

Comportamiento de las variables de las leyes de Fatiga, deformación y deflexión en una estructura de pavimento flexible

Fatigue, Deformation and Deflection Laws's Variable Behavior, in a Flexible Pavement's Structure

Carlos Hernando Higuera Sandoval*

Resumen

Se muestra el comportamiento de las variables de las leyes de fatiga, deformación y deflexión de una estructura de pavimento flexible. Para el análisis se adoptó una estructura típica de pavimento flexible, revisada por el método racional, de manera que cumpla con los criterios de fatiga, deformación y deflexión. Las leyes de comportamiento utilizadas para el análisis fueron las siguientes: la ley de Fatiga de la mezcla asfáltica, deducida por la Shell; la ley de deformación de la subrasante, deducida por la Shell para los niveles de confianza del 50%, 85% y 95%; la ley de esfuerzos sobre la subrasante, deducida por Dormon-Kerhoven y la CRR de Bélgica, y la ley de deflexión utilizada, deducida por Yang Huang.

Como resultado del análisis se obtuvo el grado de sensibilidad de cada una de las variables que integran las leyes de fatiga, deformación y deflexión y la

Abstract

It shows the fatigue, deformation and deflection variables behavior's laws of a flexible pavement's structure. For the analysis a flexible pavement's typical structure was adopted and revised by the rational method, so that it can fulfill the fatigue, deformation and deflection's requirements.

The behavior laws utilized for the analysis were the following: The asphalted mixture fatigue's law deducted by Shell; the sub-grade deformation's law derived by Shell with a confidence levels of 50%, 85% and 95%; the roadbed efforts' law was the derived by Dormon-Kerhoven and the CRR of Belgium and the deflection law deducted by Yang Huang.

As the analysis' result was obtained the sensibility grade for each one of the variables that integrate the

* Ingeniero en Transportes y Vías, Especialista en Vías Terrestres, Especialista en Carreteras, Especialista en Transportes Terrestres, Magíster en Ingeniería de Vías Terrestres, Profesor de la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja - Boyacá. Investigador del Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial – GRINFRAVIAL–Categoría B. Correo e.: carlos.higuera@uptc.edu.co

identificación de las variables más sensibles ante un cambio y su incidencia en los valores admisibles de fatiga de la mezcla asfáltica, deformación y esfuerzos en la subrasante y deflexión del modelo estructural.

El aporte de esta investigación es de gran utilidad para los ingenieros de diseño de estructuras de pavimentos porque permite evaluar el efecto de cada una de las variables de las leyes de comportamiento ante la fatiga, la deformación y la deflexión de una estructura de pavimento. El conocimiento de las leyes de comportamiento y de la incidencia o efecto de cada una de las variables que las integran es esencial para el diseño de las estructuras de pavimento flexible.

Este artículo hace parte de los trabajos de investigación sobre *diseño de pavimentos* que viene adelantando el autor en la Escuela de Transportes y Vías, Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en el Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial –GRINFRAVIAL–.

Palabras clave: Ley de Fatiga, Ley de Deformación de la subrasante, Ley de Deflexión, Pavimentos flexibles.

laws of the fatigue, deformation and deflection, besides the identification of the most sensitive variables in case of a change of conditions and its incidence in the acceptable fatigue, deformation and efforts' grades of the asphalt mixture, in the roadbed structural deflection's patterns.

This investigation's contribution is quite useful for the pavements structures design's engineers, due that it allows to evaluate the effect of each one of the behavior laws' variables of a pavement structure regarding its fatigue, deformation and deflection. The knowledge of the behavior laws and the incidence or effect of each one of the variables that integrate them, are essential for the flexible pavement structures' design.

This article is a part of the investigation works on pavements' design that the author is engaged at the School of Transport and Roads, a section of the School of Engineering of the Pedagogic and Technological University of Colombia, in the Group of Research and development in roads infrastructure –GRINFRAVIAL–.

Key words: Law of Fatigue, The Roadbed Deformation Law, The Deflection Law, Flexible Pavements.

1. Introducción

Las leyes de comportamiento más difundidas en nuestro medio son: la ley de fatiga de la mezcla asfáltica, de la casa Shell; la ley de deformación sobre la subrasante, deducida por la casa Shell; la ley de esfuerzos sobre la subrasante, deducida por Dormon–Kerhoven y la CRR de Bélgica, y la ley de deflexión, deducida por Yang H. Huang [1].

El desarrollo del estudio parte de la selección de una estructura típica de pavimento flexible que cumpla con los criterios de diseño a la fatiga, la deformación y la deflexión. Luego se identifican los rangos de variación de cada una de las variables que integran las leyes de comportamiento. Para cada variación en el valor de la variable se determina la deformación, el esfuerzo o la deflexión, según la ley de comportamiento.

Con la información de las variables de las leyes de fatiga, deformación y deflexión se elaboran gráficas para visualizar el comportamiento y su tendencia, las

cuales se representan por una ecuación de comportamiento. El análisis permite deducir, para cada ley de comportamiento, el grado de sensibilidad de cada una de las variables y definir cuáles son las variables más sensibles que afectan el comportamiento de una estructura de pavimento. Los resultados obtenidos son de gran utilidad para los ingenieros de diseño de estructuras de pavimento. El procedimiento descrito se presenta de manera detallada a continuación.

2. Diseño del modelo estructural de pavimento flexible

El modelo estructural en estudio fue diseñado por el método Shell y está compuesto por una estructura típica de pavimento flexible, integrada por cuatro capas: capa asfáltica o de rodadura, capa de base granular, capa de subbase granular y la capa de fundación o apoyo, denominada comúnmente subrasante, tal como se indica en la figura 1. Se considera que existe completa fricción en la interfase de las capas del modelo estructural de pavimento flexible [2].

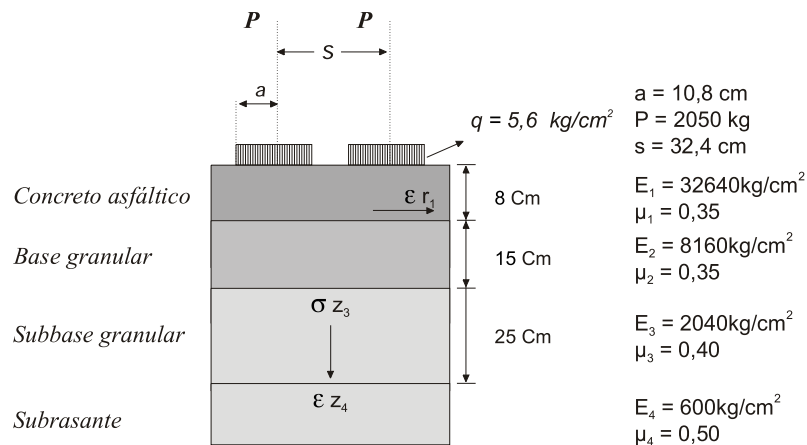


Figura 1. Modelo estructural de referencia de pavimento flexible

3. Chequeo del modelo estructural de pavimento flexible por el método racional [2, 3]

Los parámetros de diseño de la estructura del pavimento flexible, obtenidos de los estudios técnicos, son los siguientes:

- $N = 3,0 \times 10^6$ Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- $Vb = 10,8\%$ Porcentaje de volumen de asfalto de la mezcla asfáltica.
- $Vg = 85,2\%$ Porcentaje de volumen de agregados de la mezcla asfáltica.
- $Vv = 4\%$ Porcentaje de vacíos de la mezcla asfáltica.
- $NC = 95\%$ Nivel de confianza del diseño para el criterio Shell
- $K = 8,25$ Coeficiente de Calage.
- $CBR = 6\%$ Capacidad de soporte de la subrasante
- $P = 2050 \text{ Kg}$ Carga de cada llanta
- $a = 10,8 \text{ cm}$ Radio de carga
- $s = 32,4 \text{ cm}$ Separación entre ejes de carga
- $q = 5,6 \text{ Kg/cm}^2$ Presión de contacto

3.1 Determinación de esfuerzos, deformaciones y deflexiones de servicio del modelo estructural

3.1.1 Modelación. La determinación de los esfuerzos, deformaciones y la deflexión del modelo estructural se realizó con ayuda del programa BISAR 3.0 de la SHELL.

3.1.2 Parámetros de servicio. Los parámetros de servicio del modelo estructural se muestran en el cuadro 1, y son obtenidos una vez corrido el programa BISAR 3.0 de la Shell, con la información de los módulos y relaciones de Poisson descritos anteriormente en la figura 1.

Cuadro 1. Parámetros de servicio del modelo estructural

Parámetro	Valor
Deformación radial de tracción en la base de la capa asfáltica, ϵr_1	$1,24 \times 10^{-4}$
Esfuerzo vertical de compresión sobre la subrasante, σz_3 en Kg/cm^2	0,238
Deformación vertical de compresión sobre la subrasante, ϵz_4	$3,44 \times 10^{-4}$
Deflexión en la superficie, Δo , mm	0,455
Deflexión en la subrasante, Δs , mm	0,358

3.2 Determinación de esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles para el modelo estructural de referencia [2]

Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles se calculan con base en las leyes de comportamiento de acuerdo con los criterios de la Shell y de los ingenieros Dormon–Kerhoven, la CRR de Bélgica y el criterio de Yang Huang.

3.3 Comparación de las solicitaciones calculadas con las admisibles

En el cuadro 2 se presenta la comparación entre los esfuerzos, las deformaciones y las deflexiones de servicio con respecto a las admisibles y la relación porcentual entre los valores de servicio con los admisibles.

Cuadro 2. Porcentaje de solicitaciones de la estructura propuesta

Capa	Parámetro	Valor en servicio o Crítico*, V_s	<	Valor admisible, V_{adm}		Relación, %
						$\frac{V_s}{V_{adm}} * 100$
Concreto asfáltico	ϵr_1	$1,24 \times 10^{-4}$	<	SHELL	$3,02 \times 10^{-4}$	41,06
Subrasante	ϵz_4	$3,34 \times 10^{-4}$	<	Dormon-Kerhoven	$4,33 \times 10^{-4}$	79,44
	σz_3	0,238 Kg/cm ²	<		0,759 Kg/cm ²	31,36
	σz_3	0,238 Kg/cm ²	<	CRR	0,271 Kg/cm ²	87,82
Estructura	Δo	0,455 mm	<	Huang	0,694 mm	65,56

* Valores de servicio obtenidos de los Programas BISAR 3.0 de la SHELL

De acuerdo con los valores contenidos en el cuadro 2, la estructura propuesta se encuentra bien diseñada y cumple con todos los criterios de diseño establecidos, por lo tanto, el dimensionamiento de la estructura de pavimento flexible es el adecuado.

4. Variables que contempla el análisis de sensibilidad

Las variables de diseño de las leyes de comportamiento a la deformación, el esfuerzo y la deflexión son las siguientes:

- El porcentaje en volumen de asfalto de la mezcla, %Vb

- El módulo dinámico de la mezcla asfáltica, E1, kg/cm²
- Tránsito de diseño expresado como el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño, N.
- Módulo resiliente de la subrasante, E4, kg/cm²
- Capacidad de soporte de la subrasante, CBR%

5. Rangos de variación de los parámetros de diseño

Los rangos de variación de los parámetros de diseño de los modelos de comportamiento de una estructural de pavimento flexible se indican a continuación:

Cuadro 3. Rango de variación de los parámetros de diseño

Variable	Rango de variación	Variación
Porcentaje de volumen de asfalto de la mezcla asfáltica, %Vb	9 – 12	0,5
Módulo dinámico de la mezcla asfáltica, E1 kg/cm ²	15000 – 45000	5000
Número de repeticiones de ejes equivalentes, N	1×10^6 – 10×10^6	1×10^6
Módulo resiliente de la subrasante, E4 kg/cm ²	100 – 1000	100
Capacidad de soporte de la subrasante, CBR%	1 – 10	1

6. Análisis de sensibilidad de las variables de las leyes de comportamiento de un pavimento flexible

Definida la estructura de referencia del pavimento flexible y los rangos de variación de cada una de las variables que integran las leyes de comportamiento consideradas, se realiza el análisis de sensibilidad

del comportamiento de la deformación radial de tracción en la base de la capa asfáltica, la deformación vertical de compresión sobre la subrasante, el esfuerzo vertical de compresión sobre la subrasante y la deflexión del modelo estructural de pavimento flexible, en función de los rangos de variación de cada una de las variables estipuladas.

El análisis de sensibilidad se realizó con ayuda de una hoja de cálculo en Excel, la cual permite calcular la deformación, el esfuerzo y la deflexión del modelo estructural de pavimento flexible. Para visualizar la información de las variables se elaboraron diferentes cuadros y con la información contenida en ellos se elaboraron las figuras que correlacionan la variable considerada con la deformación, el esfuerzo y la deflexión. De esta manera, se analiza la tendencia de las variables y la sensibilidad de ellas ante una variación, lo cual permite sacar conclusiones y definir su grado de sensibilidad e importancia.

El comportamiento de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica, de la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante, del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante y de la deflexión del modelo estructural se presenta en las figuras 2 a la 10.

7. Conclusiones del análisis de sensibilidad de las variables de las leyes de comportamiento a la fatiga, la deformación y la deflexión de una estructura de pavimento flexible

Las conclusiones del análisis de sensibilidad de las variables de las leyes de comportamiento a la fatiga, la deformación y la deflexión en una estructura de pavimento flexible son las siguientes:

7.1 Ley de comportamiento a la fatiga de la mezcla asfáltica, de la Shell

Para analizar la fatiga de la mezcla asfáltica se determina el parámetro denominado deformación radial admisible de tracción en la base de las capas asfálticas, deducida a partir de las investigaciones realizadas por la casa Shell, mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon r_{adm} = (0.856 Vb + 1.08) E_1^{-0.36} \left(\frac{N}{K} \right)^{-0.20} \quad (1)$$

Donde:

εr_{adm} = Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica

Vb = Porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla asfáltica, %

E_1 = Módulo dinámico de la capa asfáltica en N/m²

N = Tránsito de diseño expresado como el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño

K = Coeficiente de Calage

7.1.1 Análisis de sensibilidad del porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla asfáltica, %Vb. El análisis de sensibilidad del porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla asfáltica, para el modelo estructural de referencia de pavimento flexible en estudio, es el siguiente:

- **Variación del porcentaje de volumen de asfalto de la mezcla asfáltica.** El porcentaje del volumen de asfalto se varió entre el 9% y el 12%, con incrementos de 0,5%, y su efecto en la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica (εr_{adm}) se muestra en la figura 2.

- **Conclusiones de la variación de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica en función del porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla para el modelo de referencia.** De la información contenida en la figura 2 se deducen las siguientes conclusiones:

- La relación entre la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica (εr_{adm}) y el porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla (%Vb) es directamente proporcional, o sea, ante un aumento en el valor del porcentaje de asfalto de la mezcla se aumenta el valor de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica.

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento de la deformación radial admisible de tracción en la base de capa asfáltica (εr_{adm}) en función del porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla (%Vb) es la siguiente: (ver figura 2).

$$\varepsilon_{r_{adm}} = 0.000025 Vb + 0.000032 \quad (2)$$

- El grado de sensibilidad de la magnitud de la

deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica y el porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla se clasifica como medio.

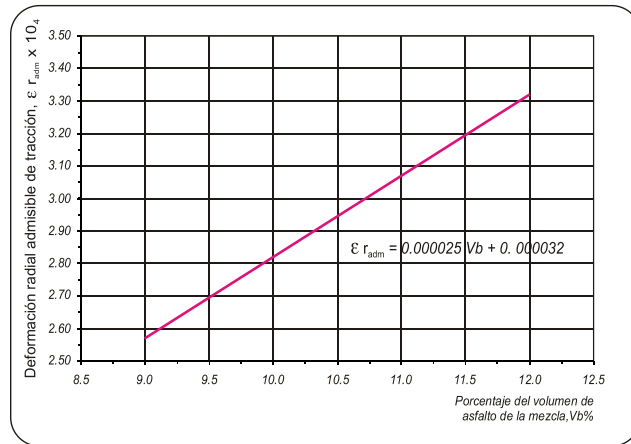


Figura 2. Variación de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica en función del porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla.

7.1.2 Análisis de sensibilidad del módulo dinámico de la mezcla asfáltica, E1. El análisis de sensibilidad del módulo dinámico de la mezcla asfáltica, para el modelo estructural de referencia de pavimento flexible en estudio, es el siguiente:

- **Variación del módulo dinámico de la mezcla asfáltica.** El módulo dinámico de la mezcla asfáltica se varió entre 15.000 kg/cm² y 45.000 kg/cm², con incrementos de 5.000 kg/cm², y su efecto en la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica ($\varepsilon_{r_{adm}}$) se muestra en la figura 3.

- Conclusiones de la variación de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica en función del módulo dinámico de la mezcla para el modelo de referencia. De la información contenida la figura 3 se deducen las siguientes conclusiones:

- La relación entre la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica ($\varepsilon_{r_{adm}}$) y el módulo dinámico de la mezcla asfáltica (E1) es inversamente proporcional, o sea, ante un aumento en el valor del módulo dinámico de la mezcla asfáltica se disminuye el valor de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica.

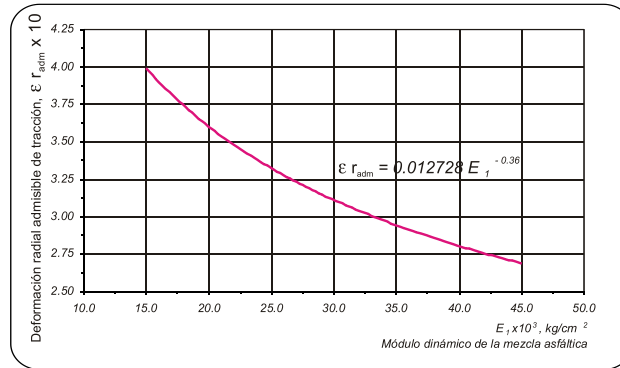


Figura 3. Variación de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica en función del módulo dinámico de la mezcla asfáltica.

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento de la deformación radial admisible de tracción en la base de capa asfáltica ($\epsilon_{r_{adm}}$) en función del módulo dinámico de la mezcla asfáltica (E_1 , kg/cm²) es la siguiente (ver figura 3):

$$\epsilon_{r_{adm}} = 0.012728 E_1^{-0.36} \quad (3)$$

- El grado de sensibilidad de la magnitud de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica y el módulo dinámico de la mezcla asfáltica se clasifica como alto.

7.1.3 Análisis de sensibilidad del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N. El análisis de sensibilidad del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas, para el modelo estructural de referencia

de pavimento flexible en estudio, es el siguiente:

- **Variación del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño.** El número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño se varió entre 1×10^6 y 10×10^6 , con incrementos de 1×10^6 , y su efecto en la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica ($\epsilon_{r_{adm}}$) se muestra en el figura 4.
- **Conclusiones de la variación de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica en función del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño para el modelo de referencia.** De la información contenida en la figura 4 se deducen las siguientes conclusiones:

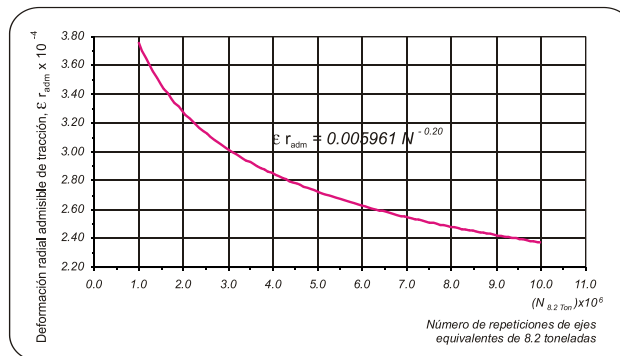


Figura 4. Variación de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica en función del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8.2 toneladas.

- La relación entre la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica ($\epsilon_{r_{adm}}$) y el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N) es inversamente proporcional, o sea, ante un aumento del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño se disminuye el valor de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica.

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento de la deformación radial admisible de tracción en la base de capa asfáltica ($\epsilon_{r_{adm}}$) en función del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N) es la siguiente (ver figura 4):

$$\epsilon_{r_{adm}} = 0.005961 N^{-0.20} \quad (4)$$

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento del número de repeticiones de

ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N) en función de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica ($\epsilon_{r_{adm}}$) es la siguiente:

$$N = 7.526 \times 10^{-12} (\epsilon_{r_{adm}})^{-5} \quad (5)$$

- El grado de sensibilidad de la magnitud de la deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica y el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril se clasifica como alto.

7.2 Ley de comportamiento de la deformación vertical admisible de compresión de la subrasante, de la Shell

Para analizar la deformación vertical de compresión de la subrasante se utilizan las expresiones deducidas a partir de las investigaciones realizadas por la casa Shell, teniendo en cuenta el nivel de confiabilidad del diseño. Las expresiones son las siguientes:

NC = 50% $\epsilon_{z_{adm}} = 2.8 \times 10^{-2} N^{-0.25} \quad (6)$	NC = 85% $\epsilon_{z_{adm}} = 2.1 \times 10^{-2} N^{-0.25} \quad (7)$	NC = 95% $\epsilon_{z_{adm}} = 1.8 \times 10^{-2} N^{-0.25} \quad (8)$
--	--	--

Donde:

$\epsilon_{z_{adm}}$ = Deformación vertical admisible por compresión sobre la subrasante.

N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

NC = Nivel de confianza

7.2.1 Análisis de sensibilidad del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N. El análisis de sensibilidad del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas, para el modelo estructural de referencia de pavimento flexible en estudio, es el siguiente:

- **Variación del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño.** El número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño se varió entre 1×10^6 y 10×10^6 , con incrementos

de 1×10^6 , y su efecto en la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante ($\epsilon_{z_{adm}}$) se muestra en la figura 5.

- **Conclusiones de la variación de la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante en función del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño para el modelo de referencia.** De la información contenida en la figura 5, se deducen las siguientes conclusiones:

- La relación entre la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante ($\epsilon_{z_{adm}}$) y el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N) es inversamente proporcional, o sea, ante un aumento del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, se disminuye el valor de la deformación

vertical admisible de compresión sobre la subrasante. Esta conclusión es básica para el diseño de estructuras de pavimento flexible, puesto que a mayor número de repeticiones la estructura de pavimento flexible presenta menores deformaciones para controlar el ahuellamiento de la estructura del pavimento flexible.

- Para un número de repeticiones de ejes de 8,2 toneladas (N), se tiene que a mayor nivel de confianza (NC%) menor es la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante (ϵz_{adm}). Lo anterior se traduce en que a mayor nivel de confiabilidad del diseño se admiten menores deformaciones verticales sobre la subrasante.

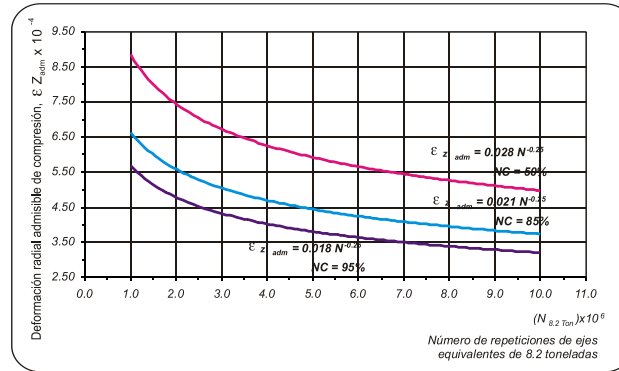


Figura 5. Variación de la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante en función del número de repeticiones. Criterio Shell

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento de la deformación vertical admisible sobre la subrasante (ϵz_{adm}), en función del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N), se muestra en la figura 5, de acuerdo con el nivel de confianza.

deformación vertical admisible sobre la subrasante y el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril se clasifica como alto.

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N), en función de la deformación vertical admisible sobre la subrasante (ϵz_{adm}), para un nivel de confianza dado (NC), es la siguiente:

7.3 Ley de comportamiento del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante

$$N = 6.14656 \times 10^{-7} (\epsilon z_{adm})^{-4} \text{ para un NC} = 50\% \quad (9)$$

$$N = 1.94481 \times 10^{-7} (\epsilon z_{adm})^{-4} \text{ para un NC} = 85\% \quad (10)$$

$$N = 1.04976 \times 10^{-7} (\epsilon z_{adm})^{-4} \text{ para un NC} = 95\% \quad (11)$$

Para analizar el esfuerzo vertical de compresión sobre la subrasante se utilizan los criterios y las expresiones deducidas a partir de las investigaciones realizadas por Dormon–Kerhoven y la CRR de Bélgica. Los criterios son los siguientes:

7.3.1 Criterio de Dormon–Kerhoven. El esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\sigma z_{adm} = \frac{0.007 E_4}{1 + 0.7 * \text{Log } N}; \text{ Kg/cm}^2 \quad (12)$$

Donde:

- El grado de sensibilidad de la magnitud de la

σz_{adm} = Esfuerzo vertical admisible de compresión

- sobre la subrasante, kg/cm^2 .
- N = Tránsito de diseño expresado en número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- E_4 = Módulo resiliente de la subrasante, kg/cm^2

7.3.1.1 Análisis de sensibilidad del módulo resiliente de la subrasante, E_4 . El análisis de

sensibilidad del módulo resiliente de la subrasante, para el modelo estructural de referencia de pavimento flexible en estudio, es el siguiente:

- Variación del módulo resiliente de la subrasante. El módulo resiliente de la subrasante se varió entre 100 kg/cm^2 y 1000 kg/cm^2 , con incrementos de 100 kg/cm^2 , y su efecto en el esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$) se muestra en la figura 6.

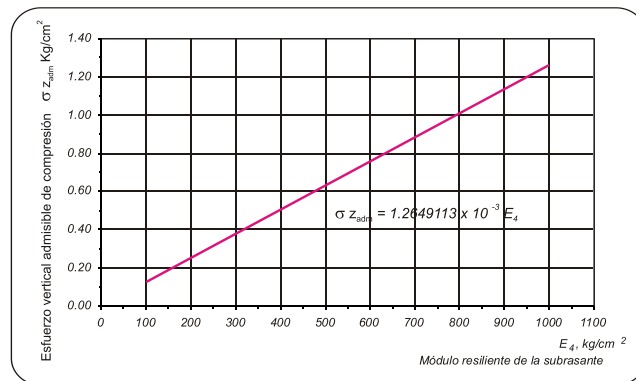


Figura 6. Variación del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante en función del módulo resiliente de la subrasante. Criterio de Dormon-Kerhoven

- **Conclusiones de la variación del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante en función del módulo resiliente de la subrasante para el modelo de referencia.** De la información contenida en la figura 6 se deducen las siguientes conclusiones:

- La relación entre el esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$) y el módulo resiliente de la subrasante (E_4) es directamente proporcional, o sea, ante un aumento del módulo resiliente de la subrasante se aumenta el valor del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante. Esta conclusión es básica para el diseño de estructuras de pavimento flexible, puesto que a mayor resistencia de la subrasante, se admite que la estructura de pavimento flexible presente mayores niveles de esfuerzos para poder controlar el ahuellamiento de la estructura del pavimento.

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$, Kg/cm^2) en función del módulo resiliente de la subrasante (E_4 , kg/cm^2) es la siguiente:

$$\sigma_{z_{adm}} = 1.2649113 \times 10^{-3} E_4 \quad (13)$$

- El grado de sensibilidad de la magnitud del esfuerzo vertical admisible sobre la subrasante y el módulo resiliente de la subrasante se clasifica como alto.

7.3.1.2 Análisis de sensibilidad del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N . El análisis de sensibilidad del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas, para el modelo estructural de referencia

de pavimento flexible en estudio, es el siguiente:

- **Variación del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño.** El número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño se varió entre 1×10^6 y 10×10^6 , con incrementos de 1×10^6 , y su efecto en el esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$) se muestra en la figura 7.

- **Conclusiones de la variación del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante en función del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño para el modelo de referencia.** De la información contenida en la figura 7 se deducen las siguientes conclusiones:

- La relación entre el esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$) y el

número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N) es inversamente proporcional, o sea, ante un aumento del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño se disminuye el valor del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante. Esta conclusión es básica para el diseño de estructuras de pavimento flexible, puesto que a mayor número de repeticiones, la estructura de pavimento flexible admite menores esfuerzos para controlar el ahuellamiento de la estructura del pavimento flexible.

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento del esfuerzo vertical admisible sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$, kg/cm^2), en función del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N), es la siguiente:

$$\sigma_{z_{adm}} = 4.2 (1+0.7 \text{Log}N)^{-1} \quad (15)$$

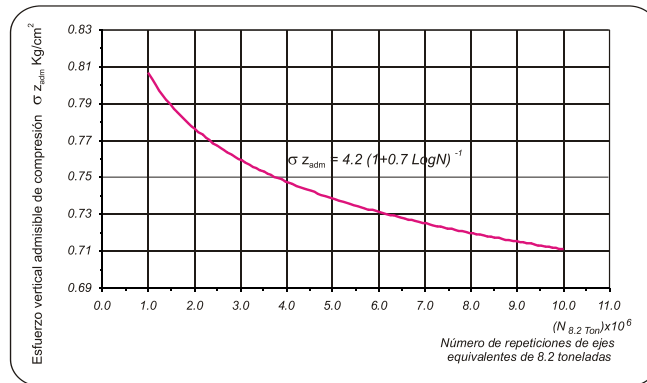


Figura 7. Variación del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante en función del número de repeticiones. Criterio de Dormon-Kerhoven

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N), en función del esfuerzo vertical admisible sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$, Kg/cm^2), es la siguiente:

$$N = 10^{\left(\frac{6}{\sigma_{z_{adm}}} - 1.428571 \right)} \quad (14)$$

- El grado de sensibilidad de la magnitud del esfuerzo vertical admisible sobre la subrasante y el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril se clasifica como bajo.

7.3.2 Criterio de la CRR de Bélgica. El esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\sigma_{z_{adm}} = \frac{0.9607 CBR^{1.2}}{N^{0.229}}; Kg/cm^2 \quad (16)$$

Donde:

$\sigma_{z_{adm}}$ = Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, kg/cm².

N = Tránsito de diseño expresado como el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

CBR = Capacidad de soporte de la subrasante, %

7.3.2.1 Análisis de sensibilidad de la capacidad de soporte de la subrasante, CBR%. El análisis de sensibilidad de la capacidad de soporte de la subrasante, para el modelo estructural de referencia de pavimento flexible en estudio, es el siguiente:

- Variación de la capacidad de soporte de la subrasante. La capacidad de soporte de la subrasante se varió entre 1% y 10%, con incrementos de 1%, y su efecto en el esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$) se muestra en la figura 8.

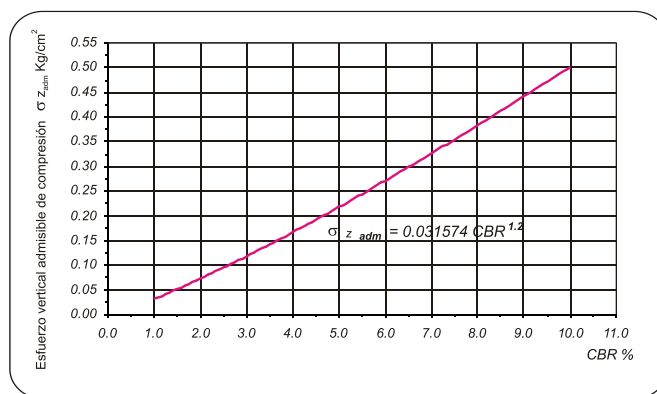


Figura 8. Variación del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante función la capacidad de la subrasante. Criterio de la CRR de Bélgica

- Conclusiones de la variación del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante en función de la capacidad de soporte de la subrasante para el modelo de referencia. De la información contenida en la figura 8 se deducen las siguientes conclusiones:

- La relación entre el esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$) y la capacidad de soporte de la subrasante (CBR%) es directamente proporcional, o sea, ante un aumento de la capacidad de soporte de la subrasante se aumenta el valor del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante. Esta conclusión es básica para el diseño de estructuras de pavimento flexible, puesto que a mayor resistencia de la subrasante

se admite que la estructura de pavimento flexible presente mayores niveles de esfuerzos para controlar el ahuellamiento de la estructura.

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento del esfuerzo vertical admisible sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$, kg/cm²), en función de la capacidad de soporte de la subrasante (CBR%), es la siguiente:

$$\sigma_{z_{adm}} = 0.031574 CBR^{1.2} \quad (17)$$

- El grado de sensibilidad de la magnitud del esfuerzo vertical admisible sobre la subrasante y la capacidad de soporte de la subrasante se clasifica como alto.

7.3.2.2 Análisis de sensibilidad del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N. El análisis de sensibilidad del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas, para el modelo estructural de referencia de pavimento flexible en estudio, es el siguiente:

- Variación del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño. El número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño se varió entre 1×10^6 y 10×10^6 , con incrementos de 1×10^6 , y su efecto en el esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$) se muestra en la figura 9.
- Conclusiones de la variación del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante en función del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño para el modelo de referencia. De la información contenida en la figura 9 se deducen las siguientes conclusiones:

- La relación entre el esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$) y el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N) es inversamente proporcional, o sea, ante un aumento del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de

diseño, se disminuye el valor del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante. Esta conclusión es básica para el diseño de estructuras de pavimento flexible, puesto que a mayor número de repeticiones se admite que la estructura de pavimento flexible presente menores esfuerzos para controlar el ahuellamiento de la estructura del pavimento.

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento del esfuerzo vertical admisible sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$, Kg/cm²), en función del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N), es la siguiente:

$$\sigma_{z_{adm}} = 8.248392 N^{-0.229} \quad (18)$$

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N), en función del esfuerzo vertical admisible sobre la subrasante ($\sigma_{z_{adm}}$, Kg/cm²), es la siguiente:

$$N = 10^{\left(4.366812 \text{Log} \left(\frac{8.248392}{\sigma_{z_{adm}}} \right)\right)} \quad (19)$$

- El grado de sensibilidad de la magnitud del esfuerzo vertical admisible sobre la subrasante y el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril se clasifica como alto.

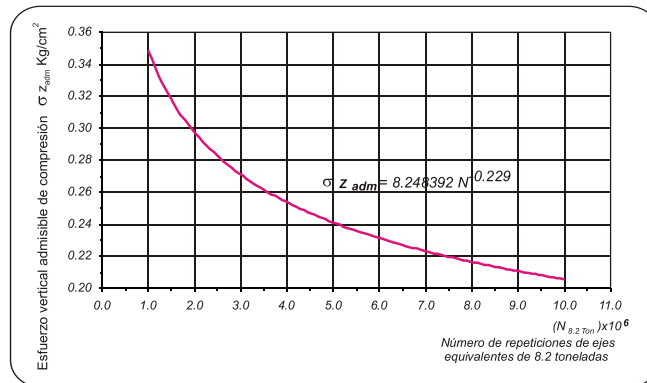


Figura 9. Variación del esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante en función del número de repeticiones. Criterio de la CRR de Bélgica

7.4 Ley de comportamiento de la deflexión

Para analizar la deflexión del modelo estructural de referencia se utiliza la expresión deducida a partir de las investigaciones realizadas por Yang Huang [4].

$$\Delta_{adm} = 23.32202N^{-0.2438}, mm \quad (20)$$

Donde:

Δ_{adm} = Deflexión admisible de la estructura de referencia, en milímetros.

N = Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

7.4.1 Análisis de sensibilidad del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N. El análisis de sensibilidad del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas, para el modelo estructural de referencia de pavimento flexible en estudio, es el siguiente:

- Variación del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño. El número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño se varió entre 1×10^6 y 10×10^6 , con incrementos de 1×10^6 , y su efecto en la deflexión (Δ_{adm}) se muestra en la figura 10.

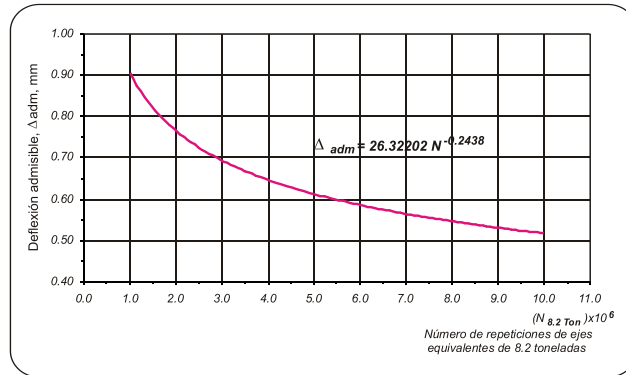


Figura 10. Variación de la deflexión admisible en función del número de repeticiones.

- Conclusiones de la variación de la deflexión admisible en función del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño para el modelo de referencia. De la información contenida en la figura 10 se deducen las siguientes conclusiones:

- La relación entre la deflexión admisible (Δ_{adm}) y el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N) es inversamente proporcional, o sea, ante un aumento del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño se disminuye el valor de la deflexión admisible. Esta conclusión es básica para el diseño de

estructuras de pavimento flexible, puesto que a mayor número de repeticiones se admite que la estructura de pavimento flexible presente una menor deflexión admisible para controlar la fatiga y la deformación de la estructura del pavimento.

- Para el modelo de referencia, la ley de comportamiento de la deflexión admisible (Δ_{adm} , mm), en función del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N), es la siguiente:

$$\Delta_{adm} = 23.32202N^{-0.2438} \quad (21)$$

- Para el modelo de referencia, la ley de

comportamiento del número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño (N), en función de la deflexión admisible (Δ_{adm} , mm), es la siguiente:

$$N = 10^{\left(\frac{\text{Log}(0.03791\Delta_{adm})}{-0.2438} \right)} \quad (22)$$

- El grado de sensibilidad de la magnitud de la deflexión admisible y el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril se clasifica como alto.

7.5 Grado de sensibilidad de las variables de las leyes de Fatiga, Deformación y Deflexión para el diseño de un pavimento flexible

Para determinar el grado de sensibilidad, se consultaron diversos estudios internacionales y se adoptó la siguiente escala de calificación (cuadro 4), de acuerdo con la variabilidad o la proporción de variación de cada parámetro en el rango de variación establecido para el presente estudio.

Cuadro 4. Escala para definir el grado de sensibilidad

Grado de sensibilidad	Variación, %
Baja	< 15
Media	15 – 30
Alta	> 30

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado el análisis de sensibilidad de las variables de la ley de fatiga, deformación y deflexión, se presenta en el cuadro 5 su grado de sensibilidad, para el ejemplo de la estructura de referencia.

Cuadro 5. Grado de sensibilidad de las variables que afectan las leyes de Fatiga, Deformación y Deflexión en el diseño de un pavimento flexible.

Variable	Grado de sensibilidad
1. LEY DE FATIGA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA – SHELL	
- Porcentaje en volumen de la mezcla asfáltica, %Vb	Media
- Módulo dinámico de la mezcla asfáltica, E1, kg/cm ²	Alta
- Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N	Alta
2. LEY DE DEFORMACIÓN DE LA SUBRASANTE – SHELL	
- Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N, para los niveles de confianza del 50%, 85% y 95%	Alta
3. LEY DE ESFUERZOS SOBRE LA SUBRASANTE	
3.1 Criterio de Dormon–Kerhoven	
- Módulo resiliente de la subrasante	Alta
- Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N	Baja
3.2 Criterio de la CRR de Bélgica	
- Capacidad de soporte de la subrasante, CBR%	Alta
- Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N	Alta
4. LEY DE COMPORTAMIENTO DE LA DEFLEXIÓN – HUANG	
- Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N	Alta

7.6 Variables más sensibles que afectan las leyes de Fatiga, Deformación y Deflexión en el diseño de un pavimento flexible

Como resultado final del estudio de sensibilidad,

se presenta en el cuadro 6 la clasificación de las variables más sensibles que afectan las leyes de comportamiento a la fatiga, deformación y deflexión de un pavimento flexible.

Cuadro 6. Variables más sensibles que afectan la ley de Fatiga, Deformación y Deflexión de un pavimento flexible

Variable	Número de orden	Grado de sensibilidad
1. LEY DE FATIGA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA – SHELL		
- Módulo dinámico de la mezcla asfáltica, E_1 , kg/cm ²	1	Alta
- Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N	2	Alta
- Porcentaje en volumen de la mezcla asfáltica, %Vb	3	Media
2. LEY DE DEFORMACIÓN DE LA SUBRASANTE – SHELL		
- Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N, para los niveles de confianza del 50%, 85% y 95%	1	Alta
3. LEY DE ESFUERZOS SOBRE LA SUBRASANTE		
3.1 Criterio de Dormon – Kerhoven		
- Módulo resiliente de la subrasante, E_4 , kg/cm ²	1	Alta
- Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N	2	Baja
3.2 Criterio de la CRR de Bélgica		
- Capacidad de soporte de la subrasante, CBR%	1	Alta
- Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N	2	Alta
4. LEY DE COMPORTAMIENTO DE LA DEFLEXIÓN – HUANG		
- Número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas en el carril de diseño, N	1	Alta

Como conclusión final del estudio realizado, se tiene que toda estructura de pavimento flexible bien diseñada debe cumplir tres criterios, a saber: el criterio de fatiga, el criterio de deformación o ahuellamiento y el criterio de deflexión.

Agradecimientos

El autor agradece al Ingeniero Juan Carlos Poveda D'Otero, Director de la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por su apoyo y colaboración en la elaboración del presente artículo, y a los integrantes del Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial –GRINFRAVIAL–, de la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por su apoyo y asesoría

en la elaboración del presente artículo, fruto de los proyectos de investigación.

Referencias

- [1] Y. H. Huang. *Pavement analysis and design*. Segunda edición. 2004. 775 p.
- [2] C. H. Higuera Sandoval. *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimento para carreteras*. Guías de clase. Volúmenes 1 y 2. Escuela de Transporte y Vías. Facultad de Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 2008. 400 p.
- [3] C. H. Higuera Sandoval. *Mecánica de pavimentos – Principios básicos*. Escuela de Transporte y Vías. Facultad de Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. ISBN 978-958-660-122-1. 2008. 361 p.

Fecha de recepción: 01 de septiembre de 2007
Fecha de aprobación: 30 de mayo de 2008