

Artículo Original

<https://doi.org/10.22463/0122820X.3472>

Análisis de sensibilidad y correlación entre el ahuellamiento y la deflexión en estructuras de pavimento flexible

Sensitivity analysis and correlation between rutting and deflection in flexible pavement structures

Carlos Hernando Higuera-Sandoval^{1*}

^{1*}Magíster en Ingeniería, carlos.higuera@uptc.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-1333-2517>, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.

Cómo citar: C. H., Higuera – Sandoval, “Análisis de sensibilidad y correlación entre el ahuellamiento y la deflexión en estructuras de pavimento flexible”, *Respuestas*, vol. 28, no. 2, pp. 33–48, 2023. <https://doi.org/10.22463/0122820X.3472>

Received on October 30, 2022; Approved on April 21, 2023

RESUMEN

Palabras clave:

Ahuellamiento, Deflexión,
Deformación Plástica,
Pavimento Flexible.

La presente investigación muestra el análisis de sensibilidad y la correlación entre el ahuellamiento o deformación y la deflexión en una estructura de pavimento flexible con el fin de verificar los criterios de diseño de deformación o ahuellamiento y deflexión del modelo estructural. La metodología aplicada para el análisis del ahuellamiento fue la establecida en la guía para el diseño mecánico – empírico de pavimentos flexibles “*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – MEPDG*” desarrollada por la AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) y la teoría elástica para el cálculo de la deflexión. Las variables analizadas fueron: la presión de contacto, la carga por llanta, los módulos de elasticidad y los espesores de las diferentes capas del modelo estructural de pavimento flexible. Como conclusión de la investigación realizada se obtiene las variables más sensibles al ahuellamiento de estructuras de pavimento flexible son: el módulo dinámico de la mezcla asfáltica, la carga por llanta, el espesor de la capa asfáltica, la presión de contacto y las variables más sensibles a la deflexión son: la carga por llanta, el módulo resiliente de la subrasante, el espesor de la capa asfáltica y el módulo dinámico de la capa asfáltica; también, se presentan las correlaciones entre la deflexión, las variables de diseño y el ahuellamiento de estructuras de pavimento flexible, esta información es de gran utilidad para los ingenieros diseñadores de estructuras de pavimento.

ABSTRACT

Keywords:

Rutting, Deflection, Plastic
Deformation, Flexible
Pavement

The present investigation shows the sensitivity analysis and the correlation between the rutting or deformation and the deflection in a flexible pavement structure to verify the design criteria of deformation or rutting and deflection of the structural model. The methodology applied for rutting analysis was established in the guide for the mechanical-empirical design of flexible pavements “*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - MEPDG*” developed by the AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) and the theory elastic for deflection calculation. The variables analyzed were contact pressure, load per tire, modulus of elasticity, and thickness of the different layers of the flexible pavement structural model. As a conclusion of the investigation carried out, the variables most sensitive to rutting of flexible pavement structures are obtained: the dynamic modulus of the asphalt mix, the load per tire, the thickness of the asphalt layer, the contact pressure, and the most sensitive variables. to deflection are the load per tire, the resilient modulus of the subgrade, the thickness of the asphalt layer and the dynamic modulus of the asphalt layer; Also, the correlations between the deflection, the design variables and the rutting of flexible pavement structures are presented, this information is very useful for designer engineers of pavement structures.

*Corresponding author.

E-mail Address: carlos.higuera@uptc.edu.co

(Carlos Hernando Higuera-Sandoval)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0

Introducción

El objetivo de la presente investigación es mostrar el análisis de sensibilidad y la correlación entre el ahuellamiento o deformación y la deflexión en una estructura de pavimento flexibles. Tanto el ahuellamiento y la deflexión son dos parámetros que se utilizan como criterios de diseño de las estructuras de pavimento.

El ahuellamiento en estructuras de pavimentos se cataloga como un daño estructural y se manifiesta por la formación de canales, roderas en las huellas de circulación de los vehículos y es causado por: altas temperaturas de servicio del pavimento, altas cargas del tránsito, el tipo de asfalto, la granulometría de la mezcla asfáltica, las características de los materiales, las propiedades volumétricas de la mezcla, las deficiencias de compactación de las capas, la debilidad de la subrasante y los errores en el diseño y construcción [1][2][3]. El ahuellamiento o deformación plástica es permanente y va aumentando a lo largo del periodo de servicio de la estructura de pavimento.

La deflexión en estructuras de pavimento flexible se define como un desplazamiento de la superficie del modelo estructural, también se define como la respuesta elástica de la estructura del pavimento ante la aplicación de una carga generalmente producida por el tránsito. La deflexión se manifiesta por la formación de un cuenco de deflexión donde la deflexión máxima se presenta en el punto de aplicación de la carga y va disminuyendo a medida que se aleja del punto de aplicación de la carga. La deflexión permite definir la capacidad estructural de una estructura de pavimento flexible.

Materiales y Métodos

Método de diseño. La guía de diseño de pavimentos MEPDG-AASHTO propone el modelo de deformación permanente o ahuellamiento para la capa asfáltica, la base granular o estabilizada, la subbase granular y la subrasante. La distorsión de la superficie en forma de surcos o huellas es causada por la deformación plástica vertical permanente en las capas asfálticas, en las capas granulares de base, subbase y en la subrasante. [4] [5] [6] [8]

El enfoque utilizado por la guía MEPDG-AASHTO se basa en el cálculo de la distorsión incremental o ahuellamiento de cada una de las capas del modelo estructural de pavimento flexible. La deformación plástica permanente o ahuellamiento se calcula en la mitad de cada capa de la estructura del pavimento. La deformación plástica o ahuellamiento de la estructura del pavimento es la suma de las deformaciones plásticas de cada una de sus capas, tal como se indica en la Ecuación (1).

$$RD = \sum_{i=1}^N \varepsilon p_i h_i \quad (1)$$

Donde:

RD: deformación permanente

N: número de capas

εp_i : deformación plástica de la capa i

h_i : espesor de la capa i

Deformación plástica permanente o ahuellamiento en la capa asfáltica. Las Ecuaciones (2 y (3) permiten determinar la deformación plástica permanente de la capa asfáltica de una estructura de pavimento.

$$\Delta_p(CA) = \varepsilon_p(CA) * h_{CA} \quad (2)$$

$$\Delta_p(CA) = \beta_{1r} * k_z * \varepsilon_v(CA) * 10^{k_{1r}} * n^{k_{2r} * \beta_{2r}} * T^{k_{3r} * \beta_{3r}} * h_{CA} \quad (3)$$

Donde:

$\Delta_p(CA)$: deformación acumulada permanente o deformación plástica vertical acumulada en la capa asfáltica en caliente, pulg

$\varepsilon_p(CA)$: deformación unitaria permanente o plástica vertical acumulada en la capa asfáltica, en pulg/pulg.

h_{CA} : espesor de la capa asfáltica, pulg

$\varepsilon_v(CA)$: deformación vertical a una profundidad media de la capa asfáltica, determinada por el modelo de respuesta estructural, en pulg/pulg.

n : número de repeticiones de carga por eje acumuladas hasta el período de análisis.

T : temperatura de la mezcla asfáltica, °F

k_{1r}, k_{2r} y k_{3r} : parámetros de calibración global de campo (de la recalibración realizada en el proyecto NCHRP 1-40D;

$k_{1r} = -3.35412$, $k_{2r} = 0.4791$, $k_{3r} = 1.5606$

β_{1r}, β_{2r} y β_{3r} : constantes locales de calibración o de mezclas en el campo. Para la calibración global estas constantes se establecieron en 1.0

k_z : factor de confinamiento de profundidad, calculado con las Ecuaciones (4), (5) y (6).

$$k_z = (C_1 + C_2 * Depth) * 0.328196^{Depth} \quad (4)$$

$$C_1 = -0.1039 * (h_{CA})^2 + 2.4868 * h_{CA} - 17.342 \quad (5)$$

$$C_2 = -0.0172 * (h_{CA})^2 - 1.7331 * h_{CA} - 27.428 \quad (6)$$

Donde:

C_1 y C_2 : factores de corrección del espesor de la capa asfáltica,

Depth: profundidad medida desde la superficie hasta la mitad del espesor de la capa asfáltica a evaluar, expresada en pulgadas.

Deformación permanente o ahuellamiento de la capa de base y subbase granular – capas no ligadas. La Ecuación (7) permite calcular la deformación vertical plástica dentro de las capas no ligadas del pavimento (base y subbase).

$$A_{p(granular)} = \frac{\beta_{s1} * k_{s1} * \varepsilon_v * h_{granular} \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right)}{e \left(\frac{\rho}{n} \right)^\beta} \quad (7)$$

Donde:

$A_{p(granular)}$: deformación plástica permanente de la capa granular, pulg.

β_{s1} : constante de calibración local para la deformación permanente o ahuellamiento en las capas no ligadas. La constante de calibración local fue establecida en 1.0 para el esfuerzo de calibración global.

k_{s1} : coeficientes de calibración global, $k_{s1} = 1.673$ para materiales granulares.

ε_v : deformación unitaria vertical resiliente o elástica calculada en la mitad del espesor de la capa, por el modelo de respuesta estructural, en pulg/pulg.

$h_{granular}$: espesor de la capa no ligada (base o subbase), pulg.

n : número de repeticiones de carga acumuladas para el período de análisis.

ε_0 : intercepción determinada de los ensayos de deformación permanente de carga repetida en el laboratorio, en pulg/pulg.

ε_r : deformación elástica utilizada en la prueba de laboratorio para obtener las propiedades del material, que depende de los parámetros ε_0 , β , ρ .

$\varepsilon_0, \beta, \rho$: propiedades del material.

El parámetro β se calcula por medio la Ecuación (8).

$$\beta = 10^{-0.61119 - 0.017638 (W_c)} \quad (8)$$

Donde:

W_c : contenido de humedad, en %; que puede calcularse por los siguientes métodos: en función de las condiciones climáticas o aplicando la Ecuación (9).

$$W_c = 51.712 \left[\left(\frac{M_r}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}} \right]^{-0.3586 \cdot GWT^{0.1192}} \quad (9)$$

Donde:

M_r : módulo resiliente de la capa, Lb/pulg²

GWT : profundidad del nivel freático, pies

La Ecuación (10) se aplica para calcular el parámetro ρ , propiedad del material.

$$\rho = 10^9 \left[\frac{\ln(0.0075)}{1 - (10^9)^\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (10)$$

Finalmente, la relación $\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right)$ se calcula por medio de la Ecuación (11):

$$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} = \frac{(e^{(\rho)^\beta} * 0.15) + \left(e^{\left(\frac{\rho}{10^9} \right)^\beta} * 20 \right)}{2} \quad (11)$$

Modelo de deformación permanente o ahuellamiento de la capa de subrasante. Para el cálculo de la deformación plástica permanente en la subrasante se utiliza la Ecuación (12).

$$\varepsilon_p(z) = (\varepsilon_{p, z=0}) e^{-kz} \quad (12)$$

Donde:

$\varepsilon_p(z)$: deformación vertical plástica a la profundidad z (medida desde la superficie de la subrasante), pulg.

$\varepsilon_{p,z=0}$: deformación vertical plástica en la superficie de la subrasante, pulg.

z : profundidad medida desde la superficie de la subrasante, pulg.

Se calcula la deformación vertical plástica para cada profundidad ($z=0$ y $z=6$ pulgadas) utilizando la Ecuación (13).

$$\Delta_p = \frac{\beta_{s1} * k_{s1} * \varepsilon_v * \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r}\right)}{e^{\left(\frac{\rho}{n}\right)^\beta}} \quad (13)$$

Donde:

β_{s1} : constante de calibración local para el ahuellamiento en las capas no ligadas. La constante de calibración local fue establecida en 1.0 para el esfuerzo de calibración global.

k_{s1} : coeficientes de calibración global, $k_{s1}=1.35$ para materiales granular fino.

ε_v : deformación unitaria vertical resiliente o elástica calculada en la subrasante, por el modelo de respuesta estructural, en pulg/pulg.

ε_0 : intercepción determinada de los ensayos de deformación permanente de carga repetida en el laboratorio, en pulg/pulg.

ε_r : deformación elástica utilizada en la prueba de laboratorio para obtener las propiedades del material, que depende de los parámetros ε_0 , β , ρ .

n : número de repeticiones de carga acumuladas para el período de análisis.

$\varepsilon_0, \beta, \rho$: propiedades del material.

k : parámetro que se calcula teniendo en cuenta la deformación vertical plástica a nivel de la subrasante ($z = 0$) y a una profundidad de +6 pulgadas medidas desde el nivel de la subrasante ($z = 6$ pulgadas) por medio de la Ecuación (14).

$$k = \frac{1}{6} \ln \ln \left(\frac{\varepsilon_{p,z=0}}{\varepsilon_{p,z=6}} \right) \quad (14)$$

La deformación permanente total se calcula al sumar el total de las deformaciones plásticas hasta la profundidad de la roca, por medio de la Ecuación (15).

$$\begin{aligned} \Delta_p(z) &= (\varepsilon_{p,z=0}) * \int_0^{hroca} e^{-kz} dz \\ &= \left(\frac{1 - e^{-k*hroca}}{k} \right) * \varepsilon_{p,z=0} \end{aligned} \quad (15)$$

Donde:

$\Delta_p(z)$: deformación plástica permanente total de la subrasante, pulg.

$hroca$: profundidad en pies a la que se encuentra el estrato portante, medido desde la superficie de la subrasante.

Estructura de referencia de pavimento flexible. El diseño de la estructura de referencia de pavimento flexible se realizó de acuerdo a la metodología de la AASHTO-93 y sus parámetros de diseño fueron los siguientes: tránsito de diseño-Ndiseño = 1.57×10^6 ejes equivalentes de 8.2 t en el carril de diseño durante el periodo de diseño, nivel de confianza del diseño-NC = 90%, desviación normal estándar-Zr = -1.282, error normal combinado-So = 0.45, pérdida de serviciabilidad- Δ IIPS = 1.7 y módulo resiliente de la subrasante-Mr = 5,000 Lb/pulg², para estas condiciones el número estructural requerido es de SNreq = 4.34

El modelo estructural del pavimento flexible está compuesto por cuatro capas: capa asfáltica, capa de base granular, capa de subbase granular y subrasante, como se aprecia en la Figura 1. Los parámetros del modelo estructural son los siguientes: Coeficiente estructural de la capa asfáltica - $a_1 = 0.44$, coeficiente estructural de la capa de base granular - $a_2 = 0.13$, coeficiente estructural de la capa de subbase granular - $a_3 = 0.11$, la calidad del drenaje de las capas granulares de base y subbase es bueno, el porcentaje del tiempo que el pavimento está expuesto a grados de humedad próximos a la saturación - %tws = 24.7% y el coeficiente de drenaje de las capas granulares de base y subbase - $m_2 = m_3 = 1.0$. La estructura diseñada tiene un número estructural del modelo - SNm = 4.34. En la Figura 1 se muestra el modelo estructural de pavimento flexible de referencia con sus cargas, los tipos de capas, los espesores, los módulos de elasticidad y la relación de Poisson. [23][24][25][26]

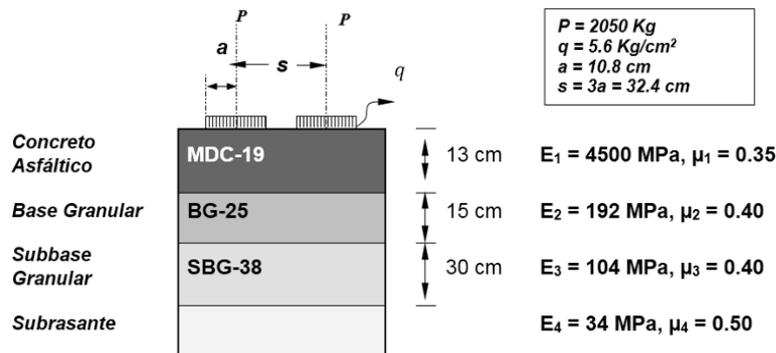


Figura 1. Estructura de pavimento flexible de referencia

El análisis del ahuellamiento de la estructura de pavimento flexible de referencia se realizó de acuerdo a la metodología de la guía MEPDG-AASHTO 2008 – 2015 y los parámetros de diseño fueron los siguientes: periodo de diseño - $n = 15$ años, tasa anual de crecimiento del tránsito - $r = 3.25\%$, tránsito de diseño - $N_{\text{diseño}} = 1.57 \times 10^6$ ejes equivalentes de 8.2 t en el carril de diseño durante el periodo de diseño, composición volumétrica de la mezcla asfáltica - $V_v = 4\%$, $V_b = 12\%$, $V_g = 84\%$; temperatura media anual ponderada del aire - $T_{MAP} = 13.3^\circ\text{C}$, temperatura de servicio del pavimento - $T_{mix} = 20^\circ\text{C}$, humedad del material de base granular - $W_{bg} = 5\%$, humedad del material de subbase granular - $W_{sbg} = 9\%$, humedad del material de subrasante - $W_{sr} = 15\%$, profundidad del nivel freático - $G_{wt} = 1.0$ m y la profundidad del estrato portante - $h_{roca} = 2.54$ m.

El cálculo de los estados tensionales de la estructura del pavimento se realizó teniendo en cuenta la carga del eje estándar para Colombia de 8.2 t y se analizaron dos ejes, uno bajo la llanta y el otro en el eje del sistema de carga. Las profundidades de análisis fueron: En la superficie, a 0.5 pulgadas de la superficie, en la mitad de la capa asfáltica, en la base de la capa asfáltica, en la mitad de la capa de base granular, en la mitad de la capa de subbase granular, a nivel de la subrasante y a +6 pulgadas por debajo del nivel de la subrasante.

Los parámetros de diseño para la determinación de la deflexión se indican en la Figura 1. La deflexión del modelo estructural para las condiciones de carga y las características del paquete estructural es de 0.673 mm. Para cada una de las alternativas de estudios descritas en la Tabla 1 se calculó la deflexión del modelo estructural mediante un programa de diseño de pavimentos. El modelo estructural de referencia de pavimento flexible cumple con todos los criterios de diseño como son: fatiga, deformación y deflexión.

Análisis de sensibilidad. Para el análisis de sensibilidad se definieron cuatro (4) grupos de variable para un total de nueve (9) variables y cada una de ellas se estableció su rango, su variación y el número de

alternativas a estudiar, tal como se presenta en la Tabla I. Para el análisis se modelaron 77 alternativas. [9] [10][11] [12][13][14][15][16][17][21][22]

Tabla I. Variables para el análisis de sensibilidad del ahuellamiento y la deflexión.

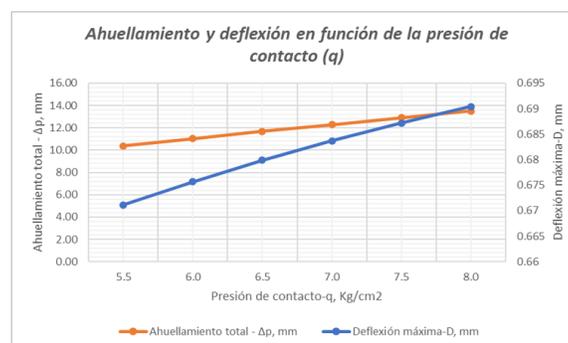
Grupo	Variable	Rango	Variación	Número de alternativas
1	Presión de contacto, q Kg/cm ² (Se toma un valor fijo de P = 2,050 Kg y se calcula el radio (a) del plato de carga para cada presión de contacto.)	5.5 – 8.0	0.5	6
2	Carga por llanta, P Kg. (Se toma una presión fija de 5.6 Kg/cm ² y se calcula el radio (a) para cada carga)	1,000 – 4,000	500	7
3	Módulo de elasticidad de las capas, E1 Kg/cm ²			
	Capa asfáltica, E1	10,000 – 100,000	5,000	19
	Base granular, E2	1,500 – 3,000	250	7
	Subbase granular, E3	800 – 2,000	200	7
	Subrasante, E4	100 – 1,000	100	10
4	Espesor de la capa, hi, cm			
	Capa asfáltica, h1	4 – 20	2	9
	Base granular, h2	15 – 30	3	6
	Subbase granular, h3	15 – 40	5	6

La deformación plástica permanente o ahuellamiento se determinó en la mitad de la capa asfáltica, la capa de base granular, la capa de subbase granular, a nivel de la subrasante y a +6 pulgadas medida desde el nivel de la subrasante. La deflexión del modelo estructural se determinó en la superficie del pavimento, tomando el mayor valor de la deflexión calculada bajo el centro de la llanta y en el eje del sistema de carga de análisis.

Resultados y Análisis

Definidas las variables a estudiar y los puntos de análisis en el modelo de referencia de pavimento flexible, se corre el programa MEPDG-AASHTO y el programa de análisis de pavimentos y se determina la deformación plástica permanente o ahuellamiento y la deflexión del modelo estructural. Los resultados y análisis obtenidos se muestran a continuación:

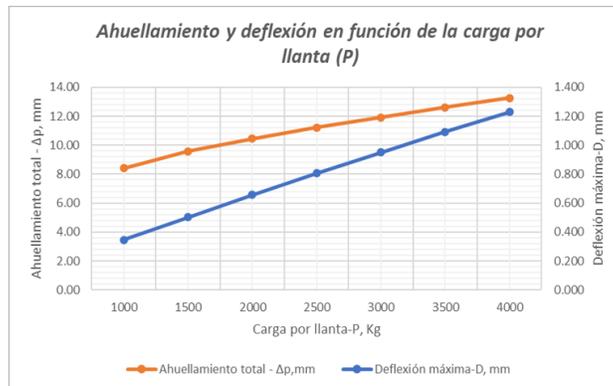
Ahuellamiento y deflexión del modelo estructural en función de la presión de contacto. Del análisis de la Figura 2 se aprecia que ante un aumento de la presión de contacto aumenta el ahuellamiento (curva color naranja) y la deflexión (curva azul). Para el rango de la presión de contacto en estudio la tasa de variación del ahuellamiento es del 29.93% y para la deflexión es del 2.88%. [18]



$$\Delta(p) = -22.7914 + 0.920428q + 41.88982D, R^2 = 0.999$$

Figura 2. Ahuellamiento y deflexión en función de la presión de contacto

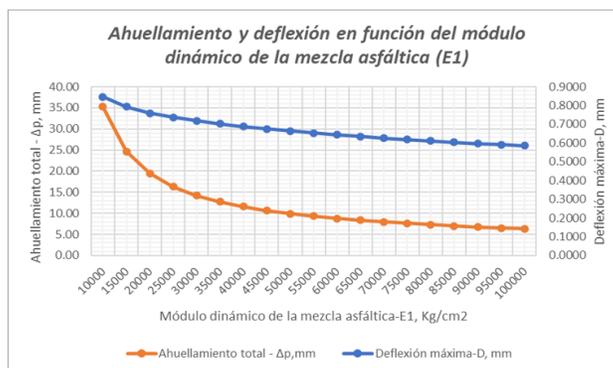
Ahuellamiento y deflexión en función de la carga por llanta. Del análisis de la Figura 3 se aprecia que ante un aumento de la carga por llanta aumenta el ahuellamiento y la deflexión. Para el rango de la carga por llanta en estudio la tasa de variación del ahuellamiento es del 57.80% y para la deflexión es del 256.32%, la cual se considera una tasa muy alta.



$$\Delta(p) = 5.83460 - 0.004497P + 20.65248D, R^2 = 0.998$$

Figura 3. Ahuellamiento y deflexión en función de la carga por llanta

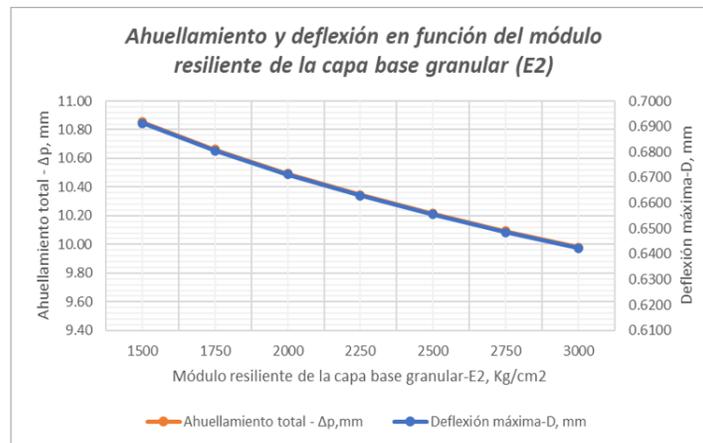
Ahuellamiento y deflexión en función del módulo dinámico de la mezcla asfáltica. Del análisis de la Figura 4 se aprecia que ante un aumento del módulo dinámico de la mezcla asfáltica disminuye el ahuellamiento y la deflexión. Para el rango del módulo dinámico de la mezcla asfáltica en estudio la tasa de variación del ahuellamiento es del 82.08% y para la deflexión es del 30.89%. Para el rango del módulo dinámico entre 10.000 Kg/cm² y 35.000 Kg/cm² se produce los mayores cambios tanto del ahuellamiento como de deflexión. [19]



$$\Delta(p) = -128.8727 + 0.000251E1 + 189.6445D, R^2 = 0.993$$

Figura 4. Ahuellamiento y deflexión en función del módulo dinámico de la mezcla asfáltica

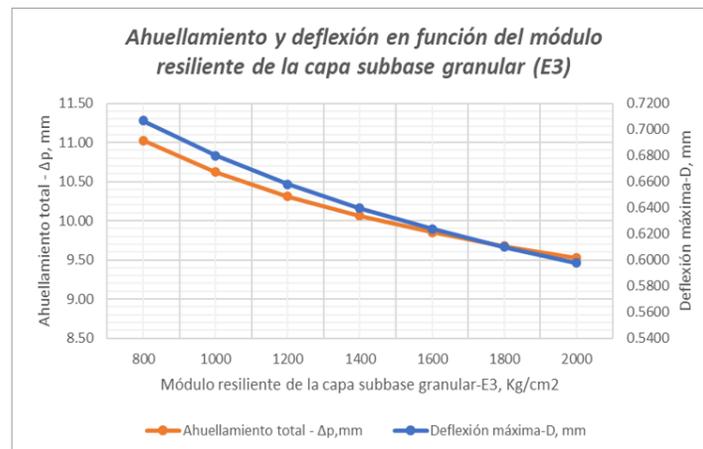
Ahuellamiento y deflexión en función del módulo resiliente de la capa de base granular. Del análisis de la Figura 5 se aprecia que ante un aumento del módulo resiliente de la capa de base granular disminuye el ahuellamiento y la deflexión. Para el rango del módulo resiliente de la capa de base granular en estudio la tasa de variación del ahuellamiento es del 8.04% y para la deflexión es del 7.09%, estas tasas se consideran bajas. [20]



$$\Delta(p) = -1.60163 + 6.60E-06E2 + 18.00091D, R^2=0.999$$

Figura 5. Ahuellamiento y deflexión en función del módulo resiliente de la capa de base granular

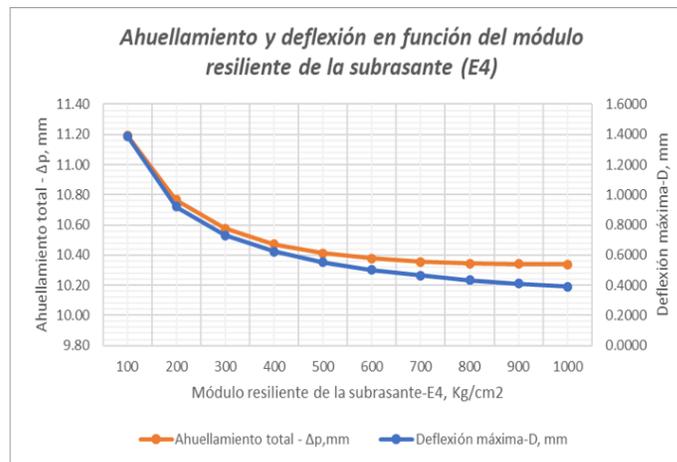
Ahuellamiento y deflexión en función del módulo resiliente de la capa de subbase granular. Del análisis de la Figura 6 se aprecia que ante un aumento del módulo resiliente de la capa de subbase granular disminuye el ahuellamiento y la deflexión. Para el rango del módulo resiliente de la capa de subbase granular en estudio la tasa de variación del ahuellamiento es del 13.59% y para la deflexión es del 15.42%.



$$\Delta(p) = -1.23034 + 0.000299E3 + 16.99936D, R^2=0.999$$

Figura 6. Ahuellamiento y deflexión en función del módulo resiliente de la capa de subbase granular

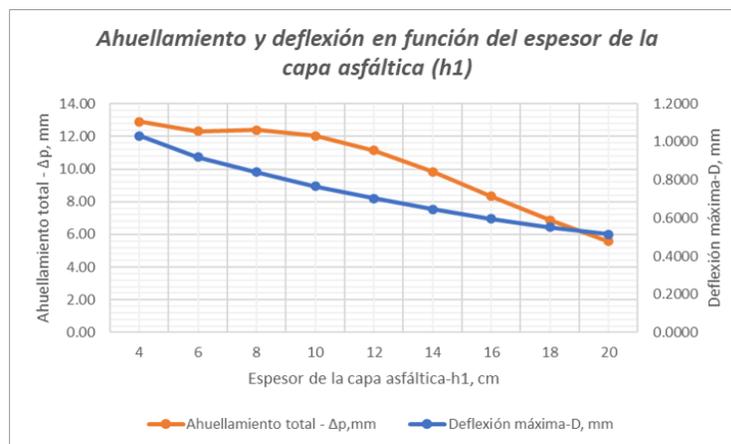
Ahuellamiento y deflexión en función del módulo resiliente de la subrasante. Del análisis de la Figura 7 se aprecia que ante un aumento del módulo resiliente de la subrasante disminuye el ahuellamiento y la deflexión. Para el rango del módulo resiliente de la subrasante en estudio la tasa de variación del ahuellamiento es del 7.67% y para la deflexión es del 71.90%, la cual es una tasa alta. Para valores del módulo resiliente entre 100 Kg/cm² y 500 Kg/cm² se producen los mayores cambios del ahuellamiento y deflexión del modelo estructural, este comportamiento es muy importante en el diseño de las estructuras de pavimento.



$$\Delta(p) = 9.79424 + 0.000144E4 + 1.004617D, R^2=0.998$$

Figura 7. Ahuellamiento y deflexión en función del módulo resiliente la subrasante

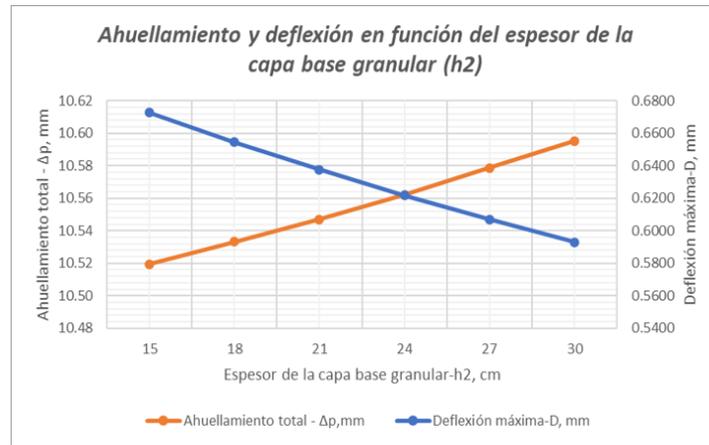
Ahuellamiento y deflexión en función del espesor de la capa asfáltica. Del análisis la Figura 8 se aprecia que ante un aumento del espesor de la capa asfáltica disminuye el ahuellamiento y la deflexión. Para el rango del espesor de la capa asfáltica en estudio la tasa de variación del ahuellamiento es del 56.71% y para la deflexión es del 50.00%. La curva de ahuellamiento presenta una disminución para el rango de espesores entre 4 cm y 6 cm, posteriormente tiende a aumentar hasta 8 cm y de este punto hacia adelante su tendencia es a disminuir.



$$\Delta(p) = 44.03533 - 1.269555h1 - 25.52877D, R^2=0.984$$

Figura 8. Ahuellamiento y deflexión en función del espesor de la capa asfáltica

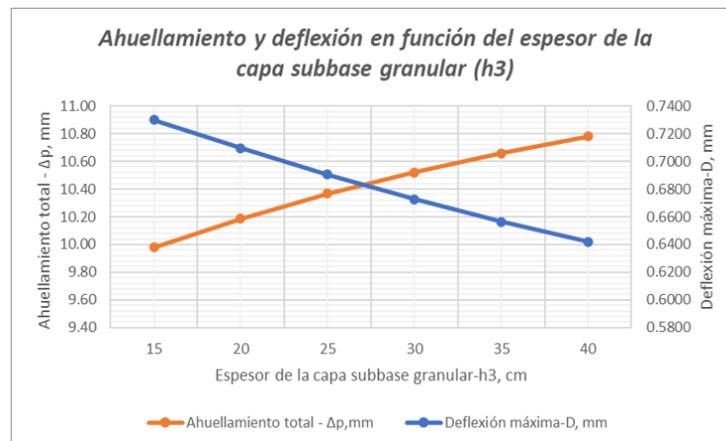
Ahuellamiento y deflexión en función del espesor de la capa de base granular. Del análisis de la Figura 9 se aprecia que ante un aumento del espesor de la capa de la base granular aumenta levemente el ahuellamiento y disminuye la deflexión. Para el rango del espesor de la capa de base granular en estudio la tasa de variación del ahuellamiento es del 0.72% y para la deflexión es del 11.83%



$$\Delta(p) = 9.8221 + 0.009425h_2 + 0.826653D, R^2=0.999$$

Figura 9. Ahuellamiento y deflexión en función del espesor de la capa de base granular

Ahuellamiento y deflexión en función del espesor de la capa de subbase granular. Del análisis de la Figura 10 se aprecia que ante un aumento del espesor de la capa de la subbase granular aumenta el ahuellamiento y disminuye la deflexión. Para el rango del espesor de la capa de subbase granular en estudio la tasa de variación del ahuellamiento es del 8.02% y para la deflexión es del 12.07%



$$\Delta(p) = 20.47768 - 0.017648h_3 - 14.01028D, R^2=0.999$$

Figura 10. Ahuellamiento y deflexión en función del espesor de la capa de subbase granular

Resumen del análisis de sensibilidad del ahuellamiento y la deflexión. Para cada una de las curvas de las Figuras 2 a la 10, se determinó el porcentaje de variación. Si el porcentaje de variación es menor a 15% se determina que el grado de sensibilidad de la variable es BAJO, si el porcentaje de variación está entre 15% y 30% se determina un grado de sensibilidad MEDIO y si el porcentaje de variación es mayor a 30% el grado de sensibilidad de la variable es ALTO. De acuerdo con el análisis de sensibilidad realizado para la estructura de pavimento flexible de referencia, el grado de sensibilidad del ahuellamiento y la deflexión se muestra en la Tabla II.

Tabla II. Grado de sensibilidad del ahuellamiento y la deflexión – análisis de sensibilidad

Variable	Grado de sensibilidad	
	Ahuellamiento	Deflexión
Presión de contacto, q	MEDIO	BAJO
Carga por llanta, P	ALTO	ALTO
Módulo dinámico de la capa asfáltica, E1	ALTO	ALTO
Módulo resiliente de la base granular, E2	BAJO	BAJO
Módulo resiliente de la subbase granular, E3	BAJO	MEDIO
Módulo resiliente de la subrasante, E4	BAJO	ALTO
Espesor de la capa asfáltica, h1	ALTO	ALTO
Espesor de la capa de base granular, h2	BAJO	BAJO
Espesor de la capa de subbase granular, h3	BAJO	BAJO

Correlaciones. Para cada una de las variables en estudio que se muestran en la Tabla I se planteó un modelo lineal de regresión múltiple, como se indica en la Ecuación (16) de manera de correlacionar el ahuellamiento con la variable de diseño y la magnitud de la deflexión del modelo estructural de pavimento flexible.

$$\Delta p = \beta_0 + \beta_1 Variable + \beta_2 Deflexión + \xi \tag{16}$$

Dónde:

Δp : deformación plástica acumulada o ahuellamiento, mm

Variable: variable de diseño del modelo estructural (Presión de contacto-q, carga por llanta-P, módulo de elasticidad de la capa i-Ei y espesor de la capa i-hi)

Deflexión: deflexión máxima del modelo estructural, mm

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$: coeficientes de calibración

ξ : residuo

La forma general del modelo de ahuellamiento (Δp) (modelo de regresión lineal múltiple) obtenidos para las diferentes variables de diseño (q, P, E1, E2, E3, E4, h1, h2 y h3) y la deflexión del modelo estructural (D) se muestra en la Tabla III.

Tabla III. Forma general del modelo de ahuellamiento para las diferentes variables de diseño y la deflexión del modelo estructural

Grupo	Variable	Rango	Modelo de regresión lineal múltiple
1	Presión de contacto, q Kg/cm ²	5.5 – 8.0	$\Delta p = \beta_0 + \beta_1 * q + \beta_2 * D + \xi$
2	Carga por llanta, P Kg.	1,000 – 4,000	$\Delta p = \beta_0 + \beta_1 * P + \beta_2 * D + \xi$
3	Módulo de elasticidad de las capas, Ei Kg/cm ²		
	Capa asfáltica, E1	10,000 – 100,000	$\Delta p = \beta_0 + \beta_1 * E_1 + \beta_2 * D + \xi$
	Base granular, E2	1,500 – 3,000	$\Delta p = \beta_0 + \beta_1 * E_2 + \beta_2 * D + \xi$
	Subbase granular, E3	800 – 2,000	$\Delta p = \beta_0 + \beta_1 * E_3 + \beta_2 * D + \xi$
	Subrasante, E4	100 – 1,000	$\Delta p = \beta_0 + \beta_1 * E_4 + \beta_2 * D + \xi$
4	Espesor de la capa, hi, cm		
	Capa asfáltica, h1	4 – 20	$\Delta p = \beta_0 + \beta_1 * h_1 + \beta_2 * D + \xi$
	Base granular, h2	15 – 30	$\Delta p = \beta_0 + \beta_1 * h_2 + \beta_2 * D + \xi$
	Subbase granular, h3	15 – 40	$\Delta p = \beta_0 + \beta_1 * h_3 + \beta_2 * D + \xi$

En la Tabla IV se muestra los coeficientes de calibración (β_0 , β_1 y β_2) del modelo de ahuellamiento (modelo lineal de regresión múltiple) para las diferentes variables de análisis. Los modelos obtenidos presentan un coeficiente de correlación – R^2 cercano a 0.99 lo cual indica que explican el comportamiento de las variables de manera aceptable y el modelo estadísticamente es representativo.

Tabla IV. Coeficientes de correlación del ahuellamiento en función de las variables de diseño y la deflexión del modelo estructural

Grupo	Variable	Rango	β_0	β_1	β_2	R^2
1	Presión de contacto, q Kg/cm ²	5.5 – 8.0	-22.79014	0.920428	41.88982	0.99999
2	Carga por llanta, P Kg.	1,000 – 4,000	5.83460	-0.004497	20.65248	0.99861
3	Módulo de elasticidad de las capas, Ei Kg/cm ²					
	Capa asfáltica, E1	10,000 – 100,000	-128.8727	0.000251	189.6445	0.99283
	Base granular, E2	1,500 – 3,000	-1.60163	6.60E-06	18.00091	0.99999
	Subbase granular, E3	800 – 2,000	-1.23034	0.000299	16.99936	0.99997
	Subrasante, E4	100 – 1,000	9.79424	0.000144	1.004617	0.99884
4	Espesor de la capa, hi, cm					
	Capa asfáltica, h1	4 – 20	44.03533	-1.269555	-25.52877	0.98395
	Base granular, h2	15 – 30	9.82217	0.009425	0.826653	0.99988
	Subbase granular, h3	15 – 40	20.47768	-0.017648	-14.01028	0.99957

Coeficiente de correlación - R^2 ajustado

Conclusiones

De acuerdo al análisis de sensibilidad realizado para la estructura de pavimento flexible de referencia las variables más sensibles del ahuellamiento y la deflexión son las siguientes:

VARIABLES MÁS SENSIBLES PARA EL AHUELLAMIENTO DEL MODELO ESTRUCTURAL SON: Módulo dinámico de la mezcla asfáltica (E1), la carga por llanta (P), el espesor de la capa asfáltica (h1) y la presión de contacto (q).

VARIABLES MÁS SENSIBLES PARA LA DEFLEXIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL SON: la carga por llanta (P), el módulo resiliente de la subrasante (E4), el espesor de la capa asfáltica (h1) y el módulo dinámico de la capa asfáltica (E1).

Para el modelo de referencia de pavimento flexible se puede estimar el ahuellamiento total en función de la deflexión y la variable de diseño (presión de contacto-q, la carga por llanta-P, el módulo resiliente de la capa asfáltica-E1, el módulo resiliente de la base granular-E2, el módulo resiliente de la subbase granular-E3, el módulo resiliente de la subrasante-E4, el espesor de la capa asfáltica-h1, el espesor de la base granular-h2 y el espesor de la subbase granular-h3).

Las ecuaciones obtenidas permiten estimar la deformación o ahuellamiento total de una estructura de pavimento flexible cuando se tiene la deflexión del modelo estructural de manera que son muy útiles para el diseño de las estructuras de pavimentos y la verificación de los criterios de diseño.

Agradecimientos

El autor agradece a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por el otorgamiento del periodo sabático y el acompañamiento durante la realización de esta investigación.

Referencias

- [1] C. Sandoval and A. Orobio, “Efectos de las tolerancias de construcción en el desempeño de los pavimentos flexibles,” *Rev. Ing. construcción*, vol. 28, no. 3, 2013, doi: 10.4067/s0718-50732013000300004.
- [2] F. Leiva, E. Pérez, J. Aguiar, and L. Loría, “Modelo de deformación permanente para la evaluación de la condición del pavimento / Permanent deformation model for pavement condition assessment,” *Rev. Ing. construcción*, vol. 32, no. 1, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000100004>.
- [3] A. K. Singh and J. P. Sahoo, “Rutting prediction models for flexible pavement structures: a review of historical and recent developments,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, May 2021, doi: 10.1016/j.jtte.2021.04.003.
- [4] Z. Zhao, J. Jiang, F. Ni, Q. Dong, J. Ding, and X. Ma, “Factors affecting the rutting resistance of asphalt pavement based on the field cores using multi-sequenced repeated loading test,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 253, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118902.
- [5] Y. Du, J. Chen, Z. Han, and W. Liu, “A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods,” *Construction and Building Materials*, vol. 168. Elsevier Ltd, pp. 893–905, Apr. 20, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.151.
- [6] S. Islam, A. Sufian, M. Hossain, R. Miller, and C. Leibrock, “Mechanistic-Empirical design of perpetual pavement,” 2018, doi: 10.1080/14680629.2018.1546218.
- [7] G. Lian-Sheng, D. Han-Cheng, and C. Jia-Qi, “Research on Predicting the Rutting of Asphalt Pavement Based on a Simplified Burgers Creep Model,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/3459704.
- [8] R. Guo, T. Nian, and F. Zhou, “Analysis of factors that influence anti-rutting performance of asphalt pavement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 254, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119237.
- [9] S. Kim, H. Ceylan, and K. Gopalakrishnan, “Effect of M-E Design Guide Inputs on Flexible Pavement Performance Predictions,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 8, no. 3, pp. 375–397, Jan. 2007, doi: 10.1080/14680629.2007.9690080.
- [10] S. Islam, A. Sufian, M. Hossain, R. Miller, and C. Leibrock, “Mechanistic-Empirical design

- of perpetual pavement,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 21, no. 5, pp. 1224–1237, Jul. 2020, doi: 10.1080/14680629.2018.1546218.
- [11] H. Gong, Y. Sun, Z. Mei, and B. Huang, “Improving accuracy of rutting prediction for mechanistic-empirical pavement design guide with deep neural networks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 190, pp. 710–718, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.087.
- [12] C. Zhang, H. Wang, Z. You, and B. Ma, “Sensitivity analysis of longitudinal cracking on asphalt pavement using MEPDG in permafrost region,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 2, no. 1, pp. 40–47, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.jtte.2015.01.004.
- [13] E. Oscarsson, “Modelling flow rutting in in-service asphalt pavements using the mechanistic-empirical pavement design guide,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 12, no. 1, pp. 37–56, Jan. 2011, doi: 10.1080/14680629.2011.9690351.
- [14] G. Zou, J. Xu, and C. Wu, “Evaluation of factors that affect rutting resistance of asphalt mixes by orthogonal experiment design,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 282–288, May 2017, doi: 10.1016/j.ijprt.2017.03.008.
- [15] K. L. Roja, A. Padmarekha, and J. M. Krishnan, “Influence of warm mix additive and loading rate on rutting of warm mix asphalt pavement,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 20, no. 3, pp. 366–381, Mar. 2019, doi: 10.1080/10298436.2017.1293269.
- [16] S. Kodippily, J. Yeaman, T. Henning, and S. Tighe, “Effects of extreme climatic conditions on pavement response,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 21, no. 5, pp. 1413–1425, Jul. 2020, doi: 10.1080/14680629.2018.1552620.
- [17] N. Hossain, D. Singh, and M. Zaman, “Sensitivity of traffic input parameters on rutting performance of a flexible pavement using Mechanistic Empirical Pavement Design Guide,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 9, no. 6, pp. 450–459, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.ijprt.2016.09.003.
- [18] D. Moazami and R. Muniandy, “Determination of rutting performance of asphalt pavements considering realistic tire-pavement contact area,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 764–770, Nov. 2021, doi: 10.1007/s42947-020-0187-9.
- [19] H. Cheng, Y. Wang, L. Liu, and L. Sun, “Effects of using different dynamic moduli on predicted asphalt pavement responses in mechanistic pavement design,” *Road Mater. Pavement Des.*, pp. 1–17, May 2021, doi: 10.1080/14680629.2021.1924842.
- [20] N. Su, F. Xiao, J. Wang, and S. Amirhanian, “Characterizations of base and subbase layers for Mechanistic-Empirical Pavement Design,” *Construction and Building Materials*, vol. 152. Elsevier Ltd, pp. 731–745, Oct. 15, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.060.
- [21] M. Crispino and V. Nicolosi, “Temperature Analysis in Prediction of the Rutting of Asphalt Concrete Bridge Pavements,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 2, no. 4, pp. 403–419, Jan. 2001, doi:

10.1080/14680629.2001.9689910.

- [22] Z. A. Alkaissi, “Effect of high temperature and traffic loading on rutting performance of flexible pavement,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 32, no. 1. King Saud University, pp. 1–4, Jan. 01, 2020, doi: 10.1016/j.jksues.2018.04.005.
- [23] C. Higuera, N. Olarte, y R. Soler. “Effect of the recycled rubber grain in the rutting of an asphalt mixture type MD-12”. *Revista Respuestas*. Vol. 24, no. 1, pp. 84-94. 2019. doi.org/10.22463/0122820X.1810
- [24] S. Erlingsson, “Rutting development in a flexible pavement structure, road materials and pavement design”, *Taylor & Francis*. vol. 13:2, pp. 218-234. 2012. http://dx.doi.org/10.108011480629.2012.682 383.
- [25] L. Vásquez, y F. García, “An overview of asphalt pavement design streets and road”. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Vol. 98, pp. 10-26. Medellín. Colombia. 2021. Doi: 10.17530/udea.redin.20200367
- [26] C. Higuera. "Análisis de sensibilidad de la deformación plástica en las estructuras de pavimento flexible", *Revista Respuestas*, Volumen 26, Número 1, Enero – abril, 2021, pág. 62-74. https://doi.org/10.22463/0122820X.2665