

MODELACIÓN DEL AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS DE PAVIMENTOS

Silvia Caro Spinel*; Leonardo Coral Triviño**; Bernardo Caicedo Hormaza***

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de la modelación del ahuellamiento de materiales asfálticos, generado por el paso lento de vehículos de transporte masivo sobre las carpetas de rodadura de pavimentos en zonas de paraderos. Para la modelación se emplearon leyes de flujo de materiales bituminosos encontrados con base en ensayos triaxiales cíclicos [1] y resultados de ensayos de resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas [2]. Los resultados muestran que las leyes dinámicas de flujo de estas mezclas sirven para simular adecuadamente el ahuellamiento; y que la temperatura, la frecuencia de aplicación de carga y la rigidez del material son los factores de mayor importancia en la ocurrencia de este fenómeno.

Palabras Clave: ahuellamiento, mezclas asfálticas, ley dinámica de flujo.

1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

El ahuellamiento de los pavimentos asfálticos se define como el deterioro gradual de la superficie y se manifiesta como una ondulación bajo las bandas de circulación vehicular. Las causas de la aparición de huellas en un pavimento son: 1) la formación y acumulación de deformaciones plásticas en las capas de materiales asfálticos; y 2) la disgregación de material en las capas granulares ante la aplicación de grandes esfuerzos verticales. Los principales factores que determinan la formación de huellas en mezclas asfálticas son la magnitud y frecuencia de la aplicación de carga y las condiciones climatológicas (i.e. temperatura).

Adicionalmente, se ha comprobado que las características reológicas del ligante asfáltico de la mezcla también influyen significativamente en el comportamiento visco-plástico de estos materiales [1].

En el diseño mecanicista de pavimentos se controlan los esfuerzos verticales que soporta la capa de subrasante, con el fin de evitar la formación de huellas en superficie. Sin embargo, ninguna metodología de diseño controla las deformaciones permanentes producidas por el comportamiento visco-plástico de las mezclas asfálticas. Este aspecto es fundamental, por-

* Profesor Instructor, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. e-mail: scaro@uniandes.edu.co.

** Ingeniero Civil- Ingeniero Mecánico. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia. e-mail: l-coral@uniandes.edu.co

*** PhD. Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia. e-mail: bcaicedo@uniandes.edu.co.

que una de las consecuencias más importantes del ahuellamiento es la disminución del nivel de servicio de la estructura.

La modelación del ahuellamiento en mezclas asfálticas de rodadura se realizó con dos programas de elementos finitos (SAP 2000®, ANSYS®). Los modelos permitieron analizar la ley de flujo dinámico de los materiales, estudiar la formación de huellas por efecto del tráfico de un sistema de transporte masivo, determinar los parámetros de mayor sensibilidad y comprender el efecto del frenado de los vehículos sobre la carpeta de rodadura. La modelación superó los inconvenientes detectados en [3], en donde no se establecía con claridad si la inconsistencia de algunos resultados era causada por la calidad del modelo o por limitaciones de la ley de flujo.

2. METODOLOGÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DEL AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Dentro de los procedimientos de laboratorio para estudiar el ahuellamiento de las mezclas asfálticas se destacan los ensayos triaxiales cíclicos con confinamiento constante y los ensayos sobre pista (I.N.V.E 756).

Los ensayos triaxiales cíclicos con confinamiento constante someten a los materiales asfálticos que conforman la estructura de pavimento a condiciones de esfuerzos similares a los producidos por el paso de vehículos en la superficie [4]. Páez y Pereira, [1], realizaron ensayos sobre muestras asfálticas MDC-2 (INVIAS, artículo 450-96) en la máquina de sistema servocontrolado MTS (Material Test System, CITEC, Universidad de Los Andes). Las mezclas fueron diseñadas mediante ensayos Marshall (norma I.N.V.E 748). Ante la aplicación de esfuerzos verticales cíclicos, la probeta sufre una deformación vertical final (DH_p) que corresponde a la deformación plástica del material (Figura 1).

El ensayo proporciona la relación entre el porcentaje de deformación permanente de la

muestra en función del número de ciclos de carga a la que ha sido sometida. Un resultado característico se muestra en la Figura 2.

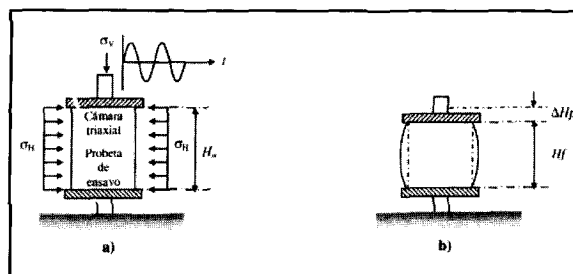


Figura 1. Esquematización del ensayo triaxial cíclico, a) al inicio de la prueba y b) al finalizar la prueba.

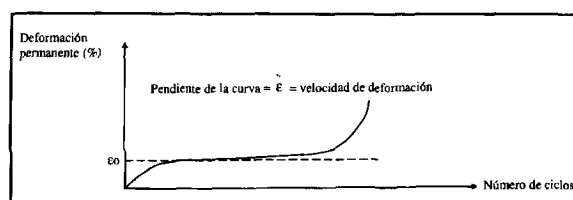


Figura 2. Curva típica de flujo de una mezcla asfáltica, [4]

Por otra parte, la norma I.N.V.E. 756 especifica el ensayo de ahuellamiento en pista para materiales bituminosos. El procedimiento es aplicable a mezclas en caliente y consiste en someter a una probeta al paso repetido de una rueda, en condiciones determinadas de presión, temperatura y frecuencia de aplicación de carga. Los resultados obtenidos para mezclas tipo MDC-2, diseñadas con asfaltos de Barrancabermeja, son presentados en la Figura 3.

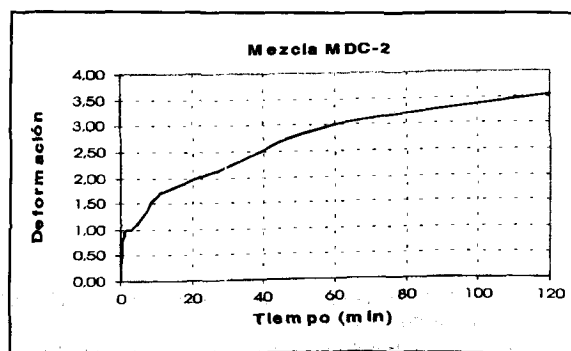


Figura 3. Resultados para mezclas MDC-2 [2].

3. CÁLCULO DE LA HUELLA GENERADA EN MATERIALES ASFÁLTICOS

Para calcular la huella generada en la carpeta de rodadura de un pavimento flexible por la acción de las cargas de tráfico, se requiere: 1) la ley dinámica de flujo de material; 2) las propiedades mecánicas del material; 3) las condiciones de magnitud y frecuencia de aplicación de la carga; 4) la temperatura en las capas de material y 5) los esfuerzos verticales y horizontales que se generan al interior del material a través del tiempo. La ley de flujo del material es la relación matemática que existe entre la velocidad de deformación y la temperatura, el tipo y frecuencia de aplicación de carga y las características de resistencia y comportamiento mecánico del material:

$$\dot{\varepsilon} = f(\theta, \sigma_v, \sigma_H, f) \quad (1)$$

donde $\dot{\varepsilon}$ es la velocidad de deformación del material en $\%/10^6$ ciclos, θ es la temperatura, f la frecuencia de aplicación de carga, σ_v y σ_H son los esfuerzos vertical y horizontal generados en el material. Los ensayos triaxiales cíclicos sobre mezclas asfálticas permiten encontrar la ley de flujo del material, determinando las relaciones matemáticas individuales entre la velocidad del flujo y cada una de las variables mencionadas. Con estos resultados, es posible enunciar una ley general de flujo del material. En el caso de una mezcla MDC-2 se determinó la siguiente ley de flujo [1]:

$$\log \dot{\varepsilon} = -1,903 + (-0,29\sigma_H^2 + 0,12\sigma_H + 5,36) \log \sigma_v + 0,60\sigma_H^2 - 2,09\sigma_H + 0,128(\theta - 30) - 1,48 \log \left[\frac{f}{10} \right] \quad (2)$$

La ley tiene validez para esfuerzos verticales (σ_v) entre 3,0 y 10,0 kg/cm^2 , esfuerzos horizontales (σ_H) entre 0,0 y 3,5 kg/cm^2 , frecuencias entre 0,1 y 10 Hz y temperaturas entre 30 y 50°C.

El cálculo de la huella generada sobre la superficie del material se realiza con base en la va-

riación de la velocidad de deformación, a diferentes profundidades y a diferentes horas del día. El valor de la huella total es:

$$\text{Huella} = DH = \int_0^z \int_0^t \frac{\dot{\varepsilon}}{10^8} N dt dh \quad (3)$$

Esta ecuación es el resultado de la relación que existe entre el valor de la deformación permanente (DH) y el número de ciclos (figura 3).

4. MODELACIÓN DEL AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

4.1 Calibración de la Ley Dinámica de Flujo de mezclas asfálticas

Para comprobar la aplicabilidad de la ley de flujo en la modelación del ahuellamiento, se realizó un modelo en elementos finitos para simular el ensayo de ahuellamiento en pista. El modelo fue sometido a las mismas condiciones que la muestra en el ensayo (60°C, carga de 9,8 kg/cm^2 , aplicado a una frecuencia de 0,38 Hz) y se calcularon los esfuerzos verticales y horizontales al interior de la placa. La Figura 4 muestra un esquema del modelo y los esfuerzos verticales en un corte al interior de la placa.

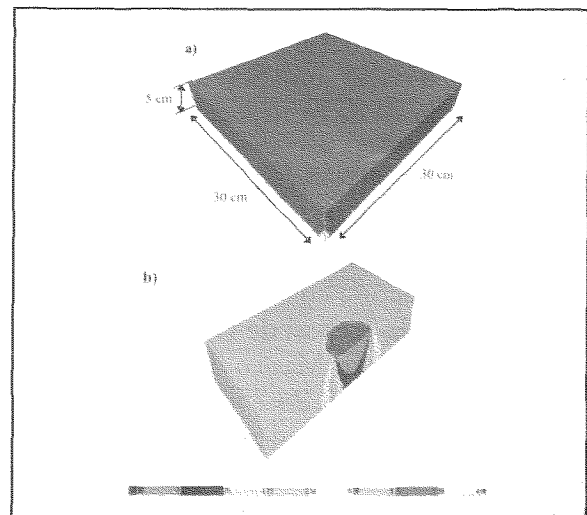


Figura 4. Modelo de placa en pista en elementos finitos regulares (SAP 2000). a. esquema del modelo y b. esfuerzos verticales en un corte bde la placa de material asfáltico (kg/cm^2).

A continuación, se calculó la huella esperada, con base en la ley de flujo encontrada para ese material (2). Este resultado fue comparado con el valor de la huella real que sufrió la muestra en el ensayo (Figura 4). Debido a que este resultado es sustancialmente más alto al obtenido en el ensayo real, se pudo establecer que la ley de flujo del material presenta algunas deficiencias. Esto se puede deber a que la ley de flujo considera los efectos desacoplados de cada una de las variables involucradas y, en algunos casos como en el factor de temperatura, debería incluirse el efecto combinado de este parámetro y del estado de esfuerzos del material. Indudablemente, una ley de flujo más acertada debería realizarse a través de un modelo elasto-visco-plástico, que simule con mayor precisión el comportamiento constitutivo del material. Sin embargo, después de un análisis cuidadoso de la sensibilidad de los parámetros de la ley, se estableció que el factor que acompaña el término de temperatura (q en ecuación (2)) puede ser disminuido a un valor de 0,03. Con esta modificación, la ley de flujo proporciona resultados más consistentes y la diferencia porcentual entre el valor de la máxima huella obtenida en la realidad (0,355 cm) y la máxima huella calculada con la ley de flujo (0,352 cm) es inferior al 0,8%.

4.2 Modelación del ahuellamiento en un pavimento en servicio sometido al tráfico de un sistema de buses de transporte masivo

Para analizar el efecto de ahuellamiento sobre pavimentos en servicio en zonas de bajas velocidades de tráfico, se modeló en elementos finitos una estructura con las características del pavimento de la Troncal de la calle 80 del sistema de Transporte Masivo Transmilenio, en Bogotá (K 1+930 a K 2+750) [5]. En la realidad, la carpeta asfáltica de este pavimento sufrió importantes fenómenos de ahuellamiento (Figura 5). Los resultados producidos por esta modelación, pueden ser comparados con el efecto real reportado en la estructura.

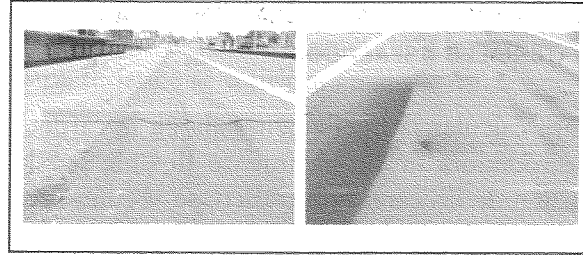


Figura 5. Ahuellamiento en la carpeta de rodadura del pavimento de la calle 80 en Bogotá en los paraderos de buses.

La estructura de pavimento empleada y una representación esquemática del modelo, se muestran en la Figura 6. El módulo de poisson (ν) para todos los materiales se supuso de 0,35. El módulo de rigidez de la subrasante fue de 130 kg/cm^2 y el de la subbase granular de 1345 kg/cm^2 ; el módulo de rigidez de las mezclas asfálticas fue calculado con base en el valor de la temperatura de la capa, para una frecuencia de 0,016 Hz. La variación de la temperatura con la profundidad se estableció con base en las mediciones realizadas en campo por Páez y Pereira [1]. Estos valores fueron extrapolados en profundidad e interpolados para periodos de 1 hora. En todos los casos, se obtuvieron funciones de correlación de temperatura vs profundidad de la carpeta de rodadura [6], las cuales sirvieron de base para establecer el módulo dinámico de los materiales a lo largo de un día.

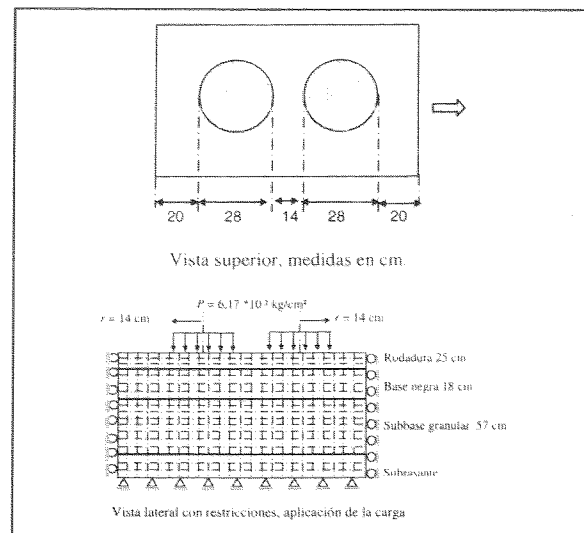


Figura 6. Características del modelo de pavimento.

Adicionalmente, sobre el modelo se incluyeron fuerzas horizontales equivalentes al efecto de frenado de los vehículos. Esta fuerza se calculó suponiendo una distancia de frenado de 30 m y una velocidad de los vehículos de 60 Km/h. Con estos supuestos, la fuerza tangencial de frenado es aproximadamente de 1588 kgf.

Con respecto a las cargas producidas por el tráfico, la Figura 7 muestra la configuración típica de un bus articulado empleado para sistemas de transporte masivo, similares a Trasmilenio en Bogotá. Las cargas en cada uno de los ejes y el número de vehículos que transitan en la vía cada hora, fueron tomados de acuerdo con los reportes de dicho sistema.

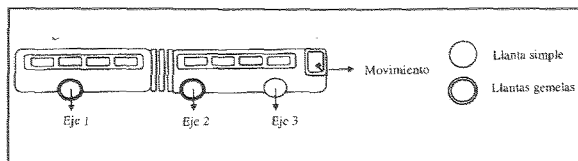


Figura 7. Configuración de un bus articulado de transporte masivo (Trasmilenio, Bogotá)

En periodos de una hora se empleó la siguiente metodología para el cálculo de la huella [3], [6]:

- Realizar un modelo del pavimento en elementos finitos con la carpeta de rodadura dividida en cinco subcapas. Los módulos de rigidez de cada subcapa se calculan en función de la temperatura media de esa capa.
- Determinar los esfuerzos verticales y horizontales en la base de cada una de las subcapas de la rodadura.
- Determinar el logaritmo de la velocidad de flujo para cada subcapa (ecuación (2) modificada).
- Calcular la deformación permanente generada en la base de cada subcapa (ecuación (4)).
- Calcular la huella total generada en esa hora, sumando las deformaciones permanentes de todas las subcapas.

- Multiplicar este resultado por 1,5, ya que se supone que los otros dos ejes del bus generan 1,5 veces la huella del primer eje (el más cargado). Este supuesto es acorde con los pesos reportados en la realidad.

Este procedimiento se realizó para intervalos de 1 hora. La suma total de los estos valores corresponde a la huella total esperada en un día.

4.3 Resultados de la modelación

La Figura 9 muestra el estado de esfuerzos verticales típico al que es sometido el pavimento entre las 12:00 m y la 1:00 p.m (a) y las deformaciones horizontales producidas en la parte superior de la carpeta (b). En la figura 9(b) se ve con claridad el efecto que produce el frenado de los vehículos sobre el pavimento.

La Figura 10 muestra las huellas obtenidas en cada una de las horas del día. Esta figura constata que las máximas huellas se producen entre las 12:00 m y las 4:00 p.m.; justamente a las horas en las que la temperatura al interior del pavimento es máxima.

La huella total producida al final de un día un valor máximo (bajo el punto de aplicación de la carga) de 0,003 cm. Multiplicando la huella total de un día por 240 días hábiles que compone un año, se obtiene una estimación de la huella total esperada al finalizar el primer año del servicio, la cual alcanza un valor máximo cercano a los 7 cm. Este valor es bastante similar al reportado en la Troncal de la calle 80 (Figura 5) y valida la metodología y los resultados obtenidos en la modelación.

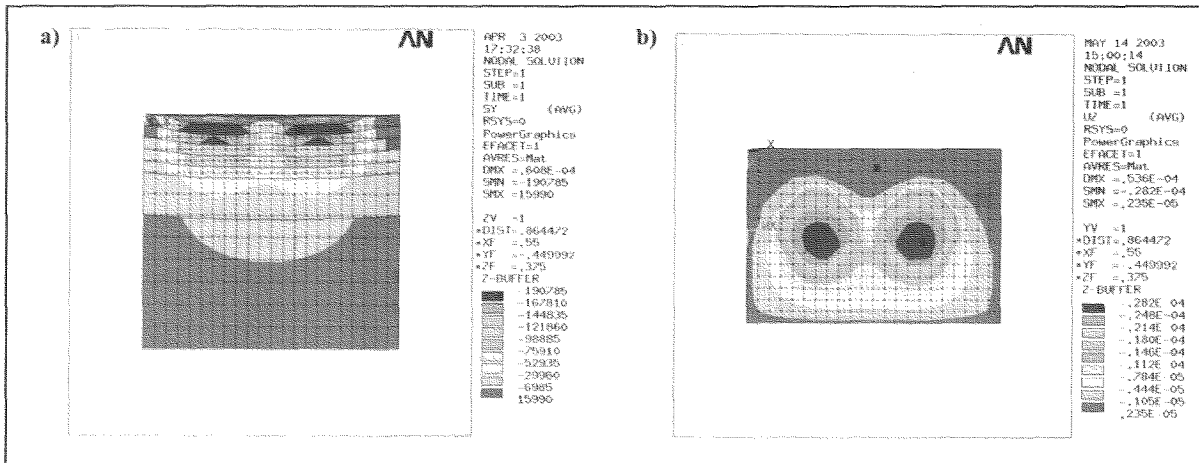


Figura 9. (a) Estado de esfuerzos verticales al interior del pavimento y (b) estado de deformaciones elásticas horizontales en la parte superior de la rodadura (vista en planta del pavimento)

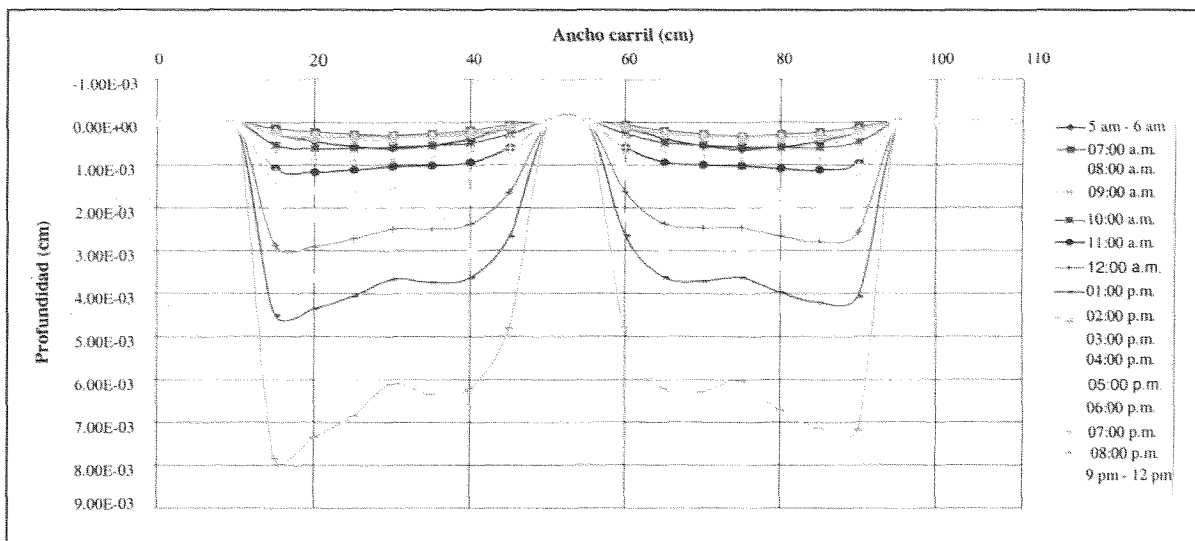


Figura 10. Huellas generadas a lo largo del día y (b) huella total al finalizar un día.

5. CONCLUSIONES

- Los ensayos triaxiales cíclicos se pueden utilizar para prever el comportamiento al flujo viscoplástico de materiales asfálticos. En particular, permiten estudiar el ahuellamiento esperado en una carpeta de rodadura de un pavimento flexible por el efecto repetido de la carga de tráfico.
- Los ensayos triaxiales con carga repetida y temperatura controlada permiten estudiar los

factores que determinan la formación de huellas (frecuencia, esfuerzos, temperatura). Sin embargo, los modelos han demostrado que la ley constitutiva del material es fuertemente acoplada. Para superar este inconveniente, sería necesario desarrollar una ley de comportamiento elasto-visco-plástica, acoplando los diferentes mecanismos de deformación.

- El efecto del frenado de los vehículos sobre el pavimento se traduce en la formación de un abultamiento en cercanías de la huella y en

la modificación de los esfuerzos horizontales en el interior de la estructura.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] PAEZ, D., PEREIRA, H. (2001). «Estudio del ahuellamiento de mezclas asfálticas. XIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos». Universidad de Los Andes, Bogotá.

[2] OCAMPO, M. (2002). «Ensayos sobre pista de materiales asfálticos». CITEC, Universidad de Los Andes.

[3] CARO, S.; CAICEDO, B. (2002). «Ahuellamiento de mezclas asfálticas». Memorias de: Terceras Jornadas

Internacionales del Asfalto. Universidad del Cauca. Popayán, Cauca.

[4] AUSSEDT, G. (1977). «L'essai de fluage dynamique dans la formation des enrobés et le dimensionnement des chaussées, Bitumes et Enrobés bitumineux». Laboratoire des Ponts et Chaussées. Paris. P. 139.

[5] JASOPAC (2002), «Diseño del pavimento flexible de algunos paraderos de la Troncal de la Calle 80». Informe técnico. Bogotá.

[6] CORAL, L (2003). «Refinamiento de un modelo de elementos finitos (FEM) para la estimación de ahuellamiento en pavimentos». Trabajo de Grado. Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes, Bogotá.