

# Three-dimensional modeling of pavement with dual load using finite element

Wilson Rodríguez-Calderón <sup>a</sup> & Myriam Rocío Pallares-Muñoz <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Programa de Ingeniería Civil, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. [wrodriguez@unisalle.edu.co](mailto:wrodriguez@unisalle.edu.co)

<sup>b</sup> Programa de Ingeniería Civil, Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia. [myriam.pallares@usco.edu.co](mailto:myriam.pallares@usco.edu.co)

Received: February 3th, de 2014. Received in revised form: May 5th, 2014. Accepted: May 18th, 2014

## Abstract

The model developed tries to predict the stresses and strains of the structure of the pavement in a more real way, doing a lineal elastic structural analysis in three dimensions with capacity to model loads of double axes, that which constitutes an advance regarding two-dimensional axisymmetrical models that only represent the state tense-deformational of the pavement under loads of simple axes. Earlier stages of this research showed two-dimensional models under different load scenarios, league between layers and nonlinear constitutive models, however the purpose is to move towards analysis methodology stress-strain state under standard loads. The model was implemented in the *Algor*<sup>®</sup> program and a comparison with the *Elsym5* multilayer freeware was performed. The results warn the existence of shear stress concentrations that can be causing major flaws that are not considered in traditional design methods which could lead to the possibility of reassessed.

**Keywords:** *Algor*<sup>®</sup>, constitutive models, *Elsym5*, finite elements, pavements, rational design, three-dimensional modeling.

## Modelado tridimensional de un pavimento bajo carga dual con elementos finitos

### Resumen

El modelo desarrollado busca predecir los esfuerzos y deformaciones de un pavimento de manera más real, realizando un análisis elástico tridimensional con solicitaciones de carga de ejes dobles, constituyéndose en un avance respecto de modelos axisimétricos bidimensionales que sólo representan el comportamiento bajo cargas de ejes sencillos. Etapas anteriores de esta investigación dan cuenta de modelos bidimensionales de carga simple bajo distintas hipótesis de liga entre capas y modelos constitutivos no lineales, no obstante, el propósito es avanzar en la metodología de análisis del estado tenso-deformacional ante cargas estándar. El modelo se implementó en el programa *Algor*<sup>®</sup> y se realizó una comparación con el programa multicapa de distribución libre *Elsym5*. Los resultados advierten la existencia de concentraciones de esfuerzos de corte en la capa asfáltica que pueden ser causantes de fallas importantes que no son tenidas en cuenta en los tradicionales métodos de diseño lo cual podría llevar a la posibilidad de reevaluarlos.

**Palabras clave:** *Algor*<sup>®</sup>, diseño racional, elementos finitos, *Elsym5*, modelado tridimensional, modelos constitutivos, pavimentos.

### 1. Introducción

En el diseño de pavimentos es viable suponer soluciones a partir de las cuales mediante un proceso de ajustes sucesivos puede lograrse una condición favorable en la estructura del pavimento que garantice unas condiciones de equilibrio durante un período de tiempo determinado [4,9]. Esta forma de proceder para el dimensionamiento de las estructuras de pavimento se conoce como métodos analíticos o racionales los cuales se fundamentan en el análisis del estado de esfuerzos y deformaciones que le

inducen diferentes solicitaciones como tránsito, clima y características de los materiales de cada una de las capas y del suelo de fundación o subrasante. Para el análisis de estructuras de pavimento existen dos grandes vertientes o grupos de métodos: los de carácter empírico y los fundamentados en criterios racionales, comúnmente llamados mecanicistas. Para la implementación adecuada de un modelo racional se requiere de un computador para el desarrollo de los procesos matemáticos y del criterio ingenieril adquirido por la experiencia directa en caracterización de materiales, la determinación de

patologías causantes de daño en la estructura del pavimento y la familiarización con los órdenes de magnitud de los parámetros de entrada y salida del problema. Los métodos racionales pueden presentar diferencias en la predicción del comportamiento de la estructura del pavimento de acuerdo con la rigurosidad de los modelos constitutivos del material, la caracterización de parámetros de entrada; la hipótesis sobre el dominio y las condiciones de contorno del problema, la compatibilidad existente entre capas y las sollicitaciones y condiciones ambientales para el funcionamiento. En la medida en que el modelo se adecue a las condiciones reales mayor será la aproximación con la cual se caracterice la respuesta estructural y los esfuerzos y deformaciones críticas para el diseño de espesores [5,6]. Dentro de los métodos más difundidos para el diseño racional de pavimentos se encuentran aquellos que representan la estructura como un conjunto de capas de espesor constante y longitud infinita horizontal y que se encuentran apoyadas sobre un dominio semi-infinito o subrasante. Las capas se suponen compuestas por materiales homogéneos, isotropos y gobernados por un modelo constitutivo lineal elástico. Sin embargo, debe notarse que en la definición del módulo elástico de la capa asfáltica se tienen en cuenta la temperatura y frecuencia de aplicación de la carga, con lo cual, implícitamente, se considera el comportamiento visco-elástico real de las mezclas asfálticas. Bajo esta perspectiva se han desarrollado importantes aplicaciones computacionales como *AlizellI*, *Elsym5* y *Depav*, entre otros; todos estos paquetes trabajan con las restricciones propias de su formulación y están limitados en capacidad en cuanto al número de capas que pueden representar. Las técnicas más avanzadas para el análisis y diseño racional de pavimentos consideran el uso de elementos finitos como la vía de mayor flexibilidad y versatilidad para la representación de los materiales, las condiciones de compatibilidad y la representación de  $n$  capas; en general, se destaca la gran capacidad para incluir complejidades al problema, generando mayor certeza de los resultados alcanzados. Pertenecen a este grupo las aplicaciones multifísicas que originalmente no están diseñadas para abordar el problema particular del comportamiento tenso-deformacional de la estructura del pavimento; sin embargo, cuentan con todas las herramientas, que aprovechadas por un usuario experto pueden conducir a modelos satisfactorios, más centrados en la realidad del comportamiento del pavimento. En este artículo se plantea el uso de *Algor*<sup>®</sup> como modelador de alto rango; sin embargo pueden emplearse otros modeladores teniendo en cuenta que en cada uno de ellos es necesario realizar una adaptación de acuerdo con las posibilidades de modelación numérica que ofrecen [8].

Después de desarrollar en esta investigación varios modelos bidimensionales de carga simple el siguiente paso era el avance hacia modelos tridimensionales que permitieran el análisis de sistemas de carga de ejes dobles. El artículo presenta un modelo de elementos finitos tridimensional que describe de forma más real y lógica el comportamiento físico-mecánico de un pavimento, teniendo en cuenta el mayor número de variables o parámetros permitidos por la formulación lineal de los modelos

constitutivos de los materiales que componen la estructura. Una vez obtenido el modelo computacional, es factible en una segunda fase del proyecto proceder a la calibración de los parámetros mediante medición directa u optimización matemática.

Con el programa de elementos finitos *Algor*<sup>®</sup> es posible analizar los efectos de una amplia gama de fenómenos como el análisis de tensiones en modelos complejos debidas a cargas estáticas o dinámicas, constantes o con variación en el tiempo, análisis de grandes deflexiones bajo estas cargas usando modelos de materiales no lineales, análisis bajo cargas térmicas, problemas de flujo de fluidos y electrostático.

## 2. Métodos

El método de elementos finitos cuenta con innumerables ventajas para el desarrollo de un modelo conceptual y numérico de análisis de pavimentos [2,3,5]. Dentro de ellas pueden destacarse: la inclusión de la temperatura como parámetro en la capa asfáltica –*debido a la posibilidad de incorporar curvas maestras ó isoterma que caracterizan el módulo dinámico de la mezcla*–; la condición de compatibilidad ligada o no ligada entre capas; la inexistencia de restricción en el número de capas del modelo geométrico; la posibilidad de introducir modelos constitutivos de material y análisis más avanzados [6,8,13].

En el análisis de la estructura de un pavimento nuevo se requiere de un predimensionamiento, esto es, de los espesores de las capas que lo componen obtenidos de diseños preliminares. En estructuras existentes los espesores de capa son determinados mediante inspección directa a través de sondeos, apiques o extracción de núcleos. En la Fig. 1 se esquematiza una estructura de pavimento típica. En un modelo de este tipo desarrollado con *Algor*<sup>®</sup> pueden añadirse capas y variar la dimensión de los espesores y tipos de material. La existencia del plano vertical de simetría  $XZ$  permite realizar la mitad del modelo geométrico que representa el problema (ver Fig. 7). Las líneas punteadas de la Fig. 1, representan los ejes de simetría de las cargas circulares de magnitud  $q$  y radio  $a$ . En el modelo, la distancia entre ejes de carga es tres veces el radio y las fronteras laterales están localizadas a 0,40 metros a partir de los ejes. Las interfaces se suponen ligadas, no obstante se espera representar condiciones no ligadas en futuras etapas de la investigación.

Las dimensiones de las capas constitutivas de la estructura del pavimento modelado se presentan en la Tabla 1.

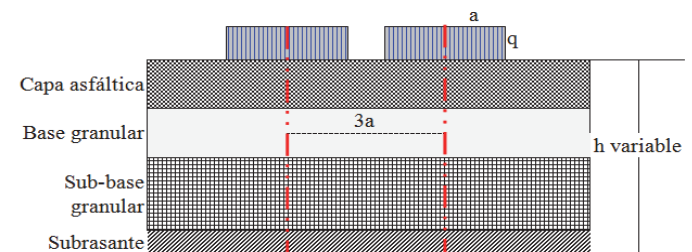


Figura 1. Estructura típica de un pavimento flexible.

Fuente: propia

Tabla 1. Valores típicos de espesores de capa de una estructura de pavimento flexible

Capa	Espesor (m)
Capa asfáltica	0.10
Base granular	0.20
Sub-base granular	0.30
Subrasante	0.70

Fuente: propia

La subrasante es semi-infinita, sin embargo en los modelos de elementos finitos las fronteras se ubican de forma que puedan establecerse líneas donde no existen desplazamientos importantes, debido a la lejanía que presentan respecto a la carga aplicada. Los módulos de elasticidad del suelo y las capas granulares se determinan por medio de ensayos triaxiales dinámicos para suelos. El módulo elástico de la capa asfáltica se establece a través de ensayos de módulos dinámicos a temperaturas y frecuencias de diseño del pavimento o por medio de pistas de prueba o tramos experimentales sobre los cuales se realizan ensayos de viga Benkelman doble o utilizando deflectómetros [1,7].

El ensayo de módulos dinámicos se realiza empleando una máquina de tracción indirecta, como el Nottingham Asphalt Tester. En el ensayo se aplica una carga vertical a determinada frecuencia (5 Hz en este trabajo) a una probeta de mezcla asfáltica midiendo los desplazamientos horizontales de la muestra con sensores (LVDT). La frecuencia de carga es controlada a través del parámetro rise-time (tiempo pico) que determina el tiempo de ascenso de la carga y permite tener en cuenta el comportamiento viscoelástico de la mezcla. Generalmente el ensayo se realiza a tres temperaturas representativas (5, 25 y 40 °C), para caracterizar lo que comúnmente se denomina curva maestra de la mezcla asfáltica

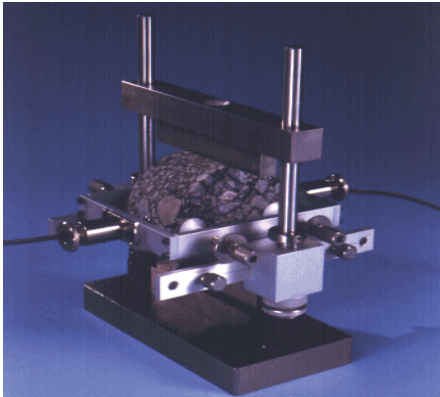


Figura 2. Montaje de la prueba de módulos dinámicos. Fuente: propia

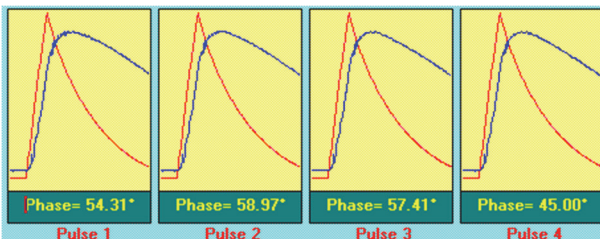


Figura 3. Aplicación de carga en pruebas de módulos dinámicos [3]. Fuente: propia

Tabla 2. Valores típicos de módulo elástico de las capas constitutivas

Capa	Módulo elástico (kPa)
Capa asfáltica	1500000
Base granular	328200
Sub-base granular	148200
Subrasante	49000

Fuente: propia

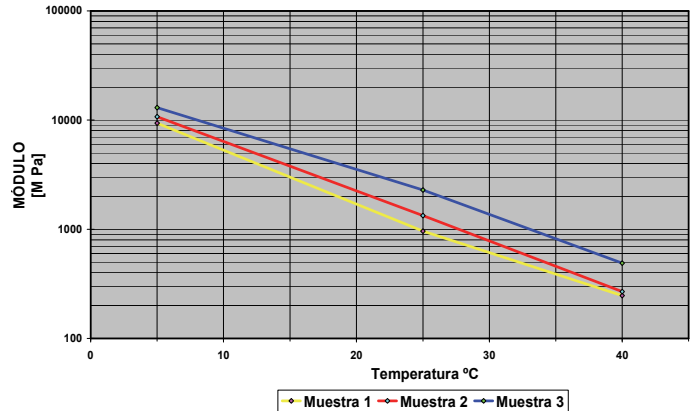


Figura 4. Curvas maestras de módulos dinámicos-capas asfáltica. Fuente: propia

o del núcleo extraído in situ. Las curvas representan la variación del módulo dinámico en función de la temperatura para una frecuencia de referencia y su construcción es posible por el efecto recíproco que tiene la temperatura y la frecuencia de sollicitación respecto al valor modular para materiales asfálticos. Las Fig. 2, 3 y 4 ilustran detalles relevantes del ensayo de módulos dinámicos [10-12]. Los módulos de elasticidad tomados como referencia para cada una de las capas de acuerdo a las condiciones de trabajo del pavimento se muestran en la Tabla 2.

El valor del módulo dinámico para la capa asfáltica fue tomado de ensayos sobre muestras obtenidas en el laboratorio de Asfaltos del Instituto Colombiano del Petróleo, dentro de la investigación realizada por los autores, titulada “Aditivos Mejoradores de Adherencia para Asfaltos”. Las conclusiones más importantes de este proyecto se encuentran publicadas en la revista de Corasfaltos “Asfaltos y Pavimentos”. La granulometría de la mezcla corresponde al huso medio de la especificación MDC-2 del Invías-96 para capa de rodadura de Mezcla Densa en Caliente. El asfalto utilizado fue una muestra de Apiay. La dosificación se efectuó con el método Marshall y el porcentaje óptimo de asfalto obtenido fue de 6.3 %. El valor del módulo dinámico que se empleó en el modelo se tomó a una temperatura de 25°C y a una frecuencia de 5 Hz.

El módulo de Poisson se define como la relación entre las deformaciones horizontal y vertical inducidas en la estructura del pavimento por acción de la carga. La variación de este parámetro no tiene una incidencia considerable en su comportamiento; por esta razón se emplean valores característicos como los de la Tabla 3, los cuales fueron tomados del documento “Caracterización de materiales viales. Su aplicación al diseño estructural de

Tabla 3.

Valores típicos de módulo de Poisson de las capas constitutivas

Capa	$\nu$
Capa asfáltica	depende de la temperatura
Base granular	0.40
Sub-base granular	0.45
Subrasante	0.49

Fuente: propia

pavimentos” de la Universidad del Cauca, en el cual se recopilan importantes trabajos de investigación de diferentes países incluido Colombia.

En el modelo desarrollado se incorporó la variación del módulo de Poisson respecto a la temperatura en la capa asfáltica utilizando la función, propuesta por la Universidad de Nottingham:

$$T < 10^{\circ}\text{C} \rightarrow \nu = 0.25 \text{ ó}$$

$$T > 10^{\circ}\text{C} \rightarrow \nu = 0.01 * T + 0.15$$

Esta función fue determinada teniendo en cuenta el rango de temperatura en el que normalmente se encuentran los pavimentos a nivel mundial. Nótese, la correspondencia con las temperaturas representativas utilizadas para la realización de las curvas maestras. De esta manera, el valor de  $\nu$  en la capa asfáltica bajo condiciones normales de temperatura ( $25^{\circ}\text{C}$ ) es aproximadamente 0,40.

La carga aplicada está representada por una presión vertical distribuida uniformemente sobre un área circular. Se ha demostrado que la presión transmitida equivale a la presión de inflado de las llantas. Como el modelo utilizado en este trabajo es tridimensional, es necesario especificar en el programa que la carga es aplicada en un área semicircular. El radio de carga empleado es de 0.108 metros bajo una presión de inflado de 560 kPa. La distancia entre ejes es de 0.324 m. El modelo está confinado en todas sus caras laterales. La cara vertical de simetría está restringida en sus movimientos horizontales en la dirección perpendicular debido a la simetría de la carga respecto a la cara. El movimiento vertical de la base de la estructura está restringido y su ubicación se establece en la medida que los desplazamientos de dicha base tiendan a cero. Las capas se consideran ligadas y la geometría utilizada busca aprovechar la característica cilíndrica de cada eje de carga dual, permitiendo un ahorro considerable en elementos y tiempo computacional. En la estructura del pavimento se toman en cuenta como parámetros de control, la deformación por tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica ( $\epsilon t$ ) y el esfuerzo vertical por compresión aplicado sobre la subrasante ( $\sigma v$ ). Se destaca que el esfuerzo de tracción en la fibra inferior de la capa asfáltica ( $\sigma t$ ) es un parámetro que puede establecer diferencias entre un modelo elástico y uno elastoplástico. En la Fig. 5 se indica la ubicación de estos parámetros en la estructura del pavimento.

El principio de cálculo consiste en la modelación de la estructura a partir de la definición de los espesores y características elásticas (módulo elástico y relación de Poisson) de cada capa para calcular las tensiones y desplazamientos provocados por una carga tipo e identificar

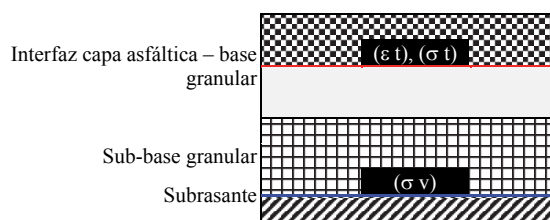


Figura 5. Ubicación de los parámetros de control en el diseño del pavimento.

Fuente: propia

la tensión máxima ( $\sigma t$ ) capaz de producir la rotura que se compara con el límite admisible del material ( $\sigma t_{adm}$ ) considerado para el tránsito propuesto. De igual manera, se compara el esfuerzo vertical ( $\sigma v$ ) y la capacidad portante del suelo de subrasante ( $\sigma v_{adm}$ ). El modelo se desarrolló en el programa de elementos finitos *Algor*<sup>®</sup>. Este modelador multifísico no dispone de un método directo que resuelva el problema de dimensionamiento de una estructura; se requiere que el proyectista efectúe la modelación de la estructura propuesta y la someta a verificación, pudiendo resultar una eventual modificación de la misma o de alguno de los parámetros de entrada. El principio del diseño racional consiste fundamentalmente de: modelar la estructura con elección del número de capas, espesores y características de los materiales; determinar las tensiones máximas que pueden provocar la degradación ( $\sigma t$ ) y ( $\sigma v$ ) y, comparar las tensiones calculadas con los valores límites admisibles para los materiales. Ahora bien, para ilustrar al lector acerca del programa *Algor*<sup>®</sup> se presenta una breve explicación de su estructura. Se compone de cuatro interfaces que realizan diferentes funciones: a) *Superdraw* contiene herramientas CAD que permiten construir un modelo geométrico, b) *Interfaz CAD* usada para generar mallas en modelos que provienen de dibujos CAD, c) *Editor FEA* para definir las propiedades del modelo y aplicar cargas y restricciones y d) *Superview* para ver los resultados del análisis. Los pasos típicos de un análisis de esfuerzos de elementos finitos empleando *Algor*<sup>®</sup> son esencialmente: crear una malla (una grilla de nodos y elementos) para discretizar el modelo; definir el sistema de unidades, las propiedades globales del modelo (tipo de análisis, solucionadores, opciones de salida de datos, etc.) las propiedades del elemento, aplicar las cargas y las condiciones de borde, ensamblar las matrices de rigidez del elemento, resolver el sistema algebraico de ecuaciones lineales, calcular los resultados y presentarlos. Estos pasos son abordados en tres fases, el preproceso, la solución y el posproceso.

BRICK es el nombre del elemento finito utilizado para modelar las capas de la estructura y está disponible en la librería de elementos del programa. Se trata de un elemento tridimensional (hexaedro) isotrópico definido por ocho nodos, tres grados de libertad traslacionales por nodo (UX, UY, UZ) y capacidad para representar estados de tensión y deformación en las tres dimensiones. En la Tabla 4 se ilustran la geometría, localización de nodos y propiedades del elemento.

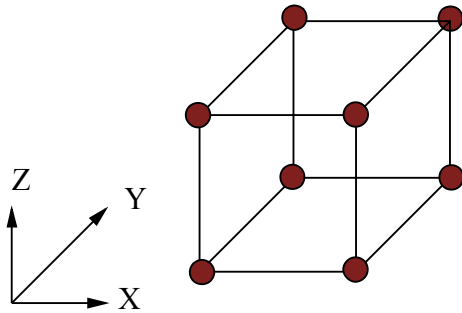


Figura 6. Elemento BRICK.  
Fuente: Algor® User Manual

Tabla 4.  
Datos de entrada del elemento finito

Nombre	BRICK
Grados de libertad	UX, UY, UZ
Propiedades del material	Módulo de Elasticidad, Densidad, Poisson
Cargas superficiales	Presiones aplicadas en las caras del elemento
Cargas de cuerpo	Temperaturas nodales

Fuente: propia

### 3. Resultados y Discusión

En el modelo desarrollado la hipótesis de compatibilidad en todas las capas es de *liga* que significa compatibilidad total en los desplazamientos horizontales y verticales. Los resultados de esfuerzo y deformación del modelo tridimensional elástico lineal se presentan por medio de isocontornos.

La Fig. 7 presenta una vista isométrica de la estructura. En ella se aprecia el dominio tridimensional constituido de dos cuartos de cilindro y un bloque rectangular de capas. La dirección de los ejes globales XYZ que se definen positivos a partir de la regla de la mano derecha, son tomados como base para interpretar los resultados de desplazamiento, deformación y esfuerzos globales. El modelo se representa sólo con la mitad del dominio ya que existe simetría de espejo respecto al eje X.

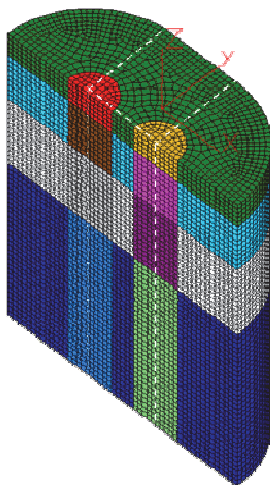


Figura 7. Vista isométrica del modelo.  
Fuente: propia

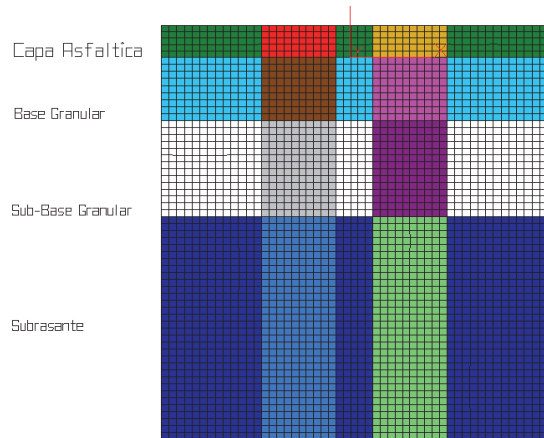


Figura 8. Dominio de la estructura. Vista frontal.  
Fuente: propia

En la *vista* frontal que se muestra en la Fig. 8 se visualiza el plano de simetría XZ del modelo, donde X denota al eje horizontal y Z al vertical. Se observa en esta vista, que los ejes X y Y están situados sobre la interfaz capa asfáltica-base granular. El origen del sistema de referencia se ubica justo en el cruce entre el plano de simetría XZ y el eje Y. Tanto en la vista tridimensional como en la frontal se distinguen claramente, la subrasante, la sub-base, la base y la capa asfáltica. En concordancia con la Fig. 5 y observando la Fig. 8, las etiquetas que permiten identificar cada una de las capas se encuentran ubicadas en el límite inferior de cada capa, pudiéndose distinguir claramente la ubicación de las interfaces y de cada capa en los resultados de isocontornos.

En adelante, los resultados de desplazamiento, esfuerzos y deformaciones por medio de isocontornos, se presentarán sobre el plano de simetría XZ visualizado en la vista frontal, por ser la sección más representativa del modelo de carga dual para el análisis tenso-deformacional de la estructura de pavimento y también por las condiciones de frontera del problema.

La Fig. 9 presenta en escala aumentada la curvatura adoptada por las capas debido al efecto de la carga dual que proporciona una idea de las posibles zonas de tracción o

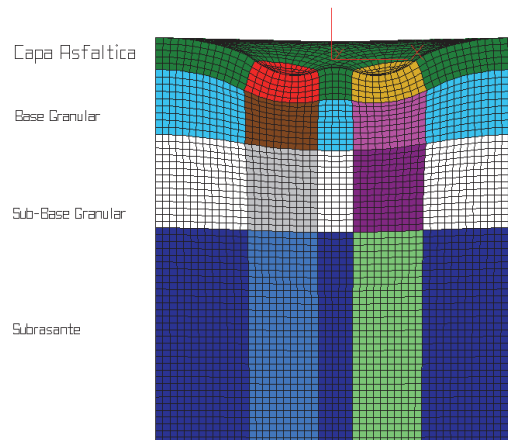


Figura 9. Deformada de la estructura por carga dual. Vista frontal.  
Fuente: propia

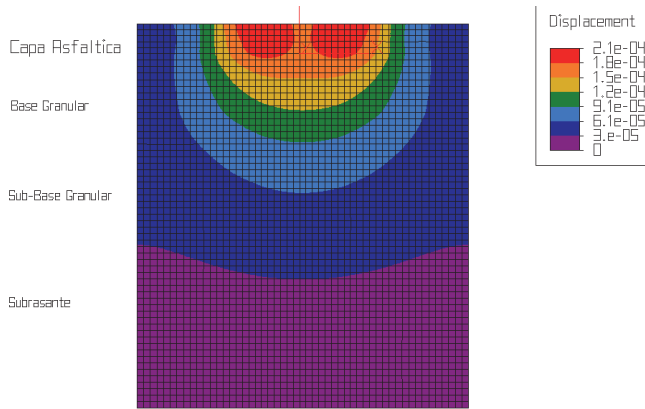


Figura 10. Isocontornos de desplazamiento total:  $[\delta]$ . Vista frontal.  
Fuente: propia

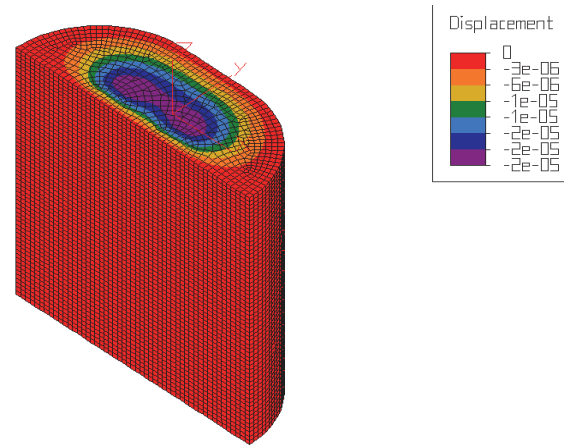


Figura 12. Isocontornos de desplazamiento horizontal en dirección Y:  $[\delta_y]$ . Vista isométrica.  
Fuente: propia

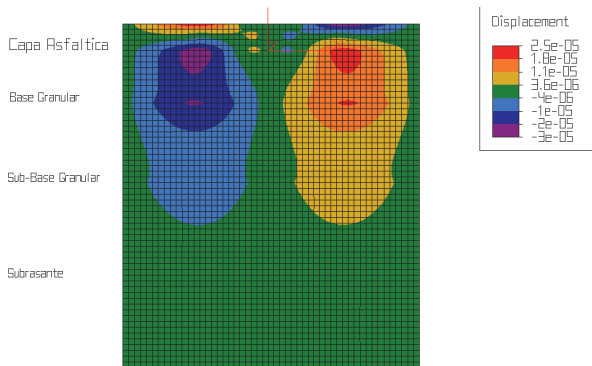


Figura 11. Isocontornos de desplazamiento horizontal en dirección X:  $[\delta_x]$ . Vista frontal.  
Fuente: propia

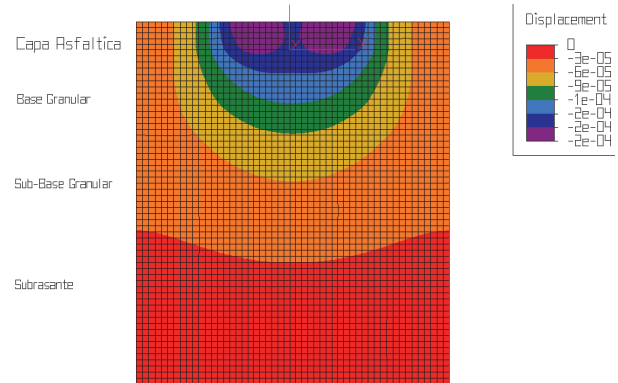


Figura 13. Isocontornos de desplazamiento vertical en dirección Z:  $[\delta_z]$ . Vista frontal.  
Fuente: propia

compresión de las fibras y de la disipación de la carga a través de las capas. Se observa en la superficie del modelo que las zonas cercanas a la carga tienden a acercarse al centro mientras que los puntos localizados a lado y lado del eje central Z en las capas inferiores tienden a alejarse. Las etiquetas que se encuentran en las interfaces sirven de guía para delimitar las capas y entender los resultados mostrados a través de isocontornos

La Fig. 10 presenta los isocontornos de desplazamiento total resultante de las tres componentes. Los dos isocontornos superiores indican la zona de mayor influencia de la carga dual.

Los isocontornos observados en la superficie de la capa asfáltica de la Fig. 11 indican el acercamiento de los puntos hacia el eje vertical Z. Por el contrario, en la interfaz capa asfáltica-base granular y las capas de base y sub-base, los isocontornos señalan que estos puntos tienden a alejarse del eje central. Los resultados de desplazamiento horizontal en dirección X presentan correspondencia con la geometría deformada.

En la Fig. 12 se aprecian los isocontornos de desplazamiento en la dirección Y. Los valores negativos en la superficie se interpretan como una tendencia de los puntos a acercarse en dirección perpendicular al plano vertical de simetría. El comportamiento coincide con el de la geometría deformada.

Por su parte, los valores negativos de desplazamiento vertical de la Fig. 13 indican hundimiento de las capas. Este comportamiento es lógico si se tiene en cuenta que la carga ejerce presión hacia abajo en la dirección negativa del eje global Z. El descenso de las capas también se observa en la geometría deformada.

La Fig. 14 indica la concentración de esfuerzos horizontales en dirección X (tensión) en la interfaz capa asfáltica-base como lo predicen teorías como la elástica lineal multicapa empleada por los programas *ALIZE III*, *Elsym5* y *DEPAV*. También se observa que en medio de los dos isocontornos de la interfaz capa asfáltica-base granular, existe una zona de compresión determinada por los valores negativos de esfuerzo. Este comportamiento se evidencia en la geometría deformada.

La concentración de esfuerzos horizontales en dirección Y (tensión) en la interfaz capa asfáltica-base granular, se presenta en la Fig. 15. En la interfaz no se aprecia ninguna zona de compresión como ocurre en los esfuerzos horizontales en dirección X. Además los esfuerzos de tensión en Y son mayores que en X, lo cual sugiere una tendencia natural a generar grietas con la repetición de carga a lo largo del eje de la vía.

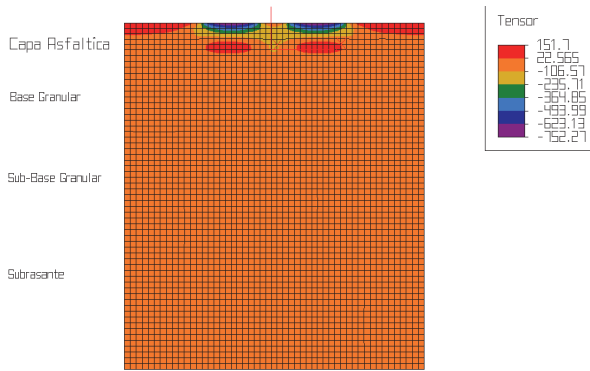


Figura 14. Isocontornos de esfuerzo horizontal en dirección X:  $[\sigma_x]$ . Vista frontal.

Fuente: propia

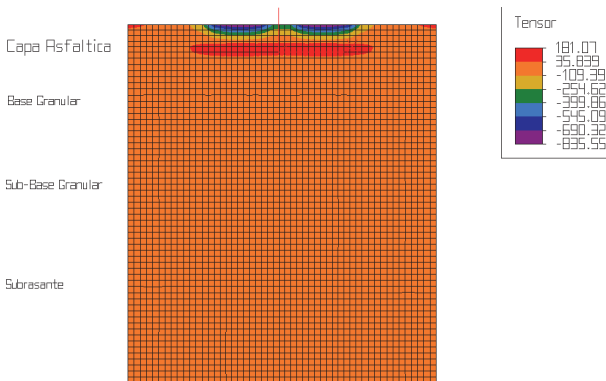


Figura 15. Isocontornos de esfuerzo horizontal en dirección Y:  $[\sigma_y]$ . Vista frontal.

Fuente: propia

En la Fig. 16 se observa la intersección de dos bulbos de esfuerzo vertical producido por la carga dual. También es clara la disipación del esfuerzo vertical a través de las capas. Esto significa, que los esfuerzos reducen su influencia a medida que se acercan a la subrasante, como es de esperarse en el diseño para garantizar la capacidad portante del suelo. Esta condición no es particular del modelo desarrollado, de hecho, las características que definen una estructura de pavimento flexible y la naturaleza de los materiales constitutivos de las capas, hacen que el módulo elástico se reduzca en la medida que se avanza en profundidad. Esto es, la capa más rígida y también la más solicitada por repetición de carga es la capa expuesta –superficial– o manto asfáltico, y la de menor rigidez es la capa más profunda –la subrasante–; por tanto, la condición de superposición de bulbos de esfuerzo vertical en dirección Z es general, tal como lo advierte el modelo presentado. Ahora bien, los valores de estos esfuerzos pueden cambiar en función de los valores de los módulos elásticos de las capas, no obstante, los bulbos siempre se presentarán de acuerdo a los conceptos de las teorías multicapa [6].

La distribución de isocontornos de la Fig. 17 señala una concentración de esfuerzos de corte en la capa asfáltica que podrían en un momento dado ser importantes en un mecanismo de falla en el caso de ser críticos con respecto a otros tipos de esfuerzo. Los esfuerzos cortantes comúnmente no se emplean como parámetro de control, sin embargo, sería importante evaluarlos por los posibles

efectos de daño que producirían, ya que de ser así deberían tenerse en cuenta en el diseño racional de pavimentos.

En la Fig. 18 se presenta la concentración de deformación horizontal en dirección X (deformación por tensión) en la interfaz capa asfáltica-base granular. Este resultado concuerda con el de esfuerzos, presentado en la Fig. 14. Se observa que en medio de los dos isocontornos positivos de la interfaz capa asfáltica-base granular, se encuentra una zona de compresión identificada por los valores negativos de los isocontornos de deformación que allí ocurren.

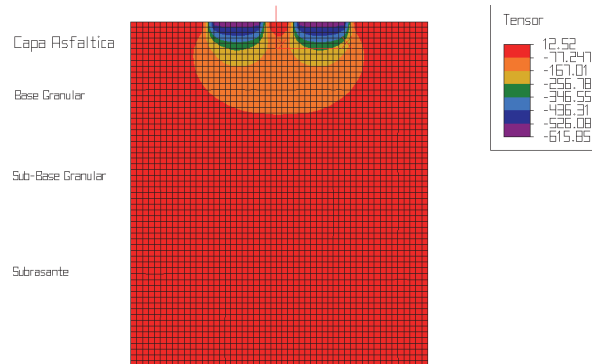


Figura 16. Isocontornos de esfuerzo vertical en dirección Z:  $[\sigma_z]$ . Vista frontal.

Fuente: propia

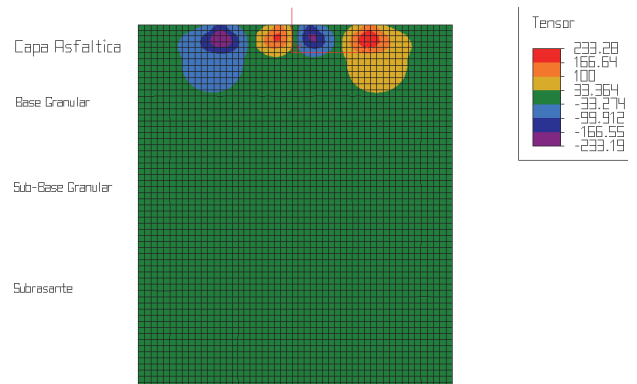


Figura 17. Isocontornos de esfuerzo cortante en el plano XZ:  $[\tau_{xz}]$ . Vista frontal.

Fuente: propia

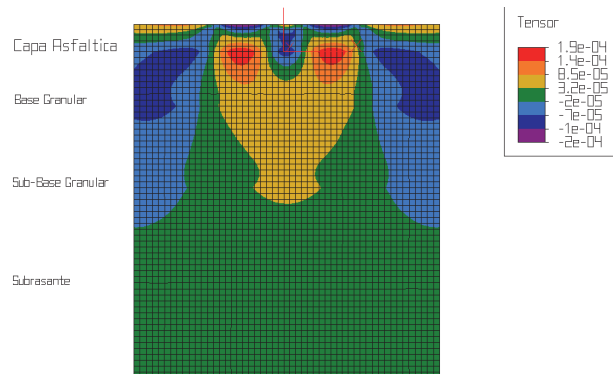


Figura 18. Isocontornos de deformación horizontal en dirección X:  $[\epsilon_x]$ . Vista frontal.

Fuente: propia

En la Fig. 19 se aprecia la concentración de deformación horizontal en dirección Y (deformación por tensión) en la interfaz capa asfáltica-base granular. Las deformaciones de tensión en esta dirección son mayores que las deformaciones en X, lo cual ratifica la tendencia natural a generar grietas con la repetición de carga a lo largo del eje de la vía. No se observan zonas de compresión en la interfaz.

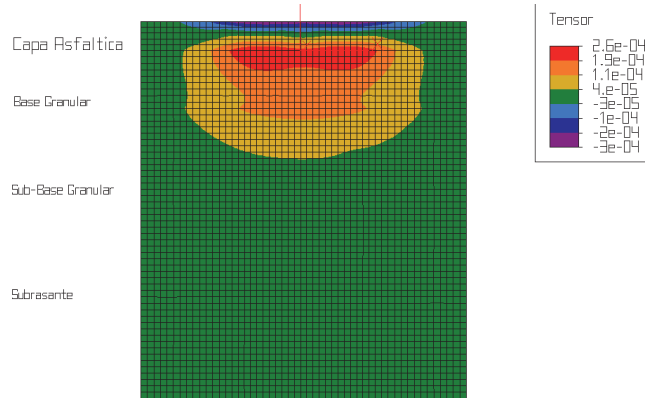


Figura 19. Isocontornos de deformación horizontal en dirección Y:  $[\epsilon_Y]$ . Vista frontal. Fuente: propia

Los resultados de deformación horizontal en dirección X (Fig. 18) difieren de los de deformación horizontal en dirección Y (Fig. 19), lo que advierte la inexistencia de simetría entre estos dos ejes y la importancia del modelado tridimensional de la carga dual. Nótese, que tal situación no ocurre cuando la carga aplicada es la de un eje simple, ya que en ese caso existe simetría axial (rotacional, radial o cilíndrica) alrededor del eje vertical Z por lo cual es suficiente y eficiente usar un modelo 2D para carga axisimétrica [10, 11].

La Fig. 20 muestra la intersección de dos bulbos de deformación vertical producida por la carga dual. Se observa una disminución del efecto de esta deformación en la subrasante. Los valores negativos denotan hundimiento en las capas.

La Fig. 21 indica que existen concentraciones de deformación por cortante que podrían ser importantes a la hora de un mecanismo de falla en el caso de ser críticos con respecto a otros tipos de deformación. En el análisis racional

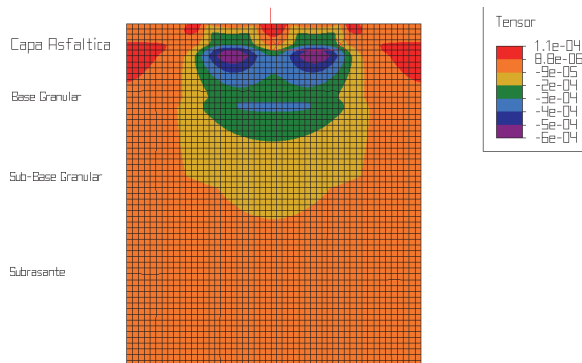


Figura 20. Isocontornos de deformación vertical en dirección Z:  $[\epsilon_Z]$ . Vista frontal. Fuente: propia

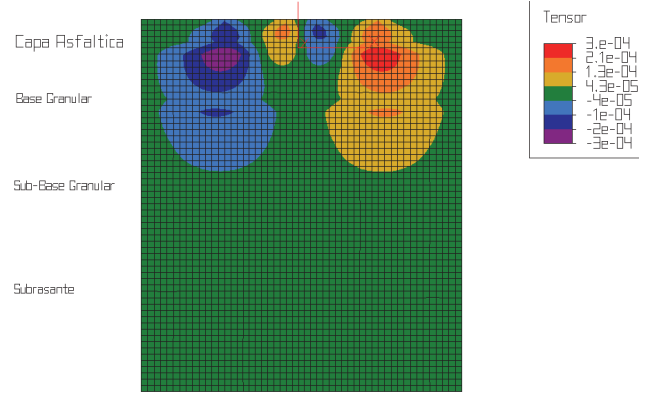


Figura 21. Isocontornos de deformación por cortante en el plano XZ:  $[\gamma_{XZ}]$ . Vista frontal. Fuente: propia

Tabla 5. Comparación de los parámetros de respuesta

Parámetro	Algor <sup>®</sup>	Elsym5	[%Var.]
$\epsilon_x$ [m]	0.190434E-3	0.1952E-03	2.4
$\epsilon_y$ [m]	0.262003E-3	0.2701E-03	3.0
Sz [kPa]	272.31	255.8	6.5
$\epsilon_{xz}$ [m]	0.483175E-5	0.4105E-05	17.7

Fuente: propia

debería introducirse la deformación y/o esfuerzo cortante como parámetros de diseño, sobre todo cuando son mayores por sobrecargas de impacto, como ocurre en las pistas de los aeropuertos.

Se compararon los resultados frente al programa elástico multicapa de cálculo de esfuerzos y deformaciones para diseño de pavimentos *Elsym5*. En la Tabla 5 se presentan comparaciones entre esfuerzos y deformaciones para los dos modelos bajo el eje de carga de una de las llantas.  $\epsilon_x$  y  $\epsilon_y$  representan las deformaciones horizontales en las direcciones X y Y, respectivamente; Sz (kPa) el esfuerzo vertical y  $\epsilon_{xz}$  es el esfuerzo cortante, en la interfaz capa asfáltica-base granular. Para la comparación se elaboró un modelo utilizando los mismos datos del modelo de *Algor<sup>®</sup>*. Sin embargo, se recomienda observar los porcentajes de variación como cantidades que señalan diferencias entre los dos modelos y no como porcentajes de error, ya que los algoritmos de cálculo de la teoría multicapa y elementos finitos, son considerablemente diferentes. Pese a ello, se encuentra que los resultados coinciden significativamente.

A partir de los datos consignados en la Tabla 5 se aprecia mayor porcentaje de variación entre los resultados de deformación por cortante,  $\epsilon_{xz}$ . Las variaciones se pueden reducir refinando la malla de elementos finitos en las zonas de carga y alejando aún más las fronteras en el modelo. Estas consideraciones incrementarían notablemente el tiempo computacional. Los resultados encontrados son satisfactorios. Sin embargo queda abierto un camino de investigación y de mejoramiento de los modelos que es factible, dada la flexibilidad del método de los elementos finitos para tratar complejidades geométricas y de material.



#### 4. Conclusiones

El método de elementos finitos demuestra su superioridad respecto a otras metodologías y marca un camino a seguir para realizar diseños de pavimentos más ajustados a comportamiento real en dos y tres dimensiones. En una segunda fase se propone realizar las actividades de calibración pertinentes y la verificación de los modelos, para determinar su grado de validez. Sin embargo debe destacarse que el desarrollo de los modelos numéricos en sí mismos constituye una importante herramienta para futuras investigaciones en el campo del análisis y diseño de pavimentos.

El esfuerzo y la deformación de corte son datos no empleados normalmente como parámetro de control en el diseño de pavimentos; sin embargo, los modelos de elementos finitos advierten la existencia de concentraciones de esfuerzos de corte que probablemente induzcan fallas importantes a la estructura. Mediante la implementación de un modelo numérico adecuado podría predecirse de manera más clara su influencia, y la relevancia de tenerlo en cuenta en el diseño. Para pistas de aeropuertos, el cálculo de esfuerzos de corte tiene gran importancia si se tiene en cuenta que el impacto de los aviones durante el proceso de aterrizaje produce esfuerzos de corte de magnitud considerable. Se advierte que programas de amplio uso por los diseñadores como *Elsym5* tienen la posibilidad de calcular la condición esfuerzo-deformación de corte, sin embargo, estos datos no son usados de manera convencional en el diseño racional de pavimentos.

Se recomienda usar los resultados de los modelos numéricos de elementos finitos con criterio y rigor matemático, físico e ingenieril, para tomar decisiones basadas en las restricciones e hipótesis propias de los modelos; de otra manera puede llegarse a concepciones erradas o poco ajustadas a la realidad. No debe olvidarse que todo modelo matemático o físico es una aproximación a la realidad, y que es imprescindible reconocer el alcance de las teorías que sustentan las predicciones halladas.

En el modelo tridimensional puede observarse la interacción de los esfuerzos y deformaciones bajo un eje de carga doble. Con ello, se obtiene un sistema de análisis completo del comportamiento de la estructura, que permite tener en cuenta todas las solicitaciones para un diseño racional de pavimentos.

El método de los elementos finitos presenta la ventaja de permitir un estudio detallado del comportamiento tenso-deformacional del pavimento ante carga dual y la herramienta de posproceso permite analizar fácilmente los resultados por medio de gráficas de isocontornos.

Se recomienda profundizar en etapas futuras de la investigación en aspectos como la liga entre capas y modelos constitutivos de los materiales, entre los tópicos más importantes.

#### Referencias

- [1] Álvarez, A., Análisis de sistemas asfalto-agregado a partir de mediciones de energía superficial libre. *DYNA*. 79 (175), pp. 111-119, 2012.
- [2] David, M. and Potts, L.Z., *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering – Theory*, London: Thomas Telford Publishing, 2009.

- [3] Fonseca, E. y Rodríguez, W., Modificación de asfaltos con poliolefinas. *Memorias de las Segundas Jornadas Internacionales del Asfalto*, 2000.
- [4] Huang, B., Tutumluer, E., et al., *Paving materials and pavement analysis*. Shanghai: ASCE, 2010. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784411049>
- [5] Jaritngam, S., Analysis of stress, strain and deflection of pavements using finite element method. *Journal of Society for Transportation and Traffic Studies*, 1 (4), pp. 51-59, 2010.
- [6] Kim, M., Three-dimensional finite element analysis of flexible pavements considering nonlinear pavement foundation behavior. Ph D. Thesis, Civil Engineering University of Illinois, Urbana-Champaign, USA, 2003.
- [7] Kringos, N., Birgisson, B., Frost, D. and Wang, L. Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials, *Proceedings of the International RILEM Symposium: Estocolmo*, Springer, 2013.
- [8] Nilaward, T., Shih, C., White, T.D. and Ting, E.C., Development of a 3D Finite Element Program for Pavement Analysis, Volume I: Introduction and Appendix 1. Publication FHWA/IN/JHRP-96/21-1. Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, WestLafayette, Indiana, 1998.
- [9] Papagiannakis, A.T., Masad, E.A., *Pavement Design and Materials*. Texas: John Wiley & Sons, 2008.
- [10] Rodríguez, W. y Pallares, M.R., Desarrollo de un modelo de elementos finitos para el diseño racional de pavimentos. *Memorias de las Cuartas Jornadas Internacionales del Asfalto*, 2004.
- [11] Rodríguez, W., Pallares, M.R. y Rodríguez, J., Modelo numérico de la estructura del pavimento con y sin geomallas, XV Simposio Colombiano de Ingeniería de Pavimentos, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2005.
- [12] Salgado, M., Rodríguez W., Guzmán J. y Rodríguez J.C., Análisis comparativo de resultados obtenidos en ensayos de tensión indirecta efectuados a briquetas. *Memorias de las Cuartas Jornadas Internacionales del Asfalto*, 2004.
- [13] Samir, N.S., *Finite Element for Pavement Analysis and Design*. Charleston: West Virginia University Press, 1998.

**W. Rodríguez-Calderón**, received the Bsc. Eng. in Civil Engineering in 1998, from the Universidad Industrial de Santander, Colombia, the MSc degree in Numerical Methods in Engineering in 2002, from the Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia. He has worked as a professor and researcher for over fifteen years. Currently, he is a Full Professor in the Civil Engineering Program, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. His research interests include: simulation, modeling; statistical and computational intelligence techniques; and optimization using metaheuristics.  
ORCID: 0000-0001-9016-433X

**M.R. Pallares-Muñoz**, received the Bsc. Eng. in Civil Engineering in 1998, from the Universidad Industrial de Santander, Colombia; the MSc. degree in Numerical Methods in Engineering in 2004 from the Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, Colombia. She has worked as a professor and researcher for over ten years. Currently, he is a Full Professor in the Civil Engineering Program, Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana, Colombia. Here research interests include: simulation and computational modeling.  
ORCID: 0000-0003-4526-2357