

**IAG54-03-2013**  
**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD SOBRE LA MODELACIÓN DE CARGA EN**  
**COSTA RICA**  
**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA MODELAGEM DA CARGA NA**  
**COSTA RICA**

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**

La Línea de Investigación de Parámetros de Carga se ha desarrollado dentro de los temas de investigación de la Unidad de Materiales y Pavimentos del LanammeUCR desde el año 2005. El primer tema desarrollado se relacionó con el análisis de los datos de la encuesta de carga, después se analizaron los datos de las estaciones de pesaje móvil que fueron facilitados por el Departamento de Pesos y Dimensiones del Ministerio de Obras Públicas y Transportes. A partir de esto, se continuó con modelaciones por medio de la metodología del elemento finito, a fin de comprender las respuestas del pavimento ante solicitudes que se están dando en campo. La presente investigación, es resultado de la necesidad de relacionar la forma en que los espectros de carga desarrollados en investigaciones previas, pueden ayudar a comprender las respuestas de los pavimentos de Costa Rica. Lo anterior será parte del desarrollo de la Guía Mecánico-Empírica de Diseño, con la cual se pretende proveer a los profesionales involucrados en el área una herramienta de diseño adecuada a las condiciones propias del país. El objetivo primordial que se pretende, es determinar la sensibilidad que esta variable en específico tiene dentro del desempeño de las estructuras de pavimento, para mostrar cómo este parámetro podría estar afectando nuestras carreteras, así como la importancia del establecimiento de una regulación adecuada dentro de la normativa vigente.

## **Resumo**

A Linha de Pesquisa de Parâmetros de Carga foi desenvolvida dentro dos temas de investigação da Unidade de Materiais e Pavimentos do LanammeUCR desde o ano 2005. O primeiro tema desenvolvido estava relacionado com a análise dos dados de uma enquete de carga, depois foram analisados os dados das estações de pesagem móveis que foram fornecidos pelo Departamento de Pesos e Dimensões do Ministério de Obras Públicas e Transportes. A partir disto, foram feitas modelações por meio do método dos elementos finitos, a fim de compreender as respostas do pavimento devido às solicitações que ocorrem no campo. O presente trabalho, é o resultado da necessidade de relacionar a maneira em que os espectros de carga desenvolvidos em investigações previas, podem ajudar a compreender as respostas dos pavimentos da Costa Rica. Isto permitiria o desenvolvimento da Guia de Dimensionamento Mecanístico-Empírico de Pavimentos, que visa proporcionar aos profissionais envolvidos na área uma ferramenta de design adequada para as condições próprias do país. O objetivo perseguido principalmente é determinar a sensibilidade deste variável específica dentro do desempenho da estrutura do pavimento, para mostrar como este parâmetro poderia estar afetando nossas estradas, e estabelecer a importância de uma regulamentação adequada dentro dos regulamentos atuais.

## **INTRODUCCION**

La cantidad y tipo de vehículos que transitan por la carretera, son los dos factores que mayor influencia tienen sobre los costos de mantenimiento de los pavimentos en cualquier país.

Existen ciertos vehículos que rigen el diseño de las estructuras de pavimento. En Costa Rica se logró demostrar, por medio del análisis de los espectros de carga, que estos vehículos son los clasificados como C2, T3S3 y T3S2 (Allen & Badilla, 2011).

La presente investigación muestra un análisis de la forma en que cada una de las configuraciones de carga de estos tres tipos de vehículos influye dentro de las estructuras de pavimento, con la finalidad de observar de una manera más acercada a la realidad, cómo pueden afectar las carreteras costarricenses.

Lo que se pretende finalmente, es llevar a los ingenieros de carreteras de Costa Rica principalmente, y en extensiva a los de la región, una visión de la forma en que las estructuras de pavimentos se ven afectadas por permitir la circulación de este tipo de vehículos, de manera que se logre tomar conciencia de la importancia de restringir su paso, ya que en otros países por esta característica certeramente están siendo sacados de circulación. Tal condición, podría finalmente terminar permitiendo el ingreso a nuestro país, como una oportunidad para los transportistas en el país, pero finalmente, como un deterioro acelerado de las carreteras de Costa Rica, y finalmente una reducción del dinero de los bolsillos de cada uno de sus ciudadanos.

## **ESPECTROS DE DAÑO**

Los espectros de daño, pueden ser obtenidos al generalizar el concepto de daño definido por la Ley de Miner (Miner, 1945).

La ley de Miner consiste en el cálculo del daño (D), como la razón de la cantidad de repeticiones de carga que una estructura específica experimenta debido a su desempeño ( $n_i$ ), con respecto a las solicitaciones totales para las que fue diseñada la estructura de pavimento ( $N_i$ ), para  $i$  años de diseño (1).

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

La condición de ruptura por fatiga se experimenta cuando  $D=100\%$ . El número de repeticiones admisibles puede ser determinado a partir de los esfuerzos y deformaciones máximos en los puntos críticos (fibra inferior de la carpeta en tensión ( $\epsilon_t$ ) y superior de la subrasante en compresión ( $\epsilon_c$ )).

Para agrietamiento por fatiga y deformación permanente el cálculo del número de repeticiones admisibles ( $N_f$  y  $N_d$ ) ha sido expresado por diferentes instituciones por medio de las ecuaciones que se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 1: Modelos de agrietamiento por fatiga**

Institución	Ecuación
DOT Illinois (Estados Unidos)	$N_f = 5.0 \times 10^{-6} \epsilon_t^{-3.0}$ (2)
TRRL (Inglaterra)	$N_f = 1.66 \times 10^{-10} \epsilon_t^{-4.32}$ (3)
BRRC (Bélgica)	$N_f = 4.92 \times 10^{14} \epsilon_t^{-4.76}$ (4)
	$N_f = 0.00432 * k_1 * C \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3.9491} \left( \frac{1}{E} \right)^{1.281}$ (5)
MEPDG (Estados Unidos)	$k_1 = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{11.02 - 5.49 * h_{ac}}}}$ (6)

E: módulo elástico (psi).  
Hac: espesor de la carpeta asfáltica (in).

**Tabla 2: Modelos de deformación permanente**

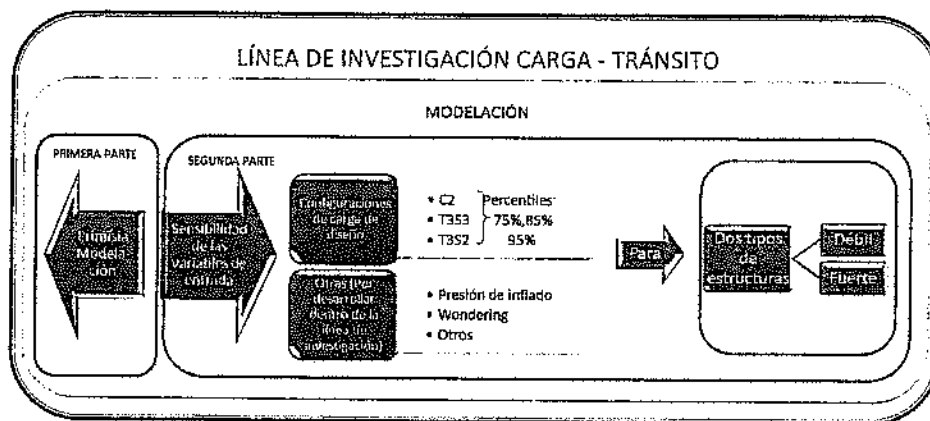
Institución	Ecuación
Instituto del Asfalto (Estados Unidos)	$N_d = 1.36 \times 10^{-9} \epsilon_c^{-4.47}$ (7)
TRRL (Inglaterra)	$N_d = 6.18 \times 10^{-8} \epsilon_c^{-4.35}$ (8)
BRRC (Bélgica)	$N_d = 3.05 \times 10^{-9} \epsilon_c^{-4.35}$ (9)
MEPDG (Estados Unidos)	$\frac{\epsilon_p}{\epsilon_r} = 10^{-3.15552 T^{1.734} N^{0.39957}}$ (10)

T: temperatura (°F).

## METODOLOGÍA

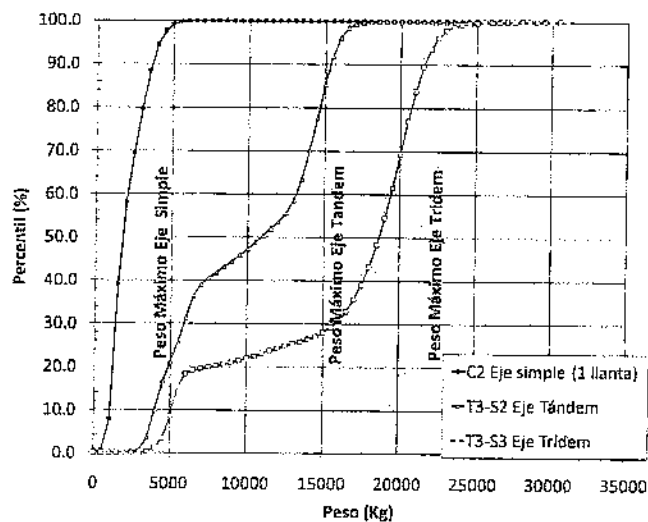
Como fue mencionado en apartados anteriores, este proyecto es parte de la línea de investigación de carga – tránsito que se inició en el año 2013 por parte de la Unidad de Materiales y Pavimentos del LanammeUCR; y es el segundo dentro del subtema de modelación, precedido por la investigación titulada “Configuración de carga: Análisis con elemento finito. Parte 1”, desarrollado por la misma Unidad. En la Figura siguiente se puede observar un esquema que resume la forma en que se desarrolló la presente investigación.

Figura 1: Esquema de ubicación del proyecto dentro de la línea de investigación de carga-tránsito.



En este caso, se analizó la sensibilidad de los vehículos que rigen el diseño en el país, definidos como C2, T3S2, y T3S3, considerando los percentiles de los espectros de carga que fueron obtenidos del estudio realizado por (Allen y Badilla, 2011) para los ejes sencillo dual, tándem y tridem. En la Figura 2 se muestran las curvas de los percentiles acumulados correspondientes.

Figura 2: Percentil acumulado por tipo de eje y carga de análisis



Perc.	Carga (kg)		
	C2 (Simple)	T3-S2 (Tandem)	T3-S3 (Tridem)
75%	2738	14286	20313
85%	3297	14973	21095
95%	4024	15840	22246

Este análisis fue realizado para dos estructuras de pavimento, una débil y una fuerte (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). Debido a que no existen bases de datos que respalden valores representativos de módulos de estructuras típicas de pavimentos costarricenses, se utilizaron valores recomendados por la Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras (Ministerio de Transporte, 2008), considerando Colombia un país latinoamericano, se consideraron pertinentes tales valores para el desarrollo de la presente investigación en tanto en Costa Rica se generan los propios, que es parte de un nuevo proyecto actualmente en desarrollo en la Unidad de Materiales y Pavimentos. Los valores de espesor fueron obtenidos del análisis de los datos de núcleos extraídos de algunas de las rutas del país, y que fueron brindados por el MOPT al LanammeUCR para la caracterización de las estructuras de pavimento de las rutas, y considerando espesores mínimos sugeridos para el diseño por la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento de la AASHTO (AASHTO , 1993).

**Tabla 3: Módulo, razón de Poisson y espesor para las estructuras en análisis**

Estructura	Módulo (MPa)				Razón de Poisson				Espesor (mm)			
	CA	BG	SB	SR	CA	BG	SB	SR	CA	BG	SB	SR
<b>Débil</b>	1400	140	70	21					30*	180	240	-
<b>Fuerte</b>	3000	340	130	100	0.40	0.40	0.40	0.45	150	300	350	-

CA: Carpeta asfáltica, BG: Base granular, SB: Subbase granular, SR: Subrasante.

\* Similar a un tratamiento superficial

Fuente: (Ministerio de Transporte, 2008) y (AASHTO , 1993)

Se consideró una presión de 0.8 MPa, en un área de contacto elíptica. Se calcularon los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en la fibra inferior de la carpeta, el intermedio de las granulares y la superior de la subrasante. Los resultados obtenidos se describen en el siguiente apartado.

## RESULTADOS

Como resultado del proceso de modelación, en las Figuras 3, 4 y 5, se observan los esfuerzos, y deformaciones desarrolladas con respecto a la profundidad para cada uno de los ejes y estructuras modeladas.

Figura 3: Esfuerzos y deformaciones configuración C2 simple

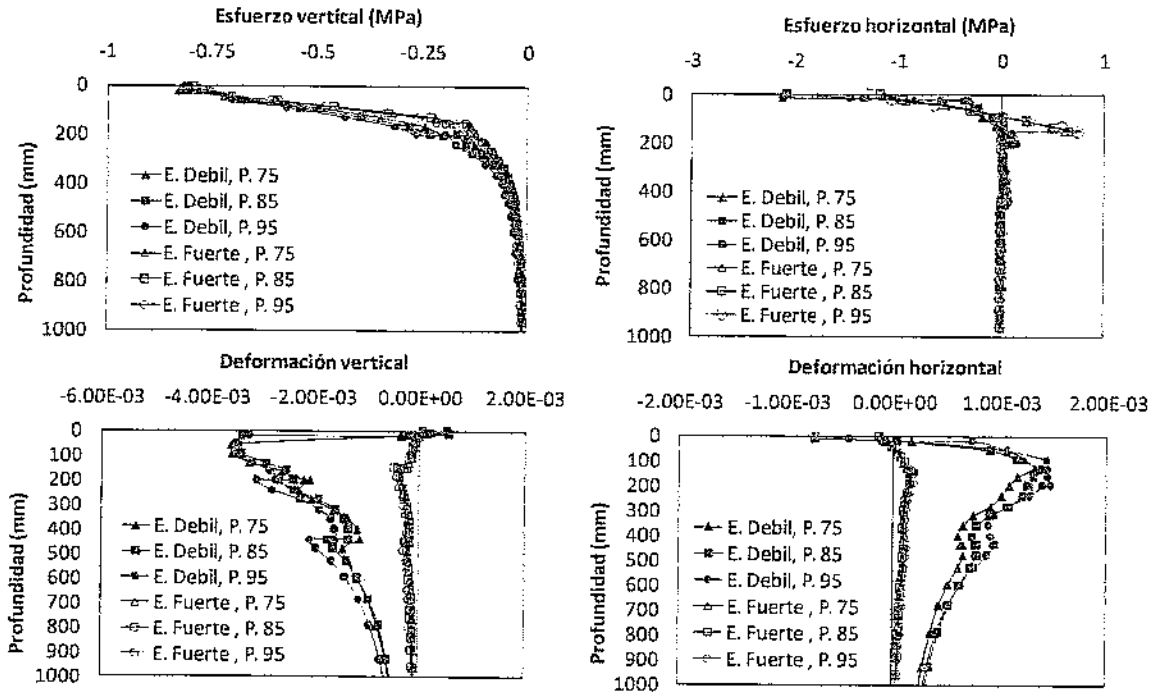


Figura 4: Esfuerzos y deformaciones configuración T3-S2 tándem

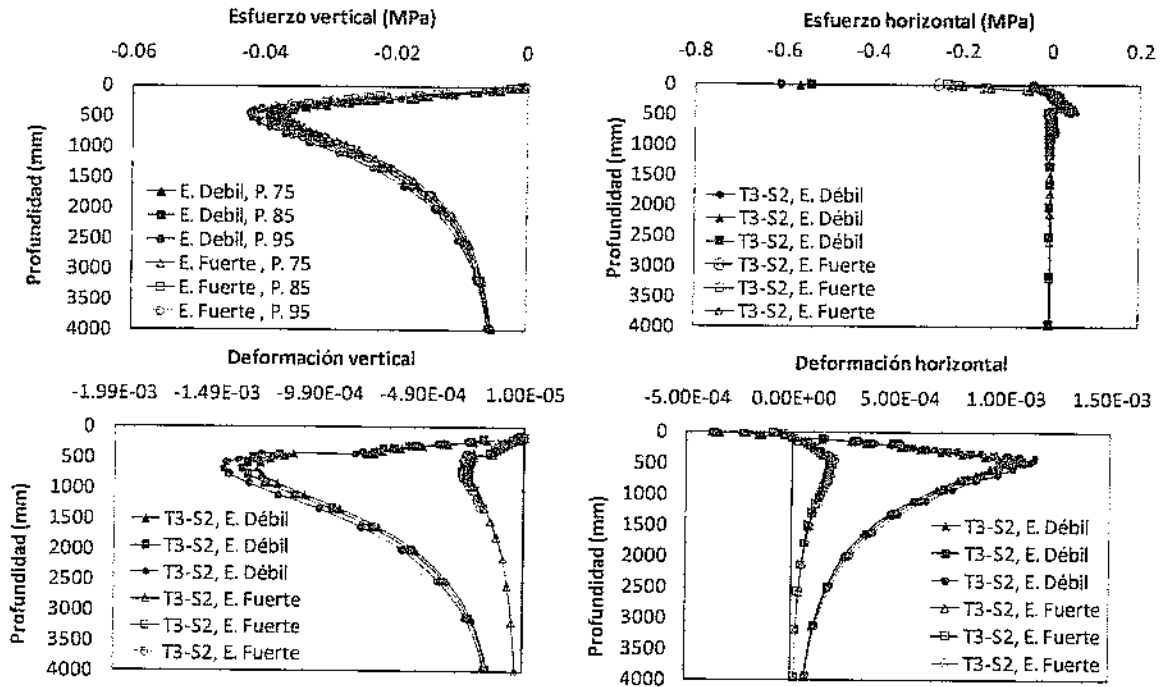
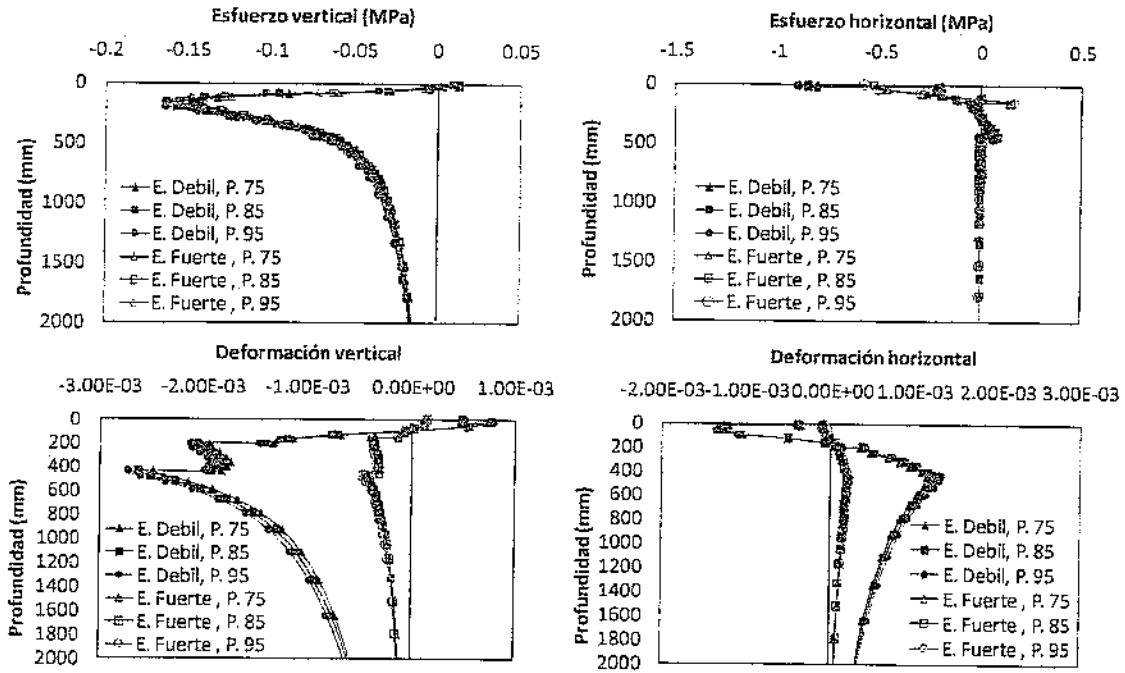
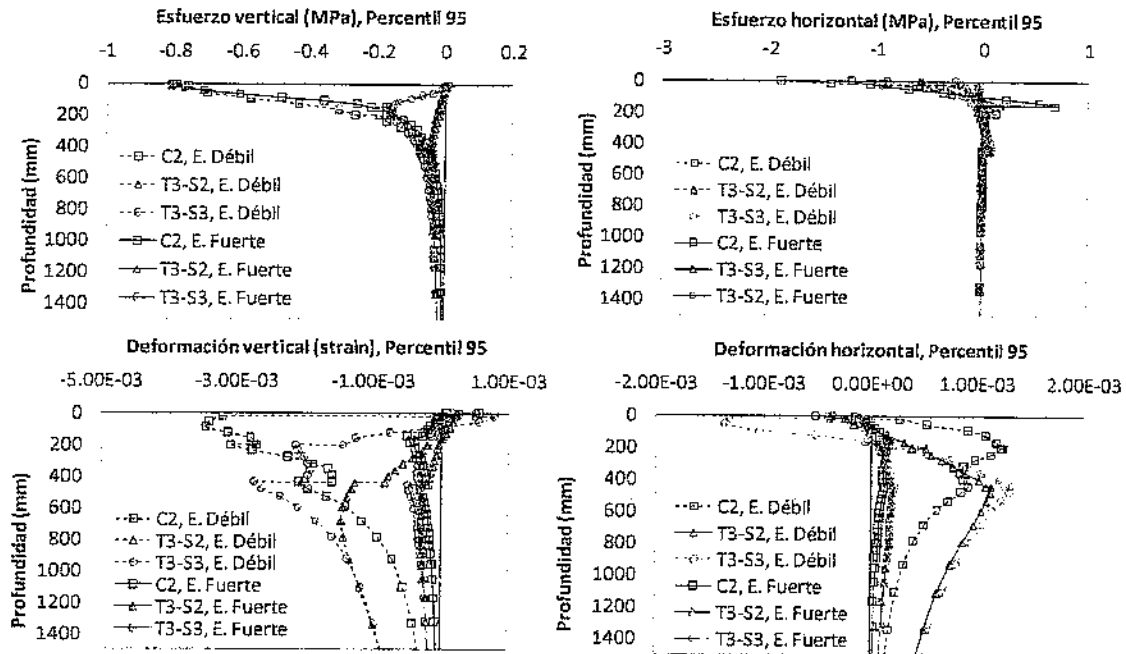


Figura 5: Esfuerzos y deformaciones configuración T3-S3 tridem



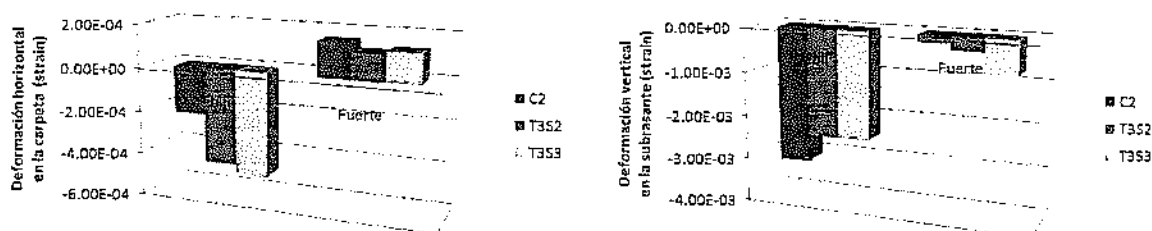
Seguidamente se introduce un gráfico más para la comparación de los esfuerzos y deformaciones de cada uno de los ejes al Percentil 95, como resultado más crítico, para las dos estructuras definidas. Los resultados se muestran en la Figura 6.

Figura 6: Esfuerzos y deformaciones Percentil 95



Los valores de las deformaciones asociadas a los puntos críticos de la sección estructural del pavimento para el Percentil 95 de carga (fibra inferior de la carpeta asfáltica y la superior de la subrasante), utilizadas en el análisis de daño, se muestran en la Figura 7.

Figura 7: Deformación horizontal y vertical en los puntos críticos de la sección estructural para el Percentil 95 de carga



Posteriormente se realizó un análisis de daño de los puntos críticos del Percentil 95. Se utilizó la Guía de la Metodología de Diseño Mecánico-Empírica de los Estados Unidos en este caso. El número de repeticiones de carga obtenidos a partir del desempeño desarrollado actualmente por la estructura, para la condición de fatiga y deformación permanente máxima de 12 mm, tal como es propuesto por el Instituto del Asfalto para cálculos de este tipo, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Número de repeticiones admisibles por fatiga y deformación permanente

Tipo de eje	Repeticiones admisibles a fatiga ( $n_{fatiga}$ )		Repeticiones admisibles a deformación permanente ( $n_{deformación\ permanente}$ )	
	Estructura		Estructura	
	Débil	Fuerte	Débil	Fuerte
C2	Carpeta asfáltica en compresión	66,252,115	8,203	49,718,531
T3S2		199,326,770	34,224	7,251,874
T3S3		122,296,128	147,596	11,792,466

Considerando un tráfico de 85,000,000 repeticiones de carga para la estructura fuerte y un tráfico de 50,000 repeticiones de carga para la estructura débil, se obtiene que los años para que cada estructura llegue a su capacidad máxima son los que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Vida a fatiga y deformación permanente

Tipo de eje	Años a falla a fatiga		Años a falla a deformación permanente*	
	Estructura		Estructura	
	Débil	Fuerte	Débil	Fuerte
C2	Carpeta asfáltica en compresión	17.0	6	14
T3S2		31.0	13	3
T3S3		25.0	35	5

\* Considerando una deformación permanente máxima de 12 mm.



También se analizó el caso del total de deformación desarrollada para el número de repeticiones de carga propuesto anteriormente, los resultados arrojaron los valores que se observan en la Tabla 6.

Tabla 6: Deformación permanente máxima para la totalidad de repeticiones de carga propuestas

Tipo de eje	Estructura	
	Débil	Fuerte
	PD (mm)	PD (mm)
C2	40	15
T3S2	12	30
T3S3	13	25

## CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados anteriores se puede concluir lo siguiente:

- Para los percentiles 75, 85 y 95, existe un comportamiento similar con respecto a los valores de esfuerzos tanto para la estructura débil como la fuerte. Las deformaciones por su parte, aunque no tienen grandes diferencias entre los valores de cada percentil, muestran comportamientos muy diferentes entre la estructura fuerte y la débil en cada uno de los casos.
- Analizando el Percentil 95 de carga, se observan diferencias en la distribución de los esfuerzos y deformaciones bajo la línea central de cada eje de carga, y los resultados más críticos lógicamente se atribuyen al eje C2 debido a que para este caso, esta línea de análisis es bajo el centro de la llanta.
- El análisis de desempeño de los puntos críticos para la estructura débil muestra deformaciones horizontales en compresión en la carpeta asfáltica, mayores para el eje T3S3 con respecto al T3S2 y estos a su vez del C2, que podría atribuirse a la influencia de las cargas de las demás llantas, pero que muestra una distribución efectiva de las respuestas del pavimento ante cargas mayores. Además, se observa un aumento en el valor de la deformación vertical del eje T3S3 con respecto al T3S2, lo que se atribuye a la al mayor valor de carga que maneja.
- Para la estructura fuerte los resultados a fatiga muestran una mayor capacidad para el eje T3S2 con respecto a los otros.
- Se hace evidencia de los resultados de las Tablas 4 y 5, que una deformación permanente de 12 mm es alcanzada en un período corto del pavimento para las configuraciones C2 y T3S2 en ambas estructuras (fuerte y débil), y para la T3S3, se alcanza en un período más amplio para la estructura débil, pero igualmente en un corto período para la estructura fuerte. Estos resultados serán profundizados en posteriores investigaciones por desarrollar en esta línea de investigación.
- En general en las combinaciones analizadas, parece que predomina la falla por deformación permanente, por lo que el análisis de este elemento será complementado con investigaciones de campo posteriores.
- Como fue expuesto anteriormente el eje C2, que se ha utilizado bastante para transporte de cierto tipo de carga en Costa Rica, demuestra un aceleramiento en el deterioro de los pavimentos, lo que le confiere importancia al asunto de sacarlo de circulación.

- Se destaca también de esta investigación, la importancia que tiene el control de carga de los vehículos que transportan carga pesada en Costa Rica.

## REFERENCIAS

AASHTO . (1993). *Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento*.

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.

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

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

Leiva, P., Loria, L., & Navas, A., e. (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.

Leiva, P., Allen, J., & Badilla, G. (2013). *Configuración de Carga: Análisis con Elemento Finito. Parte 1*. Costa Rica: LM-PI-UNMP-002-12. Informe final de investigación. Unidad de Materiales y Pavimentos. PITRA. LanammeUCR.

Ministerio de Transporte. (2008). *Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras*. Colombia: Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo.