



Sensitivity analysis of plastic deformation on flexible pavement structures

Análisis de sensibilidad de la deformación plástica en las estructuras de pavimento flexible

Carlos Hernando Higuera-Sandoval^{1*}

¹MSc. en Ingeniería, carlos.higuera@uptc.edu.co, ORCID: 0000-0003-1333-2517, Universidad de Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

How to cite: C. H. Higuera-Sandoval, "Sensitivity analysis of plastic deformation on flexible pavement structures". *Respuestas*, vol. 26, no. 1, pp. 62-74, 2021.

Received on July 7, 2020 - Approved on November 5, 2020.

ABSTRACT

Keywords:

Rutting, plastic deformation, flexible pavement, mechanistic analysis, sensitivity

In Colombia, one of the most frequent damages of flexible pavement structures is the plastic deformation commonly known as rutting, which consists of a channelized depression in the circulation footprint of vehicles produced by the effect of traffic loads, variations in the service temperature of the pavement, deficiencies in the design and construction of asphalt mixtures or due to the presence of weak subgrade. The rutting hinders the maneuverability of vehicles, reduces road safety and affects the comfort level for the user. The objective of this research is to perform the sensitivity analysis of the variables that influence accumulated plastic deformation or rutting in flexible pavement structures using the mechanistic model. The study of the plastic deformation or rutting was carried out by applying the methodology presented 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*) versions 2008 and 2015, which is one of the most widely implemented methodologies for the design of new pavement structures, as well as for their maintenance and rehabilitation. The scope of the study is at the theoretical modeling level in order to understand the phenomenon of permanent plastic deformation of flexible pavement structures. The study shows that the variables most sensitive to rutting of flexible pavement structures are: the weighted annual average temperature - TMAP, followed by the design traffic, the dynamic modulus of the asphalt mixture, the load per tire, the thickness of the asphalt layer, the contact pressure and depth of the bearing layer; This information is very useful for pavement structure design engineers.

RESUMEN

Palabras clave:

Ahuellamiento, deformación plástica, pavimento flexible, análisis mecanicista, sensibilidad

En Colombia, uno de los daños más frecuentes de las estructuras de pavimento flexible es la deformación plástica conocida comúnmente como el ahuellamiento, el cual consiste en una depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos producida por el efecto de las cargas del tránsito, las variaciones de temperatura de servicio del pavimento, deficiencias en el diseño y construcción de las mezclas asfálticas o por la presencia de subrasantes débiles. El ahuellamiento dificulta la maniobrabilidad de los vehículos, disminuye la seguridad de la vía y afecta el nivel de confort para el usuario. El objetivo de la presente investigación es realizar el análisis de sensibilidad de las variables que influyen en la deformación plástica acumulada o ahuellamiento en estructuras de pavimento flexible mediante el modelo mecanicista. El estudio de la deformación plástica o ahuellamiento se realizó aplicando la metodología presentada 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*) versiones 2008 y 2015, la cual es una de las metodologías de mayor implementación para el diseño de estructuras de pavimento nuevas, así como para el mantenimiento y rehabilitación de las mismas. El alcance del estudio es a nivel de modelación teórica con el fin de comprender el fenómeno de la deformación plástica permanente de las estructuras de pavimento flexible. Como resultados de la investigación realizada se obtiene que las variables más sensibles al ahuellamiento de estructuras de pavimento flexible son: la temperatura media anual ponderada - TMAP, seguida del tránsito de diseño, el módulo dinámico de la mezcla asfáltica, la carga por llanta, el espesor de la capa asfáltica, la presión de contacto y profundidad del estrato portante; esta información es de gran utilidad para los ingenieros diseñadores de estructuras de pavimento.

*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

La deformación plástica permanente o ahuellamiento es causada por el exceso de tránsito o cargas, bajas velocidades de circulación, deficiencias en el diseño y construcción de las mezclas asfálticas, variaciones drásticas de temperatura y presencia de humedad y subrasantes débiles. [1][2][3]

La malla vial de Colombia está construida predominante con pavimento flexible, según estadísticas del Ministerio de Transporte para el año 2019, nuestro país cuenta con 205,378 Km de red vial. Cifras de la red vial a cargo del Instituto Nacional de Vías – INVIAS del año 2020, aproximadamente el 47.42% de la red vial presenta deterioros y varios daños representativos lo cual disminuye su vida de servicio considerablemente y el 52.58% de la red está en muy bueno y buen estado. Los daños de la red vial son debidos a deficiencias en los diseños, fallas en los procesos constructivos, excesos de humedad de los materiales y sobrecargas que afectan la capacidad y durabilidad a las estructuras de pavimento. [4]

A su vez en el control de diseño de una estructura de pavimento es importante conocer el valor de la deformación plástica esperada o ahuellamiento con el objeto de asegurar un buen desempeño estructural y funcional.[5]

Por lo anteriormente enunciado, la presente investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento de la deformación plástica mediante la implementación de metodologías mecanicistas y analizar el grado de sensibilidad de las variables que intervienen en su cuantificación, de manera que las estructuras de pavimento flexible que se diseñen cumplan el criterio de control de deformación o ahuellamiento.

En la Figura 1a se representa el modelo reológico desarrollado por Burgers. Cuando una carga pasa sobre la estructura del pavimento se produce inicialmente una deformación elástica, seguida de una deformación viscoelástica y una vez la carga es retirada el pavimento se recupera mediante la componente elástica y la componente plástica permanece y va aumentando con el paso de las cargas del tránsito, dando lugar al fenómeno del ahuellamiento, el cual se manifiesta en la superficie de la capa asfáltica mediante la formación de huellas, surcos o roderas. [6] [7] [8] [9]

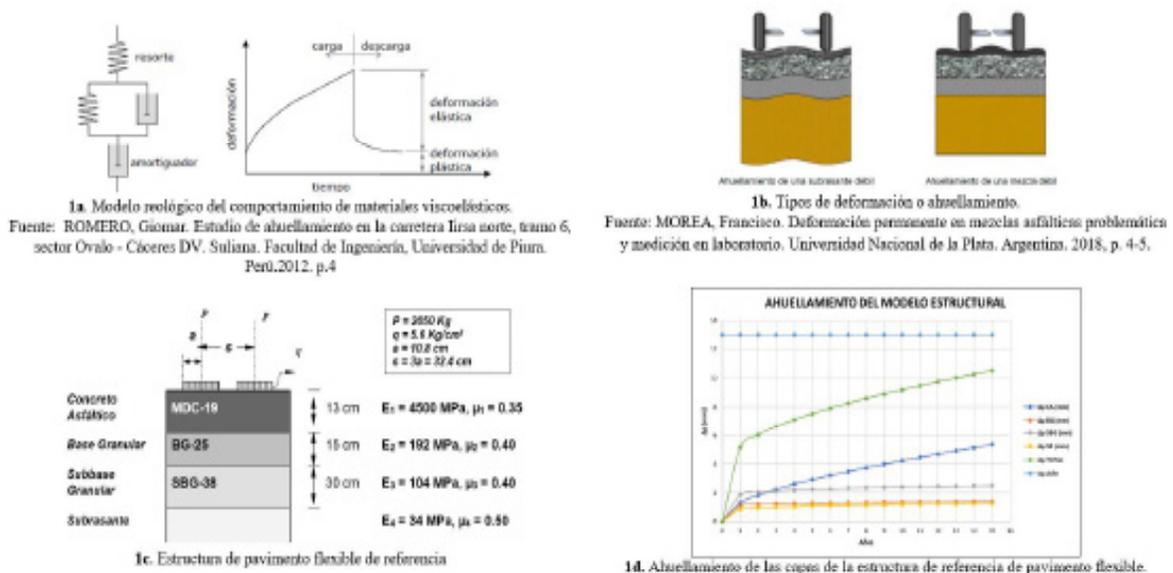


Figura 1. Modelo de ahuellamiento de la estructural de pavimento flexible en estudio.

Las causas del ahuellamiento [6] de los pavimentos flexibles están asociados al clima (altas temperaturas de servicio

del pavimento), a las 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 en la compactación de las capas, la debilidad de la subrasante y errores en el diseño y construcción de la mezcla asfáltica.

Los factores que afectan el ahuellamiento y la deformación plástica permanente [6][10][11] de las estructuras de pavimento flexible son: el espesor de las capas, los módulos de elasticidad, el grado de ligante de la mezclas, el contenido efectivo de ligante de las capas asfálticas, la temperatura y las condiciones ambientales, las cargas del tránsito, el área y la presión de contacto de las llantas, la velocidad de operación de los vehículos, las propiedades volumétricas de la mezcla, el grado de humedad de las capas de base, subbase y subrasante, la profundidad del estrato portante y la profundidad del nivel freático.

Las etapas del proceso de evolución de la deformación plástica permanente o ahuellamiento en capas asfálticas [6][12][13], se presenta en tres etapas: la primera etapa es la densificación que produce un cambio de volumen, alta velocidad de deformación y alta deformación o ahuellamiento, la segunda etapa se caracteriza por bajos cambios de volumen y la velocidad de deformación es constante y la tercera etapa se denomina deformación por flujo plástico por corte y se caracteriza por una baja velocidad de deformación, alta deformación y no hay cambios de volumen.

Los tipos de deformación plástica o ahuellamiento se clasifican en: deformación en las capas asfálticas, ocurre cuando la resistencia al corte es demasiado baja para soportar los esfuerzos producidos por el tránsito y el perfil de ahuellamiento ocurre en la capa asfáltica y su esquema se presenta en la Figura 1b. El segundo tipo de deformación es el ahuellamiento en la subrasante el cual se presenta por falla de la subrasante y se genera por la aplicación repetida de esfuerzos de compresión al suelo de subrasante, la subbase o la base y su perfil se presenta en la Figura 1b. Frecuentemente, la deformación o ahuellamiento es el resultado de estructuras con espesores de capas muy delgadas que influyen en la disipación de los esfuerzos y deformaciones verticales de compresión y que deforman la subrasante. También, influye en el ahuellamiento las deficiencias en el proceso de compactación de las capas y la variación de los niveles de humedad. En este tipo el ahuellamiento se presenta en mayor magnitud en la subrasante, seguida de la base y subbase granular y finalmente en las capas asfálticas. [6][13]

Materiales y Métodos

La metodología para la realización de la investigación contempló siete etapas: Revisión bibliográfica, diseño estructural, chequeo y cálculo de la deformación plástica o ahuellamiento de la estructura, variables a estudiar, análisis de sensibilidad, definición de las variables más sensibles y significativas y el análisis de resultados.

A continuación, se presenta el modelo de deformación plástica propuesta en la guía “*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – MEPDG-AASHTO*” versiones 2008 y 2015. [15][16]

El modelo propuesto por la guía MEPDG-AASHTO [15][16][21][22], para determinar la deformación o plástica permanente de la capa asfáltica se presenta en la Ecuación (1).

$$\Delta p (CA) = \beta I_r * k_z * \epsilon_{v(CA)} * 10^{k_{1r}} * n^{k_{2r} * \beta_{2r}} * T^{k_{3r} * \beta_{3r}} * h_{CA} \quad (1)$$

Donde:

$\Delta p(CA)$: Deformación plástica permanente acumulada en la capa asfáltica, en pulgadas.

$\epsilon_{v(CA)}$: Deformación vertical calculada en la mitad de la capa asfáltica, en pulgada/pulgada.

h_{CA} : Espesor de la capa asfáltica, en pulgadas.

n : Número de repeticiones de carga.

T: Temperatura de trabajo de la mezcla asfáltica, Tmix en grados Fahrenheit.

K1r – K2r – K3r: Parámetros de calibración global de campo.

β1r – β2r – β3r: Constantes locales de calibración o de la mezclas en el campo.

Kz: Factor de corrección en función del espesor de la capa asfáltica, se estima mediante la Ecuación (2).

$$Kz = (C1 + C2 * Depth) * 0.328196^{Depth} \quad (2)$$

$$C1 = -0.1039 * (h_{CA})^2 + 2.4868 * (h_{CA}) - 17.342 \quad (3)$$

$$C2 = 0.0172 * (h_{CA})^2 - 1.7331 * (h_{CA}) + 27.428 \quad (4)$$

Donde:

Depth: Profundidad media de la capa asfáltica, en pulgadas.

C1 y C2: factores de corrección del espesor, se estiman con las Ecuaciones (3) y (4).

El modelo propuesto por la guía MEPDG-AASHTO [15][16][21][22], para determinar la deformación plástica de las capas granulares de base y subbase se presenta en la Ecuación (5).

$$\Delta p(\text{granular}) = \frac{\beta s1 * ks1 * \epsilon v * h(\text{granular}) * \left(\frac{\epsilon o}{\epsilon r}\right)}{e^{\left(\frac{\rho}{n}\right)^{\beta}} \quad (5)$$

Donde:

Δp(granular): Deformación plástica permanente, en pulgadas.

βs1: Constantes de calibración global para el ahuellamiento en las capas no ligadas.

ks1: Coeficientes de calibración global.

εv: Deformación vertical en la mitad de la capa granular determinada por el modelo de análisis estructural, en pulgada/pulgada

h(granular): Espesor de la capa granular no ligada, en pulgadas

n: Número de repeticiones de carga.

εo: Intersección determinada de los ensayos de deformación permanente de carga repetida de laboratorio, en pulgada/pulgada

εr: Deformación elástica determinada en la prueba de laboratorio para obtener las propiedades del material, que depende de los parámetros: εo, β y ρ.

εo, β y ρ: Propiedades del material.

El parámetro β se estima por medio de la Ecuación (6):

$$\beta = 10^{-0.61119 - 0.017638 * (Wc)} \quad (6)$$

Donde:

Wc: Contenido de humedad del material, en porcentaje - %

Cuando no se tienen la humedad del material se puede calcular por medio de la Ecuación (7):

$$W_c = 51.712 \left[\left(\frac{Mr}{2555} \right)^{\frac{1}{0.64}} \right]^{-0.3586 + Gwt^{0.1192}} \quad (7)$$

Donde:

Mr: Módulo de elasticidad de la capa, en lb/pulg²

Gwt: Profundidad del nivel freático, en pies

El parámetro ρ se calcula por medio de la Ecuación (8):

$$\rho = 10^9 * \left(\frac{0.0075}{1 - (10^9)^\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

Finalmente, la relación (ϵ_o/ϵ_r) se calcula por medio de la Ecuación (9):

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

El modelo propuesto por la guía MEPDG-AASHTO [15][16][21][22], para estimar la deformación plástica permanente en la subrasante se presenta en la Ecuación (10):

$$\epsilon p(z) = (\epsilon p_{z=0}) e^{-kz} \quad (10)$$

Donde:

$\epsilon p(z)$: Deformación vertical plástica a la profundidad z

k: Parámetro que se estima por medio de la Ecuación (11).

$$K = \frac{1}{6} * Ln \left(\frac{\epsilon p, z = 0}{\epsilon p, z = 6} \right) \quad (11)$$

Para calcular la deformación de la subrasante para cada profundidad (z=0 y z=6 pulgadas), se aplica la Ecuación (12).

$$\epsilon p = \frac{Bs1 * ks1 * \epsilon v * \left(\frac{\epsilon_o}{\epsilon_r} \right)}{e^{\left(\frac{\rho}{n} \right)^\beta}} \quad (12)$$

Donde:

ϵv : Deformación unitaria vertical en la subrasante calculada por el modelo de respuesta estructural, en pulgada/pulgada

Ks1: Coeficiente de calibración global

β_{s1} : Constante de calibración local

La deformación permanente total de la subrasante se determina sumando las deformaciones plásticas hasta la profundidad del estrato portante por medio de la Ecuación (13).

$$\Delta p_{(SR)} = \frac{1 - e^{-k \cdot h_{roca}}}{k} * \epsilon p, z = 0 \quad (13)$$

Donde:

$\Delta p_{(SR)}$: Deformación plástica total de la subrasante, en pulgadas

h_{roca} : Profundidad a la que se encuentra el estrato rocoso, en pies.

El diseño de la estructura de referencia de pavimento flexible se realizó de acuerdo a la metodología de la AASHTO-93 [14] y su modelo estructural se presenta en la Figura 1c.

Aplicando la metodología propuesta por la guía MEPDG-AASHTO [15-23] se calculó la deformación plástica acumulada o ahuellamiento de cada capa y del modelo estructural, la fisuración piel de cocodrilo y la fisuración longitudinal de la capa asfáltica, también se determinó el índice de rugosidad. Se revisó que la estructura diseñada cumpla los criterios de desempeño y el índice de rugosidad, tal como se muestra en la Tabla I.

Tabla I. Criterios de verificación del diseño de la estructura de pavimento flexible de referencia, metodología MEPDG-AASHTO.

No.	Criterio de desempeño	Valor obtenido	Valor admisible	Observación
1	Deformación plástica acumulada o ahuellamiento	10.52 mm	13.00 mm	Cumple
2	Fisuración piel de cocodrilo	1.49%	35%	Cumple
3	Fisuración longitudinal	40.19 pies/milla (7.61 m/Km)	1,000 pies/milla (189 m/Km)	Cumple
4	Índice de rugosidad final	154.29 pulg/milla (2.44 m /km)	220 pulg/milla (3.5 m/Km)	Cumple

Las variables para el análisis de sensibilidad de la deformación plástica, su rango, variación y número de alternativas a evaluar se indican en la Tabla II.

Tabla II. Definición de las variables para el estudio de sensibilidad.

Grupo	Variable	Rango	Variación	Número de alternativas
1	Tránsito de diseño, $N_{diseño}$	$0.5 \times 10^6 - 5.0 \times 10^6$	0.5×10^6	10
2	Presión de contacto, q Kg/cm ²	5.5 – 8.0	0.5	6
3	Carga por llanta, P Kg	1,000 – 4,000	500	7
4	Módulo de elasticidad de las capas, E_i Kg/cm ²			
	Capa asfáltica, E_1	10,000 – 100,000	5,000	19
	Base granular, E_2	1,500 – 3,000	250	7
	Subbase granular, E_3	800 – 2,000	200	7
	Subrasante, E_4	100 – 1,000	100	10
5	Espesor de la capa, h_i , cm			
	Capa asfáltica, h_1	4 – 20	2	9
	Base granular, h_2	15 – 30	3	6
	Subbase granular, h_3	15 – 40	5	6
6	Temperatura media anual ponderada del aire, $T_{MAP}^{\circ}C$	5 – 40	5	8
7	Humedad de los materiales, $W\%$			
	Base granular, $W_{bg}\%$	2 – 14	2	7
	Subbase granular, $W_{sb}\%$	2 – 18	2	9
	Subrasante, $W_{sr}\%$	5 – 50	5	10
8	Profundidad del estrato portante, h_{roca} , m	1 – 11	1	11
9	Profundidad del nivel freático, G_{wt} , m	0.5 – 4.0	0.5	8

Resultados y Discusión

La deformación plástica o ahuellamiento de la estructura de referencia de pavimento flexible, determinado de acuerdo a la MEPDG-AASHTO [15] [16] se muestra en la Figura 1d. La magnitud de la deformación plástica o ahuellamiento en la estructura es de 10.52 mm, de los cuales la capa asfáltica presenta un ahuellamiento de 5.355 mm (50.91%), la capa de base granular 1.408 mm (13.39%), la capa de subbase granular 2.499 mm (23.75%) y la subrasante 1.258 mm (11.95%). La estructura presenta un ahuellamiento total menor de 13 mm la cual cumple con el criterio de aceptación de la guía de diseño. Del análisis de la curva de desempeño de la deformación plástica, ver Figura 1d, se deduce que el 71.75% de la deformación plástica total ocurre en los primeros 5 años de servicio del pavimento, el 15.67% de la deformación plástica total ocurre entre los años 5 y 10 de servicio y el 12.58% restante ocurre entre los años 10 y 15 de servicio.

Análisis de sensibilidad de la deformación plástica de la estructura de referencia. En cuanto el tránsito de diseño, este influye de manera directa en la deformación plástica y su magnitud está en función directa con la intensidad del tránsito tal como se aprecia en la la Figura 2a, siendo la capa asfáltica la que presenta la mayor deformación plástica, seguida de la capa de subbase, la capa de base y la subrasante. Es importante resaltar que la mayor deformación plástica de la estructura de pavimento flexible (7.779mm) ocurre cuando la estructura soporta los primeros 500,000 ejes equivalentes de 8.2 t, a mayor tránsito la tasa de deformación plástica se hace menor.

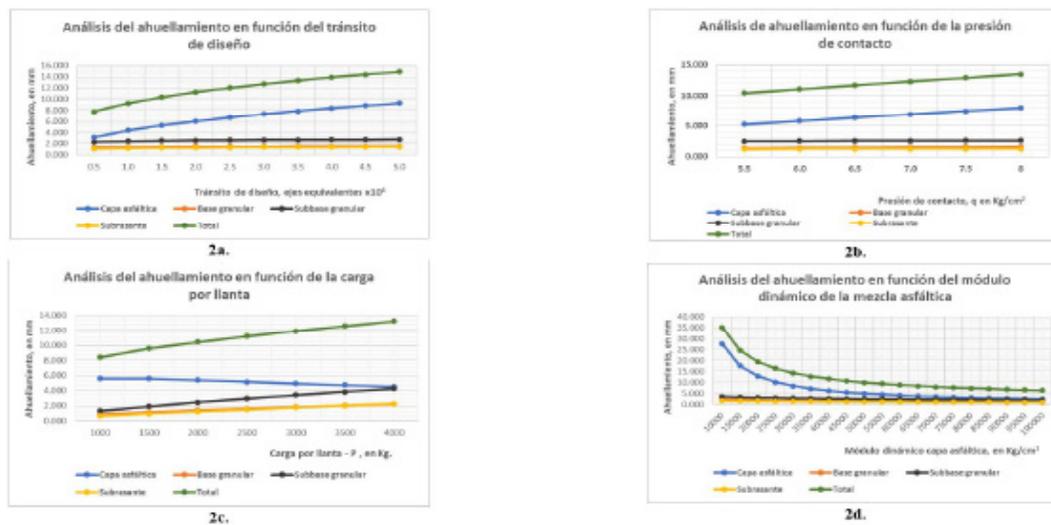


Figura 2. Análisis de sensibilidad en función del tránsito de diseño, la presión de contacto, la carga por llanta y el módulo dinámico de la capa asfáltica.

Para el modelo de referencia en estudio, la influencia de la presión de contacto y la carga por llanta influyen directa en la deformación plástica o ahuellamiento, siendo la capa asfáltica la que presenta la mayor deformación, seguida de la capa de subbase granular y la capa de base y la subrasante se deforma de manera similar tal como se observa en las Figuras 2b y 2c.

En cuanto a los módulos de las capas influyen de manera directa en la magnitud de la deformación plástica y se cumple que a medida que se incrementa el valor se disminuye la magnitud de la deformación plástica, siendo el más sensible el módulo dinámico de la capa asfáltica, seguido del módulo resiliente de la subbase, base y subrasante, tal como se aprecia en las Figuras 2d, 3a, 3b y 3c.

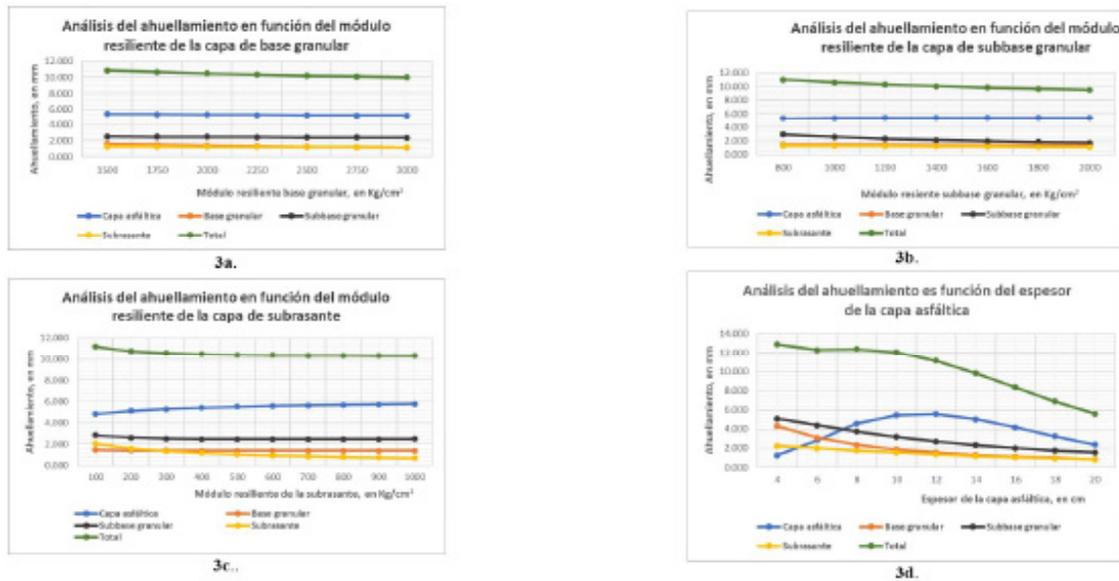


Figura 3. Análisis de sensibilidad en función de los módulos resiliente de la base granular, subbase granular, subrasante y el espesor de la capa asfáltica.

Los espesores de las diferentes capas del pavimento flexible influyen en la estimación de la deformación plástica de cada una de las capas. Para la estructura de referencia se obtuvo que un aumento en el espesor de la capa asfáltica influye de manera inversa en la magnitud de la deformación plástica y este mismo comportamiento se presenta en la capa de base granular, tal como se muestra en las Figuras 3d y 4a. En cambio, para la capa de subbase granular el comportamiento de la deformación es un poco atípico debido a que se presentó el caso que a medida que se incrementa el espesor de la capa de subbase granular se incrementa el ahuellamiento aunque su magnitud es muy baja, ver Figura 4b.

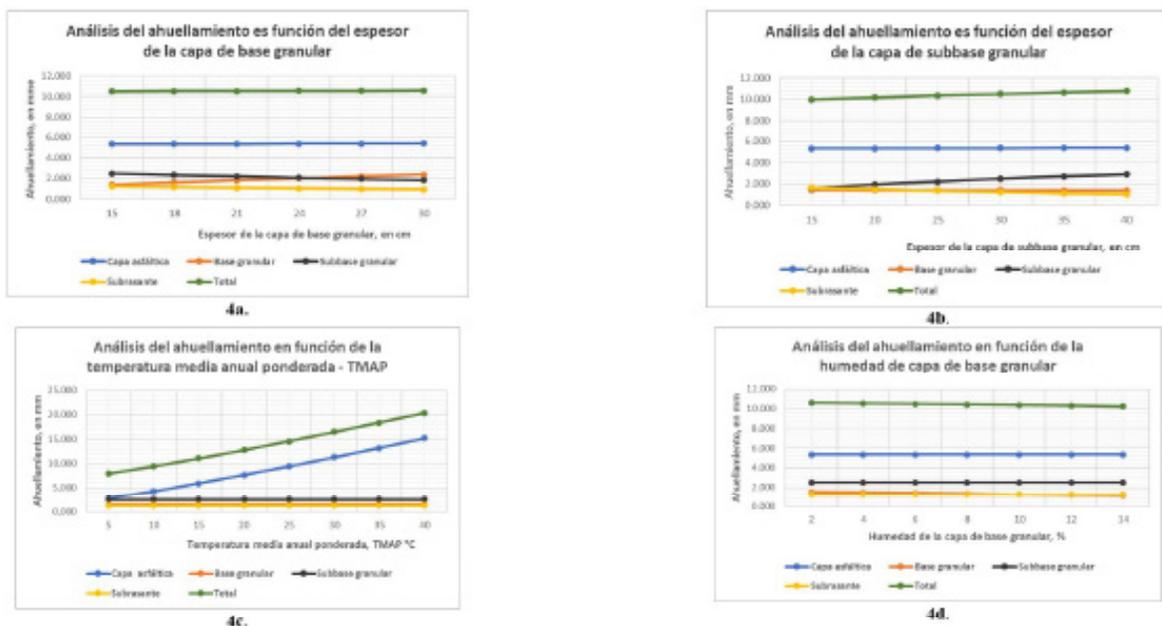


Figura 4. Análisis de sensibilidad en función del espesor de la base y subbase granular, la temperatura media anual ponderada y la humedad de la capa de base granular.

La temperatura media anual ponderada del aire - TMAP y la temperatura del pavimento – Tmix, influyen directamente en la magnitud de la deformación plástica de las capas asfálticas, tal como se muestra en la Figura 4c, debido al cambio de viscosidad del asfalto haciendo que la mezcla asfáltica se deforme por la pérdida de resistencia. En cambio, el ahuellamiento de las capas granulares y la subrasante no ven afectados por el cambio de temperatura.

Para la estructura de referencia, la variación de la humedad de las capas de base, subbase y subrasante son poco sensibles a los cambios de la deformación plástica, tal como se indica en las Figuras 4d, 5a y 5b.

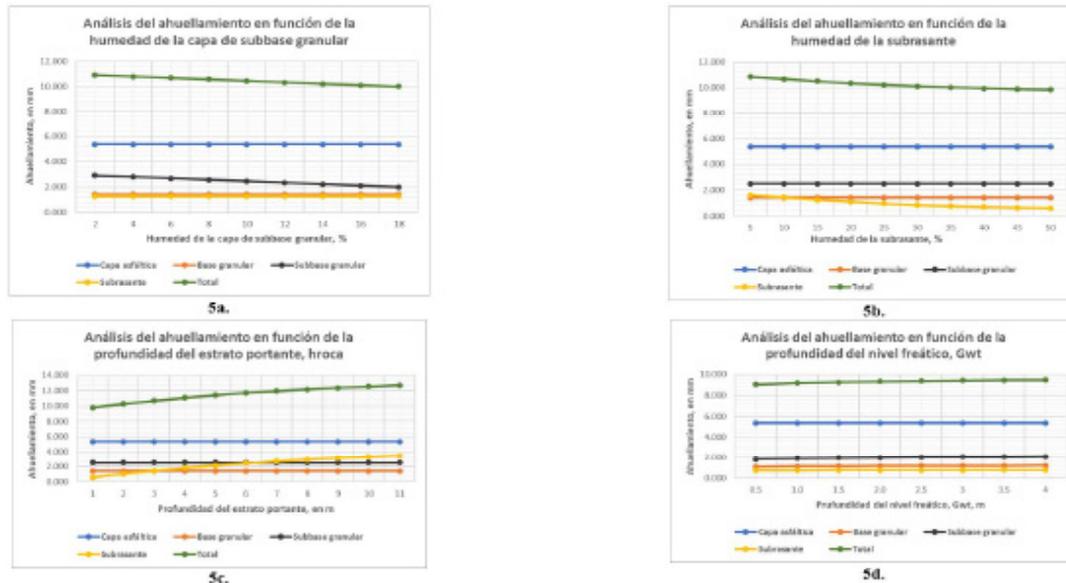


Figura 5. Análisis de sensibilidad en función de la humedad de la capa de subbase granular y subrasante, la profundidad del estrato portante y la profundidad del nivel freático.

La profundidad del estrato rocoso influye directamente en la deformación plástica o ahuellamiento de la estructura de pavimento flexible, de manera que a mayor profundidad del estrato rocoso es mayor el ahuellamiento de la estructura del pavimento, ver Figura 5c. La profundidad del nivel freático es poco sensible a la deformación plástica, ver Figura 5d.

El grado de sensibilidad se determinó en función del porcentaje de variación de cada variable, ver Tabla III, de manera que, si dicho porcentaje es menor al 15% la variable es de sensibilidad baja, si su porcentaje de variación está entre el 15% y 30% la variable es de sensibilidad media y si la variación es mayor del 30% la sensibilidad es alta.[23][24]

Tabla III. Grado de sensibilidad de las variables que influyen en el ahuellamiento de una estructura de pavimento flexible

Variables	Grado de sensibilidad del Ahuellamiento				
	Capa asfáltica	Capa de base	Capa de subbase	Subrasante	Estructura
Tránsito de diseño, N _{diseño}	ALTA	BAJA	MEDIA	MEDIA	ALTA
Presión de contacto, q	ALTA	BAJA	BAJA	BAJA	MEDIA
Carga por llanta, P	MEDIA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
Módulo dinámico de la capa asfáltica, E1	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
Módulo resiliente e la capa de base granular, E2	BAJA	MEDIA	BAJA	BAJA	BAJA
Módulo resiliente de la subbase granular, E3	BAJA	BAJA	ALTA	MEDIA	BAJA
Módulo resiliente de la subrasante, E4	MEDIA	BAJA	BAJA	ALTA	BAJA
Espesor de la capa asfáltica, h1	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
Espesor de la capa de base granular, h2	BAJA	ALTA	MEDIA	MEDIA	BAJA
Espesor de la capa de subbase granular, h3	BAJA	BAJA	ALTA	ALTA	BAJA
Temperatura media anual ponderada, TMAP	ALTA	BAJA	BAJA	BAJA	ALTA
Humedad de la capa de base granular, W _{bg}	BAJA	MEDIA	BAJA	BAJA	BAJA
Humedad de la capa de subbase granular, W _{sbg}	BAJA	BAJA	ALTA	BAJA	BAJA
Humedad de la subrasante, W _{sr}	BAJA	BAJA	BAJA	ALTA	BAJA
Profundidad del estrato portante, h _{roca}	BAJA	BAJA	BAJA	ALTA	MEDIA
Profundidad del nivel freático, Gwt	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA

Los modelos de comportamiento de la deformación plástica o ahuellamiento obtenidos del análisis de sensibilidad se presentan en la Tabla IV. Los modelos obtenidos estiman el valor del ahuellamiento total de la estructura de pavimento flexible de referencia.

Tabla IV. Modelos de comportamiento del análisis de sensibilidad de la deformación plástica permanente – ahuellamiento

Variable	Modelo de comportamiento Δp - Ahuellamiento total, mm	R ²
Tránsito de diseño – N, ejes equivalentes de 8.2t	$\Delta p = 9.3398(N)^{0.285}$	0.9983
Presión de contacto – q, Kg/cm ²	$\Delta p = 3.1546(q)^{0.699}$	1.0000
Carga por llanta – P, Kg	$\Delta p = 0.8807(P)^{0.3259}$	0.9989
Módulo dinámico de la capa la asfáltica - E1, Kg/cm ²	$\Delta p = 26624(E1)^{-0.728}$	0.9966
Módulo resiliente de la base granular - E2, Kg/cm ²	$\Delta p = 26.254(E2)^{-0.121}$	0.9997
Módulo resiliente de la subbase granular - E3, Kg/cm ²	$\Delta p = 31.963(E3)^{-0.159}$	0.9997
Modulo resiliente de la subrasante - E4, Kg/cm ²	$\Delta p = 6E-12(E4)^4 - 2E-08(E4)^3 + 2E-05(E4)^2 - 0.0082(E4) + 11.845$	0.9982
Espesor de la capa asfáltica - h1, cm	$\Delta p = -0.0295(h1)^2 + 0.2422(h1) + 12.281$	0.9919
Espesor de la capa de base granular - h2, cm	$\Delta p = 5E-05(h2)^2 + 0.0028(h2) + 10.466$	0.9999
Espesor de la capa de subbase granular - h3, cm	$\Delta p = 8.051(h3)^{0.0788}$	0.9988
Temperatura media anual ponderada - TMAP, °C	$\Delta p = 0.356(TMAP) + 5.8861$	0.9981
Humedad de la capa de base granular – W _{bg} , %	$\Delta p = -0.03(Wbg) + 10.667$	0.9995
Humedad de la capa de subbase granular – W _{sbg} , %	$\Delta p = -0.0581(Wsbg) + 11.039$	0.9998
Humedad de la capa de subrasante – W _{sr} , %	$\Delta p = 0.0004(Wsr)^2 - 0.0436(Wsr) + 11.081$	0.9997
Profundidad del estrato portante – h _{roca} , m	$\Delta p = 9.5922(hroca)^{0.1131}$	0.9831
Profundidad del nivel freático - Gwt, m	$\Delta p = 9.1798(Gwt)^{0.0226}$	1.0000

Conclusiones

Como resultados del análisis de sensibilidad de la deformación plástica o ahuellamiento para la estructura de pavimento flexible de referencia, se muestra en la Tabla V.

Tabla V. Variables más sensibles que influyen en la determinación de la deformación plástica en estructuras de pavimento flexible

Variables	% de variación	Grado de sensibilidad del Ahuellamiento
Temperatura media anual ponderada	155.690%	ALTA
Tránsito de diseño	92.011%	ALTA
Módulo dinámico de la capa asfáltica	82.077%	ALTA
Carga por llanta	57.804%	ALTA
Espesor de la capa asfáltica	56.710%	ALTA
Presión de contacto	29.929%	MEDIA
Profundidad del estrato portante	29.526%	MEDIA
Módulo resiliente de la subbase granular	13.590%	BAJA
Humedad de la subrasante	9.251%	BAJA
Humedad de la capa de subbase granular	8.403%	BAJA
Módulo resiliente de la base granular	8.037%	BAJA
Espesor de la capa de subbase granular	8.024%	BAJA
Módulo resiliente de la subrasante	7.666%	BAJA
Profundidad del nivel freático	4.811%	BAJA
Humedad de la capa de base granular	3.369%	BAJA
Espesor de la capa de base granular	0.719%	BAJA

- La variable más sensible es la temperatura - TMAP, seguida del tránsito de diseño, el módulo dinámico de la mezcla asfáltica, la carga por llanta y el espesor de la capa asfáltica; estas variables presentan un grado de sensibilidad ALTA. Las variables: presión de contacto y profundidad del estrato portante presentan un grado de sensibilidad MEDIA. Las variables: módulo resiliente de la subbase granular, humedad de la subrasante, humedad de la capa de subbase granular, módulo resiliente de la base granular, Espesor de la capa de subbase granular, módulo resiliente de la subrasante, profundidad del nivel freático, humedad de la capa de base granular y espesor de la capa de base granular, presentan un grado de sensibilidad BAJA.

De acuerdo al análisis realizado se destaca los siguientes comportamientos:

- A medida que se incrementa la temperatura media anual ponderada – TMAP °C, el ahuellamiento de la capa asfáltica aumenta significativamente, en cambio el ahuellamiento de las capas de base, subbase y subrasante permanece constante. Lo anterior, permite afirmar que el incremento de la TMAP trae consigo un incremento de la deformación plástica o ahuellamiento de las capas asfálticas.

- El comportamiento del ahuellamiento de la capa asfáltica, para el rango de espesores entre 4 cm a 12 cm, el ahuellamiento se incrementa y para espesores mayores a 12 cm hasta 20 cm el ahuellamiento disminuye, luego el comportamiento del ahuellamiento de la capa asfáltica tiene forma de parábola.

- Para el rango de módulos dinámicos de la capa asfáltica entre 10,000 Kg/cm² y 30,000 Kg/cm², la disminución de la magnitud del ahuellamiento es significativa, para valores mayores de 30,000 Kg/cm² el cambio de la magnitud del ahuellamiento es menor. Lo anterior indica que para módulos dinámicos bajos la magnitud de la deformación plástica o ahuellamiento es alta.

- El comportamiento de la capa asfáltica ante los cambios de espesor y módulo dinámico son significativos, lo cual permite afirmar que se debe escoger el espesor y el módulo dinámico apropiado con el fin de controlar la magnitud de la deformación plástica.

Se recomienda para futuros estudios realizar análisis comparativos de la deformación plástica o ahuellamiento utilizando el tránsito equivalente y los espectros de carga, además es importante para Colombia iniciar los estudios de calibración del modelo de deformación plástica o ahuellamiento para las condiciones propias del país.

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] G. Thenoux, y O. Carrillo, Análisis de casos de ahuellamiento en mezclas asfálticas chilenas. Santiago, Chile, 2002.
- [2] D. Páez, y H. Pereira, Estudio de ahuellamiento en mezclas asfálticas. Universidad de los Andes. Bogotá. Colombia, 2001.
- [3] L. Parra, y J. Pedroza, “Estudio sobre el efecto de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas, Ingenio Magno, vol. 6, no.1, pp. 112-127, 2015.
- [4] MINISTERIO DE TRANSPORTE. <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial>
- [5] ARA. Guide for mechanistic – empirical design of the new and rehabilitated pavement structures – NCHRP, report 1-37A. Champaign. Estados Unidos. 2004.
- [6] G. Romero, Estudio de ahuellamiento en la carretera Iirsa norte, tramo 6, sector Ovalo - Cáceres DV. Suliana. Facultad de Ingeniería, Universidad de Piura. Perú. 2012.
- [7] B. Bakhshi, y M. Arabani, “Numerical evaluation of rutting in rubberized asphalt mixture using finite element modeling based on experimental viscoelastic properties”. Journal of materials in civil engineering. American Society of Civil Engineering. 2018. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533-000216.
- [8] J. Campana, Consideraciones de la deformación permanente en el diseño estructural. Asociación Argentina de la Carretera. Comisión permanente del asfalto. Argentina. 2014.
- [9] R. Mallick, y T. El-Karehi. Pavement engineering – Principles and practice. Taylor & Francis. Nueva York. 2013.
- [10] H. Rondón, Ahuellamiento y fatiga de mezclas asfálticas. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. Colombia. 2012.
- [11] 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
- [12] B. Verhaeghe, P. Myburgh, y E. Denneman, “Asphalt rutting and prevention. Proceedings of the 9th conference on asphalt pavements for solution for Southern Africa”. Botswana. 2007.
- [13] F. Morea. Deformación permanente en mezclas asfálticas – problemática y medición en laboratorio.

Universidad Nacional de la Plata. Argentina. 2018.

- [14] AASHTO. Guide for design of structure. Estados Unidos. 2013.
- [15] AASHTO. Mechanistic – empirical pavement design guide – A manual of practice. Washington, Estados Unidos. 2008.
- [16]. AASHTO. Mechanistic – empirical pavement design guide – A manual of practice. Washington, Estados Unidos. 2015.
- [17] Austroads. Guide to pavement technology Parte 2 – Pavement structural design. Sydney. Australia. 2017.
- [18] C. Trejos, T. Ávila, J. Aguiar y L. Loria. Mechanical empirical design software for flexible pavements, Transportation Research Board. Annual Meeting. 2018.
- [19] M. Martínez, y I. Pérez. “Mechanistic – empirical pavement design guide: feature and distinctive elements”. *Revista de la construcción – journal of construction*. Vol. 14, no.1, pp, 32-40. 2015.
- [20] 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/10.108011480629.2012.682383>.
- [21] INVIAS. Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. Segunda versión. 2018.
- [22] 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.
- [23] C. Higuera-Sandoval. Mecánica de pavimentos – Principios básicos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 2012.
- [24] C. Sandoval y 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.