



**ENTRE MODELACION DE RESPUESTAS DE  
PAVIMENTOS FLEXIBLES CON ANALISIS DE  
MULTICAPA ELASTICA, Y ELEMENTO FINITO**

Paulina Leiva<sup>1</sup>, Luis G. Loría<sup>2</sup>, Alejandro Navas<sup>3</sup>

**Copyright 2011, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP**

Este Trabajo Técnico, elaborado para ser presentado en el *XVI CILA – Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto* a realizarse entre el 20 y el 25 de noviembre de 2011 en Rio de Janeiro, fue seleccionado por el Comité Técnico del evento para dicho fin, de concordancia con las informaciones contenidas en el resumen sometido por el/los autor(es). Tal cual presentado, su contenido no fue revisado por el IBP. Por ende, los organizadores no traducirán ni corregirán los textos recibidos. La versión original del material presentado no refleja necesariamente las opiniones del *Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis*, sus Asociados y Representantes. El/los autores de este Trabajo Técnico tienen pleno conocimiento de esto y aprueban su publicación en los Anales del *XVI CILA – Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*.

## Resumen

La determinación de las respuestas de un pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) ante diversas condiciones de carga y propiedades de materiales componentes, es fundamental para el adecuado diseño y modelación de desempeño de las estructuras de pavimento. En particular, las metodologías de diseño mecanicistas requieren de una determinación precisa de dichas respuestas. Esta investigación compara las respuestas de una estructura de pavimento flexible sometida a carga estática y dinámica, mediante la utilización de diversas metodologías de análisis, a saber: teoría de multicapa elástica (MCE), teoría de viscoelasticidad (VE) y el método del elemento finito (FEM, abreviatura en inglés). Para tales efectos, se usaron diversas herramientas informáticas, para MCE se usó el software llamado EVERSTRESS, BISAR, DEPAV, 3D MOVE, para VE, y FEM se utilizó ABAQUS. En particular FEM ofrece la oportunidad de modelar la presión de contacto llanta-superficie de pavimento de forma muy precisa, a diferencia de MCE que asume presión uniforme, ejercida sobre un área geoméricamente simple. En este sentido, para poder realizar comparaciones en el caso dinámico, tanto en el FEM como en MCE, se uso análisis cuasi-estático. Los resultados de la investigación indican que para análisis estático los resultados son altamente similares, cuando la presión de contacto es modelada de forma considerablemente simple, sin embargo, conforme condiciones reales de campo se modelan los resultados difieren considerablemente. La conclusión de la investigación provee de herramientas para determinar cual técnica de análisis es la más apropiada, según las condiciones de campo y supuestos de diseño.

## Abstract

In order to ensure the adequate design and modeling of pavements structures, the estimation of pavement response (stress, strain and deflections) under various loading conditions and proper material characterization is required. Particularly, mechanistic design methodologies require precise determination of this response. This research compares the response of a flexible pavement structure subjected to static and dynamic loading, using various analysis methods: multilayer elastic theory (MCE, abbreviation in spanish), viscoelasticity theory (VE, abbreviation in spanish), and finite element method (FEM). For this purpose, various software packages were used: programs such as EVERSTRESS, BISAR, DEPAV, and 3D MOVE were used for MCE analysis and ABAQUS for VE and FEM analysis. FEM in particular, offers the possibility of modeling the tire-surface pavement contact pressure very precisely. MCE is limited since; it assumes uniform pressure distributed on a simple geometric area. Additionally, in order to make comparisons under the dynamics cases, quasi-static analysis was used based on both, FEM and MCE. The results show that in the static analysis, the response is similar when the contact pressure is modeled simplistically. However, based on the actual field conditions, the modeled results differ considerably. The conclusion of the analysis provides guidance in selecting which analysis technique is the most appropriate depending on field conditions and design assumptions.

<sup>1</sup> Estudiante, Ingeniería Civil, Asistente de Investigacion - LanammeUCR

<sup>2</sup> PHD, Ingeniería Civil - LanammeUCR

<sup>3</sup> Ms.C, Ingeniería Civil - LanammeUCR

## 1. Introducción

Las teorías de diseño de pavimentos involucran desde las metodologías de diseño empíricas, donde se correlaciona el comportamiento de los pavimentos in situ a través de observaciones y mediciones de campo, con las cargas del tránsito, condiciones ambientales, tipo de suelo, calidad de materiales, y proceso constructivo, hasta las metodologías de diseño de multicapa elástica, para las cuales el estado de esfuerzos y deformaciones de las capas de la estructura influyen en el comportamiento del pavimento, este tipo de análisis se ha facilitado con el desarrollo de programas computacionales, como el ALIZE, ELSYM5, BISAR, KENLAYER y DEPAV.

Actualmente surgen nuevas metodologías, como el elemento finito, para el cual, se pueden considerar las propiedades de las bases no tratadas que presentan un comportamiento no lineal, y dependiente de la configuración de los esfuerzos, del comportamiento viscoso de la carpeta asfáltica, de la geometría de análisis, de las condiciones de borde, y tipo de carga. Estas nuevas metodologías se han visto beneficiadas con el desarrollo de la tecnología y la capacidad de las computadoras, programas de elemento finito como el ABAQUS, PLAXIS, ANSYS, y aquellos exclusivos al estudio de pavimentos como el SENOL y el FENLAP de la Universidad de Nottingham, el ILLIPAVE de la Universidad de Illinois, el GT-PAVE del Instituto de Tecnología de Georgia, entre otros, están haciendo realidad que sea posible modelar con los mismos y se conviertan en un referente para comenzar a preferir este tipo de metodologías ante aquellas que utilizan la teoría de multicapa elástica y que hasta el momento por simplicidad de manejo y entendimiento de sus ecuaciones así como que requieren un menor tiempo computacional y memoria han sido las más utilizadas por los diseñadores.

## 2. Metodologías empleadas

Como el presente artículo surge de la comparación entre los resultados del trabajo realizado por Reyes et al. (2004), y de aquellos obtenidos del análisis de modelación de la estructura de pavimento flexible definida por dichos autores, en una diversidad de programas que a su vez, utilizan distintas metodologías de análisis, es importante realizar una descripción de cada una de ellas, debido a que esto permitirá comparar los resultados obtenidos y consecuentemente determinar lo que representan los supuestos que estas definen. A continuación se hará mención a cada una de estas teorías.

### 2.1. Metodologías de diseño de multicapa elástica

En la Figura 1 se ilustra el concepto del Sistema Elástico Multicapa Generalizado definido por Yoder y Witzack (1), ellos muestran que, en un punto dado dentro de cualquier capa del pavimento el equilibrio estático requiere de la existencia de nueve esfuerzos, la figura muestra un sistema de coordenadas polares, donde los esfuerzos normales actúan en dirección radial, vertical y tangencial, y perpendicularmente a las caras de estos seis esfuerzos de corte, que por el equilibrio estático son iguales. La orientación de los elementos en el sistema es de tal forma que los esfuerzos de corte en cada cara son cero y los esfuerzos normales entonces son los principales, donde  $\sigma_z$  es el esfuerzo principal,  $\sigma_y$  es el esfuerzo intermedio,  $\sigma_t$  es el esfuerzo menor, y la suma de estos se define entonces como el esfuerzo total  $\theta$ . Las deformaciones en la dirección vertical, radial y tangencial se definen ante este estado triaxial de esfuerzos como en las Ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\varepsilon_z = \left(\frac{1}{E}\right) [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = \left(\frac{1}{E}\right) [\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \left(\frac{1}{E}\right) [\sigma_t - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \quad (3)$$

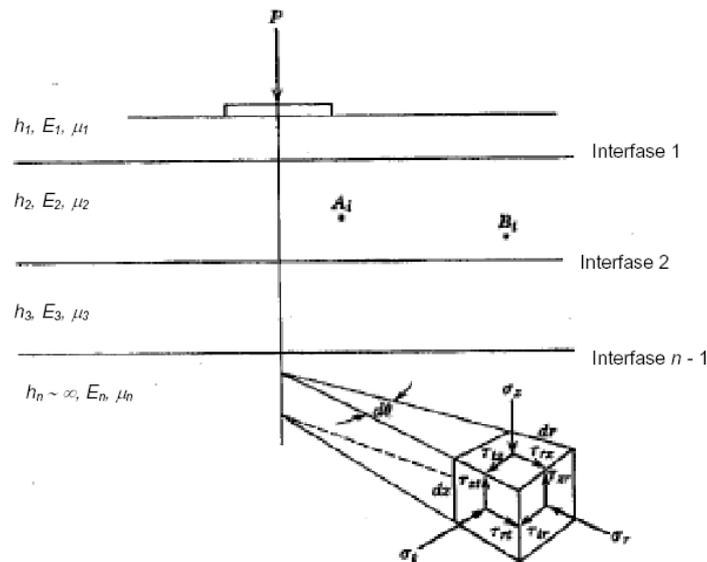


Figura 1. Sistema Elástico Multicapa Generalizado  
Fuente: (Yoder y Witzack, 1975)

La teoría elástica multicapa hace las siguientes suposiciones para la solución analítica del estado de esfuerzos y deformaciones en una estructura de pavimento:

- Las propiedades de cada capa son homogéneas.
- Cada capa tiene un espesor finito, excepto la inferior (la subrasante).
- Cada capa es isotrópica.
- En cada interfase entre capas se desarrolla una fricción total.
- Entre dos estratos existe continuidad de esfuerzos
- Los estratos se caracterizan por su módulo de rigidez, espesor y la razón de Poisson  $\nu$ .

Los software basados en esta teoría permiten evaluar esfuerzos, desplazamientos y deformaciones entre las capas de pavimentos. Para el desarrollo del presente tema se utilizaron los programas: EVERSTRESS 5.0 (del Departamento del Estado de Washington de los Estados Unidos), BISAR 3.0 (de la empresa SHELL), DEPAV (de la Universidad del Cauca), 3D MOVE (de la Universidad de Nevada).

## 2.2. Método del Elemento Finito (FEM, abreviatura en inglés)

El método de elemento finito, según Portillo (2008), consiste en la división del modelo a ser analizado en cuerpos discretos o elementos finitos, a los cuales se les definen sus propiedades mecánicas y térmicas. Este funciona por medio de la interacción de cuatro partes principales, la discretización (división del dominio de análisis en diferentes elementos finitos, que pueden estar caracterizados por una, dos o tres dimensiones), la formulación de las ecuaciones (que establecen las funciones aplicadas para aproximar la variación del desplazamiento para cada punto nodal, que corresponden a las fuerzas generalizadas, que son aplicadas en estos), la matriz de rigidez correspondiente (por la relación que surge entre las fuerzas y desplazamientos aplicados, a partir de las propiedades mecánicas y geométricas de los elementos), y la resolución respectiva en la determinación del estado de esfuerzos y deformaciones en los diferentes puntos de un cuerpo, en función de los desplazamientos de los nodos que conforman cada elemento.

Este método es relativamente nuevo, ya que data de 1941, y es una poderosa herramienta en el análisis de problemas de ingeniería, además, los avances en la tecnología están haciendo cada vez más accesible su uso. Este método utiliza una serie de supuestos que son necesarias para poder emplearlo las que se describen seguidamente:

1. Se puede aproximar la solución exacta por una serie de funciones continuas que opera bajo un número finito de subdominios que se acercan infinitamente a la realidad.
2. El dominio global se divide en subdominios llamados elementos.
3. Los puntos que definen las uniones y conexiones entre los elementos son llamados nodos o puntos nodales.
4. Los elementos se asumen continuos en las fronteras, y se especifican en los modelos como las uniones de los nodos comunes.
5. El dominio se resuelve explícitamente bajo la función dada por los puntos nodales, cualquier punto interno se define en términos de las variables nodales.
6. Las variables nodales están referidas a 6 grados de libertad (3 de desplazamiento, y 3 de rotación).

7. El conjunto de elementos representa una aproximación a los dominios de la geometría, y exactitud del modelo.
8. Los puntos nodales que son referidos para evaluar la función, no son físicamente puntos de unión entre los elementos.

Los programas de análisis que utilizan esta metodología y que se utilizan en el presente estudio son ABAQUS (de la empresa SIMULIA), y PLAXIS (de la empresa PLAXIS).

### 2.3. Viscoelasticidad

Las propiedades mecánicas de los sólidos elásticos se basan en las consideraciones de la ley de Hooke, la cual describe la deformación como directamente proporcional al esfuerzo aplicado, por su parte, en los líquidos viscosos, según la ley de Newton, el esfuerzo aplicado es directamente proporcional a la velocidad de la deformación e independiente de ella. Por tanto, si se aplica una fuerza sobre un sólido elástico este se deforma hasta que se deje de aplicar la fuerza y seguidamente regresa a su estado original, en cambio si se aplica una fuerza sobre un fluido viscoso, este se deforma, pero al retirársele la fuerza no recupera su condición inicial. La teoría de viscoelasticidad se ubica en el intermedio de estos dos conceptos, entonces los cuerpos con viscoelásticos al aplicárseles una fuerza y retirarse la misma, recuperan parte de la deformación y conservan otra parte, en la Figura 2 se puede observar el comportamiento típico de la deformación con el tiempo para cada uno de estos casos (García, 2008).

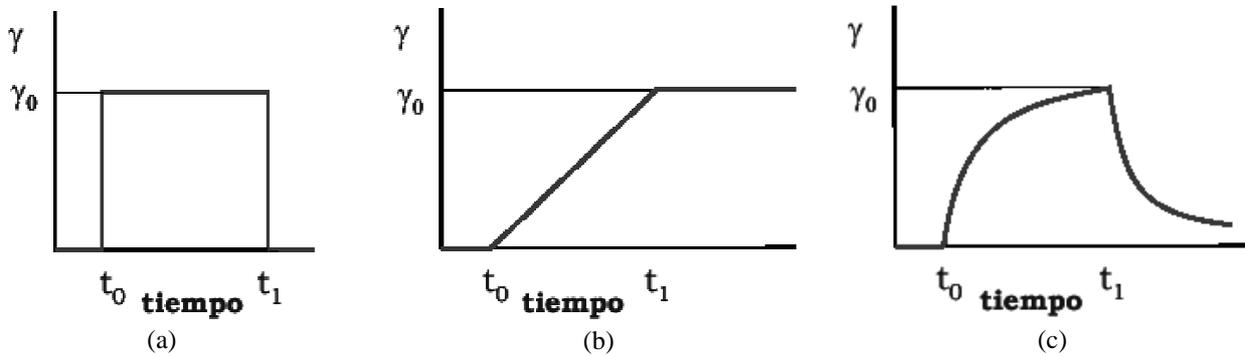


Figura 2. Comportamiento (a) elástico, (b) viscoso, (c) viscoelástico  
Fuente: (García, 2008)

El comportamiento viscoelástico lineal según García (2008), se puede describir por medio de ecuaciones diferenciales con coeficientes constantes que describen la relación esfuerzo-deformación dependiente del tiempo, cuando la deformación y su velocidad son infinitesimales. Esta relación está dada por la ecuación constitutiva o ecuación reológica de estado que puede ser ajustada por medio de series de Prony basadas en el Modelo del sólido de Maxwell Generalizado, y representado en las Ecuaciones 4 y 5.

$$G(t) = G_o \left( 1 - \sum_{i=1}^n G_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right) \tag{4}$$

$$K(t) = K_o \left( 1 - \sum_{i=1}^n K_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right) \tag{5}$$

Donde:

$G_o$  y  $K_o$ : son los valores instantáneos del módulo de cortante y volumétrico.

$G_i$ ,  $K_i$ ,  $\tau_i$ : parámetros de las series de Prony.

$t$ : tiempo de relajación reducida.

$G$ : Módulo de cortante.

$K$ : Módulo de compresibilidad.

### 3. Procedimiento de cálculo

El procedimiento utilizado para la definición del proceso de análisis fue el siguiente:

1. Primeramente se trabajó en el programa ABAQUS, para un modelo de multicapa elástica, de manera que los resultados fueran comparables con los que se obtendrían de los programas definidos con dicha teoría y que a la

actualidad han sido mayormente utilizados, para de esta manera decidir si el modelo logrado se adecuaba a lo que se pretendía representar, en este caso como se mencionó anteriormente se utilizaron los parámetros definidos por el trabajo de Reyes et al. (2004) para la modelación, la estructura de análisis se esquematiza en la Figura 3, donde el pavimento está compuesto de cuatro capas, la primera de mezcla asfáltica, la segunda y tercera de una grava sin tratamiento, y la última de la subrasante (el suelo de soporte). En esta parte del proceso específicamente para la modelación en elemento finito se definió una geometría (espesor de capas, área de carga, zonas de interés) por medio de un sketch que pudiera posteriormente ser modificado para análisis diferentes, con lo cual se procedió a la definición de cada una de las propiedades elásticas de las capas, y asignación de las propiedades a las secciones, se ensambló la estructura, a la cual se le definieron dos pasos de análisis, el inicial, y uno de carga, de perturbación lineal (este solo puede ser utilizado para analizar problemas lineales como es el caso), y aplicado en la zona definida geoméricamente para carga, las condiciones de frontera se definieron para los extremos de la estructura con restricción al movimiento vertical solamente, mientras que en el fondo se incluyó la restricción horizontal, respecto al mallado, se definieron los elementos de forma cuadrada y de integración reducida, se refinó la malla en las zonas de interés para la medición de esfuerzos, deformaciones, y deflexiones; en la Figura 4 se puede observar en detalle la definición de las condiciones de frontera y el mallado de la estructura.

Carpeta asfáltica = 0.1 m	$\nu = 0.4$	$E1 = 5000 \text{ MPa}$
Capa granular 1=0.2 m	$\nu = 0.25$	$E2 = 200 \text{ MPa}$
Capa granular 2=0.2 m	$\nu = 0.25$	$E3 = 100 \text{ MPa}$
Subrasante	$\nu = 0.45$	$E4 = 50 \text{ MPa}$

Figura 4. Estructura del modelo.

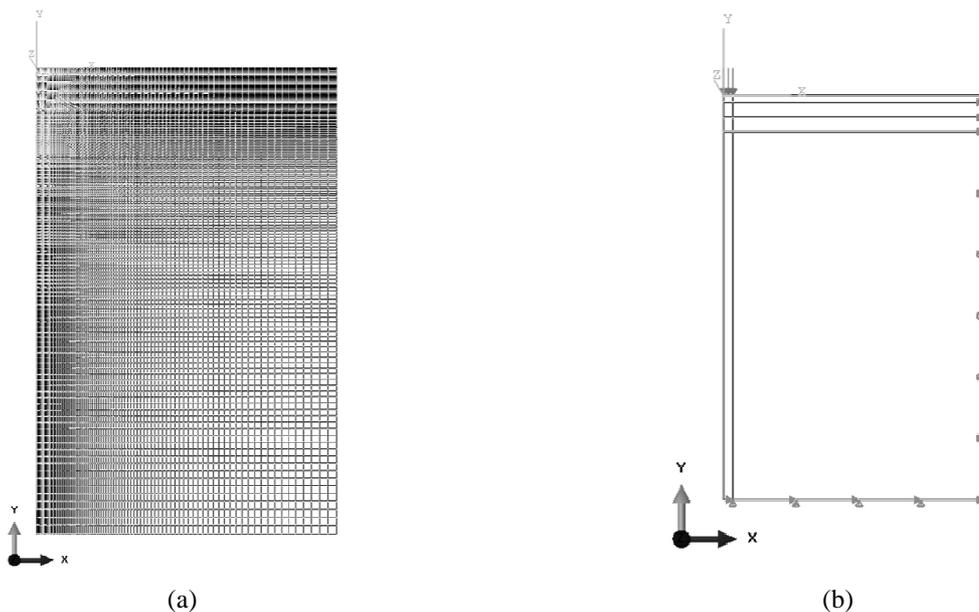


Figura 4. (a) Mallado y (b) condiciones de frontera

2. Se procedió a la modelación y análisis en aquellos programas de teoría de multicapa elástica que el trabajo de Reyes et al. (2004) no incluía (EVERSTRESS, BISAR Y 3D MOVE) y se compararon los resultados.
3. Posteriormente se procedió con la introducción de parámetros de viscoelasticidad para la capa de concreto asfáltico, para este efecto se utilizaron series de Prony, los valores que fueron introducidos para el presente análisis son los de la Tabla 1, la finalidad fue observar la influencia de estos parámetros partiendo de la comparación con el análisis elástico. Es importante mencionar que el 3D MOVE es un programa que tiene capacidad para el análisis de viscosidad de la carpeta asfáltica, sin embargo para efectos de este estudio se limita al análisis para parámetros de elasticidad.

Tabla 1. Series de Prony

Series de Prony		
$G_i$	$K_i$	$\tau_i$
0.678	0.591	0.001
0.000	0.000	0.010
0.105	0.165	0.100
0.074	0.083	1.000
0.074	0.093	10.000

4. Como último paso se procedió con la introducción de un análisis dinámico, esto a partir del archivo de análisis elástico definido en el paso 1, dejando por fuera los parámetros de viscoelasticidad definidos en el paso anterior para la comparación de la influencia de cada uno de estos conceptos por aparte y entre sí. Los parámetros en este caso se definieron para los primeros 30 modos, en un período de 0.26 s en incrementos de 0.005 s, y con un amortiguamiento de 5.0% desde el modo 1 hasta el 30, para la curva de amplitud de carga de la Figura 5.

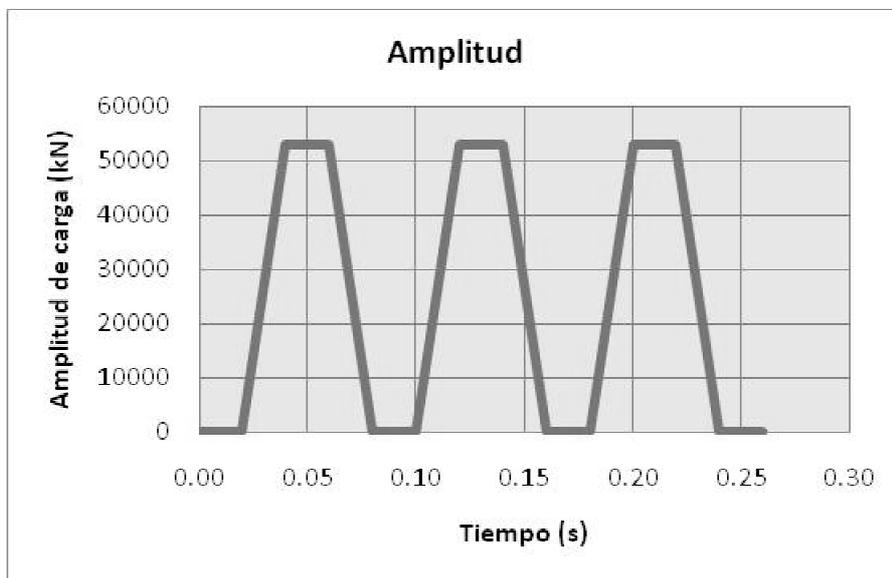


Figura 5. Amplitud de carga

#### 4. Resultados

En la Figura 6, se muestra los resultados obtenidos por medio del procedimiento anteriormente descrito, estos fueron cuantificados en la fibra inferior de la segunda capa granular, y se describen los esfuerzos radiales ( $s_{rr}$ ), normales ( $s_{zz}$ ), y deflexiones. En la Tabla 2, se pueden ver las diferencias porcentuales para cada uno de los parámetros tomando como referencia los resultados obtenidos del ABAQUS.

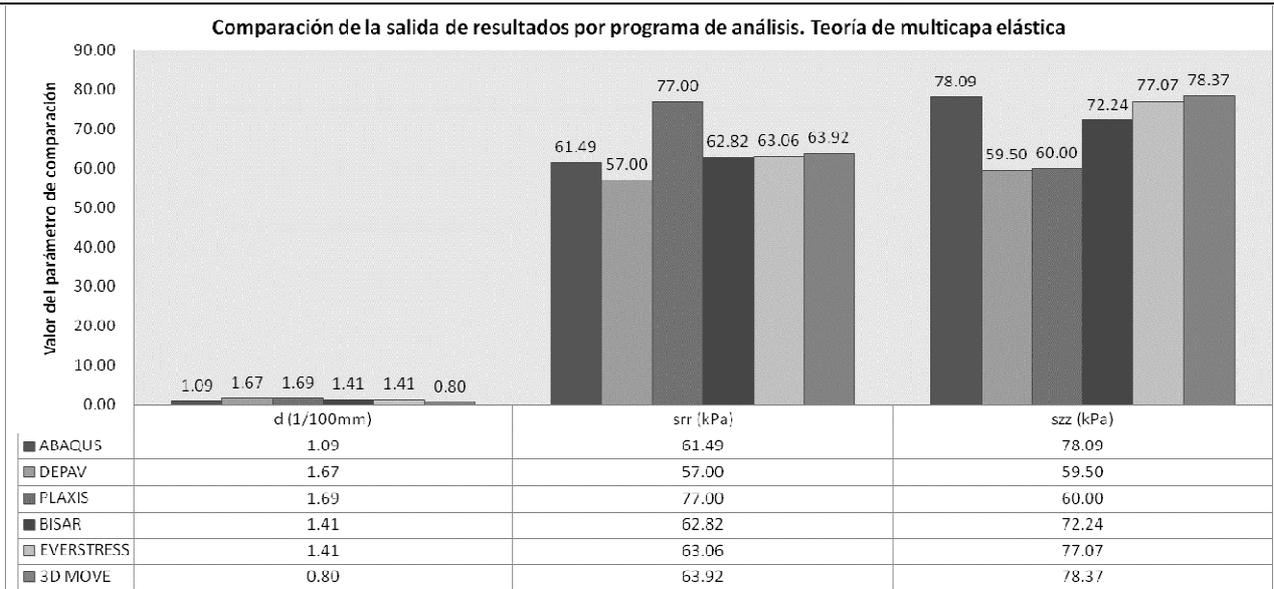


Figura 6. Comparación de la salida de resultados por programa de análisis

Tabla 2. % de diferencia de los resultados de cada programa con ABAQUS

Parámetro	% de diferencia con el resultado de ABAQUS				
	DEPAV	PLAXIS	BISAR	EVERSTRESS	3D MOVE
d (1/100mm)	52.90	54.73	29	29	27
sr (kPa)	7.31	25.22	2	3	4
szz (kPa)	23.80	23.16	7	1	0

En la Figura 7 se puede ver la distribución de los esfuerzos normales (Figura 7.a), y radiales (Figura 7.b) de la salida del análisis estático en el programa ABAQUS.

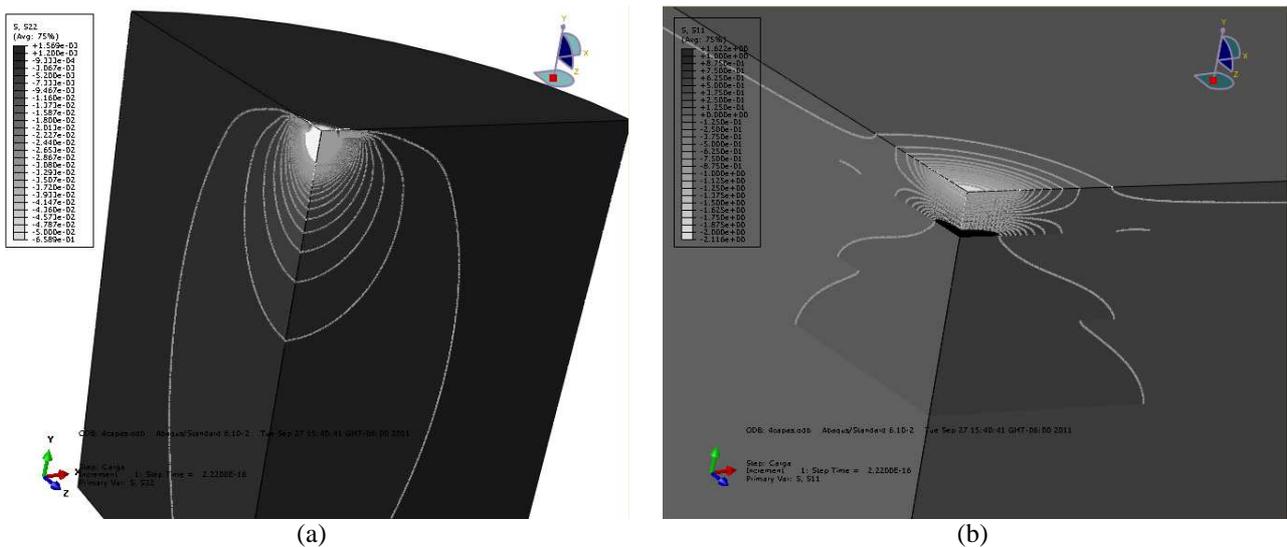


Figura 7. Comportamiento de los esfuerzos (a) normales ( $\sigma_{zz}$ ), y (b) radiales ( $\sigma_r$ )

La distribución de los esfuerzos normales de este análisis, a nivel de la subrasante, se distribuyen conforme la distancia al eje del modelo como el que se muestra en la Figura 8, y los esfuerzos radiales, bajo el centro de la carga y conforme a la profundidad, se distribuyen tal como se observa en la Figura 9.

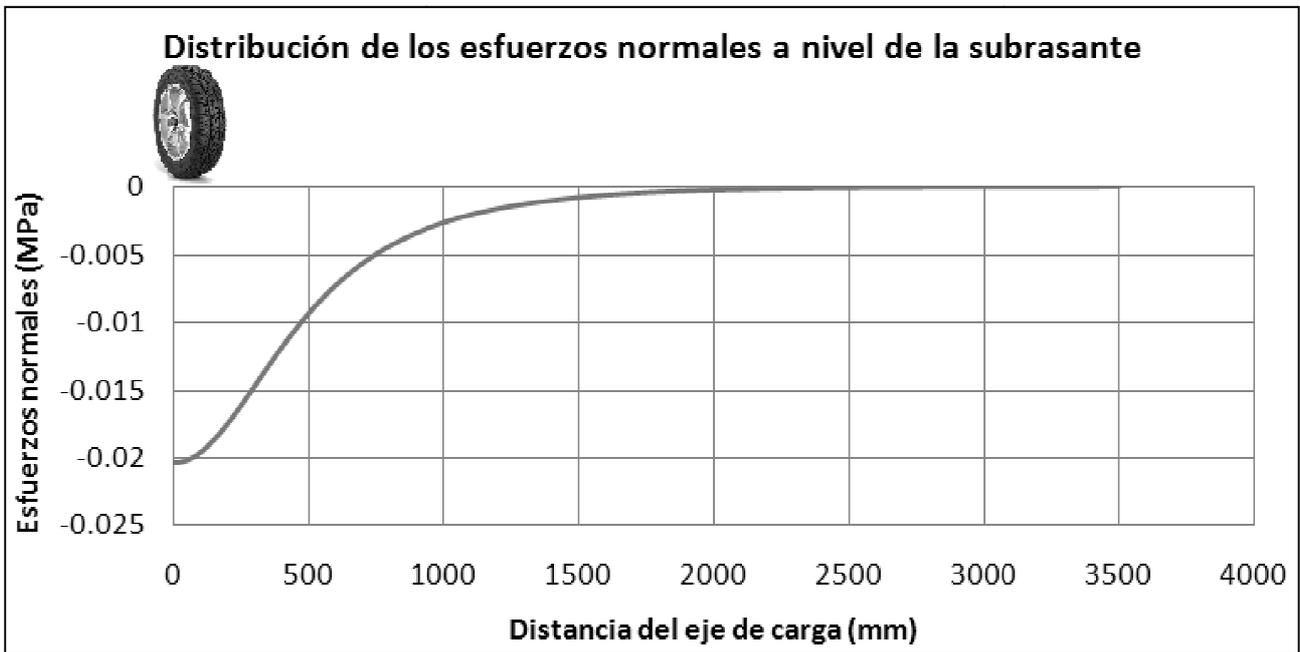


Figura 8. Distribución de los esfuerzos normales a nivel de la subrasante

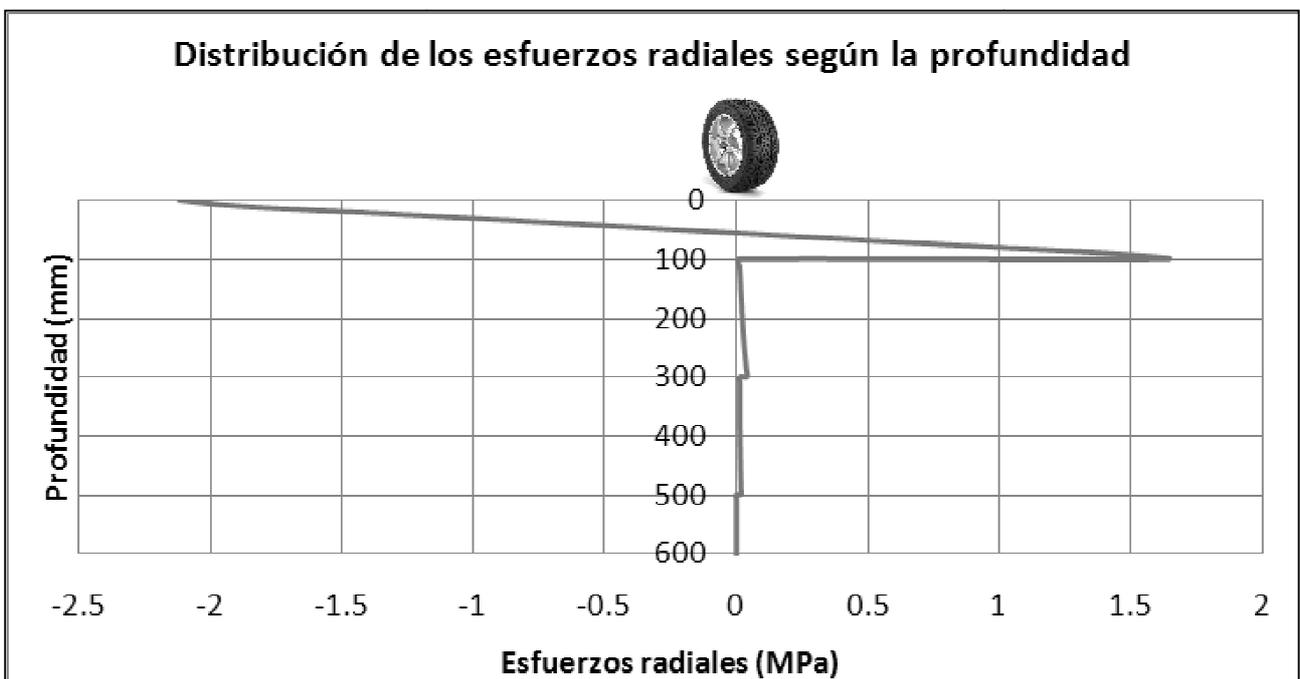


Figura 9. Distribución de esfuerzos radiales con la profundidad

En cuanto al análisis de influencia de viscoelasticidad, respecto a las posibilidades que permite el programa ABAQUS, los resultados obtenidos en la fibra inferior de la segunda capa granular, igual que en los casos anteriores, se ilustran en la Figura 10, y se diferencian porcentualmente en la Tabla 3.

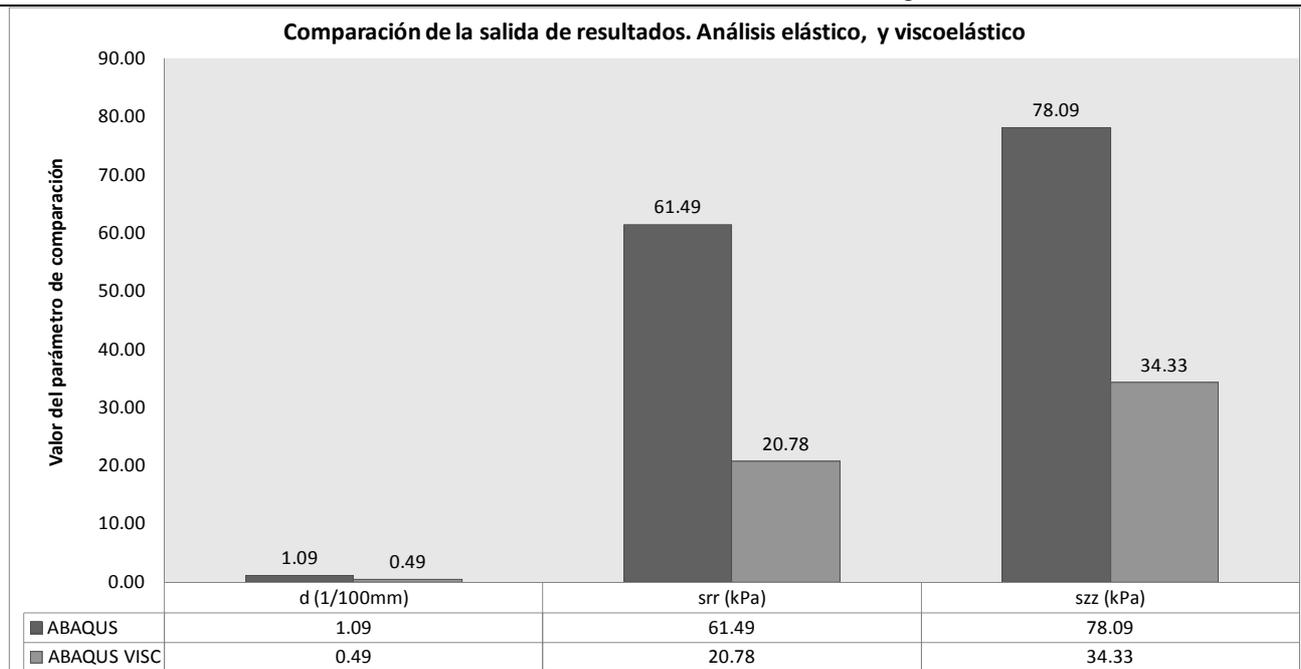


Figura 10. Análisis elástico y viscoelástico

Tabla 3. Diferencia entre los resultados de análisis estático y viscoelástico

Parámetro	ABAQUS	ABAQUS VISC	% de diferencia
d (1/100mm)	1.09	0.49	56
sr (kPa)	61.49	20.78	66
szz (kPa)	78.09	34.33	56

Y finalmente del análisis con carga dinámica, para las condiciones establecidas en el procedimiento anterior, en la Figura 11 se despliega la variación en el tiempo de los esfuerzos normales en el centro de la carga para la fibra extrema de la segunda capa granular, y en la Figura 12, respecto a los esfuerzos radiales en el mismo punto.

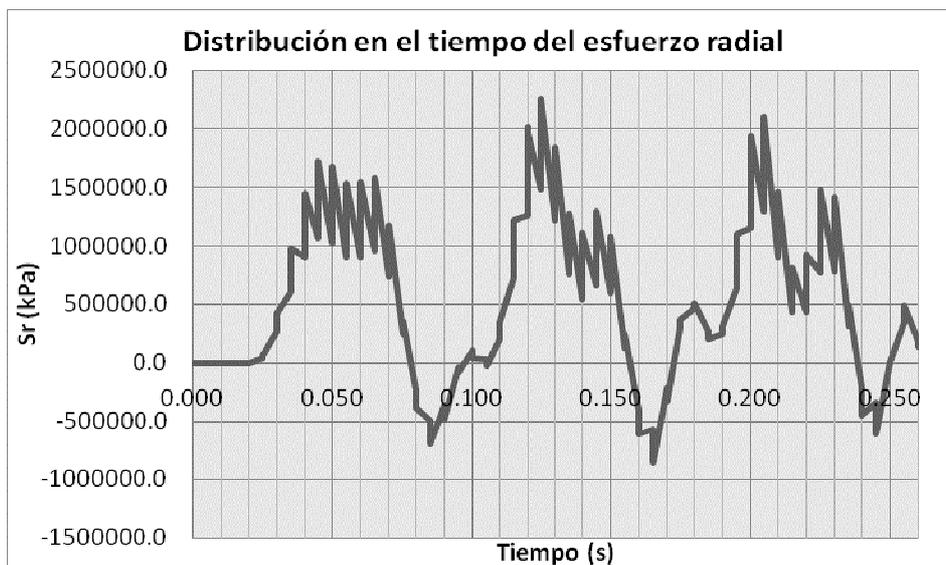


Figura 11. Distribución en el tiempo del esfuerzo radial

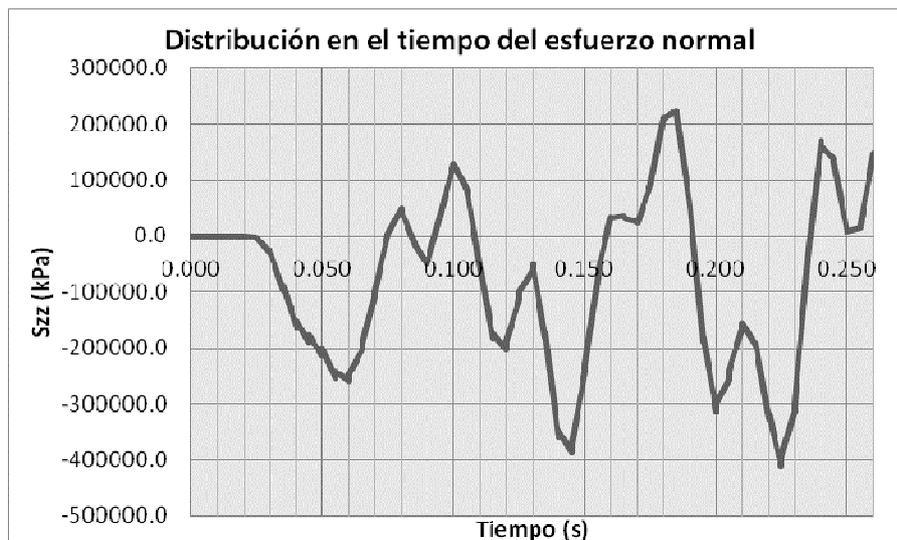


Figura 12. Distribución en el tiempo del esfuerzo normal

#### 4. Conclusiones y Recomendaciones

A partir de los resultados anteriores se puede concluir y recomendar lo siguiente:

- Los resultados arrojados por cada uno de los programas que utilizan la teoría multicapa elástica tienen pequeñas diferencias porcentuales, tal como se muestra en la Tabla 2, la mayor diferencia está en las deflexiones, sin embargo, se aceptan estos valores en vista de que los programas de elemento finito también son aproximaciones de la realidad, esto justifica la utilización hasta la actualidad de los programas tradicionales, que primeramente se argumenta en el hecho de ser programas de fácil utilización, gratuitos, y que requieren tiempos computacionales cortos.
- La versatilidad que están mostrando los programas de elemento finito, por la variedad de análisis que se pueden desplegar de un solo modelo, hacen de este tipo de programas, la herramienta para la solución a los problemas, que solo podían ser analizados bajo procedimiento de cálculo manual, utilizando los conceptos teóricos de la mecánica de pavimentos.
- La obtención de datos de análisis para la evaluación de la respuesta de los pavimentos en la realidad, tal como la distribución de esfuerzos normales conforme la distancia al eje de la carga, y los esfuerzos de compresión o tensión que se van desarrollando en cada fibra de cada capa de la estructura, radialmente al eje de simetría, y los respectivos bulbos de esfuerzos, se convierte en un proceso sencillo, en comparación con los datos tradicionales, donde se deben definir los puntos análisis, y leer punto por punto los datos respectivos. Además, en este sentido, entre mejor sea definida la malla del modelo, más representativos serán los resultados.
- Los resultados obtenidos con los programas de elemento finito, dependen mucho del tipo de modelo empleado, a partir de las capacidades que pueda representar el programa, por lo que es pertinente que el analista conozca con exactitud la mecánica del problema, con la finalidad de que se represente de la manera más realista el fenómeno.
- La diferencia entre resultados realizados por distintos programas de elemento finito, se debe principalmente a las consideraciones que el analista realice para definir el modelo, como el tipo de mallado, la extensión de las fronteras, así como la introducción de parámetros como anisotropía de las capas, viscoelasticidad, entre otros, a esto se puede atribuir la diferencia entre los resultados de los autores y el realizado por Reyes et al. (2004)
- Los programas de multicapa elástica reflejaron ser bastante acertados, sin embargo, al estar definidos para el rango elástico los resultados son bastante conservadores, es por tanto que se hace necesaria la utilización de nuevas metodologías en el diseño de pavimentos, que se dirijan a la optimización de los diseños. Parámetros como la viscoelasticidad de la carpeta asfáltica, anisotropía de las capas granulares, así como la configuración física y dinámica de la carga, que se han convertido en temas de interés para los investigadores en los últimos años, no pueden ser representados en este tipo de programas, por lo que se hace evidente lo útil que convierte el método de elemento finito, en ayuda con el desarrollo de la tecnología para cubrir esta necesidad.

- Se demostró además, como un preámbulo a esta nueva necesidad, que la viscoelasticidad de la mezcla asfáltica genera reducciones porcentualmente considerables en los valores de los esfuerzos radiales ( $\sigma_r$ ), normales ( $\sigma_{zz}$ ), y deflexiones, lo que se debe primeramente a la dependencia que tiene el estado de esfuerzos de la viscosidad que la mezcla va desarrollando con el tiempo, esto demuestra la necesidad de hacer representaciones más reales de los modelos, que mejoren las metodologías de diseño, que actualmente son bastante conservadoras.
- El análisis dinámico, mostró que los programas tradicionales solo muestran los esfuerzos en un instante de tiempo en que la carga máxima es aplicada, sin embargo, los esfuerzos varían en el tiempo y en ocasiones pueden ser menores, lo que debería considerarse en las metodologías de diseño, puesto que las tradicionales entonces parecieran ser como reiteradamente se menciona en el presente informe, bastante conservadoras.
- Estos resultados demuestran que los diseños actuales, por estar basados en los programas tradicionales, son bastante conservadores, por lo que es necesario modificar las teorías actuales de diseño con la finalidad de que se optimicen los diseños, y los modelos desarrollados sean los más apropiados, tanto en la capacidad de las estructuras, como en los costos.
- Además, se demuestra que las metodologías de diseño de pavimentos, hasta el momento no han considerado de manera adecuada muchos de los factores que influyen el diseño a nivel mecánico, por lo que es de importancia que se comiencen a introducir adecuadamente estos parámetros en futuras metodologías.
- Como último punto es importante rescatar que hay programas como el 3D MOVE, que por el análisis anterior muestran ser bastante confiables, que permiten además de este tipo de análisis, introducir parámetros de viscoelasticidad a la mezcla asfáltica, así como configuración del área de contacto y tipo de carga, de forma que sea más realista el diseño respecto a los programas tradicionalmente usados, sin embargo, sigue siendo la técnica del elemento finito la herramienta más adecuada para análisis mecánico de estructuras de pavimento flexible.

## 8. Referencias

- YODER, E. J., WITZACK, M. *Principles of Pavement Design*. Jhon Wiley & Sons, Inc., 1975.
- REYES, O. J., CAMACHO, J. F., REYES, F., Comparación de pavimento flexible por elementos finitos y cálculo teórico. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina.*, n. 14, p. 6-13, 2004.
- PORTILLO, M. *Measured and theoretical response of perpetual pavements structures*. University of Texas at Arlington in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering.
- GARCÍA, J. C., *Tema 3. Viscoelasticidad lineal*. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química.