

# COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE, ESFUERZOS – DEFORMACIONES Y DEFLEXIONES

Recepción:  
Enero 29 de 2012

Aceptado:  
Febrero 25 de 2012

Carlos Hernando Higuera Sandoval  
Msc. en Ingeniería de Vías Terrestres  
Investigador grupo GRINFRAVIAL  
Escuela de Transporte y Vías  
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia  
Tunja, Colombia  
Carlos.higuera@uptc.edu.co

## Resumen

El presente trabajo de investigación fue realizado con el apoyo de la División de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y muestra el comportamiento de los estados tensionales: esfuerzos, deformaciones y deflexiones actuantes en una estructura de pavimento flexible. Para el análisis se adoptó una estructura típica de pavimento flexible compuesta por cuatro capas: capa asfáltica, base granular, subbase granular y subrasante. Dicha estructura de pavimento cumple con los criterios de diseño: fatiga, deformación y deflexión.

## Palabras Claves:

Estados tensionales, esfuerzos, deformaciones, deflexiones, diseño de pavimentos flexibles, mecánica de pavimentos.

## Abstract

The present investigation shows the behavior of stress states, stress, strain and deflection acting on a flexible pavement structure. The analysis adopted a flexible pavement structure typical of four layers: asphalt, aggregate base, subbase granular subgrade. This pavement structure meets the design criteria: fatigue, deformation and deflection.

## Key Words:

Deflection, deformation, flexible pavement design, pavement mechanics, stress, strain.

## Introducción

El objetivo del presente trabajo de investigación es conocer el comportamiento y la magnitud de los estados tensionales (esfuerzos, deformaciones y las deflexiones) de una estructura de pavimento flexible, mediante la aplicación de la mecánica de pavimentos, de manera de tenerlos en cuenta en el diseño de las estructuras.

La mecánica de pavimentos se ha desarrollado con especial vigor durante las tres últimas décadas, en procura de optimizar el diseño y la evaluación de las estructuras de pavimentos, teniendo en cuenta las características de las cargas del tránsito, las propiedades de los materiales y los espesores de las capas que conforman un pavimento. Todas las teorías modernas sobre diseño de estructuras de pavimentos están basadas en la mecánica de pavimentos, y mediante la aplicación de los diferentes procedimientos es posible cuantificar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en cualquier punto de un pavimento y determinar su comportamiento estructural y funcional. (Higuera, 2008).

El desarrollo del conocimiento sobre mecánica de pavimentos es muy reciente. Las primeras teorías fueron formuladas por Westergaard, Burmister, Boussinesq, Palmer, Barber, Odemark, Kirk, Jones, Peattie, Nielson, Foster, Ahlvin, Sanborn y otros más. En 1975, Eldon Joseph Yoder y Matthew Witczak publicaron el texto Principios para el diseño de pavimentos, que se constituyó, para esa época, en un documento esencial para la enseñanza de la mecánica de pavimentos, acorde con las teorías desarrolladas del diseño racional de pavimentos, como fue el caso del método SHELL. Para la época comprendida entre los años 1975 y 1990, la aplicación de la mecánica de pavimentos fue muy restringida y se centró en modelos estructurales de una, dos y tres capas, debido a la dificultad de los procedimientos de cálculos para determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones de un modelo estructural de pavimentos. (Huang, 2004)

En las últimas décadas las publicaciones sobre mecánica de pavimentos han sido muy limitadas, pero se destacan las de los ingenieros Félix J. Lilli, Fredy Reyes Lizcano, Carlos Hernando Higuera Sandoval y Yang H. Huang, entre otros.

Metodología. Para el análisis y estudio del comportamiento de los estados tensionales se tomó una estructura típica de pavimento flexible integrada por cuatro capas: capa asfáltica o de rodadura, capa de base granular, capa de subbase granular y la capa de fundación o apoyo denominada comúnmente subrasante.

El modelo estructural de pavimento flexible, está compuesto por los parámetros de carga (carga aplicada – P, la presión de contacto – q, y el radio de carga – a) y la caracterización de cada una de sus capas (espesor – hi, módulo de elasticidad – Ei, y la relación de Poisson –  $\mu_i$ ), tal como se indica en la Figura 1. Se considera que existe completa fricción en la interfase de las capas del modelo estructural de pavimento flexible. Para facilitar el análisis se adoptó un plato de carga circular correspondiente al semieje estándar adoptado para Colombia.

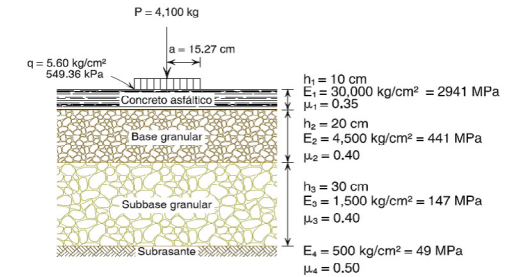


Figura 1. Modelo estructural de referencia de pavimento

## Modelación

La determinación de los esfuerzos, deformaciones y la deflexión del modelo estructural de referencia se realizó con ayuda del programa BISAR 3.0 de la SHELL. Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles se calculan en base a las leyes de comportamiento de acuerdo a los criterios de la Shell, los criterios de los Ingenieros Dormon – Kerhoven y la CRR de Bélgica, y el criterio de Yang Huang. (Higuera, 2006). A continuación se describe el cálculo de cada uno de ellos:

Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica,  $E_r adm$ . De acuerdo con el criterio de la Shell, la ley de comportamiento de la deformación radial admisible de tracción en la base de las capas asfálticas es la siguiente:

$$\epsilon_{r adm} = (0.856 V_b + 1.08) E_1^{-0.36} \left( \frac{N}{K} \right)^{-0.20} \quad (1)$$

Donde:

- Er adm.: Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica.
- Vb: Porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla asfáltica.
- E1: Módulo dinámico de la capa asfáltica, N/m<sup>2</sup>.
- N: Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- K: Coeficiente de Calage.



Deformación vertical admisible por compresión sobre la subrasante,  $Ez_{adm}$ . De acuerdo con el criterio de la Shell, la ley de comportamiento de la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante, para un nivel de confianza del 85%, es la siguiente:

$$\epsilon_{z_{adm}} = 2.10 \times 10^{-2} N^{-0.25} \quad (2)$$

Donde:

$Ez_{adm}$ : Deformación vertical admisible por compresión sobre la subrasante.

N: Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante,  $z_{adm}$ . El esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante se determina de acuerdo a los criterios de Dormon – Kerhoven y la CRR de Bélgica, los cuales son los siguientes:

• Criterio de Dormon – Kerhoven.

El esfuerzo admisible de compresión sobre la subrasante se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\sigma_{z_{adm}} = \frac{0.007 \times E_s}{1 + 0.7 \times \log N} \quad (3)$$

Donde:

$\sigma_{z_{adm}}$ : Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, kg/cm<sup>2</sup>.

N: Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

Es: Módulo resiliente de la subrasante, Kg/cm<sup>2</sup>

• Criterio de la CRR de Bélgica.

El esfuerzo admisible de compresión sobre la subrasante se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\sigma_{z_{adm}} = \frac{0.9607 \times CBR^{1.2}}{N^{0.229}} \quad (4)$$

Donde:

$\sigma_{z_{adm}}$ : Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, kg/cm<sup>2</sup>.

N: Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

CBR: Capacidad de soporte de la subrasante, %.

Determinación de la deflexión admisible de la estructura del pavimento,  $\sigma_{z_{adm}}$ . La deflexión admisible de la estructura de referencia se calcula por medio del criterio de Yang H. Huang, de la siguiente manera:

$$\Delta_{z_{adm}} = 26.32202 N^{-0.2438} \quad (5)$$

Donde:

$\sigma_{z_{adm}}$ : Deflexión admisible de la estructura de referencia, mm.

N: Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

### Diagramas

Para el modelo estructural que se presenta en la Figura 1, se pretende conocer el comportamiento de los esfuerzos, las deformaciones y las deflexiones, en función de la profundidad, o a lo largo del espesor de la estructura del pavimento flexible de referencia. El análisis se realizó con ayuda del programa BISAR 3.0 de la SHELL, el cual permite calcular los estados tensionales de una estructura de pavimento flexible en cualquier punto de interés, bajo las condiciones de carga y propiedades de las capas que conforman la estructura.

Metodológicamente se seleccionaron 10 puntos de análisis, tal como se muestran en la Figura 2, ubicados a 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y 240 cm a partir del eje de simetría del

sistema con el objeto de analizar la variación de los estados tensionales en el eje de simetría del sistema y en la zona del cuenco de deflexión que genera la carga del tránsito en la estructura del pavimento flexible.

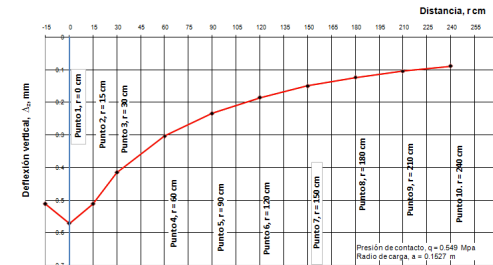


Figura 2. Puntos de análisis de los estados tensionales.

## Desarrollo

En el presente numeral se describe el comportamiento o tendencias de los estados tensionales del modelo estructural de referencia en estudio, permitiendo observar y analizar el comportamiento de los esfuerzos, las deformaciones y deflexiones en un mismo plano de influencia. El análisis se realizó para los 10 puntos de estudio, ubicados a una distancia horizontal (r) de 0, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y 240 centímetros medidos desde el eje de simetría o de carga del sistema y para una variación de la profundidad (Z) de 0 a 100 centímetros, del modelo de referencia de pavimento flexible, tal como se indica a continuación.

### Análisis de las deformaciones

Deformación radial, Ex. Del análisis de la Figura 3 se deduce las siguientes tendencias:

- En la superficie de la estructura del pavimento la deformación radial es de compresión y pasa a ser de tensión a medida que se incrementa la profundidad.
- Para la estructura en estudio, puntos 1 a 3, aproximadamente en la mitad del espesor de la capa asfáltica la deformación radial es nula, para los puntos 4 a 10 la deformación radial es casi cero en la base de la capa asfáltica, tal como se

visualiza en la Figura 3.

- La deformación radial tiende a ser menor a medida que el punto de estudio se aleja del centro de simetría del sistema.
- La máxima deformación radial se presenta en el contacto entre la base granular y la subbase granular, tal como se indica en la Figura 3, para los puntos más cercanos al eje de simetría del sistema, r menor de 90 cm.
- A partir del punto 5, r = 90 cm la deformación radial se reduce notablemente en su magnitud de manera tiende a cero.
- La deformación radial en la base de la capa asfáltica es un parámetro de diseño para controlar la fatiga a tensión de las mezclas asfálticas.

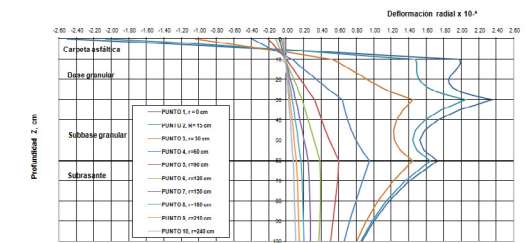


Figura 3. Variación de la deformación radial de los puntos de estudio

Deformación tangencial,  $Ez$ . Del análisis de la Figura 4 se deduce las siguientes tendencias:

- En la superficie de la estructura del pavimento la deformación tangencial es de compresión, para los puntos 1 y 2, pasa a ser de tensión a medida que se incrementa la profundidad. Para los punto 3 a 10 en la superficie la deformación tangencial es de tensión y a medida que se incrementa la profundidad la deformación tangencial es de compresión, tal como se muestra en la Figura 4.
- Para la estructura en estudio, aproximadamente en la mitad del espesor de la capa asfáltica la deformación tangencial es nula, para los diferentes puntos de estudio tal como se visualiza en la Figura 4.
- La deformación tangencial tiende a ser menor a medida que el punto de estudio se aleja del centro de simetría del sistema.



- La máxima deformación tangencial se presenta en el contacto entre la base granular y la subbase granular.
- A partir del punto 5,  $r = 90$  cm la deformación tangencial se reduce notablemente en su magnitud.

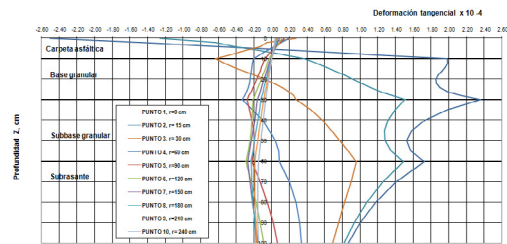


Figura 4. Variación de la deformación tangencial de los puntos de estudio

Deformación vertical,  $E_z$ . Del análisis la Figura 5 se deduce las siguientes tendencias:

- En la superficie de la estructura del pavimento la deformación vertical es de tensión, para los puntos cercanos al eje de simetría del sistema, y pasa a ser de compresión medida que se incrementa la profundidad tal como se visualiza en la Figura 5.

- La deformación vertical tiende a ser menor a medida que el punto de estudio se aleja del centro de simetría del sistema.

- La máxima deformación tangencial se presenta en el contacto entre la capa asfáltica y la base granular, tal como se indica en la Figura 5.

- A partir del punto 5,  $r = 90$  cm la deformación vertical se reduce notablemente en su magnitud.

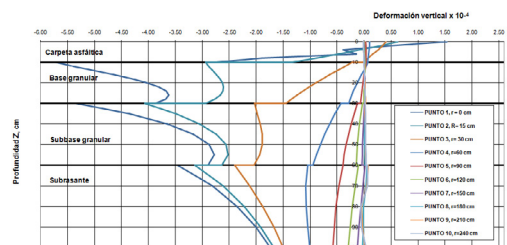


Figura 5. Variación de la deformación vertical de los puntos de estudio

## Análisis de los esfuerzos

Esfuerzo radial,  $\sigma_r$ . Del análisis de la Figura 6 se deduce las siguientes tendencias:

- En la superficie de la estructura del pavimento el esfuerzo radial es de compresión y pasa a ser de tensión.

- A medida que se incrementa la profundidad, para las capas del paquete estructural, tal como se visualiza en la Figura 6. En la capa de subrasante el esfuerzo radial es de compresión y tiende a ser muy pequeño.

- Para el caso en estudio el máximo esfuerzo radial a compresión de 1.428 MPa y se presenta en la superficie del pavimento en el eje de simetría del sistema.

- El máximo esfuerzo radial se presente en el eje de simetría del sistema y se va disminuyendo a medida que el punto de análisis se aleja del centro de simetría del sistema y con la profundidad.

- A partir del punto 5,  $r = 90$  cm el esfuerzo radial disminuye de manera significativa y tiende a tener magnitudes muy pequeñas cercanas a cero.

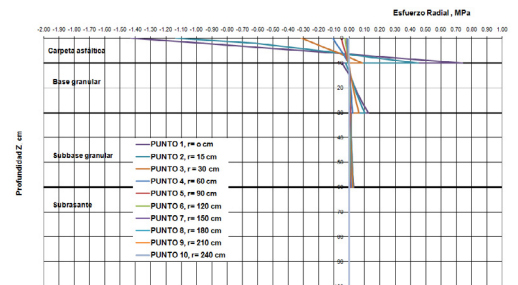


Figura 6. Variación del esfuerzo radial de los puntos de estudio

Esfuerzo tangencial,  $\sigma_t$ . Del análisis de la Figura 7 se deduce las siguientes tendencias:

- El esfuerzo tangencial presenta un comportamiento aleatorio, pasando según el punto de estudio y la profundidad de análisis, de tensión a compresión o viceversa, tal como se muestra en la Figura 7.

- Para el caso en estudio el máximo esfuerzo tangencial es de compresión de 1.428 MPa y se presenta para el punto 1 ubicado en el eje

de simetría del sistema y en la superficie de la estructura del pavimento.

- El máximo esfuerzo tangencial se presente en el eje de simetría del sistema y se va disminuyendo a medida que el punto de análisis se aleja del centro de simetría del sistema.

- A partir del punto 5,  $r = 90$  cm el esfuerzo tangencial disminuye de manera significativa y tiende a tener magnitudes muy pequeñas cercanas a cero.

- A nivel de la subrasante el esfuerzo tangencial es muy pequeño cercano a cero.

Esfuerzo vertical,  $\sigma_z$ . Del análisis de la Figura 8 se deduce las siguientes tendencias:

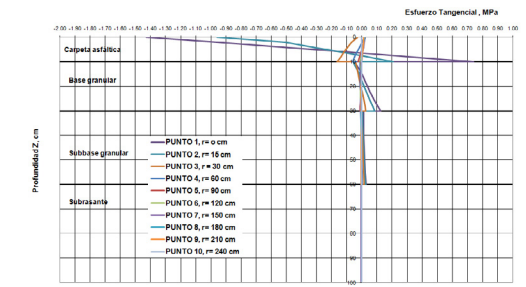


Figura 7. Variación del esfuerzo tangencial de los puntos de estudio

- En la superficie de la estructura del pavimento, los punto 1 y 2 tienen influencia directa del esfuerzo vertical, los demás puntos de estudio no se ven afectados.

- El máximo esfuerzo vertical corresponde al punto 1, a nivel de la superficie del pavimento y su magnitud es equivalente a la presión de contacto. Para el caso en estudio la presión de contacto de 0.549 MPa.

- La disipación del esfuerzo vertical es función de los espesores y de los módulos de elasticidad de las diferentes capas de la estructura del pavimento. Entre mejor sea la calidad de los materiales de las diferentes capas, el esfuerzo vertical que llega a la subrasante es menor y este parámetro es básico para el diseño y controlar la deformación o el ahuellamiento de las estructuras de pavimentos flexibles.

- Para el caso en estudio la capa asfáltica disipa el 46.95% del esfuerzo vertical, la capa de base granular disipa el 40.47% del esfuerzo vertical y la capa de subbase granular el 9.21%. El conjunto

de capas disipa el 87.42% y solamente le llega a la subrasante el 3.37% del esfuerzo vertical.

## Análisis de las deflexiones

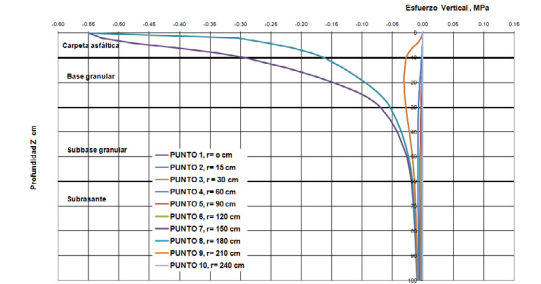


Figura 8. Variación del esfuerzo vertical de los puntos de estudio

En la Figura 9 se muestran los perfiles de deflexión para cada punto de estudio y en la Figura 10 se muestran los cuencos de deflexión para las profundidades Z de 0, 10, 30, 60 y 100 centímetros.

Del análisis de las Figura 9 y 10 se deduce lo

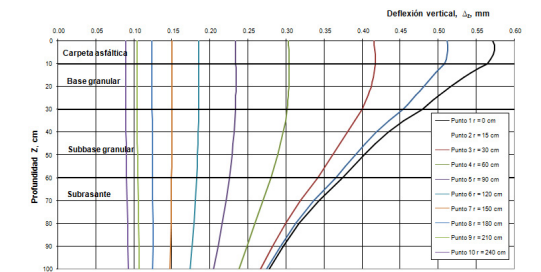


Figura 9. Deflexión de los puntos de estudio

siguiente:

- En un modelo estructural de pavimento flexible, la mayor deflexión se presenta en el punto de aplicación de la carga generada por el tránsito, o sea en el eje de simetría del sistema donde  $r = 0$  y cuando  $Z = 0$ . Para el caso del modelo de referencia en estudio, la deflexión máxima es de 0.5715 mm tal como se indica en la Figura 9.

- A medida que el punto de análisis se aleja del eje de simetría del sistema, la deflexión decrece

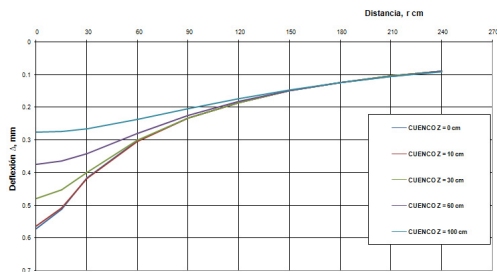


Figura 10. Cuencos de deflexión a una profundidad Z de 0, 10, 30, 60 y 100 cm

rápidamente en los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 que corresponden al tramo donde  $r = 0$  a 90 cm. Para los puntos 6, 7, 8, 9 y 10 que se encuentran en el tramo donde  $r = 90$  a 240 cm la deflexión decrece lentamente. Para los puntos 8, 9 y 10 la deflexión es prácticamente la misma en toda su profundidad. La Figura 10 presenta los cuencos de deflexión para las profundidades de  $z = 0, 10, 30, 60$  y  $100$  cm y se aprecia la disminución de la deflexión en todo su cuenco.

• La deflexión en un modelo estructural de pavimento flexible se disipa en función de los espesores de la capa asfáltica, las capas granulares de base y subbase y la calidad de la subrasante expresada en sus módulos de elasticidad. (Ver Figura 9).

• Para el caso del modelo en estudio, punto 1, la capa asfáltica disipa una deflexión de 0.0072 mm (1.26%), la capa de base granular 0.0859 mm (15.03%), la capa de subbase granular 0.1041 mm (18.22%), o sea que la disipación del paquete estructural es de 0.1972 mm (34.51%) y la subrasante absorbe la restante deflexión de 0.3743 mm (65.49%). La deflexión total de 0.5715 mm se descompone como la deflexión del paquete estructural 0.1972 mm y la deflexión de la subrasante 0.3743 mm.

De acuerdo al análisis de las Figuras 9 y 10 a partir del punto 7,  $r = 150$  cm la deflexión de la subrasante es prácticamente la misma de la deflexión total del modelo estructural.

## Conclusiones

Las conclusiones generales de la investigación realizada son las siguientes:

- Para evaluar el comportamiento estructural y funcional de una estructura de pavimento flexible es de suma importancia conocer el comportamiento de los estados tensionales que se generan al interior de la estructura de pavimento y para ello la mecánica de pavimentos nos permite realizar este análisis.

- Cualquier punto de una estructura de un pavimento está sometida a esfuerzos, deformaciones y deflexiones que pueden ser calculados mediante el empleo de la mecánica de pavimentos.

- La máxima magnitud de las variables de los estados tensionales se presenta en el punto de la aplicación de la carga sobre la estructura del pavimento y va disminuyendo a medida que se aleja del punto de aplicación de la carga en un contorno que puede llegar hasta los 2.4 m, donde la magnitud de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones es muy pequeña.

- En mecánica de pavimentos la magnitud de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones es relativamente pequeña, pero si consideramos el efecto cíclico de la aplicación de las cargas del tránsito y las solicitaciones de la estructura del pavimento, los estados tensionales superan a los valores admisibles de los materiales y se produce la fatiga, el ahuellamiento y la deformación de la estructura del pavimento. Por esta razón, en el diseño racional o mecanicista de las estructuras de pavimentos se debe controlar la magnitud de los estados tensionales.

- La aplicación de este tipo de investigaciones permite evaluar el comportamiento de una estructura de pavimento flexible en los puntos de aplicación de las cargas del tránsito y en sus contornos o cuencos generados y la evaluación de la superposición de efectos o estados tensionales en los carriles de una calzada.

- Para el diseño de las estructuras de pavimentos flexibles se determinan como mínimo las magnitudes de los estados tensionales en los

siguientes puntos, los cuales se deben comparar con los valores admisibles de manera de cumplir con los criterios de diseño de fatiga, deformación y deflexión.

- La zona de concentración de las mayores magnitudes de los estados tensionales (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) se presenta en un área circular de 90 centímetros de radio, para el caso en estudio los puntos 1 al 5. El área entre 90 cm a 180 cm de radio presenta una leve disminución de los estados tensionales, para el caso en estudio los puntos 5 al 8 y para áreas mayores de 180 cm de radio la magnitud de los estados tensionales es muy pequeña tendiendo a cero, para el caso del estudio los puntos 8 al 10.

Las recomendaciones para futuros estudios son las siguientes:

- Realizar las modelaciones considerando otros modelos estructurales de pavimentos flexibles que contemplen capas estabilizadas ya sea con asfalto, cemento cal u otros aditivos químicos.

- Realizar modelaciones variando los espesores de las capas asfálticas y las rigideces de las capas.

- Considerar otros puntos de análisis con el objeto de evaluar completamente el comportamiento de los estados tensionales en los cuencos que generan las cargas del tránsito.

- Analizar el comportamiento de la deflexión de la subrasante a partir del punto 8,  $r = 180$  cm, la cual presenta un comportamiento mayor que la deflexión en la superficie del pavimento del orden de milésimas de milímetro, parece ser que se presenta un levantamiento de la subrasante.

## Agradecimientos

El autor agradece al Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial – GRINFRAVIAL – de la Escuela de Transporte y Vías de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por el apoyo brindado en la realización de la presente investigación.

## Referencias Bibliográficas

Higuera S, Carlos Hernando. (2006). Comportamiento de la deflexión en función de los parámetros de diseño de una estructura de pavimento. Trabajo de investigación. Escuela de Transporte y Vías. Facultad de Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja. 25-30.

Higuera S, Carlos Hernando. (2008). Mecánica de pavimentos – Principios básicos. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. ISBN 978-958-660-122-1 Tunja. 126-130.

Higuera S, Carlos Hernando. (2010). Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimento para carreteras. Volumen II. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, ISBN 978-958-660-152-8, Tunja. 28-29.

HUANG, Yang H. (2004). Pavement analysis and design. Prentice – Hall. Inc. United State of America. Segunda edición. 45-46.

SHELL. (1975) Manual del usuario del programa BISAR 3.0.

YODER, Eldonnd y WITCZAK, Matthew. (1975). Principles of pavement design. New York. 25-27.