

**IAG55-07-2013**  
**CONFIGURACIÓN DE CARGA DE LOS VEHÍCULOS EN COSTA RICA:**  
**ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO**  
**CONFIGURAÇÃO DA CARGA DOS VEÍCULOS NA COSTA RICA: PELO**  
**ANÁLISE DOS ELEMENTOS FINITOS**

Paulina Leiva Padilla  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica  
[paulina.leivapadilla@ucr.ac.cr](mailto:paulina.leivapadilla@ucr.ac.cr)

Jaime Allen Monge  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica  
[jaime.allenmonge@ucr.ac.cr](mailto:jaime.allenmonge@ucr.ac.cr)

Gustavo Badilla Vargas  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica  
[gustavo.badilla@ucr.ac.cr](mailto:gustavo.badilla@ucr.ac.cr)

Luis Guillermo Loría Salazar  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica  
San José, Costa Rica  
[luis.loriasalazar@ucr.ac.cr](mailto:luis.loriasalazar@ucr.ac.cr)

## **Resumen**

El presente trabajo surge como complemento a una serie de investigaciones realizadas desde el 2005 por la Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA del LanammeUCR, sobre el tema de parámetros de carga en Costa Rica. Con la presente investigación se inicia un proceso de análisis de los resultados obtenidos, con la finalidad de comprender el comportamiento mecánico ante condiciones específicas de tipo de carga en función de esfuerzos, deformaciones y deflexiones, que son fundamentales en el diseño y modelación de desempeño de las estructuras de pavimento. El trabajo consiste en la modelación de estructuras típicas de pavimento en Costa Rica, utilizando para ello la metodología del elemento finito. Se considera dentro del análisis las variables área y magnitud para los ejes sencillo dual, tandem y tridem, que son los que están presentes en la mayoría de los vehículos que transitan por nuestras carreteras. De los resultados se logra confirmar la importancia dentro del diseño y gestión de pavimentos, de considerar y regular el tipo de vehículos que se espera o se permite que pasen por las carreteras nacionales, con el objetivo de minimizar los costos de su mantenimiento y asimismo alargar su vida útil, ya que se demuestra que la sobrecarga en ciertos ejes puede generar un mayor daño a la estructura. Se observa como existe una interacción entre los bulbos de esfuerzos desarrollados entre las llantas de los ejes tandem y tridem, lo que implica influencia de las cargas de las llantas contiguas. El

objetivo que se persigue radica principalmente en la generación de herramientas fundamentales necesarias para la formulación y aplicación de parámetros adecuados en el desarrollo de la Guía Mecánico-Empírica de Diseño de Costa Rica, que será clave en la mejora de la calidad de las obras de infraestructura vial del país.

## **Resumo**

Este artigo surge como complemento duma série de investigações feitas desde o 2005 pela Unidade de Materiais e Pavimentos do PITRA do LanammeUCR, sobre o tema dos parâmetros de carga na Costa Rica. Com a presente investigação começa um processo da análise dos resultados obtidos, com a finalidade de compreender o comportamento mecânico ante condições específicas do tipo de carga em função das tensões, deformações e deflexões, que são fundamentais no dimensionamento e modelação do desempenho das estruturas dos pavimentos. Este trabalho apresenta a modelação de estruturas típicas de pavimentos na Costa Rica, utilizando para isto o método dos elementos finitos. Considera-se dentro da análise as variáveis área e magnitude para os eixos simples de roda dupla, tandem duplo e tandem triplo, que são os que estão presentes na maioria dos veículos que transitam por nossas rodovias. Disto resultados confirmam-se a importância dentro do dimensionamento e gestão dos pavimentos, a consideração e regulação dos tipos de veículos que são esperados ou são permitidos para passar pelas rodovias nacionais, a fim de minimizar os custos de manutenção e também estender sua vida útil, uma vez que mostra-se que a sobrecarga de certos eixos podem gerar danos maiores na estrutura. Observa-se que existe uma interação entre os bolbos de esforço desenvolvidos entre os pneus dos eixos tandem duplo e tandem triplo, envolvendo influência das cargas dos pneus adjacentes. O objetivo perseguido principalmente é a geração de ferramentas fundamentais necessárias para a formulação e aplicação de parâmetros adequados para o desenvolvimento da Guia de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos da Costa Rica, que será fundamental para melhorar a qualidade das obras de infra-estrutura rodoviária do país.

## **ANTECEDENTES**

La Unidad de Materiales y Pavimentos, del PITRA del LanammeUCR, inició sus estudios en esta área durante el 2005, en el 2007 se presentaron los resultados obtenidos de la encuesta de carga para vehículos de carga y buses, que fueron realizados entre el 2005 y el 2006 en ocho de las rutas más importantes para el país. Dicha encuesta reveló que los Factores Camión Típicos de diseño subestimaban el peso real de los vehículos, al mostrar valores muy superiores, indicando que para evitar el deterioro acelerado de los pavimentos y obras existentes, era necesario controlar el peso de los vehículos.

Para esa fecha el pesaje que se realizó mediante balanzas camioneras portátiles estáticas, encuestando un pesaje por eje de vehículos que fueron elegidos en campo, y contando con el apoyo de los oficiales de tránsito para detener los vehículos. Adicionalmente, para cada vehículo, se consultó sobre el tipo de carga que transportaba o si viajaba sin carga. También se llevó un archivo fotográfico de cada uno de los vehículos encuestados, y se realizaron en noviembre del 2008, servicios de pesaje temporal para tres rutas importantes.

En el Reglamento de Circulación por Carretera de Costa Rica, publicado en el diario oficial La Gaceta No.15 del miércoles 19 de enero del 2005, se presenta la reglamentación de la

configuración de ejes y pesos que son legales para los diferentes tipos de vehículos que circulan en el país. Esto con la finalidad de disminuir costos de conservación, y evitar un acelerado deterioro de las carreteras y puentes, lo que adicionalmente lleva a la protección de la vida y los bienes de los usuarios.

La base de datos que ha sido generada con base a las mediciones realizadas por el Departamento de Pesos y Dimensiones de las estaciones de pesaje del MOPT, ha permitido al LanammeUCR darle un seguimiento adecuado a las de cargas que transitan. Esto a su vez ha permitido formular modelos y definir parámetros en los procedimientos de diseño estructural de pavimentos.

## **ESPECTROS DE CARGA**

La caracterización adecuada del tránsito vehicular, es fundamental si se desea asegurar el desempeño y la durabilidad de los pavimentos (Allen y Badilla, 2011).

En la nueva Guía de Diseño Mecánico-Empírica de Pavimentos de los Estados Unidos (MEPDG, por sus siglas en inglés), se deja de utilizar el concepto de ejes equivalentes. En su lugar se empiezan a utilizar los espectros de carga para el diseño, rehabilitación, modernización, reconstrucción, preservación y operación de carreteras.

Los espectros de carga se definen como la relación entre el número de ejes con cierto rango de carga y el número total de ese tipo de eje, en términos de porcentaje (Garnica, 2002; Troncoso, 2011; Ishak, 2010; Rodríguez, 2011). Estos permiten representar el porcentaje de ejes de un cierto tipo que circula con un rango de carga, caracterizar el tránsito pesado en el tramo carretero donde se hace medición y su evolución en el tiempo, identificar los niveles de carga más usuales, las carreteras donde se excede la carga reglamentaria y su porcentaje, diseñar y revisar la capacidad estructural de un pavimento con datos representativos de una red (Allen y Badilla, 2011).

A partir del conocimiento de los espectros de carga, es necesario conocer el comportamiento mecánico de la estructura de pavimento, la distribución de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en los puntos críticos, y de esta manera determinar el daño acumulado que ocurre durante la vida útil del pavimento.

El cálculo de este comportamiento mecánico supone una respuesta elástica de los materiales, lo cual es válido siempre y cuando los niveles de esfuerzo generados por el tránsito vehicular sean menores a la resistencia del material. Sin embargo esto requiere una caracterización adecuada de los materiales, con procedimientos de ensayo de carga cíclica, según la normativa para cada tipo de material.

El daño o efecto acumulado en el pavimento, se define a partir de una serie de cargas sucesivamente aplicadas sobre el mismo. El daño total de un vehículo compuesto de varios ejes, entonces se conoce como la suma de los daños parciales de cada uno de los ejes independientes que componen el vehículo. Un eje se considera independiente cuando la distancia entre los centros de ambos ejes es igual o superior a 2.00 m (AEPO S.A. Ingenieros consultores, 2000).

## Forma geométrica de solicitación sobre el pavimento, área de contacto y reparto de presiones

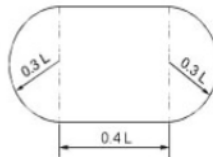
Como la carga vehicular se transmite al pavimento por medio de las llantas, es necesario para los métodos de diseño mecanicistas conocer el área de contacto de la llanta con el pavimento. Se asume que el área de contacto depende de la presión de contacto (Huang, 2004).

Según Huang (2004), para el diseño de pavimentos se supone que la presión de contacto es igual a la presión de la llanta, con la finalidad de estar del lado de la seguridad, puesto que el tamaño del área de contacto depende de este parámetro. La presión de contacto, se hace más grande que la presión de la llanta cuando las presiones de la llanta son bajas, esto debido a que la pared está en compresión y la suma de las fuerzas verticales de la pared y la llanta deben de estar en equilibrio con el contacto; lo contrario ocurre con presiones altas en la llanta, ya que sus paredes entonces están a tensión.

La carga de las llantas se puede asumir como uniformemente distribuida, y el tamaño del área de contacto depende de la presión de contacto, como anteriormente se expuso.

Las cargas más pesadas son aplicadas por ejes duales. En la Figura 1, se muestra la forma del área de contacto para cada llanta, la cual está compuesta de un rectángulo y dos semicírculos.

**Figura 1: Geometría del área de carga**  
Huang, 2004



Donde  $A_c$  corresponde al área de contacto, que se obtiene dividiendo la carga de cada llanta entre la presión de inflado, lo cual nos conduce a la siguiente ecuación.

$$L = \sqrt{\frac{A_c}{0.5227}} \quad (1)$$

Los programas tradicionales de multicapa elástica asumen el área de contacto de manera circular, lo cual no es correcto. La ventaja de la modelación con programas de elemento finito es que, permiten modelar el área de carga de una forma más representativa: elíptica.

## METODOLOGÍA

### Caracterización de la geometría, cargas y propiedades del modelo óptimas

Con la finalidad de garantizar la aplicabilidad del análisis a la realidad costarricense, se hizo uso de los datos generados por el Proyecto N° UI-PE-03-08, realizado por la Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA en agosto del 2008, y que fue titulado “Variaciones a los rangos para la

clasificación estructural de la Red Vial Nacional de Costa Rica”. Dicho proyecto buscó caracterizar por medio de datos de TPD, distribución vehicular, factor camión, y mediante diseño estructural a un 100%, 60%, 20% y 0% de la vida remanente del pavimento usando la Metodología AASHTO-93, algunas de las rutas de mayor importancia en el país. Con base en dicho informe se eligen las configuraciones de estructuras de pavimentos a ser analizadas según la Tabla 1. En esta tabla se muestran los valores de espesores y módulo de tres de las rutas principales de Costa Rica, es importante aclarar que los datos no corresponden a los espesores existentes en dichas rutas.

**Tabla 1: Configuración de las estructuras por analizar**

Ruta	ID Configuración	Propiedad	CA	BG	SB	SR
Naranjo Peaje	N1 (100% Vida remanente)	Espesor (cm)	15.0	30.0	30.0	-
		Módulo (MPa)	2758.0	345.0	103.0	59.0
	N2 (0% Vida remanente)	Espesor (cm)	15.0	30.0	30.0	-
		Módulo (MPa)	1034.0	100.0	71.0	59.0
Pérez Zeledón	P1 (100% Vida remanente)	Espesor (cm)	12.5	20.0	29.5	-
		Módulo (MPa)	2758.0	345.0	103.0	59.0
	P2 (0% Vida remanente)	Espesor (cm)	12.5	20.0	29.5	-
		Módulo (MPa)	1034.0	100.0	71.0	59.0
Esparza	E1 (100% Vida remanente)	Espesor (cm)	12.0	29.0	30.5	-
		Módulo (MPa)	2758.0	345.0	15.0	59.0
	E2 (0% Vida remanente)	Espesor (cm)	12.0	29.0	30.5	-
		Módulo (MPa)	1034.0	100.0	71.0	59.0

Para asegurar una representación más cercana a la real del área de contacto, se utilizó un área de contacto elíptica según la geometría indicada en la

**Figura 1**, para una longitud de lado L según ecuación 2.

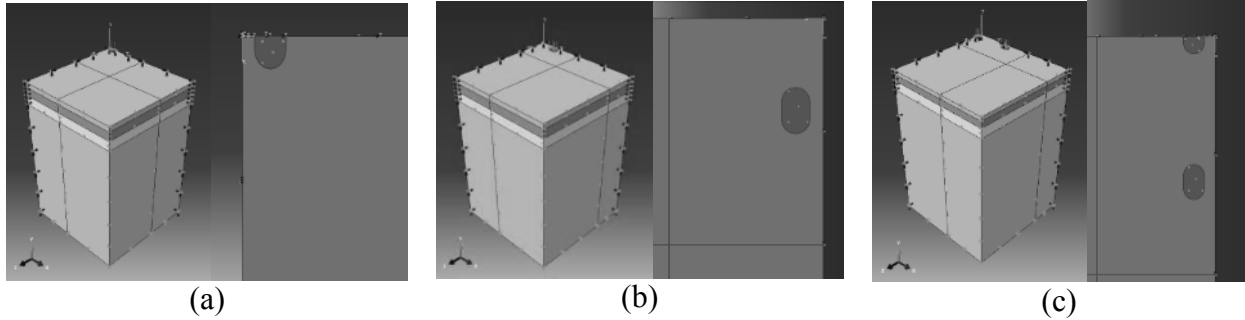
Se elige modelar el eje trasero de los vehículos para modelar el eje con mayor carga. Es por esto que se modelan tres configuraciones: eje sencillo dual, eje tandem y eje tridem.

Para fijar la variable presión de inflado en esta primera parte del estudio, se asumen las mismas condiciones que en Perú, nación latinoamericana, donde la presión de inflado de las llantas tiene un valor de 0.8 MPa, debido al uso excesivo de la llanta radial para vehículos de carga y transporte de pasajeros, que ha resultado en un incremento en las presiones de inflado que anteriormente rondaban los 0.5 MPa, según recomendaciones de la AASHTO 93 (Broncano, 2011), esto en vista de no contar con datos aún en este sentido para Costa Rica, sin embargo, se están desarrollando tesis de licenciatura para la obtención de estos datos.

## Construcción del modelo

Para el análisis se utilizó un modelo tridimensional de un cuarto de estructura de pavimento, al cual se le definieron condiciones de simetría en sus dos ejes. Se aprovechó la capacidad del programa utilizado, ABAQUS versión 10-2, para minimizar los efectos generados por las condiciones de frontera que resultan de plantear el modelo. La Figura 2, ilustra la geometría, configuración de carga y condiciones de frontera de las estructuras definidas.

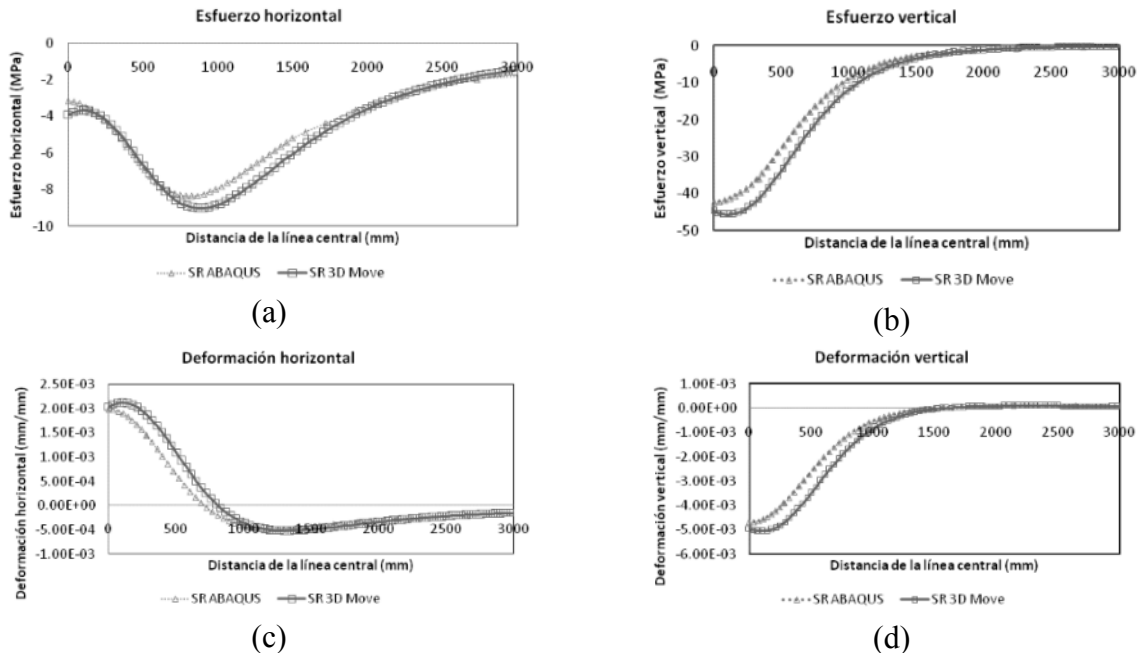
**Figura 2: Geometría para eje (a) sencillo dual, (b) tándem, y (c) tridem**



Para validación del modelo utilizado se hace referencia al trabajo realizado por Leiva et al. (2011), quienes realizaron comparaciones entre los resultados arrojados por diferentes programas de análisis de pavimentos basados en la teoría de multicapa elástica (EVERSTRESS y BISAR), de diferencias finitas (3D MOVE), y las modelaciones en elemento finito (DEPAV y PLAXIS) desarrolladas por Reyes (2004).

Además, se complementa el estudio anterior con análisis comparativos de los esfuerzos y deformaciones desarrollados a nivel de la subrasante para la configuración definida como N1 en el presente informe (Tabla 1). Los resultados se muestran en la Figura 3.

**Figura 3: Comparación esfuerzos y deformaciones (a, c) horizontales y (b, d) verticales a nivel de la subrasante entre los resultados de 3D MOVE y ABAQUS**



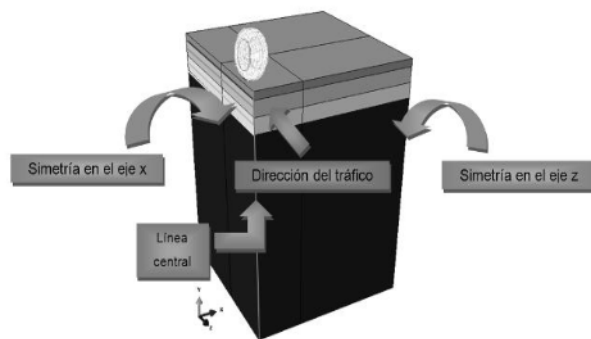
Los resultados permiten confirmar la validez del modelo, puesto que la distribución de los valores de esfuerzos y deformaciones de la modelación con ABAQUS, es consistente con los

valores obtenidos por medio del análisis con el 3D-Move, que es un software específico para análisis de pavimentos flexibles.

## ANÁLISIS MECÁNICO DE LAS RESPUESTAS DEL PAVIMENTO

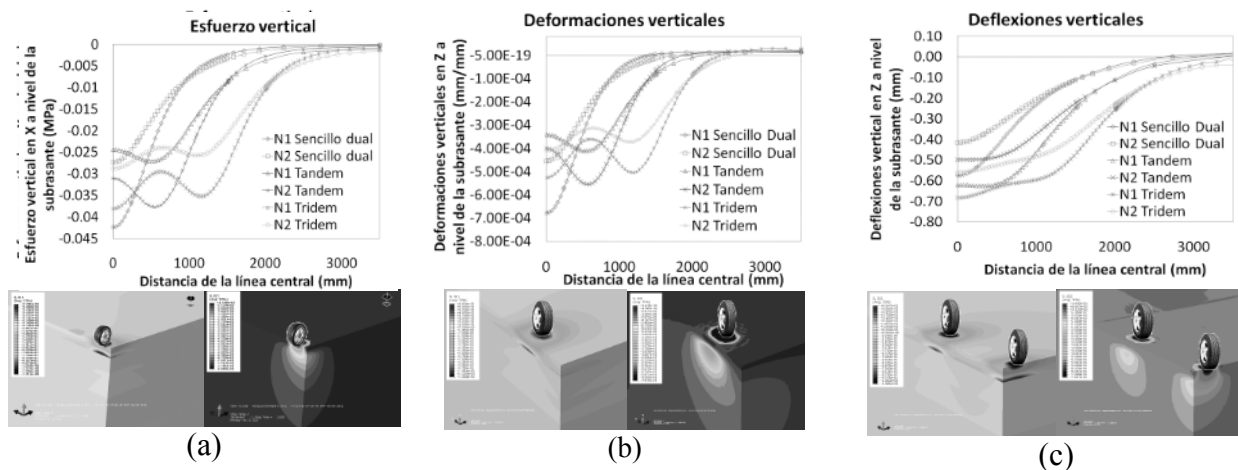
A cada una de las estructuras definidas en el estudio, se les calculó los valores de esfuerzos y deformaciones en cuatro ubicaciones dentro de la estructura: la fibra inferior de la carpeta asfáltica, la fibra superior de la subrasante, y a la mitad de la capa de base y subbase granular. Dicho cálculo se realiza a la mitad de la distancia entre llantas, tal como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 4: Toma de datos. Última línea: fibra superior de la subrasante. Penúltima línea: intermedio de la subrasante. Segunda línea: intermedio de la base granular. Primera línea: fibra inferior de la carpeta.**



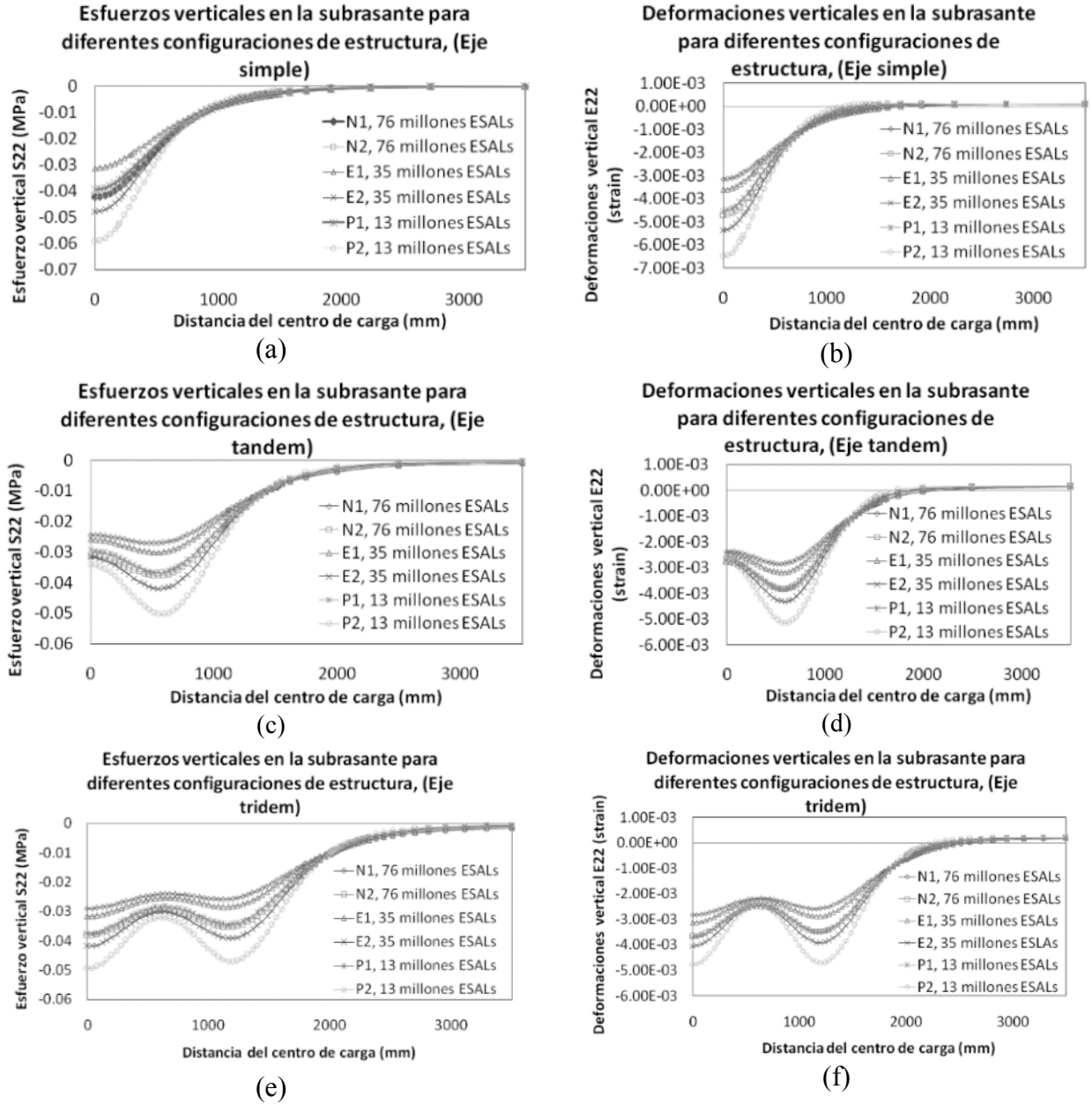
Sin embargo, y con la finalidad de mostrar los datos más representativos de la investigación, en la figura siguiente se muestra la distribución de esfuerzos, deformaciones y deflexiones para las estructuras N1 y N2 a nivel de la subrasante.

**Figura 5: Distribución de (a) esfuerzos verticales, (b) deformaciones verticales y (c) de deflexiones verticales, en la subrasante según tipo de configuración de carga**



En las figuras siguientes, se muestran los resultados obtenidos de esfuerzos y deformaciones desarrolladas en la subrasante, para las diferentes estructuras y configuraciones de carga.

Figura 6: Esfuerzos y deformaciones en la subrasante para (a) y (b) eje sencillo dual, (c) y (d) eje tándem, (e) y (f) eje tridem.



## CONCLUSIONES

De los resultados anteriores se puede extraer lo siguiente:

- Puesto que el análisis se basa en información típica del país, se logra una caracterización del comportamiento mecánico estructural de estructuras de pavimento típicas y condiciones de carga de Costa Rica, que se proyecta complementar con investigaciones posteriores.



- El modelo definido es adecuado para la caracterización de las estructuras analizadas. Esto se pudo verificar en la validación del modelo, realizada previo al análisis. La validación señala diferencias porcentuales pequeñas entre los resultados arrojados por los distintos programas.
- Se da una distribución uniforme de los esfuerzos en las capas de pavimento, desarrollándose una interacción entre los bulbos de esfuerzos de los ejes tándem y trídem, tal como se puede observar en la Figura 5. Esto genera que los bulbos de esfuerzo se superpongan con la profundidad, lo que demuestra que existe influencia de la carga de cada llanta contigua.
- Con respecto a los esfuerzos horizontales, se concentran valores mayores en la carpeta asfáltica. La mayor concentración se da bajo el área de carga, lo que generalmente resulta en el agrietamiento por fatiga. Particularmente en el caso de los ejes trídem, la concentración del esfuerzo es mayor bajo la llanta central del eje.
- Las configuraciones definidas para transportar cargas mayores evidencian ser adecuadas en cuanto a la distribución de los esfuerzos y deformaciones en la subrasante. Esto resulta en un incremento en la vida útil. El resultado se invierte cuando se consideran las deflexiones (Figura 5).
- Es posible observar que estructuras más robustas, asociadas a solicitaciones mayores, experimentan esfuerzos y deformaciones mayores, lo que indica que la importancia de la regulación de la carga es un elemento importante de considerar en rutas de alto tránsito vehicular. Se recalca la importancia que tienen los diseños adecuados (Figura 6).
- Es importante recalcar que estos resultados fueron obtenidos para los valores establecidos por ley, sin embargo, se ha demostrado que las solicitaciones son aún mayores en algunas rutas nacionales. Esto puede resultar en un incremento en los niveles de carga a que se someten las estructuras analizadas en la presente investigación.
- Los valores graficados en el presente informe fueron tomados bajo el centroide de las llantas de los vehículos, con la finalidad de observar la influencia de una llanta sobre la otra, por lo que los valores podrían aumentar al máximo justo debajo de la carga aplicada.
- Se demuestra que las teorías de diseño empíricas utilizadas hasta la fecha han sido acertadas en la utilización de estructuras menos robustas para los casos donde las solicitaciones de tránsito son menores.
- Con estos resultados se logra analizar de manera más realista el comportamiento de las estructuras típicas de pavimento flexible en Costa Rica. Esto constituye un insumo para la introducción de parámetros en la Guía de Diseño Mecánico – Empírica de Pavimentos que se encuentra actualmente en desarrollo para el país.

## REFERENCIAS

AEPO S.A. Ingenieros consultores. (2000). *Cálculo del daño producido por un vehículo pesado en firmes de carreteras*. Recuperado el 16 de abril de 2012, de AEPO S.A. Ingenieros consultores: <http://www.aepo.es>

Allen, J., & Badilla, G. (2011). *Determinación de la carga de diseño para pavimentos flexibles en Costa Rica*. Río de Janeiro, Brasil: XVI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto.

Broncano Flores, J. (2011). *Evaluación de los coeficientes de daño producido por vehículos en la estructura de pavimento de la carretera Casma - Huaraz tramo Punta Callan - Huaraz - 2010*. Huaraz - Perú: Tesis para optar por el título de ingeniero civil.

Garnica, P., Gómez, J., & Sesma, J. (2002). *Mecánica de Materiales Para Pavimentos*. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 197.

Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Desing*. New Jersey, United States of American: Prentice-Hall, Inc.

Ishak, S., Sridhar, B., Zhang, Z., & Shin, H. ((2010)). *Characterization and Development of Axel Load Spectra to Enhance Pavement Desing and Performance on the Basis of the New Mechanistic-Empirical Desing Guide in Louisiana*. Washington, D.C.: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2153, ISSN: 0361-1981, pp. 121-129.

Leiva, P., Loría, L., & Navas, A. (2011). *Comparación entre modelación de respuestas de pavimentos flexibles con análisis de multicapa elástica, viscoelasticidad y elemento finito*. Río de Janeiro, Brasil: XVI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto.

Reyes, O., Camacho, J., & Reyes, F., (2004). *Comparación de pavimento flexible por elementos finitos y cálculo teórico*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina., n. 14, p. 6-13.

Rodríguez, J. (2011). *Characterization of Traffic Load and Local Calibration of MEPDG for New Mexico*. Albuquerque, New Mexico: Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science Civil Engineering, University of New Mexico.

Troncoso, J. (2011). *Evaluación del Espectro de Carga y Coeficientes de Daño en el Corredor de la Avenida Bayacá, Bogotá D.C*. Bogotá: Trabajo final de maestría para optar por el título de Magister en Ingeniería - Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia.

Vega, L., & Vives, J. (2009). *Beneficios para la Red Vial Primaria de Costa Rica mediante el uso de un sistema eficiente de control de carga*. San José, Costa Rica: IV Congreso Centroamericano de Fondos Viales.