



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

PROPUESTA: LM-PI-UMP-002-12

CONFIGURACIÓN DE CARGA: ANÁLISIS CON ELEMENTO FINITO PARTE 1

INFORME FINAL

Preparado por:
Unidad de Materiales y Pavimentos

San José, Costa Rica
junio de 2013

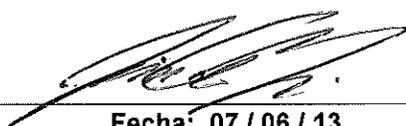
1. Informe LM-PI-UI-002-12		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: CONFIGURACIÓN DE CARGA: ANÁLISIS CON ELEMENTO FINITO		4. Fecha del Informe junio de 2013
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
8. Notas complementarias		
9. Resumen <i>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, según lo expuesto en el artículo "Determinación de la carga de diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica" que fue presentado en el pasado XVI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto en Río de Janeiro, Brasil.</i> <i>Con la presente investigación se inicia un proceso de análisis de los resultados obtenidos por medio de la encuesta de carga. Esto con la finalidad de entender el comportamiento mecánico dentro de las estructuras de pavimento, en función de esfuerzos, deformaciones y deflexiones ante condiciones específicas de tipo de carga. Las variables del análisis son área y magnitud. El objetivo radica en generar herramientas fundamentales que son necesarias para la formulación y aplicación de parámetros adecuados en el desarrollo de la Guía Mecánico-Empírica de Diseño de Costa Rica, que será fundamental en la mejora de la calidad de las obras de infraestructura vial del país.</i>		
10. Palabras clave CONFIGURACIÓN DE CARGA, ELEMENTO FINITO, COMPORTAMIENTO MECÁNICO, PAVIMENTOS FLEXIBLES	11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 46
13. Preparado por: Ing. Paulina Leiva Padilla Investigadora Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 07 / 06 / 13	Ing. Jaime Allen Monge, MSc Investigador asociado PITRA  Fecha: 07 / 06 / 13	Ing. Gustavo Badilla Vargas Investigador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 07 / 06 / 13
14. Revisado por: Ing. José Pablo Aguilar, PhD Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos  Fecha: 07 / 06 / 13	15. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, PhD Coordinador General PITRA  Fecha: 07 / 06 / 13	



TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
RESUMEN EJECUTIVO	7
1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	8
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.3 ANTECEDENTES	9
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	10
1.5 MARCO TEÓRICO.....	11
2. METODOLOGÍA PROPUESTA	14
2.1 INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
2.2 INVESTIGACIÓN DE DOCUMENTACIÓN E INFORMACIÓN EXISTENTE DE ESTRUCTURAS Y CARGAS EN COSTA RICA	15
2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA, CARGAS Y PROPIEDADES DEL MODELO ÓPTIMAS.....	15
2.4 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	19
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	21
3.1 DEFINICIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	21
3.2 ANÁLISIS MECÁNICO DE LAS RESPUESTAS DEL PAVIMENTO.....	24
3.2.1 NARANJO – PEAJE: INFLUENCIA DE CADA TIPO DE EJE	25
A CONTINUACIÓN SE DISCUTE SOBRE LA INFLUENCIA DE CADA TIPO DE CONFIGURACIÓN DE EJE EN LAS DOS ESTRUCTURAS EXTREMAS, 100% Y 0% DE VIDA REMANENTE DE LA ESTRUCTURA DE DISEÑO RESPECTO AL TRÁFICO PRESENTE EN LA RUTA NARANJO – PEAJE.....	
3.2.1.1 EJE SENCILLO DUAL.....	25
3.2.1.2 EJE TÁNDEM	30
3.2.1.3 EJE TRÍDEM	34
3.2.1.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS SEGÚN CONFIGURACIÓN DEL ÁREA DE CARGA	37
3.2.2 INFLUENCIA DEL TIPO DE EJE DIFERENTES RUTAS: PÉREZ ZELEDÓN, ESPARZA Y NARANJO ..	39
4. CONCLUSIONES.....	43
4. RECOMENDACIONES	44
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DAÑO.	12
FIGURA 2. RELACIÓN ENTRE LA PRESIÓN DE CONTACTO Y LA PRESIÓN DE LA LLANTA.....	13
FIGURA 3. GEOMETRÍA DEL ÁREA DE CARGA.....	14
FIGURA 4. ESQUEMA METODOLÓGICO.....	15
FIGURA 5. CONFIGURACIONES Y CARGAS LEGALES DE LOS PRINCIPALES VEHÍCULOS DE CARGA EN COSTA RICA.....	17
FIGURA 6. EJE (A) SENCILLO DUAL, (B) TÁNDEM, (C) TRIDEM.....	19
FIGURA 7. GEOMETRÍA PARA EJE (A) SENCILLO DUAL, (B) TÁNDEM, Y (C) TRÍDEM..	20
FIGURA 8. ESTRUCTURA DEL MODELO.....	22
FIGURA 9. COMPARACIÓN ESFUERZOS Y DEFORMACIONES. VALIDACIÓN DEL MODELO.....	23
FIGURA 10. COMPARACIÓN ESFUERZOS Y DEFORMACIONES (A, C) HORIZONTALES Y (B, D) VERTICALES A NIVEL DE LA SUBRASANTE ENTRE LOS RESULTADOS DE 3D MOVE Y ABAQUS.....	24
FIGURA 11. TOMA DE DATOS. LÍNEA AMARILLA: FIBRA SUPERIOR DE LA SUBRASANTE. LÍNEA VERDE: INTERMEDIO DE LA SUBRASANTE. LÍNEA AZUL: INTERMEDIO DE LA BASE GRANULAR. LÍNEA ROJA: FIBRA INFERIOR DE LA CARPETA.....	25
FIGURA 12. CONFIGURACIÓN DE (A) ESFUERZOS, (B) DEFORMACIONES Y (C) DEFLEXIONES, NARANJO PEAJE, ESTRUCTURA N1, 100% DE LA VIDA REMANENTE (EJE SENCILLO DUAL).....	26
FIGURA 13. CONFIGURACIÓN DE (A) ESFUERZOS, (B) DEFORMACIONES Y (C) DEFLEXIONES, NARANJO PEAJE, ESTRUCTURA N2 (EJE SENCILLO DUAL).....	28
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS (A) HORIZONTALES Y (B) VERTICALES EJE SENCILLO DUAL, ESTRUCTURA N1 (CUARTO DE EJE).....	29
FIGURA 15. CONFIGURACIÓN DE (A) ESFUERZOS, (B) DEFORMACIONES Y (C) DEFLEXIONES NARANJO PEAJE, ESTRUCTURA N1 (EJE TÁNDEM).....	30



FIGURA 16. CONFIGURACIÓN DE (A) ESFUERZOS, (B) DEFORMACIONES Y (C) DEFLEXIONES NARANJO PEAJE, ESTRUCTURA N2 (EJE TÁNDEM)	31
FIGURA 17. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS (A) HORIZONTALES Y (B) VERTICALES PARA EJE TÁNDEM, ESTRUCTURA N1 (CUARTO DE EJE)	32
FIGURA 18. CONFIGURACIÓN DE (A) ESFUERZOS, (B) DEFORMACIONES Y (C) DEFLEXIONES NARANJO PEAJE, ESTRUCTURA N1 (EJE TRIDEM).....	34
FIGURA 19. CONFIGURACIÓN DE (A) ESFUERZOS, (B) DEFORMACIONES Y (C) DEFLEXIONES NARANJO PEAJE, ESTRUCTURA N2 (EJE TRIDEM).....	35
FIGURA 20. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS (A) HORIZONTALES Y (B) VERTICALES EJE TRÍDEM, ESTRUCTURA N1 (CUARTO DE EJE)	36
FIGURA 21. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN LA SUBRASANTE SEGÚN TIPO DE CONFIGURACIÓN DE CARGA	37
FIGURA 22. DISTRIBUCIÓN DE DEFORMACIONES VERTICALES EN LA SUBRASANTE SEGÚN TIPO DE CONFIGURACIÓN DE CARGA	38
FIGURA 23. DISTRIBUCIÓN DE DEFLEXIONES VERTICALES EN LA SUBRASANTE SEGÚN TIPO DE CONFIGURACIÓN DE CARGA	38
FIGURA 24. (A) ESFUERZOS Y (B) DEFORMACIONES EN LA SUBRASANTE PARA DIFERENTES ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO (EJE SENCILLO DUAL DE CARGA).....	40
FIGURA 25. (A) ESFUERZOS Y (B) DEFORMACIONES EN LA SUBRASANTE PARA DIFERENTES ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO (EJE TÁNDEM DE CARGA).....	41
FIGURA 26. (A) ESFUERZOS Y (B) DEFORMACIONES EN LA SUBRASANTE PARA DIFERENTES ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO (EJE TRÍDEM DE CARGA)	42



ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CONFIGURACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS POR ANALIZAR	16
TABLA 2. GEOMETRÍAS POR TIPO DE EJE	18
TABLA 3. DIFERENCIAS PORCENTUALES DE LOS RESULTADOS RESPECTO A ABAQUS	23



RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación fue definida como complemento a una línea de investigaciones de la Unidad de Materiales y Pavimentos, del Programa de Infraestructura del Transporte, del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Se basa en datos de la encuesta de carga de las estaciones de pesaje móvil que fueron facilitados por el Departamento de Pesos y Dimensiones del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, y en resultados desarrollados por la Unidad (Allen y Badilla 2011).

Con el presente informe se pretendió analizar los resultados obtenidos por medio de la encuesta de carga, de manera que se comprendiera de forma adecuada la respuesta del pavimento (por ejemplo: esfuerzos, deformaciones y deflexiones) ante distintas condiciones de carga con respecto al tipo de eje. Todo lo anterior es parte del desarrollo de herramientas fundamentales que son necesarias para la formulación y aplicación de parámetros necesarios para la formulación de la Guía Mecánico-Empírica de Diseño de Costa Rica, que será un paso muy importante en la mejora de la calidad de las obras de infraestructura vial del país.

1. INTRODUCCIÓN

Los principales factores que están involucrados en el daño de las vías de Costa Rica y países de la región (Vega y Vives 2009) son:

- Diseños inadecuados por estimación del tránsito circulante de manera poco consistente con las condiciones reales.
- La calidad deficiente de los materiales de base, subbase y carpeta asfáltica.
- El pobre control de la calidad en el desarrollo de la obra.
- El tipo de terreno de sustentación y su heterogeneidad.
- La utilización de asfaltos sin consideración de los factores climáticos.

Propuesta LM-PI-UI-002-12	Fecha de emisión: 07 de junio de 2013	Página 7 de 46
---------------------------	---------------------------------------	----------------



- La carencia de drenajes y el mantenimiento de los existentes.
- El desmedido aumento en la flota vehicular.
- La falta de un control eficaz y eficiente en la carga.

Como el comportamiento mecánico de los pavimentos se relaciona directamente con la carga aplicada, el peso y las dimensiones de los vehículos son elementos de gran importancia para este tipo de estructuras.

Es por tanto que para mejorar la calidad de las obras viales en Costa Rica, se hace necesario conocer como estos elementos afectan las estructuras de pavimento, esto con el fin de lograr implementar una Guía de Diseño Mecánico-Empírica, que sirva como herramienta de utilidad para los ingenieros de carreteras del país.

1.1 Objetivo general

Analizar la influencia de las configuraciones de carga: eje sencillo dual, tándem, y trídem sobre el comportamiento mecánico de las estructuras de pavimento flexible típicas en Costa Rica ante distintas condiciones de carga, por medio de la metodología de elemento finito

1.2 Objetivos específicos

- Investigar literatura referente a la forma adecuada de caracterizar configuraciones de carga y estructuras de pavimento.
- Construir modelos que caractericen de manera adecuada configuraciones de carga y estructuras de pavimento en Costa Rica.
- Validar el trabajo de modelación realizado en el presente informe, por medio de comparaciones con resultados de la teoría de Boussinesq y programas de análisis de pavimentos basados en la teoría de multicapa elástica (BISAR) y diferencias finitas (3D MOVE), de manera que sea posible la futura formulación de modificaciones idóneas a las teorías de diseño actuales, en busca de optimización de las técnicas de diseño.



- Complementar por medio de análisis con elemento finito el estudio mecánico de los resultados obtenidos y presentados por la Unidad de Materiales y Pavimentos en el artículo: "Determinación de la carga de diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica" (Allen y Badilla 2011).
- Analizar la distribución de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en cada una de las capas que constituyen las estructuras de pavimento; y principalmente en la fibra inferior de la carpeta asfáltica y en la fibra superior de la subrasante, para las distintas configuraciones de carga.
- Generar herramientas de análisis que permitan la estimación de parámetros necesarios para la creación de la Guía de Diseño Mecánico-Empírico en Costa Rica.

1.3 Antecedentes

La Unidad de Materiales y Pavimentos, del LanammeUCR, inició sus estudios en esta área durante el 2007, cuando presentó los resultados obtenidos de la encuesta de carga para vehículos de carga y buses, que fueron realizados entre el 2005 y el 2006 en 8 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, 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.

Para evitar fallas prematuras en la vida útil por causa de cargas de tránsito mayores a las previstas. Esto se dio como respuesta a la debilidad respecto al control de las cargas de los vehículos que transitan en el país por parte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) y del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI). También se realizaron en noviembre



del 2008, servicios de pesaje temporal para las rutas 1 (Cañas), 32 (Braulio Carrillo), y 2 (Ochomogo).

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 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.

1.4 Justificación

Entre más representativo sea el modelo de diseño, mejor será la calidad de las carreteras, y consecuentemente el desarrollo del país. Una Red Vial en buen estado, asegura el acceso a los distintos puntos del país, y contribuye con la disminución en inversiones por tratamientos o diseños deficientes, mejorando la calidad del servicio a los usuarios.

Es por esto que se hace necesario estudiar la mecánica del comportamiento estructural de los pavimentos, de manera que se logre ir abriendo camino hacia la implementación de la Guía de Diseño Mecánico-Empírica para Costa Rica.

Por esta razón es que la modelación de la configuración de carga por medio de la metodología de elemento finito es de gran utilidad. El método del elemento finito es una herramienta que permite estimar de forma aproximada a la realidad, los esfuerzos, deformaciones y deflexiones, que se generan en la estructura de pavimento como respuesta a las cargas de tránsito.



1.5 Marco teórico

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 de Pavimentos Mecánico-Empírica (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 (Garnic, 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).

En la Figura 1, se muestra un diagrama de flujo para el cálculo del daño en las estructuras de pavimentos.

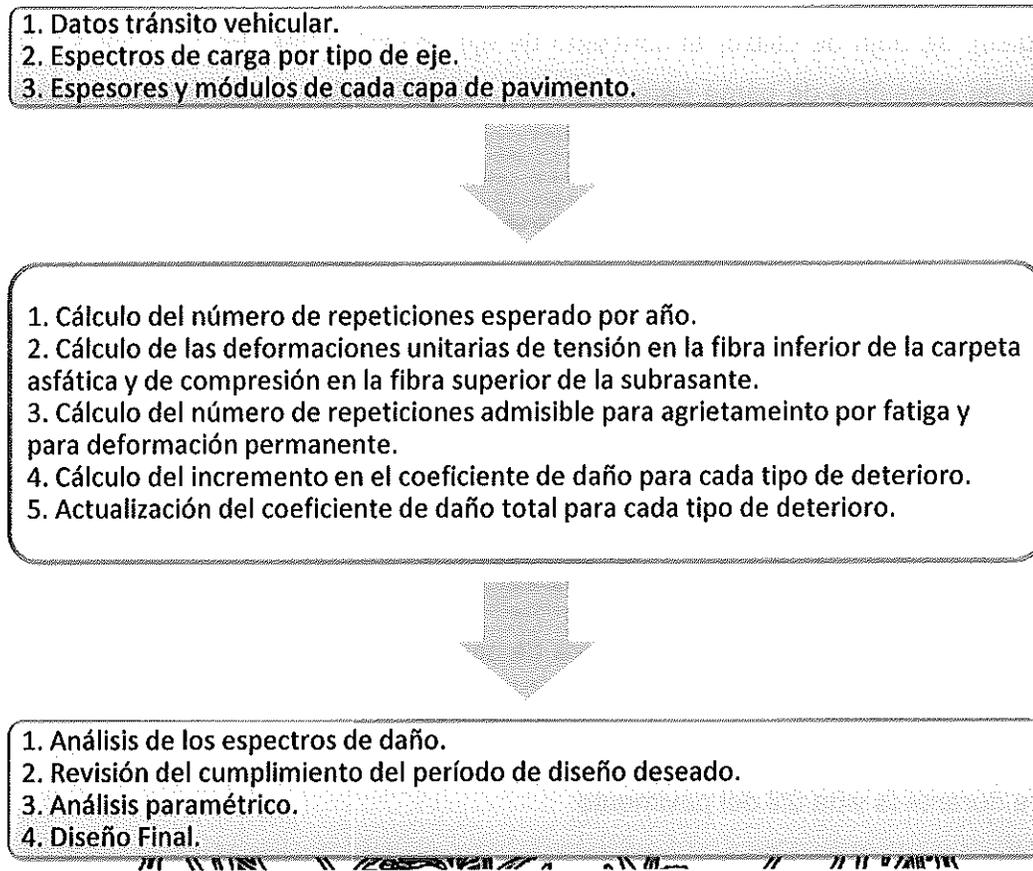


Figura 1. Diagrama de flujo para el cálculo de los espectros de daño.
Fuente: Garnica, 2009, modificada y adaptada por los autores.

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. Según se observa en la Figura 2, 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 la contacto; lo contrario ocurre con presiones altas en la llanta, ya que sus paredes entonces están a tensión.

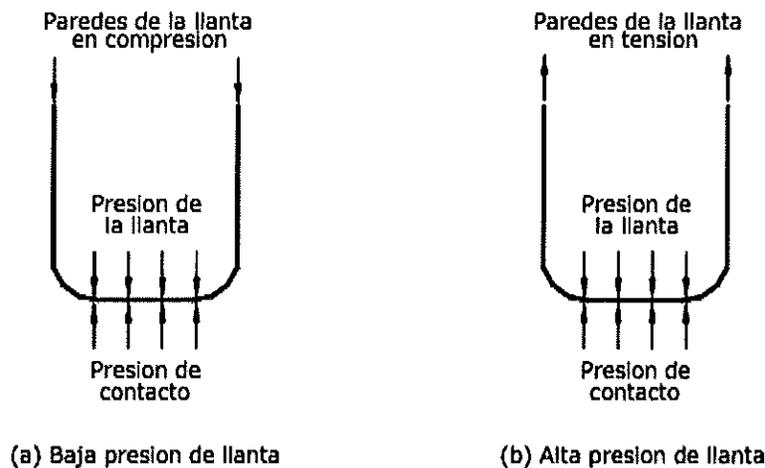


Figura 2. Relación entre la presión de contacto y la presión de la llanta
Fuente: Huang, 2004

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 3, se muestra la forma del área de contacto para cada llanta, la cual está compuesta de un rectángulo y dos semicírculos. Asumiendo una longitud L y un ancho de $0.6L$, el área de contacto se define como:

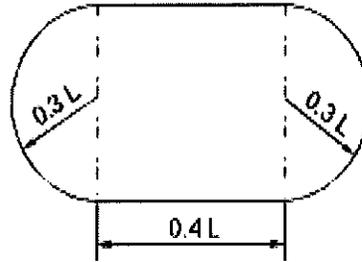


Figura 3. Geometría del área de carga
Huang, 2004

$$A_c = \pi(0.3L)^2 + (0.4L)(0.6L) = 0.5227L^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde A_c corresponde al área de contacto, que se obtiene dividiendo la carga de cada llanta entre la presión de inflado. Al manipular la ecuación se puede definir la longitud del lado como:

$$L = \sqrt{\frac{A_c}{0.5227}} \quad \text{Ecuación 2}$$

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.

2. METODOLOGÍA PROPUESTA

La presente investigación fue desarrollada siguiendo la metodología que se resume en la Figura 4, la cual se detalla a continuación.

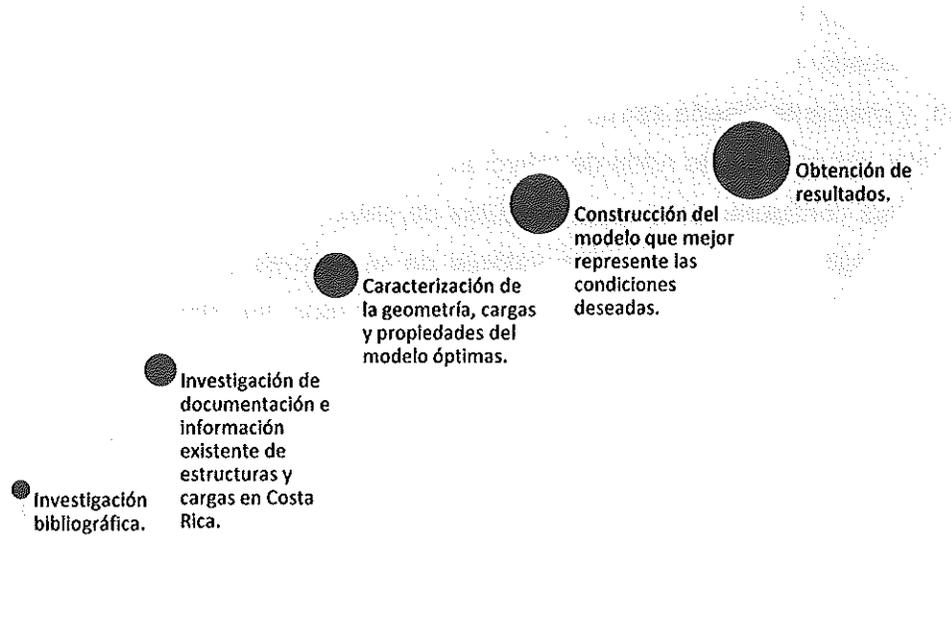


Figura 4. Esquema metodológico

2.1 Investigación bibliográfica

Para el desarrollo de este trabajo, se realizó una investigación literaria de artículos, tesis e informes, asociados a la temática de interés, con el objetivo de conocer cómo se ha enfocado dicha temática anteriormente.

2.2 Investigación de documentación e información existente de estructuras y cargas en Costa Rica

A partir del reconocimiento de la situación actual sobre el tema, se inició la recopilación de datos y documentación existente para las condiciones propias de Costa Rica, partiendo de la búsqueda de la recolección de investigaciones relacionadas que fueron desarrolladas por el LanammeUCR para tal objetivo.

2.3 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, 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

* Similar a Ruta 32 y SJ Alajuela

** Similar a Escazú SJ

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 3, para una longitud de lado según ecuación 2.

La configuración de vehículo y peso por eje se basa en los valores del Reglamento de Circulación por Carretera, publicado en el diario oficial La Gaceta No. 15, del miércoles 19 de enero del 2005. Se consideran los vehículos C2, C3, T3-S2 y T3-S3, tomando en cuenta el análisis estadístico realizado por Allen et al. 2011, donde se demuestra que estos representan cerca del 98.32% de todos los vehículos de carga en Costa Rica. La configuración de ejes y cargas se muestra en la Figura 5.

Tipo	Configuración del vehículo y peso por eje (Ton)		PVB (Ton)	
C2 Class 5				
Nom 1995	6.5	11	17.5	
Nom 2008	6.5	11	17.5	
Estados Unidos	5.5	9	14.5	
Costa Rica (2005)	6.0	10	16.0	
C3 Class 6				
Nom 1995	6.5	19.5	26.0	
Nom 2008	6.5	18.0	24.5	
Estados Unidos	5.5	15.5	21.0	
Costa Rica (2005)	6.0	16.5	22.5	
T3-S2 Class 9				
Nom 1995	6.5	19.5	18	44.0
Nom 2008	6.5	18	17	41.5
Estados Unidos	5.5	15.5	15.5	36.5
Costa Rica (2005)	6.0	16.5	16.5	39.0
T3-S3 Class 10				
Nom 1995	6.5	19.5	22.5	48.5
Nom 2008	6.5	18	23.5	48
Estados Unidos	5.5	15.5	19.0	40
Costa Rica (2005)	6.0	16.5	23.0	45.5

Figura 5. Configuraciones y cargas legales de los principales vehículos de carga en Costa Rica.
Fuente: Reglamento de circulación por carretera 2005, modificada y adaptada por los autores.

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 tándem y eje tridem.

Propuesta LM-PI-UI-002-12	Fecha de emisión: 07 de junio de 2013	Página 17 de 46
---------------------------	---------------------------------------	-----------------



Se asume que las llantas tienen un valor de presión de inflado de 0.8 MPa. Esto se debe al uso excesivo de la llanta radial para vehículos de carga y transporte de pasajeros, lo 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).

Las geometrías del área de contacto por tipo de eje se muestran en la **Tabla 2**, para los ejes sencillo dual, tándem, y tridem respectivamente.

Tabla 2. Geometrías por tipo de eje

		Tipo de eje		
		Sencillo dual	Tandem	Tridem
Carga	(lb)	11023	9094	8451
Presión	(MPa)	0.8	0.8	0.8
L	(cm)	33.7	30.6	29.5
0.4 L	(cm)	13.5	12.2	11.8
0.3 L	(cm)	10.1	9.2	8.8

La separación entre llantas que fue utilizada para cada uno de los tipos de ejes elegidos, se define en la Figura 6.

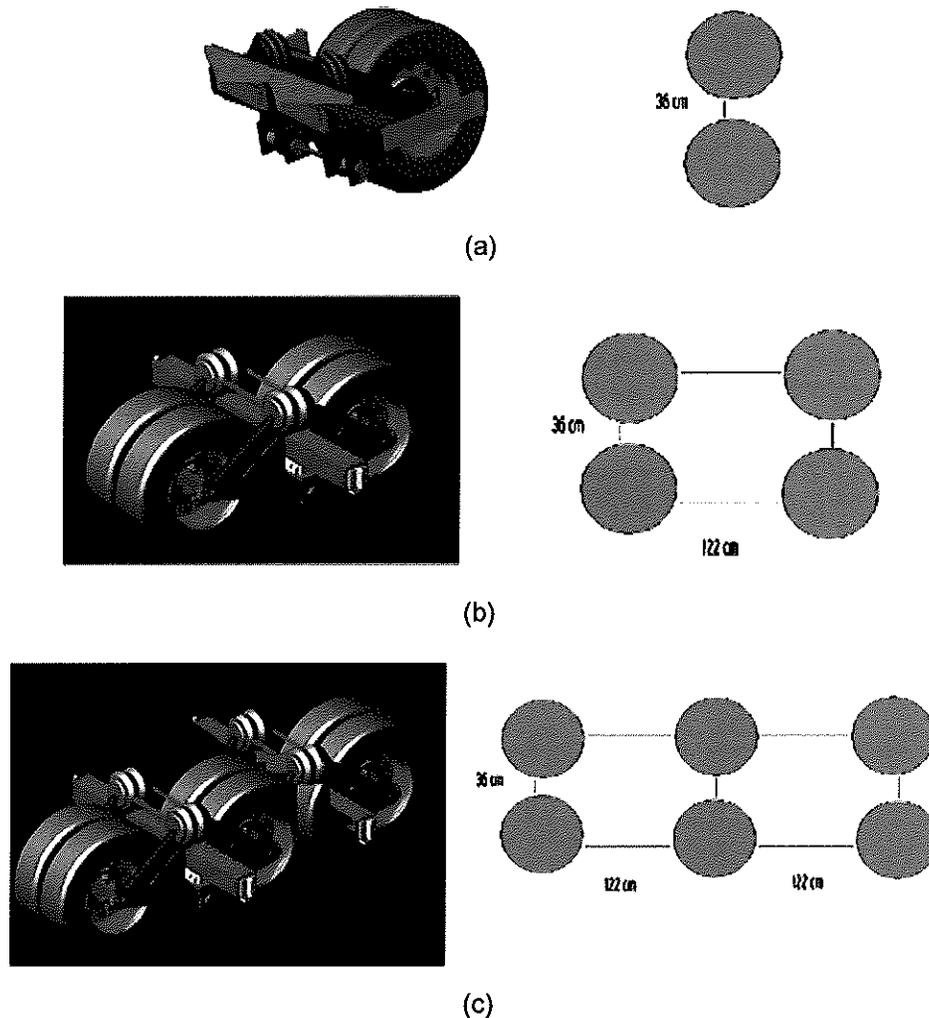
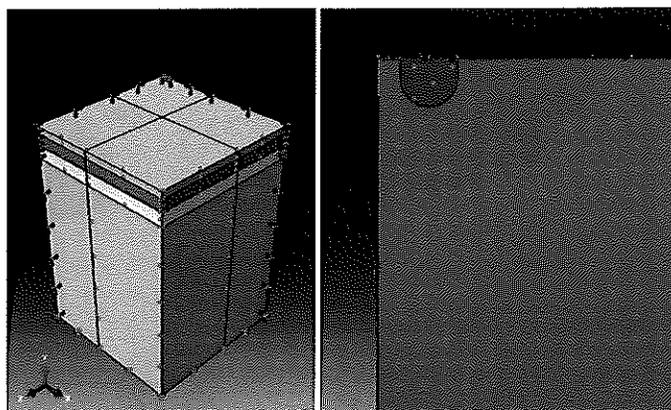


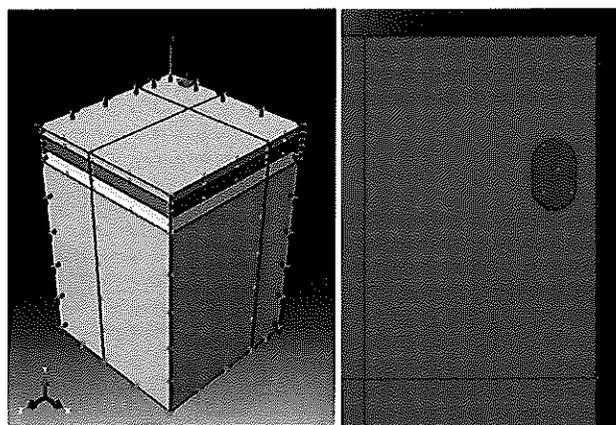
Figura 6. Eje (a) sencillo dual, (b) tándem, (c) tridem.
Fuente: Garnica, 2009

2.4 Construcción del modelo

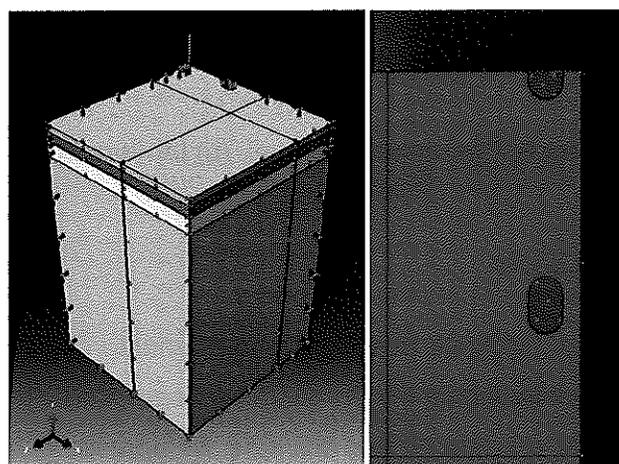
La modelación se realizó mediante el software de elemento finito ABAQUS. Para el análisis se utilizó un modelo tridimensional de un cuarto de estructura de pavimento, al cual se le definieron condiciones de simetría en sus dos ejes. Se aprovechó la capacidad del programa para minimizar los efectos generados por las condiciones de frontera que resultan de plantear el modelo. Esto es de gran importancia puesto que el análisis supone un espacio semi-infinito. La Figura 7, ilustra la geometría, configuración de carga y condiciones de frontera de las estructuras definidas.



(a)



(b)



(c)

Figura 7. Geometría para eje (a) sencillo dual, (b) tándem, y (c) trídem



3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Definición y validación del modelo

Se realizó un proceso de definición y validación del modelo a utilizar con la finalidad de representar adecuadamente la estructura de pavimento. Para tal objetivo, 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).

En el presente informe se modifican y adaptan los resultados obtenidos de la modelación de los autores en BISAR, 3D MOVE y ABAQUS. Esto se realiza a manera de comparación. Adicionalmente, se agrega el resultado obtenido de las ecuaciones fundamentales de la teoría de Boussinesq.

Como en las investigaciones previas, se parte de comparaciones entre los esfuerzos radiales y normales a nivel de la subrasante, para una estructura de pavimento con las siguientes características:

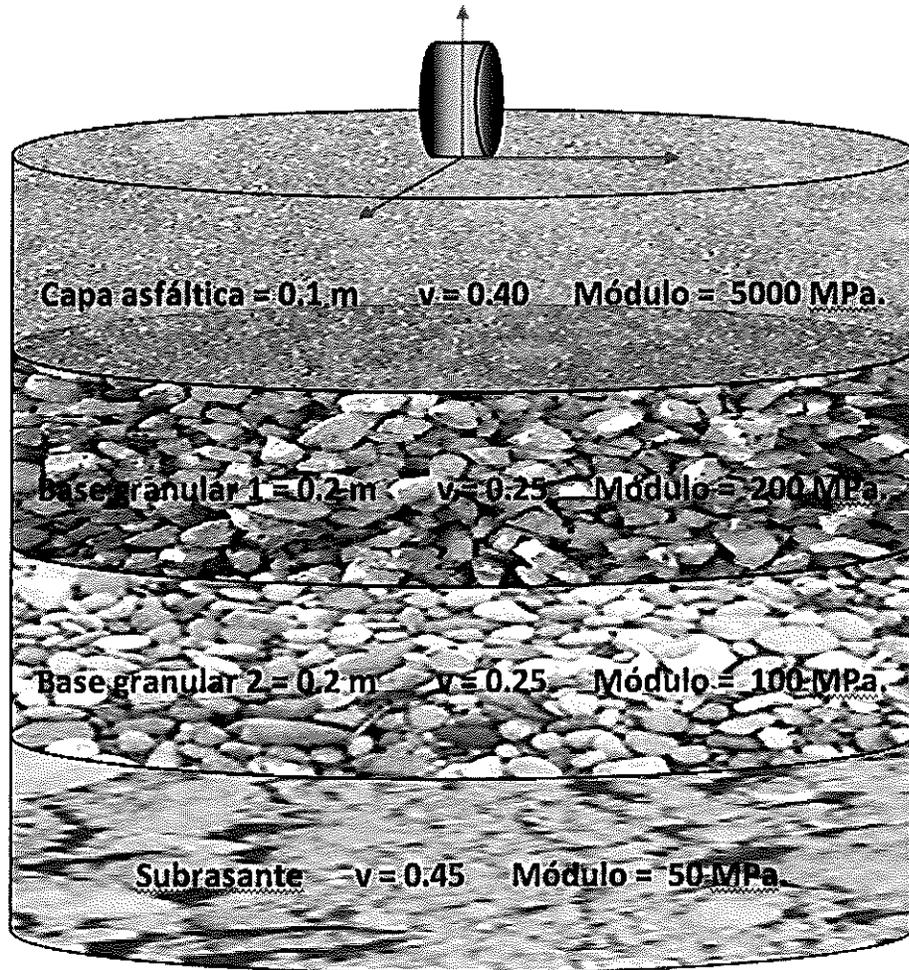


Figura 8. Estructura del modelo.
Fuente: Leiva et al, 2011

Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 9.

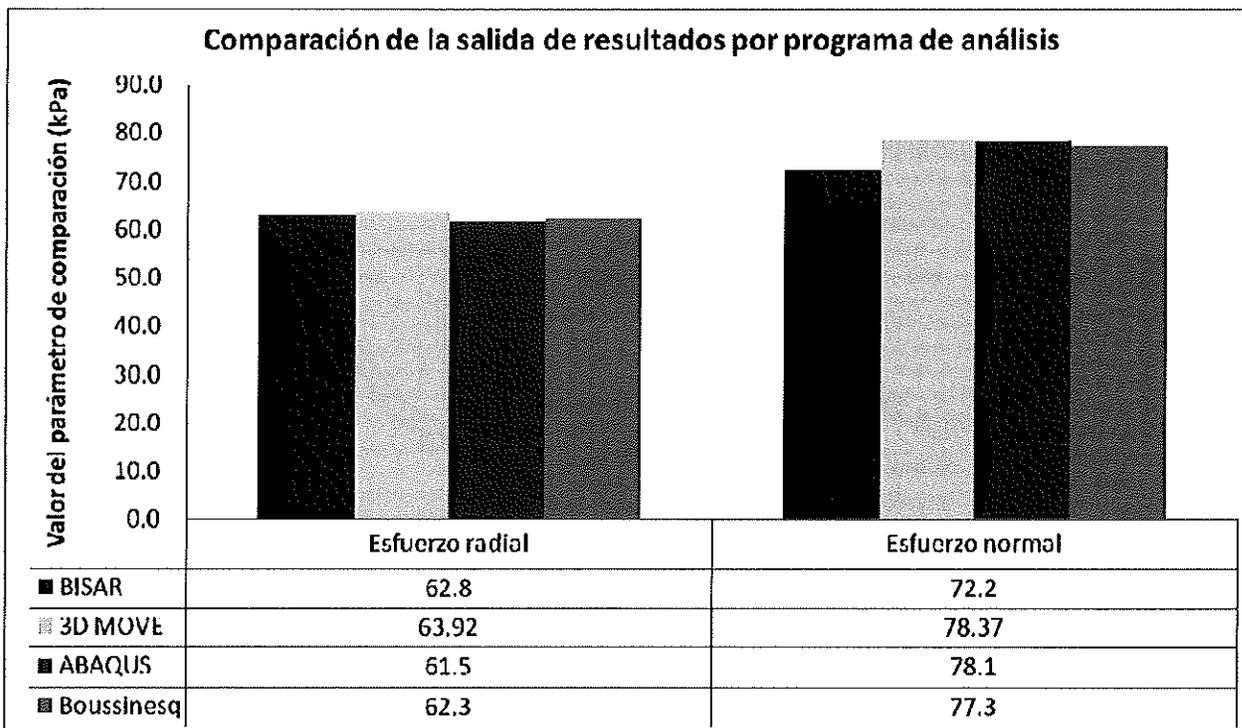


Figura 9. Comparación esfuerzos y deformaciones. Validación del modelo

Los resultados muestran que el modelo desarrollado por los autores para el rango elástico, es consistente con los resultados esperados según la teoría. Las diferencias identificadas se pueden asociar a las aproximaciones realizadas por el método de elemento finito y a que los cálculos con la teoría de Boussinesq no consideran la diferencia entre las propiedades mecánicas de las diferentes capas de pavimento. Las diferencias porcentuales en los resultados de cada uno de los parámetros con respecto a ABAQUS se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Diferencias porcentuales de los resultados respecto a ABAQUS

Parámetro	% de diferencia con el resultado de ABAQUS		
	BISAR	3D MOVE	Bousinesq
Esfuerzo radial	2%	4%	1%
Esfuerzo normal	7%	0%	1%

Para validar el modelo y complementar el estudio anterior, se extienden los análisis a la comparación de los esfuerzos y deformaciones desarrollados a nivel de la subrasante para la

configuración definida como N1 en el presente informe (Tabla 1), con el objetivo de observar si el comportamiento de tales parámetros es acorde con lo definido en la teoría. La comparación se muestra en la Figura 10.

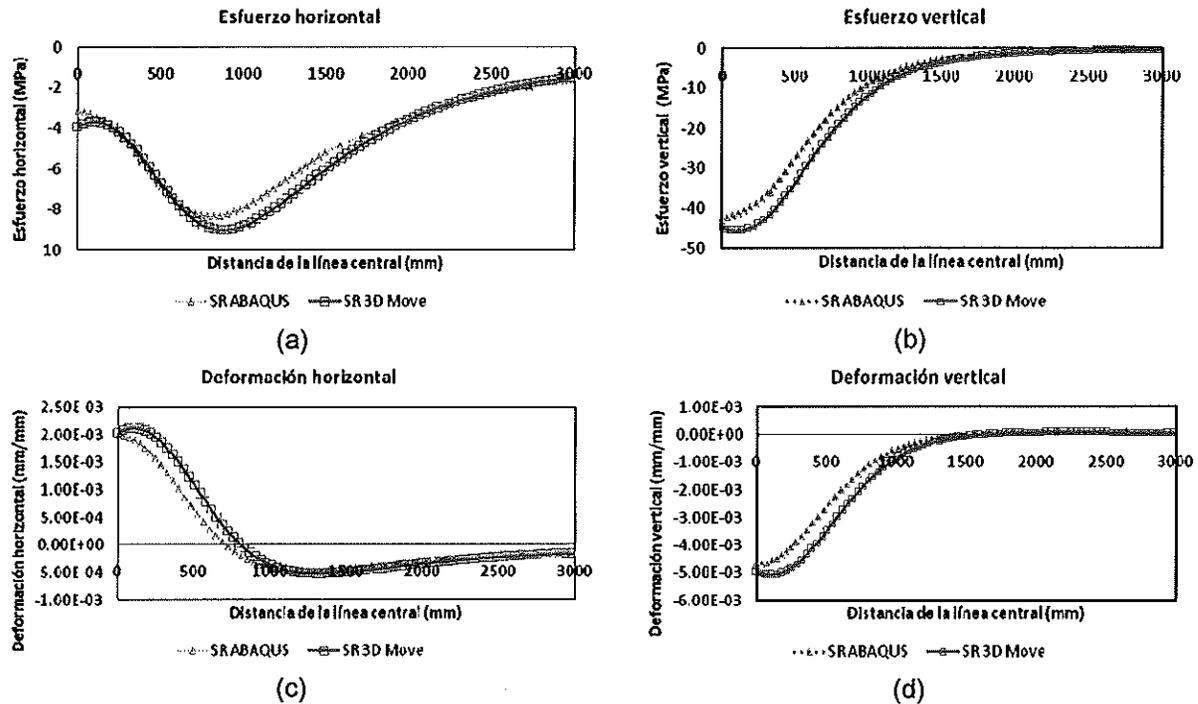


Figura 10. Comparación esfuerzos y deformaciones (a, c) horizontales y (b, d) verticales a nivel de la subrasante entre los resultados de 3D MOVE y ABAQUS

Los resultados permiten confirmar la validez del modelo, puesto que la distribución de los valores de esfuerzos y deformaciones es consistente con lo esperado según la teoría.

3.2 Análisis mecánico de las respuestas del pavimento

A cada una de las estructuras definidas en el estudio, se les midió los valores de esfuerzos, deformaciones y deflexiones 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. Dicha medición se realiza a la mitad de la distancia entre llantas, tal como se muestra en la siguiente figura.

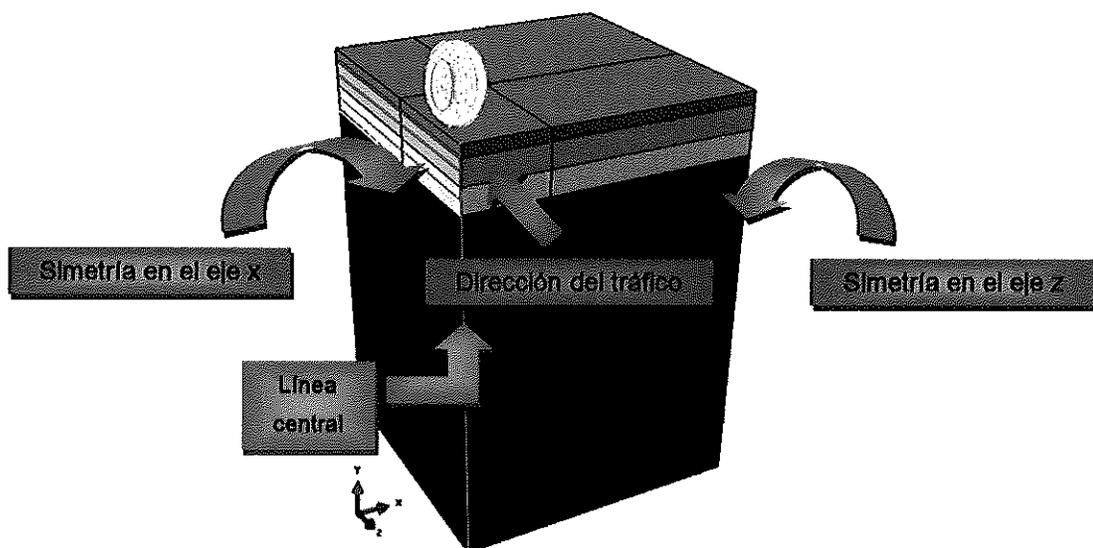


Figura 11. Toma de datos. Línea amarilla: fibra superior de la subrasante. Línea verde: intermedio de la subrasante. Línea azul: intermedio de la base granular. Línea roja: fibra inferior de la carpeta.

Para la primera parte del análisis, se toman datos de esfuerzos, deformaciones y deflexiones para los tres tipos de ejes, en las estructuras definidas como N1 y N2 en la Tabla 1, para cada una de las localidades anteriormente mencionadas, y los cuales se muestran en los siguientes gráficos.

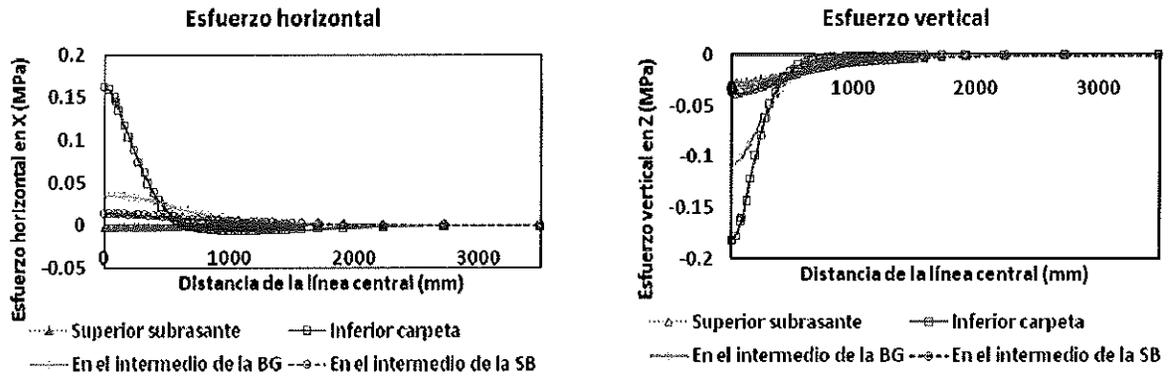
3.2.1 Naranjo – Peaje: Influencia de cada tipo de eje

A continuación se discute sobre la influencia de cada tipo de configuración de eje en las dos estructuras extremas, 100% y 0% de vida remanente de la estructura de diseño respecto al tráfico presente en la ruta Naranjo – Peaje.

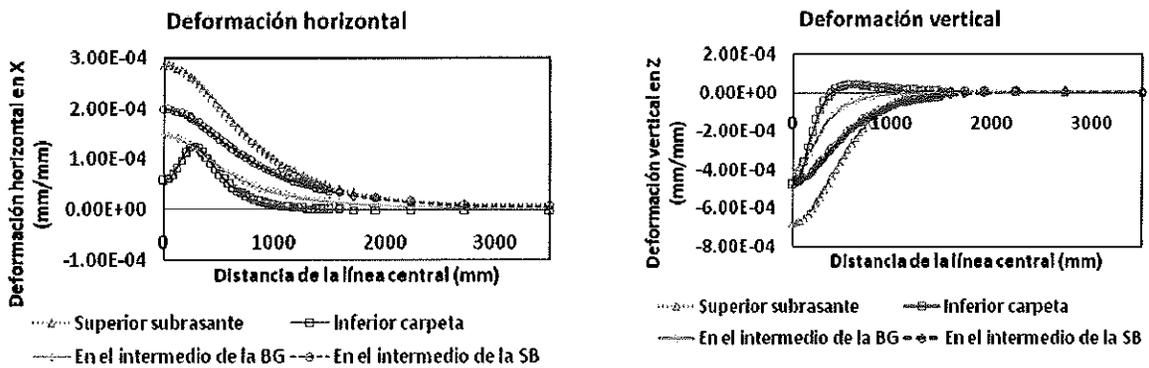
3.2.1.1 Eje sencillo dual

Eje sencillo dual, estructura N1

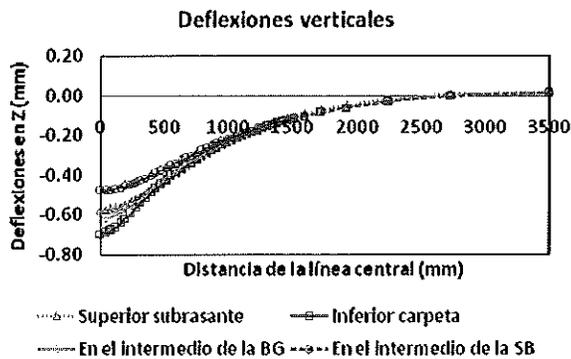
Para el eje sencillo dual en la configuración estructural N1, la distribución de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en la fibra inferior de la carpeta, la fibra superior de la subrasante, y el intermedio de las capas granulares es la siguiente.



(a)



(b)



(c)

Figura 12. Configuración de (a) esfuerzos, (b) deformaciones y (c) deflexiones, Naranjo Peaje, estructura N1, 100% de la vida remanente (Eje Sencillo Dual)

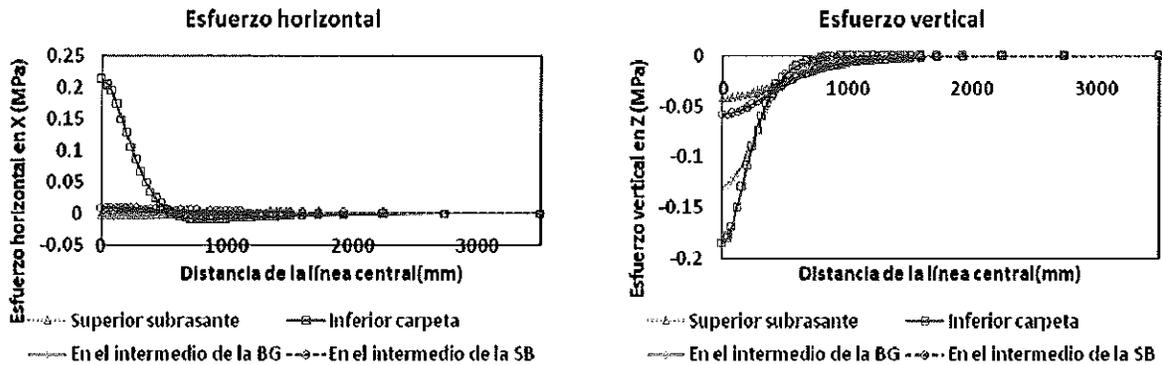
Los esfuerzos bidireccionales se distribuyen en cada una de la capas, de manera que los mayores valores se presentan en la carpeta asfáltica, y los menores en la subrasante.



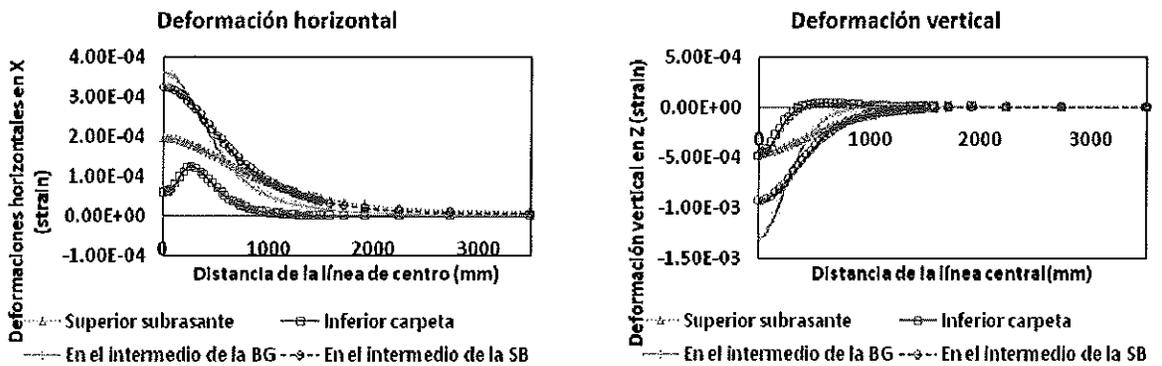
Las deformaciones, son mayores en las capas inferiores, y similares para el intermedio de la subbase y la parte superior de la subrasante, lo que es lógico respecto a la relación básica en esfuerzos y deformaciones para un valor de módulo específico en el rango elástico. Las deflexiones por su parte disminuyen con la profundidad. Esto se debe en parte al efecto de confinamiento desarrollado por las capas de la estructura. Se nota además que la máxima deflexión ocurre bajo la carga, y se reduce conforme se aleja radialmente de la misma.

Eje sencillo dual, estructura N2

En el caso del eje sencillo dual de la configuración estructural N2 (100% de la vida remanente), con valores de módulo menores que la configuración anterior (N1, 0% de la vida remanente), se nota un aumento en el valor de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones, y una diferencia más marcada en la variación de los esfuerzos horizontales para la carpeta asfáltica y las capas inferiores, respecto al caso anterior.



(a)



(b)

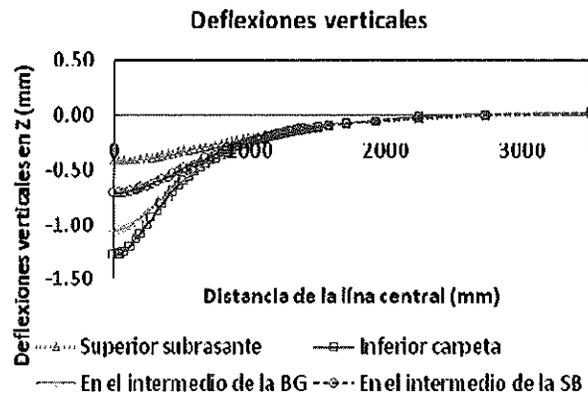
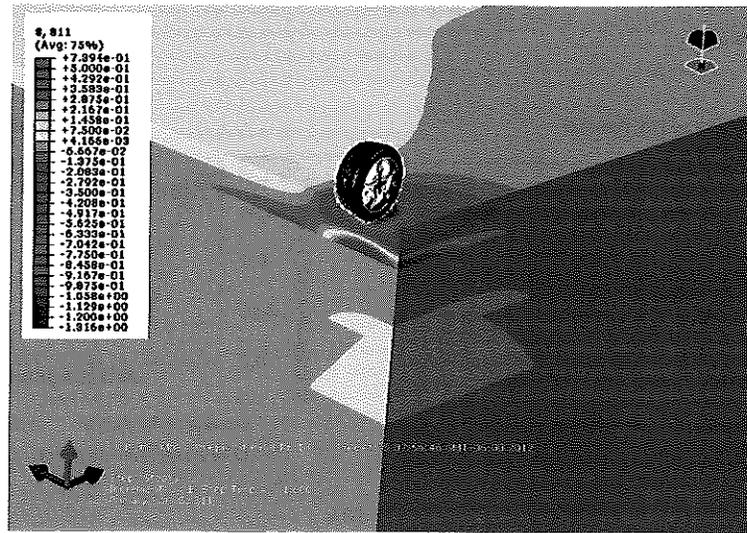
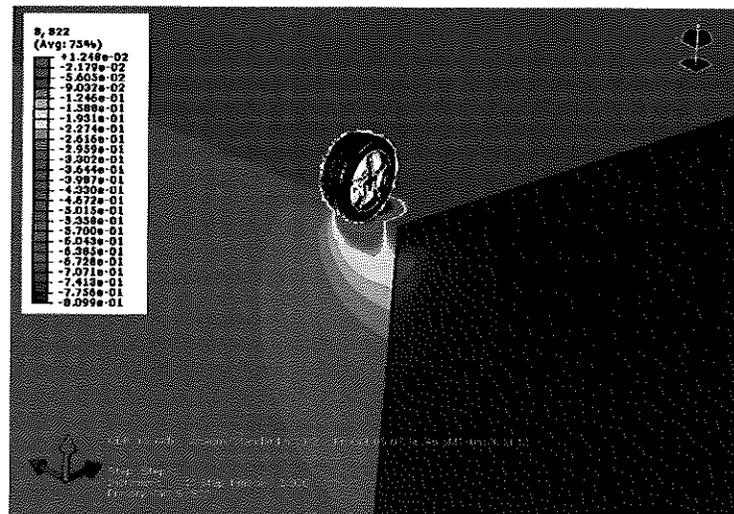


Figura 13. Configuración de (a) esfuerzos, (b) deformaciones y (c) deflexiones, Naranjo Peaje, estructura N2 (Eje Sencillo Dual)

La distribución de esfuerzos de la primera configuración se puede observar en la Figura 14. La estructura N2 presenta una distribución del bulbo de esfuerzos muy similar ya que ambas estructuras son sometidas a una misma configuración de carga.



(a)



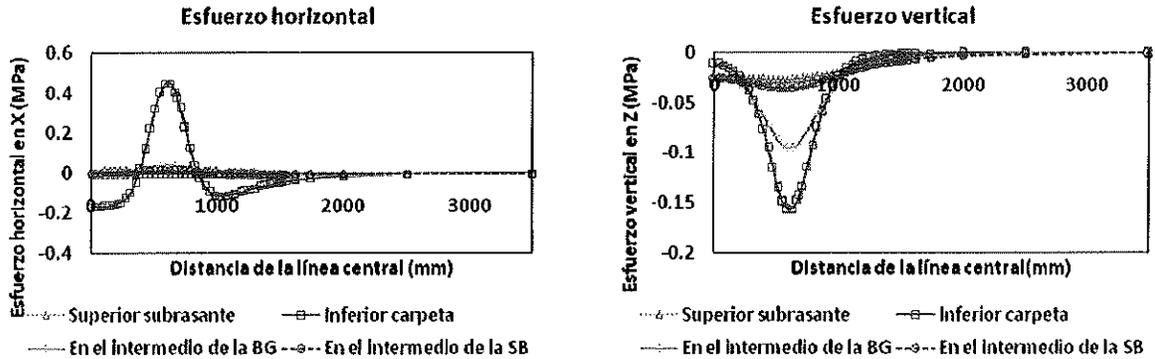
(b)

Figura 14. Distribución de esfuerzos (a) horizontales y (b) verticales eje sencillo dual, estructura N1 (Cuarto de eje).

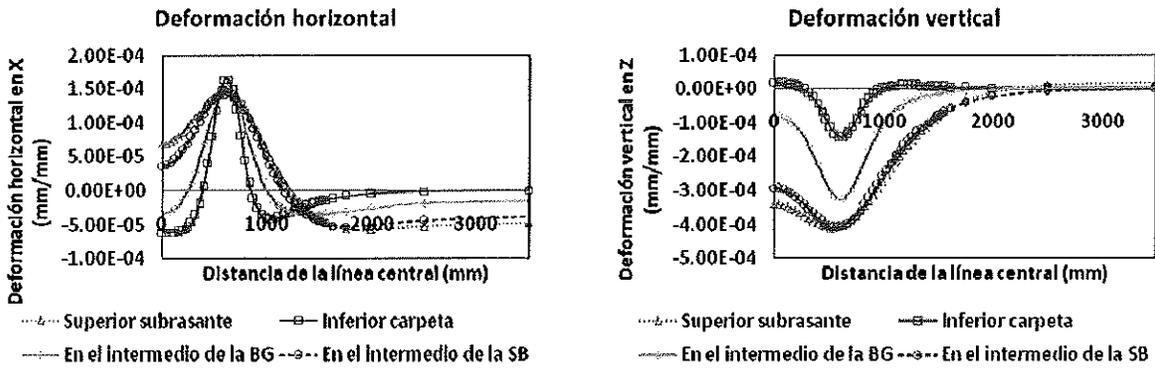
En la figura se nota como se distribuyen los esfuerzos verticales en las capas de pavimento en forma continua. En el caso de los esfuerzos horizontales, se notan incrementos en el nivel de esfuerzos en la parte inferior de cada una de las capas, siendo mayor el valor bajo la carpeta asfáltica.

De manera similar, se repite el análisis para los ejes tándem y trídem. Las distribuciones de esfuerzos, deformaciones y deflexiones se muestran en las siguientes figuras.

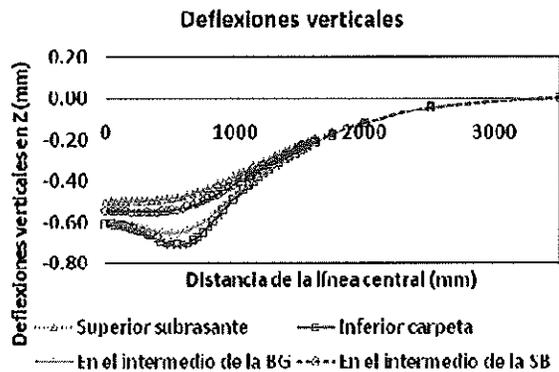
3.2.1.2 Eje tándem



(a)

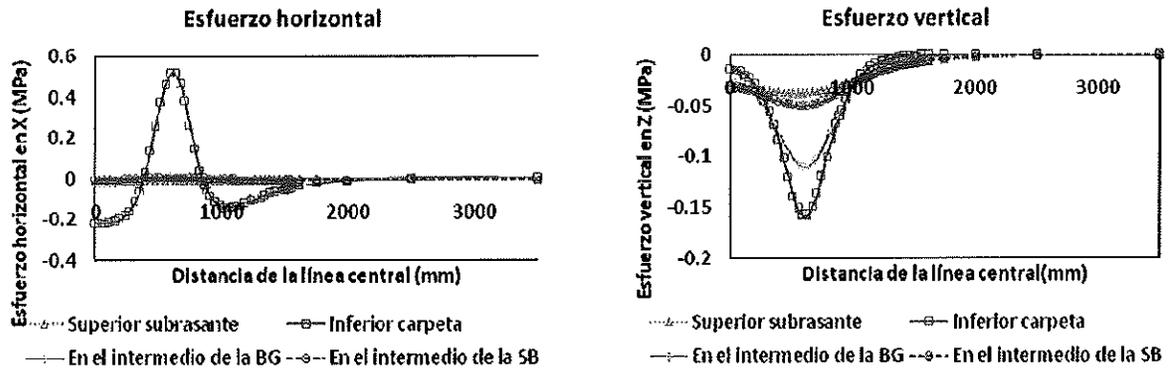


(b)

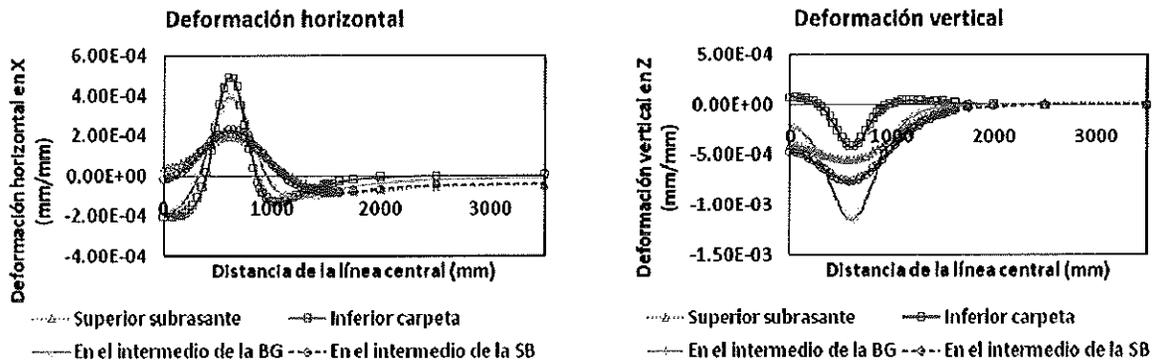


(c)

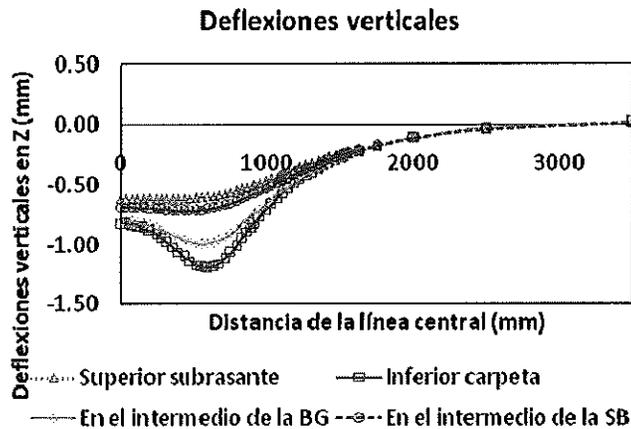
Figura 15. Configuración de (a) esfuerzos, (b) deformaciones y (c) deflexiones Naranjo Peaje, estructura N1 (Eje Tándem)



(a)



(b)

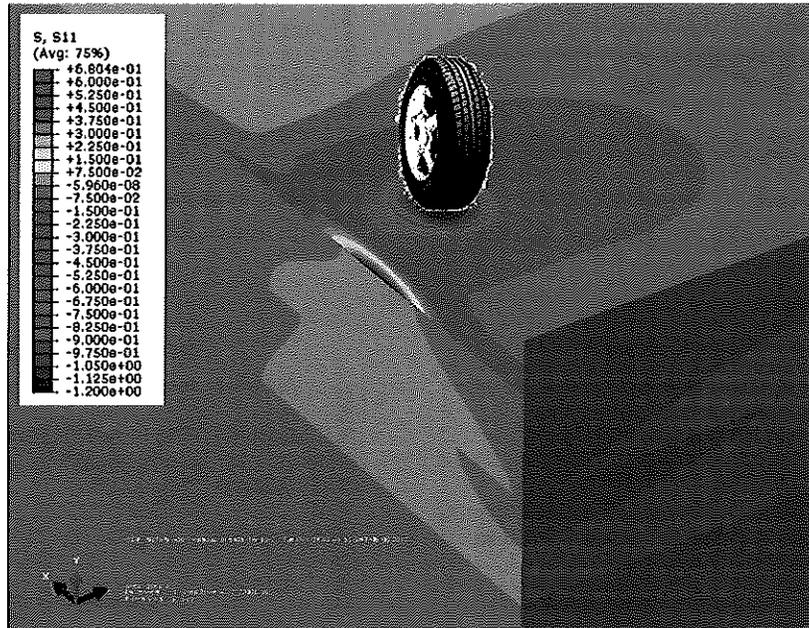


(c)

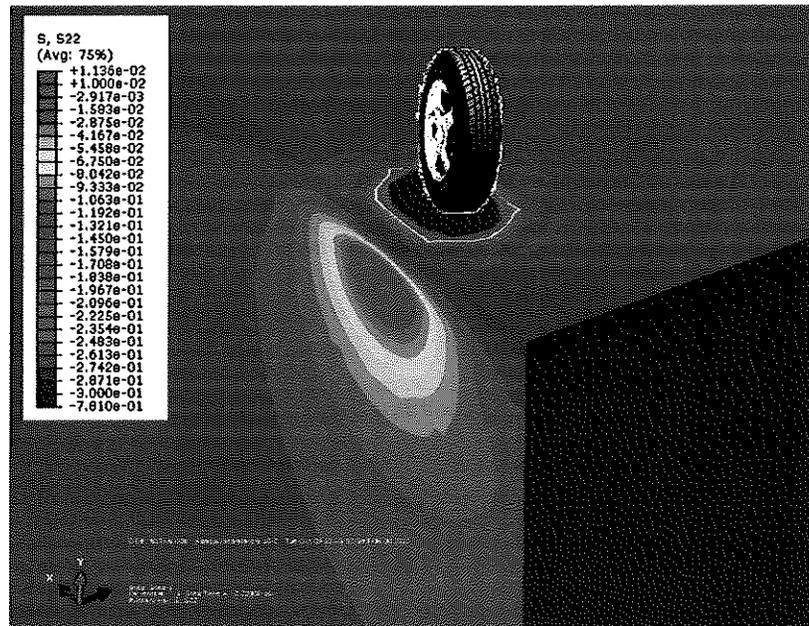
Figura 16. Configuración de (a) esfuerzos, (b) deformaciones y (c) deflexiones Naranjo Peaje, estructura N2 (Eje Tándem)

Se nota en este caso como el valor máximo se sigue ubicando bajo la llanta, y que en el centro de ambas cargas los valores son menores. El valor mínimo ocurre en los extremos.

La distribución de esfuerzos verticales y horizontales para estas configuraciones se puede observar en la Figura 17.



(a)



(b)

Figura 17. Distribución de esfuerzos (a) horizontales y (b) verticales para eje tándem, estructura N1 (Cuarto de eje).



Para efectos del presente informe se analiza el área central entre las llantas, con la finalidad de observar la influencia una llanta en la otra. En este escenario, se observan los dos bulbos de distribución de esfuerzos verticales, que presentan interacción en esta localidad. Es importante notar que los valores medidos son mayores justo bajo la carga.

Adicionalmente, se puede observar en la Figura 17 que se dan dos zonas de concentración de esfuerzos horizontales marcadas, en la carpeta asfáltica, indicando la existencia de dos puntos críticos para este tipo de ejes.

3.2.1.3 Eje tridem

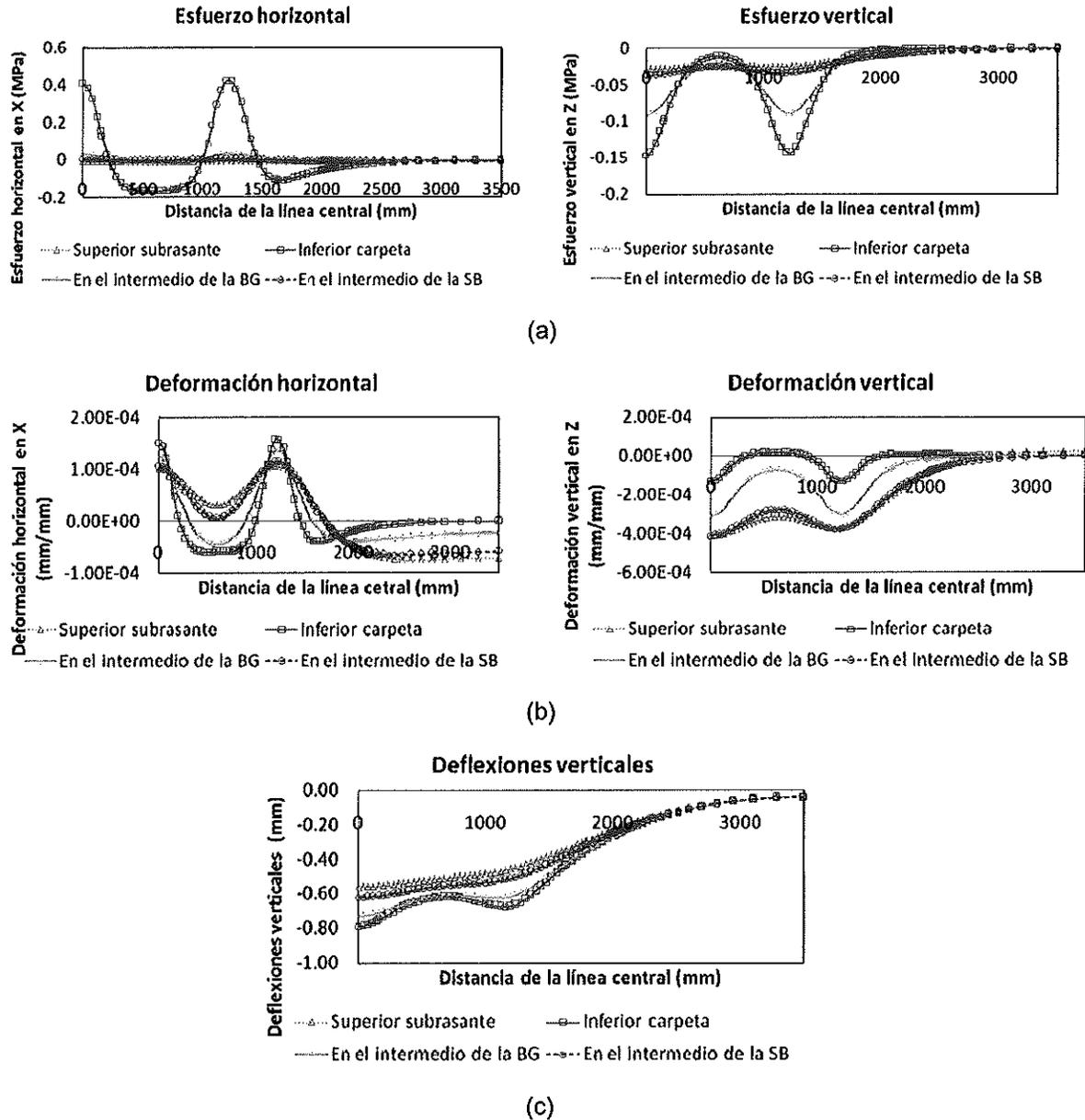


Figura 18. Configuración de (a) esfuerzos, (b) deformaciones y (c) deflexiones Naranjo Peaje, estructura N1 (Eje Tridem)

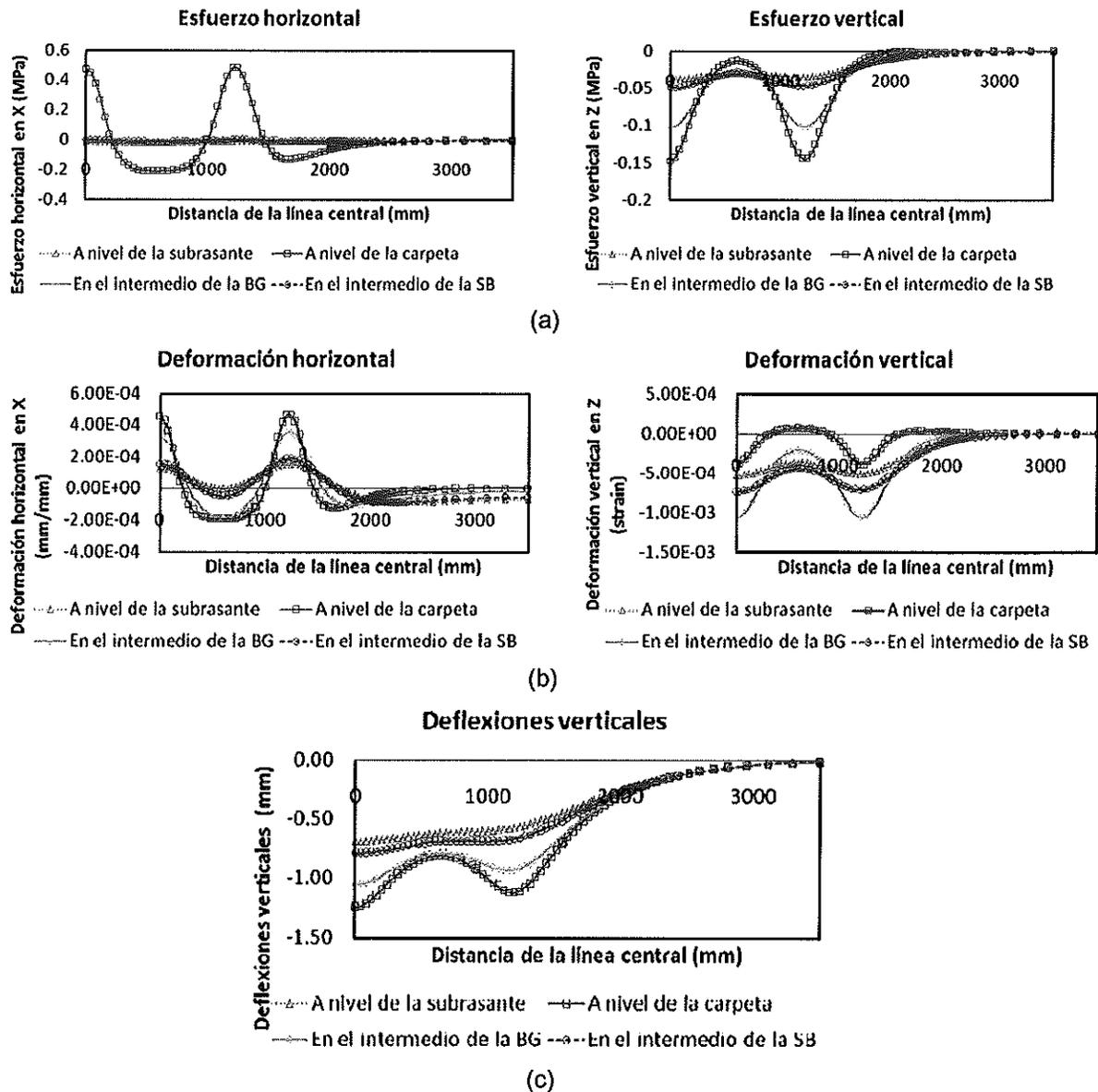
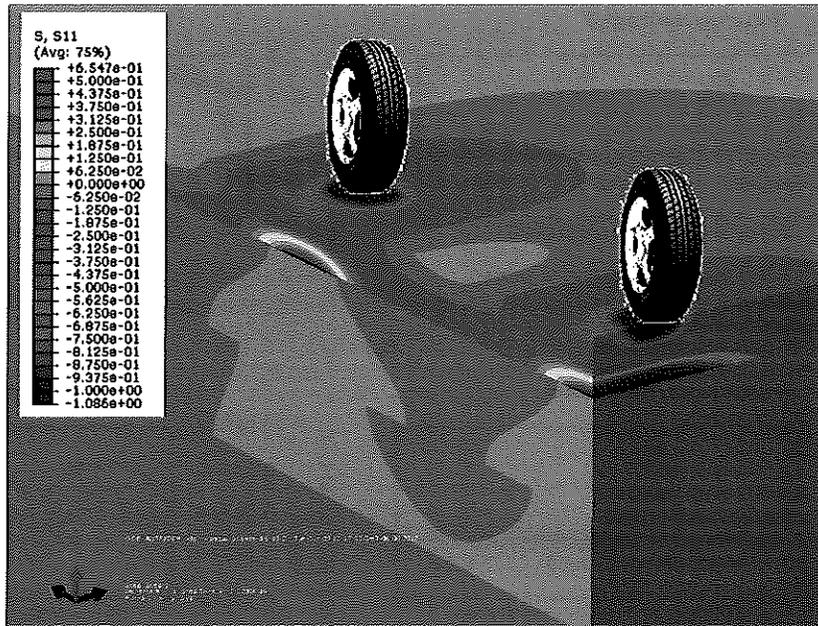


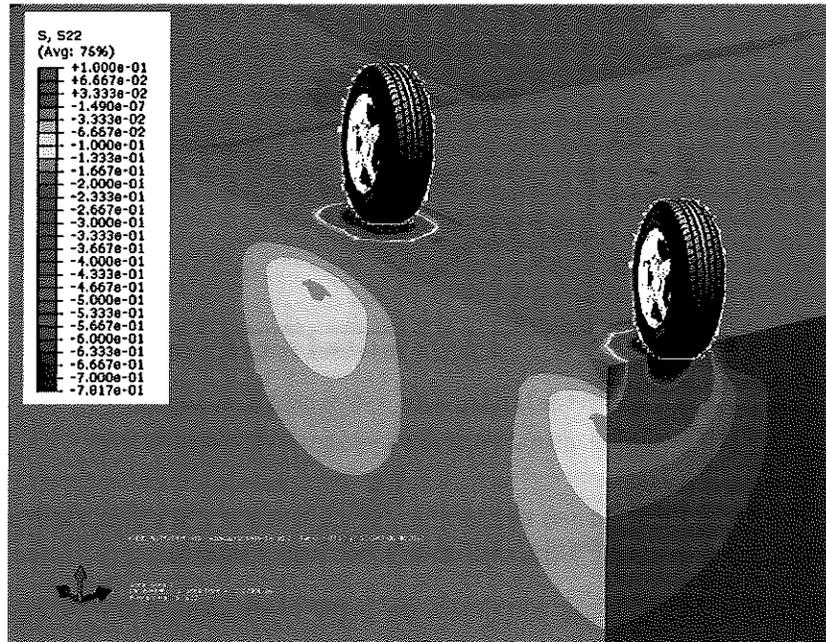
Figura 19. Configuración de (a) esfuerzos, (b) deformaciones y (c) deflexiones Naranjo Peaje, estructura N2 (Eje Tridem)

Para este escenario, los valores máximos se presentan bajo la llanta central del eje. Esto demuestra que la interacción de los bulbos de esfuerzos que resultan de cada uno de los ejes, se concentra en esta ubicación.

Los esfuerzos que se desarrollan se diagraman en la Figura 20.



(a)



(b)

Figura 20. Distribución de esfuerzos (a) horizontales y (b) verticales eje tridem, estructura N1 (Cuarto de eje).

De la figura anterior se observa claramente la interacción de los bulbos esfuerzos verticales de cada llanta, que posteriormente se concentran en uno solo conforme se incrementa la

profundidad. Respecto a la distribución de los esfuerzos verticales, se muestra como los esfuerzos verticales críticos se dan en tres puntos de la carpeta asfáltica, siendo el central el más crítico.

3.2.1.4 Comparación de resultados según configuración del área de carga

Como segunda parte del análisis, y con el fin de comparar la diferencia entre la distribución de esfuerzos, deformaciones y deflexiones para las dos estructuras previamente analizadas, se comparan los valores obtenidos a nivel de la subrasante en las figuras siguientes.

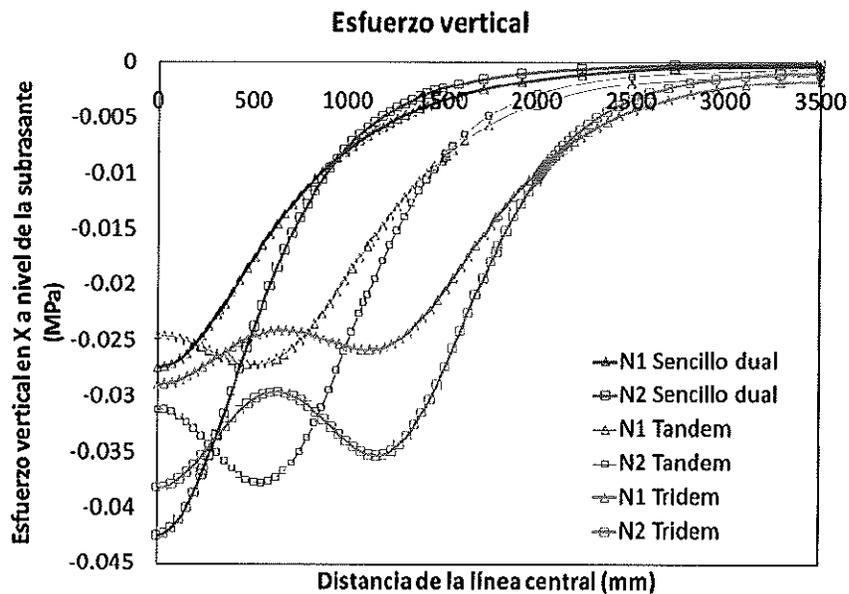


Figura 21. Distribución de esfuerzos verticales en la subrasante según tipo de configuración de carga

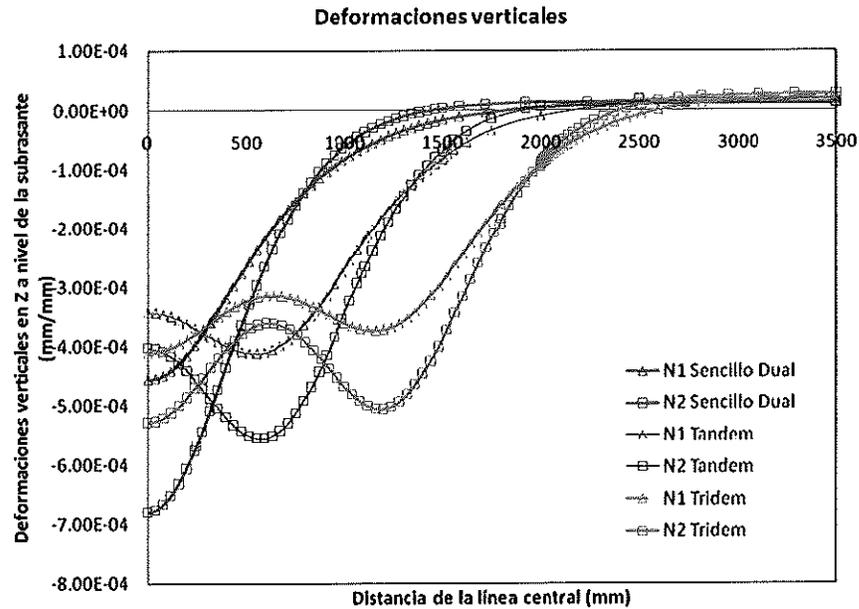


Figura 22. Distribución de deformaciones verticales en la subrasante según tipo de configuración de carga

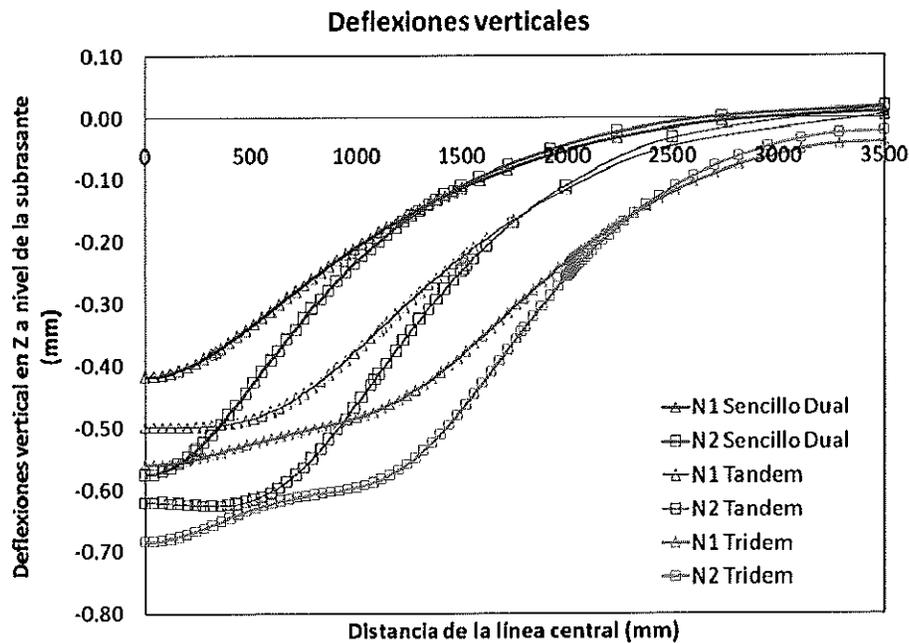


Figura 23. Distribución de deflexiones verticales en la subrasante según tipo de configuración de carga

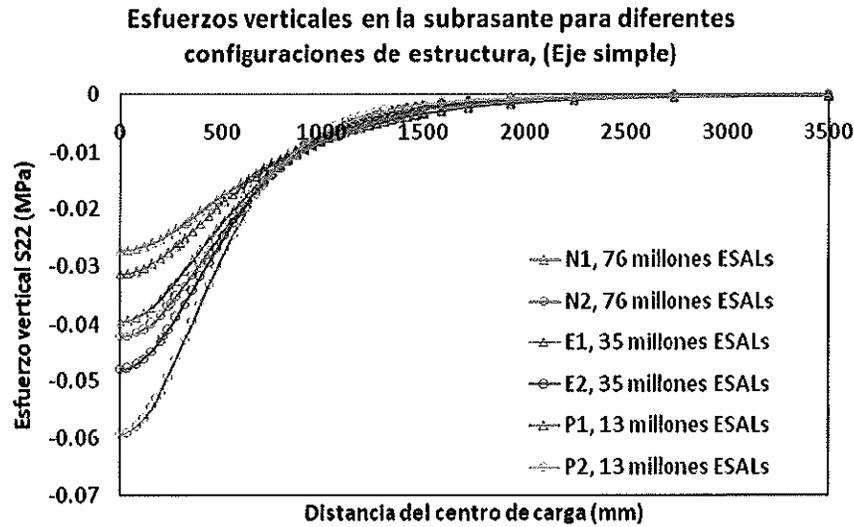


De los resultados se observa que áreas de contacto mayores (por ejemplo, ejes tándem y trídem), permiten reducir el nivel de esfuerzos con respecto a los ejes sencillos, razón por la cual han sido ideados.

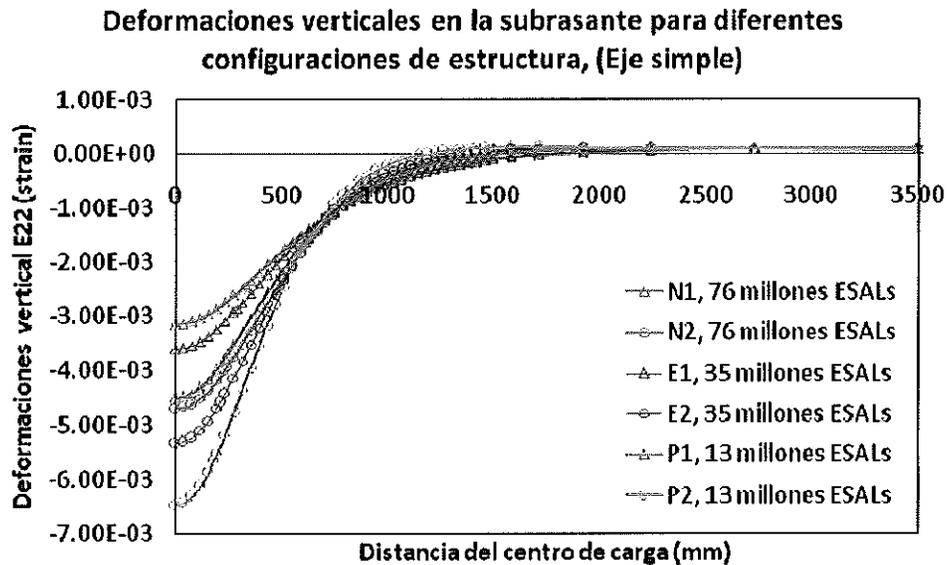
En el caso de las deflexiones, las diferencias entre los tipos de ejes son pequeñas, con valores por debajo de los 0.15 mm.

3.2.2 Influencia del tipo de eje diferentes rutas: Pérez Zeledón, Esparza y Naranjo

Los resultados de las distintas rutas siguen patrones similares a los descritos anteriormente. Se compararon los resultados de esfuerzos, deformaciones y deflexiones en la fibra superior de la capa de subrasante, de manera que se mida la influencia de la configuración geométrica y geomecánica de la estructura.



(a)



(b)

Figura 24. (a) Esfuerzos y (b) deformaciones en la subrasante para diferentes estructuras de pavimento (eje sencillo dual de carga).

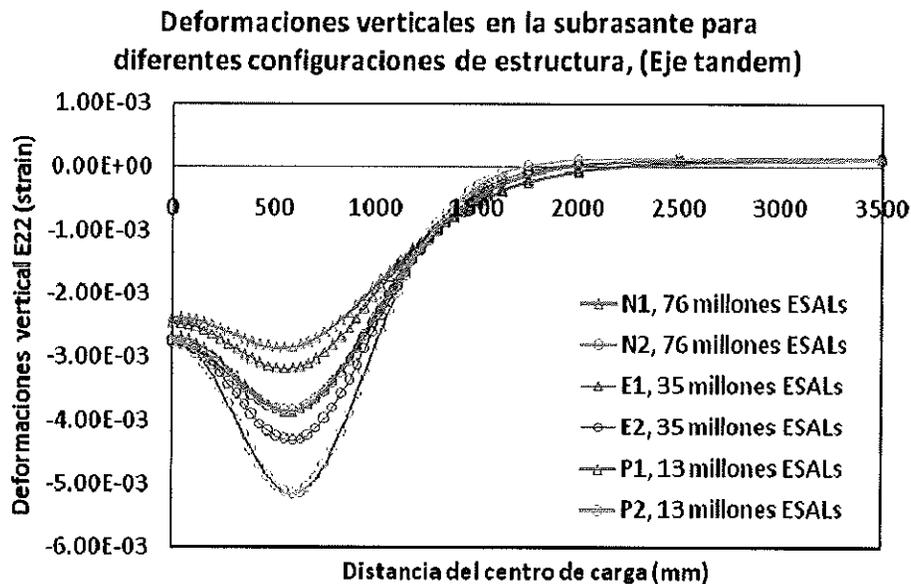
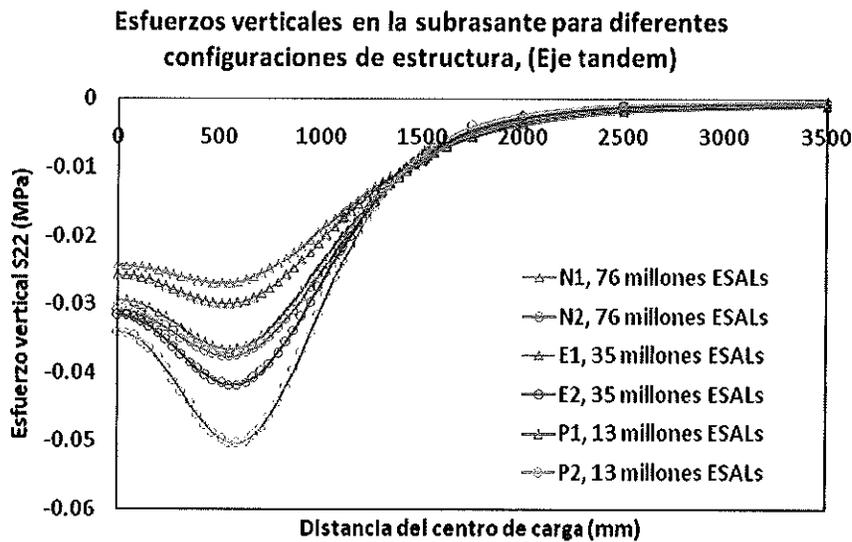


Figura 25. (a) Esfuerzos y (b) deformaciones en la subrasante para diferentes estructuras de pavimento (eje tándem de carga).

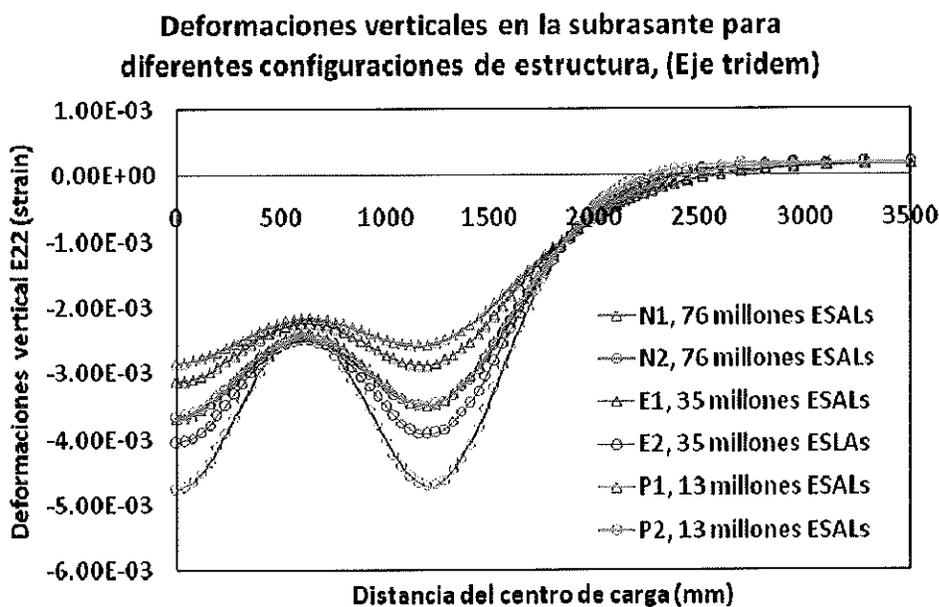
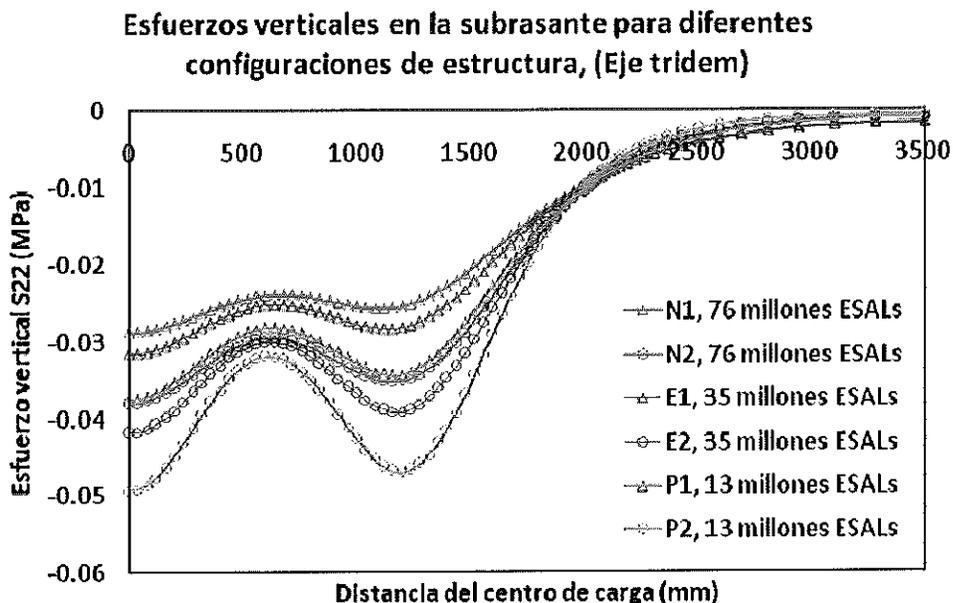


Figura 26. (a) Esfuerzos y (b) deformaciones en la subrasante para diferentes estructuras de pavimento (eje tridem de carga).

De las figuras se puede observar que las estructuras que desarrollan mayores esfuerzos y deformaciones son aquellas donde el tránsito vehicular es menor. Esto debido a que las



capacidades mecánicas y/o espesores que requieren son menores y por consiguiente, las mismas configuraciones de carga tendrán mayor sollicitud estructural.

4. CONCLUSIONES

Este informe plantea las bases para el desarrollo de una línea de investigación que enfoca el tema de carga en Costa Rica. Es por tanto que en este punto y con respecto a los datos obtenidos se deducen los siguientes aspectos:

- 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 tandem y tridem. 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 tridem, 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.
- Es posible observar que estructuras más robustas, asociadas a sollicitaciones 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.
- 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.

4. RECOMENDACIONES

Debido a que esta investigación es el inicio a una serie de trabajos alrededor del tema de carga en pavimentos, surgen las siguientes recomendaciones:

- De manera que se complemente adecuadamente la presente investigación se recomienda analizar propiedades como anisotropía de las capas granulares, viscoelasticidad de la carpeta asfáltica, y su influencia en el comportamiento mecánico de las estructuras de pavimento.
- Temas como presión de inflado, carga dinámica, entre otros son elementos importantes en el tema de configuración de carga, y por tanto se hace necesario estudiar en futuras investigaciones su influencia dentro de las estructuras de pavimento.

Propuesta LM-PI-UI-002-12	Fecha de emisión: 07 de junio de 2013	Página 44 de 46
---------------------------	---------------------------------------	-----------------



- Se recomienda además, realizar un análisis de sensibilidad con respecto a rangos de carga para cada tipo de eje (sencillo dual, tándem y tridem) y la influencia asociada dentro del comportamiento mecánico estructural del pavimento.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

Broncano Flores, Julian. *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, 2011.

Diario Oficial La Gaceta No. 15. «Reglamento de Circulación por Carretera.» 19 de enero de 2005.

Garnica et al. *"Mecánica de Materiales Para Pavimentos"*. Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 197, 2002.

Garnica, Paul. «Espectros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos.» *Quinta Conferencia Magistral "Alfonso Rico Rodríguez"*. México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, 2009.

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

Ishak, S, B Sridhar, Z Zhang, y H Shin. *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, (2010).



Leiva et al. *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, 2011.

Reyes et al. *Comparación de pavimento flexible por elementos finitos y cálculo teórico*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina., n. 14, p. 6-13, 2004.

Rodríguez, J. *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, 2011.

Troncoso, Juan. *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, 2011.

Universidad de Reno. "Software 3D MOVE". Reno, Nevada, octubre de 2011.

Vega, L, y J Vives. *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, 2009.