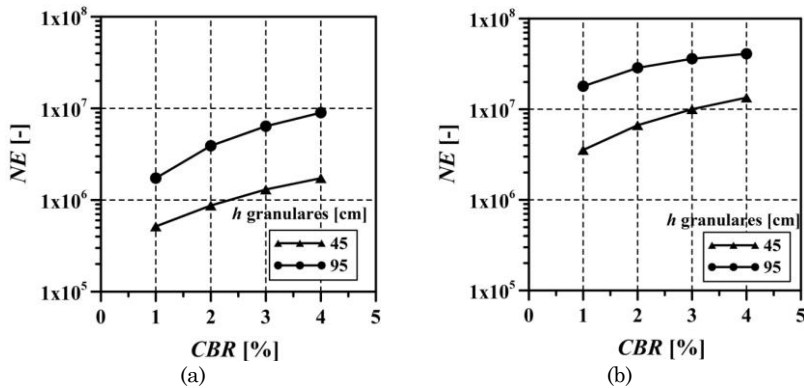


Fig. 3. Evolución de NE con el CBR de la subrasante para capa asfáltica de 30 cm. a) ecuación (7), b) ecuación (2). Fuente: Autores

Para el caso de $h_{CA}=30$ cm y espesor de granulares de 45 cm, si el suelo cambia el CBR desde 4 % hasta 1 % la capa asfáltica puede experimentar una disminución de la vida fatiga de 73,7 % y 70,3 % cuando se utilizan (2) y (7) respectivamente. Para las mismas condiciones reportadas anteriormente, dicha disminución en la vida a fatiga es de 88,6 % y 92,4 % cuando $h_{CA}=8$ cm. La in-

fluencia del espesor de las capas granulares sobre la vida a fatiga de mezclas asfálticas es fuertemente dependiente del espesor de la capa asfáltica y de la rigidez de la estructura de pavimento. En la estructura compuesta por 30 cm de capa asfáltica, la vida a fatiga de la misma incrementa entre 3,0 y 5,2 veces cuando se aumenta la capa granular de 45 cm a 95 cm. Este incremento varía entre 7,1 y 61,7 veces cuando se utiliza una capa asfáltica de 8 cm de espesor.

Para el mismo *CBR* de subrasante, utilizando la misma ecuación para caracterizarla y manteniendo constante el espesor de la capa granular, la vida a fatiga incrementa entre 206,5 y 8235,1 veces cuando se aumenta el espesor de la capa asfáltica entre 8 cm y 30 cm respectivamente.

4. CONCLUSIONES

A través de simulación computacional, el presente estudio evaluó la influencia de las capas granulares (rigidez y espesor principalmente) y la subrasante sobre la vida a fatiga de estructuras típicas de pavimento flexible construidas en la ciudad de Bogotá D.C.

En Colombia no existen ecuaciones propias para calcular el módulo resiliente de subrasantes a través del *CBR*. Lo que se hace es utilizar ecuaciones empíricas provenientes de otros países. El empleo de una u otra ecuación reportada en la literatura de referencia puede hacer variar la vida a fatiga entre 4,6 y 48,5 veces, modificando el espesor de las capas del pavimento en su diseño. Lo anterior genera un grado de incertidumbre elevado a la hora de dimensionar estructuras de pavimentos flexibles.

Cuando la plataforma de la estructura o subrasante cambia su *CBR* desde 4 % hasta 1 % la capa asfáltica puede experimentar una disminución de la vida a fatiga entre 54 % y 92,42 % dependiendo del espesor de las capas granulares. En estructuras compuestas por capas asfálticas gruesas (30 cm), la vida a fatiga de la misma puede incrementar entre 3,0 y 5,2 veces cuando se aumenta el espesor de la capa granular desde 45 cm hasta 95 cm. Este

incremento varía entre 7,1 y 61,7 veces cuando se utiliza una capa asfáltica delgada (8 cm).

Los resultados presentados demuestran la importancia de desarrollar modelos propios de leyes de fatiga y caracterización de subrasantes y granulares en Colombia. A la hora de diseñar estructuras flexibles, el ingeniero de pavimentos podría estar sub o sobredimensionando los espesores de capas que las componen.

5. REFERENCIAS

- AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials (1993). *Guide for design of pavement structures*. Washington, D.C.
- Asphalt Institute - AI, (1982). Research and development of the Asphalt Institute's Thickness design manual MS – 1, 9th Ed., College Park, Md.
- Austroroads (1992). *Pavement design, a guide to the structural design of road pavement, Austroroads*. Sydney, Australia.
- Ayres, M. (1997). *Development of a rational probabilistic approach for flexible pavements analysis*. PhD Thesis, University of Maryland, USA.
- Brown, S.F., O'Reilly, M.P. (1990). The relationship between californian bearing ratio and elastic stiffness for compacted clays. *Ground Engineering*, 23(8), 27-31.
- Brown, S.F., & Selig, E.T. (1991). *The design of pavement and rail track foundations. Cyclic loading of soils*, Chapter 6, 249-305.
- Christensen, D. W. Jr. & Bonaquist, R. (2012). Modeling of fatigue damage functions for hot mix asphalt and application to surface cracking. *Road Materials and Pavement Design*, 13(1), 102-123.
- Di Benedetto, H.C., & De la Roche, C. (2005). State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures, in Report RILEM No. 17 Bituminous binders and mixes: State of the art and Interlaboratory Test on Mechanical Behavior and Mix Design, L. Francken, ed., E and FN Spon, London, 97-123.
- Di Benedetto, H., De la Roche, C., Baaj, H., Pronk, A. & Lundstrom, R. (2004). Fatigue of bituminous mixtures. *Material and Structures*, 37(4), 202-216.
- Dormon, E.M., & Metcalf, C.T. (1965). Design curves for flexible pavements based on layered system theory. Highway Res. Record 71, Washington, DC, Federal Highway Administration, 69-84.

- Drumm, E.C., Boateng-Poku, Y. & Pierce, T.J. (1990). Estimation of subgrade resilient modulus from standard tests. *Journal of Geotechnical Eng*, 116(5), 774-789.
- Epps, J. A., & Monismith, C.L. (1972). Fatigue of asphalt concrete mixtures - summary of existing information. Fatigue of Compacted Bituminous Aggregate Mixtures, in ASTM STP 508, American Society for Testing and Materials, 19-45.
- Fredlund, D.G., Bergan, A.T., & Wong, P.K. (1977). Relation between resilient modulus and stress conditions for cohesive subgrade soils. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, (642), 73-81.
- Garnica, P.A., Gómez, L.J., & Sesma, M.J. (2002). Mecánica de materiales para pavimentos. *Publicación Técnica* No. 197, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCI) - Instituto Mexicano del Transporte (IMT), Sanfandila, México.
- Green, J.L., & Hall, J. W. (1975). *Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements*. Report No. FAA-RD-73-205, Vol. 1, NTIS, Washington, D.C, USA.
- Hajj, E. Y., Thushanthan, P., Sebaaly, P. E., & Siddharthan, R. V. (2012). Influence of tire-pavement stress distribution, shape, and braking on performance predictions for asphalt pavement. *Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board*, 2306, 73-85.
- Heukelom, W., & Foster, C.R. (1960). Dynamic testing of pavements. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 86(SM1), 1-28.
- Heukelom, W., & Klomp, A.J.G. (1962). *Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction*. Proc., of 1st Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, USA.
- Hsu, T.-W. & Tseng, K.-H. (1996). Effect of rest periods on fatigue response of asphalt concrete mixtures. *Journal of Transportation Engineering*, 122(4), 316-322.
- IDU - Instituto de Desarrollo Urbano and Universidad de los Andes (2002). *Manual de Diseño de Pavimentos para Bogotá*. Bogotá D.C., Colombia.
- INVIAS - Instituto Nacional de Vías (2007). *Normas de ensayos de materiales para carreteras*. Bogotá D.C., Colombia.
- INVIAS - Instituto Nacional de Vías (2007a). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos volúmenes de tránsito*. Bogotá D.C., Colombia.
- Lee, W., Bohra, N.C., Altschaefel, A.G., & White, T.D. (1995). Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw. *Canadian Geotechnical J.*, 32(4), 559-568.

- Lee, W., Bohra, N.C., Altschaefel, A.G., & White, T.D. (1997). Resilient modulus of cohesive soils. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(2), 131-136.
- Lister, N.W., & Powell, D. (1987). *Design practices for pavements in the United Kingdom*. Proc. 6th Int. Conf. on the Struct. design of asphalt pavements, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Martono, W., Bahia, H.U. & D'Angelo, J. (2007). Effect of testing geometry on measuring fatigue of asphalt binders and mastics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9), 746-752.
- Masad, E., Castelo Branco, V.T.F., Little, D.N., & Lytton, R. (2008). A unified method for the analysis of controlled-strain and controlled-stress fatigue testing. *International Journal of Pavement Engineering*, 9(4), 233-246.
- Miljković, M. (2013). Reconsideration of European empirical and fundamental specifications for asphalt mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(8), 1030-1040.
- NCHRP - National Cooperative Highway Research Program. (2004). Guide for the mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, NCHRP Project 1-37A. Transportation Research Board, Washington, D.C., www.trb.org/mepdg/.
- Poulsen, A., & Stubstad, R.N. (1980). Fastlæggelse af E-moduler for Underbundsmaterialer ved Målinger i Marken. *Interne Notater 108*, Statens Vejlaboratorium, Vejdirektoratet.
- Powell, W.D., Potter, J.F., Mayhew, H.C., Nunn, M.E. (1984). The structural design of bituminous roads. *Transportation and Road Research Laboratory*, Report No. 1132.
- Rao Tangella, R., Craus, J., Deacon, J.A., & Monismith, C.L. (1990). Summary report on fatigue response of asphalt mixtures. *Rep. to Strategic Highway Research Program*, Washington, D.C., USA.
- Reyes, F.A. (2003). *Diseño racional de pavimentos*. 1ra. Edición, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C., Colombia.
- Rondón, H.A. (2008). *Comportamiento de un material granular no tratado en ensayos triaxiales cíclicos con Presión de Confinamiento Constante (PCC) y variable (PCV)*. Tesis de Doctorado, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia.
- Rondón, H.A. & Reyes, F.A. (2011). Fatiga en mezclas asfálticas por flexión debido a cargas cíclicas. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, 82, 17-34.
- Rondón, H.A. & Reyes, F.A. (2011a). *Pavimentos flexibles*. 1ra. Edición, Editorial Académica Española - EAE, Madrid, España.
- Rondón, H.A. & Reyes, F.A. (2012). *Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas*. 1ra Edición, Editorial Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.

- Rondón, H.A. & Reyes, F.A. (2012a). Evaluación de los parámetros mecánicos de una mezcla asfáltica sometida a las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá D.C. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(1), 57-74.
- Sawangsurriya, A., & Edil, T.B. (2005). Evaluating stiffness and strength of pavement materials. Proc. of the Institution of Civil Engineers, *Geotechnical Engineering*, 158, Issue GE4, 217-230.
- Schukla, P.K., Das, A. (2008). A re-visit to the development of fatigue and rutting equations used for asphalt pavement design. *Int. J. Pavement Engineering*, 9(5), 355-364.
- Shell International Petroleum Company (1978). *Shell Pavement design manual, asphalt pavement and overlays for road traffic*, London.
- Smith, B.E., & Witzak, M.W. (1981). Equivalent granular base moduli prediction. *Transportation Engineering Journal*, 107(6), 635-652.
- Tarefder, R. A., Kias, E. & Zaman, A. (2008). Cracking in asphalt concrete under wet and dry conditions. Pavements and Materials 2008: Modeling, Testing, and Performance, Proc. of the Symp. on Pavement Mechanics and Materials at the Inaugural Int. Conf. of the *Eng. Mechanics Institute*, 37-47.
- Universidad Nacional de Colombia y Ministerio de Transporte (2006). *Estudio e investigación del estado actual de las obras de la Red Nacional de Carreteras - Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles*. Convenio Interadministrativo 0587-03, Bogotá D.C., Colombia.
- Uzan, J., Ishai, I., Hoffman, M., Wiseman, G. & Livneh, M. (1977). Application of elasticity models for evaluation of flexible pavements. *Research Report No. 77-2*, Technion, Israel Institute of Technology, Transportation Research Institute.
- Wen, H. & Li, X. (2013). Development of a damage-based phenomenological fatigue model for asphalt pavements. *J. Mater. Civ. Eng.*, 25(8), 1006-1012.
- Xiao, F., Amirkhanian, S. & Juang, C.H. (2009). Prediction of fatigue life of rubberized asphalt concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement using artificial neural networks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(6), 253-261.