

Plain-concrete strip road pavements: 3D finite element analysis

Armando Orobio ^a & Juan Carlos Orobio ^b

^a Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia. armando.orobio@correounivalle.edu.co

^b El Alcázar S.A.S, Cali, Colombia, jorobio1@gmail.com

Recibido: Enero 26th, 2016. Recibido en versión revisada: Junio 13th, 2016. Aceptado: Julio 11th, 2016.

Abstract

The construction of strip road pavements has increased in the recent days in Colombia. This type of pavements is being used for rural low-traffic volume roads, the type of strip road pavement used nationwide is made of reinforced-concrete, the construction is based mainly on the particular construction specification 500-1P that has only one configuration of the pavement, which raises doubts on its application for different projects. In this research, a finite element analysis was performed to study the response of concrete strip road under different load configurations and soil support. The design of plain-concrete strip roads pavements was evaluated for the maximum loads of C3 trucks and 20 years of design period. The results showed that although this type of strip road may meet fatigue criteria, the erosion criteria is uncertain due to lack of data to calibrate an erosion model to perform this evaluation.

Keywords: Pavements; strip road; rural roads; low-traffic roads; plain concrete.

Pavimentos con placa-huella de concreto simple: Análisis con elementos finitos 3D

Resumen

La construcción de pavimentos en placa-huella se ha incrementado en Colombia en los últimos años, este tipo de pavimento se utiliza para vías rurales con bajo tránsito. El tipo de placa huella utilizado en el país es de concreto reforzado, basado principalmente en un diseño general definido por la especificación particular 500-1P, que genera muchas dudas para su aplicación en diferentes proyectos. En la presente investigación se realizó una modelación con elementos finitos para estudiar el comportamiento de los pavimentos con placa-huella ante diferentes condiciones de carga y soporte. Se analizó la posibilidad de diseñar pavimentos con placa-huella de concreto simple, para las cargas máximas del camión C3 y con periodo de diseño de 20 años. Se encontró que desde el punto de vista del criterio de fatiga esto sería posible, pero el comportamiento por erosión de estos pavimentos es incierto, debido a que en la actualidad no existe suficiente información para calibrar un modelo para realizar la evaluación por este criterio.

Palabras clave: Pavimentos; placa-huella; vías rurales; bajo tránsito; concreto simple.

1. Introducción

La Placa-huella en concreto es un sistema de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito, en el cual se pavimentan únicamente las huellas por donde circulan las ruedas de los vehículos, la separación entre las franjas de concreto se rellena con piedra pegada, un material con las características de concreto ciclópeo, rocas distribuidas adecuadamente y pegadas con concreto, dependiendo del ancho de la vía se construyen cunetas y bordillos en concreto para proveer la vía de un sistema de

drenaje superficial, sí se requiere la separación entre la parte exterior de cada placa-huella y la cuneta se rellena también con piedra pegada (Fotografía 1).

El uso de pavimentos en placa-huella de concreto se ha incrementado en Colombia en los últimos años, al parecer, debido a las condiciones climáticas de muchas zonas del país que hacen que la conservación de vías en afirmado sea poco efectiva, con necesidades de inversión que en la mayoría de los casos no reflejan los esfuerzos en conservación de redes viales terciarias y secundarias que realizan los entes gubernamentales.

How to cite: Orobio A. & Orobio J.C. Pavimentos con placa-huella de concreto simple: Análisis con elementos finitos 3D DYNA 83 (199) pp. 9-18, 2016.

La subdirección de redes terciarias del Instituto Nacional de Vías, varios departamentos y municipios colombianos han venido adelantando contratos de pavimentación de vías de bajos volúmenes de tránsito con pavimentos en placa-huella.

Considerando el uso masivo de este tipo de pavimento y la ausencia de un método unificado de diseño y construcción de los mismos, el Instituto Nacional de Vías – INVIAS contrató mediante concurso de méritos al consorcio Manuales y Guías CEAL 2015, conformado por las firmas El Alcázar SAS, La Compañía de consultoría y construcciones LTDA. y Vías Alfa EU, para la elaboración de una Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella.

La guía de diseño debe propender por la mejor relación costo-beneficio en el diseño de este tipo de pavimentos para un periodo de diseño de 20 años. Este artículo presenta una modelación con elementos finitos tridimensionales realizada para estudiar el comportamiento de estos pavimentos bajo diferentes condiciones de carga y calidad del suelo de soporte.

1.1. Situación actual de placa-huella en Colombia

Los pavimentos en placa-huella que se construyen actualmente en Colombia son en concreto reforzado, en su mayoría regulados por la especificación particular 500 – 1P [1], que al parecer no es una especificación oficial del INVIAS, pero se ha venido utilizando debido a la ausencia de una mejor especificación.

De acuerdo con la especificación 500-1P, este pavimento consiste en dos placas-huellas paralelas en concreto reforzado y separadas con piedra pegada, con la geometría mostrada en la Fig. 1. Las dos placas-huella en concreto reforzado tienen ancho de 0.90 mt cada una, separadas 0.90 mt entre sí, con una longitud de 5.0 mt distribuida entre 3 riostras de 13 cm de ancho, una a cada extremo y otra en el centro de las placas-huella, las cuales tienen una longitud de 230.5 cm cada una, medida entre riostras, la separación entre las placas-huella se rellena con piedra pegada, el espesor de la placa-huella es de 15 cm y está apoyada sobre un material



Fotografía 1. Placa - huella en concreto
Source: The authors.

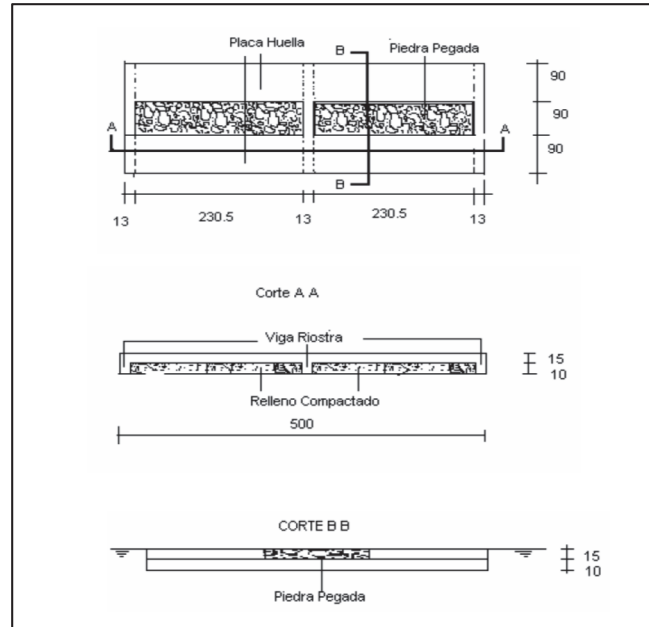


Figura 1. Geometría de Placa-huella de la especificación 500-1P
Source:[1].

granular de 10 cm de espesor, según la especificación se requiere que este material cumpla como mínimo la especificación de afirmado y tiene como función garantizar adecuado soporte a las placas-huella.

El acero de refuerzo está constituido por una armadura de acero No 2 (1/4”) separadas cada 30 cm en las dos direcciones, para las riostras se requiere dos aceros No 3 (3/8”) arriba y abajo con estribos de 1/4” cada 20 cm.

Aunque la norma es clara en definir la geometría de las placas-huella, en la práctica se encuentran referencias de placas-huella construidas con diferentes espesores, se encuentran diseños en donde se ha calculado el espesor de la placas-huella utilizando el método de diseño de pavimentos de concreto de la PCA (Portland Cement Association), encontrando espesores mucho mayores a los 15 cm requeridos por la especificación 500-1P, pero conservando el refuerzo exigido por la especificación. También se han realizado otras modificaciones en los proyectos que hacen que existan diferencias entre la especificación y lo que finalmente se construye, estos ajustes se hacen para garantizar la estabilidad de la obra y generalmente están del lado de la seguridad, pero reflejan el poco conocimiento que se tiene del comportamiento de este tipo de pavimentos bajo las condiciones específicas de tránsito, geotecnia y clima.

Debido a estas situaciones, los costos de los proyectos se incrementan, superando los montos considerados como razonables para mejoramiento de redes terciarias o secundarias con bajos volúmenes de tránsito. En la actualidad es común entre constructores y consultores, escuchar interrogantes sobre si este tipo de pavimento se puede construir de manera más económica, se han planteado preguntas sobre si es realmente necesario construir placas-huella de concreto reforzado, si son necesarias las riostras, sobre cuál es el efecto de diferentes calidades de subrasante, si el espesor del material granular es suficiente, cuáles son las

máximas cargas por ejes que puede soportar, pero quizás la pregunta más importante es que si se eliminan los elementos que al parecer son innecesarios, las placas-huella podrían ser una solución de pavimentación mucho más económica para las vías de bajos volúmenes de tránsito.

Ante todos estos interrogantes, es claro que en la actualidad no se entiende claramente el comportamiento de los pavimentos con placas-huella de concreto y la interrelación entre las variables de diseño de estos pavimentos, por lo que en el marco del presente estudio se decidió dar respuesta a los interrogantes planteados.

2. Metodología

En la presente investigación se analiza el comportamiento de los pavimentos de placa-huella con losas de concreto simple, el análisis se realiza mediante un modelo de elementos finitos tridimensional para analizar la respuesta de las placas-huella a diferentes tipos de ejes vehiculares, con trabazón de agregados o con pasadores de transferencia de carga, diferentes calidades de subrasante y efectos de gradientes de temperatura. Al final se evalúan criterios de fatiga y erosión para evaluar si es posible realizar la construcción de placas-huellas en concreto simple, bajo las condiciones de tránsito esperadas y cumpliendo con el requisito contractual de 20 años de periodo de diseño.

2.1. Tipos de vehículos que circulan por pavimentos en placa-huella

Los pavimentos con placa-huella son utilizados para vías de bajos volúmenes de tránsito de la red terciaria. Por tratarse de pavimentos de concreto, en la evaluación de cargas de tránsito lo que importa es el tipo, peso y repeticiones esperadas de los ejes. Los vehículos comerciales que se espera que circulen por pavimentos en placa-huella son el camión C2 y el C3, el camión C2 tiene un eje simple de rueda simple adelante (SRS) y un eje simple de rueda doble atrás (SRD), el camión C3 tiene un eje simple de rueda simple adelante (SRS) y un eje tándem atrás (Fig. 2). Los pesos máximos para estos ejes están regulados por la resolución 004100 del 2004 del Ministerio de Transporte [2], sin embargo, sería recomendable que se analizará en cada región si estos pesos máximos son adecuados para la red terciaria, debido a que estas cargas podrían resultar considerablemente altas para pavimentos con placa-huella, si estos se quieren diseñar con placas de concreto simple como una alternativa más económica a las placas-huella reforzadas que se construyen actualmente. En pavimentos de placa-huella cada una de las huellas soporta un lado del eje, por lo que para efectos de la presente modelación se consideró una distribución de 50% del peso total del eje en cada huella (semieje).

2.2. Modelación de pavimentos en placa-huella con elementos finitos 3D

Para analizar la respuesta estructural de un sistema de pavimento de concreto se requiere un modelo de respuesta que permita realizar análisis de [3]:

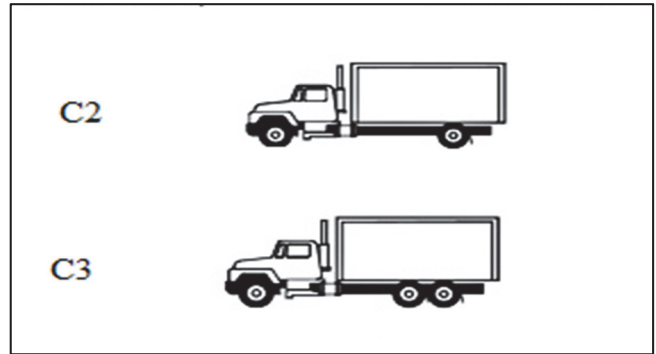


Figura 2. Tipo y peso máximo de los ejes vehiculares
Source: [2].

- Losas de cualquier geometría.
- Losa y material de subbase ligados o no ligados, y con diferentes propiedades de los materiales.
- Pavimentos sobre subrasante sólida o líquida.
- Varias losas con soporte uniforme o no uniforme.
- Múltiples losas con transferencia de carga en las juntas y fisuras.
- Losas con diferentes tipos de cargas, incluidos ejes simples y múltiples, diferentes posiciones de carga.
- Diferentes condiciones de bermas.
- Sistemas con espesores no uniformes entre losas y bermas.

Las características exigidas para el modelo de respuesta para pavimentos de concreto, son las mismas que se requieren para analizar pavimentos en placa-huella de concreto simple, debido a esto se decidió utilizar EverEF 2.25, un software de elementos finitos 3D para modelar pavimentos de concreto y de uso libre, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Maine [4] que cumple con los requerimientos anteriores.

2.3. Definición del modelo para evaluación

Con base en la geometría de los pavimentos en placa-huella descrita anteriormente se evaluaron dos modelos:

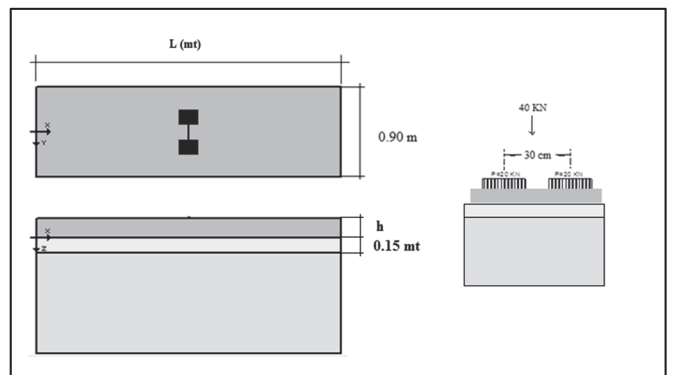


Figura 3. Modelo 1 semieje SRD en posición centro-centro
Fuente: Los autores.

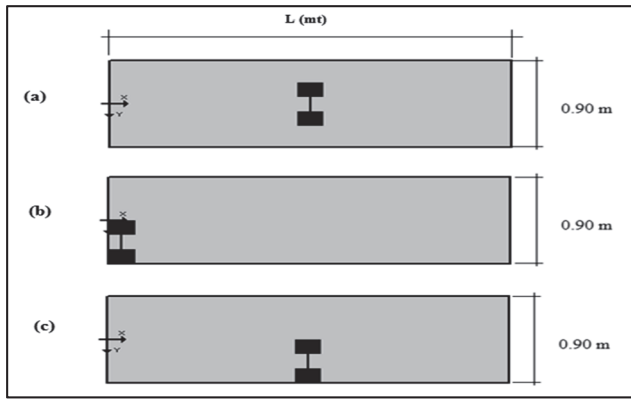


Figura 4. Modelo 1 cargas centro-centro (a), esquina (b) y centro-borde (c).
Source: Los autores.

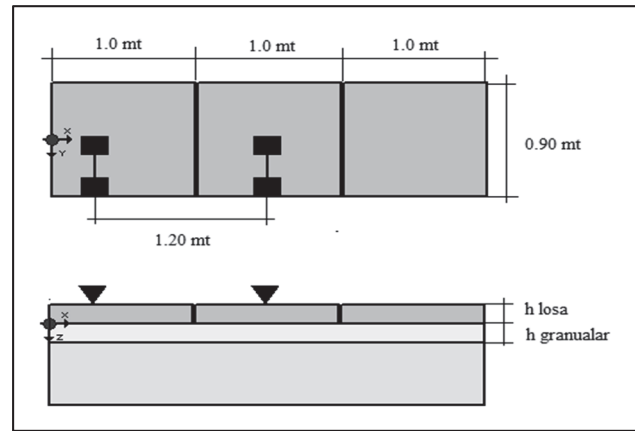


Figura 6. Modelo 2 con semieje tándem de rueda doble
Fuente: Los autores.

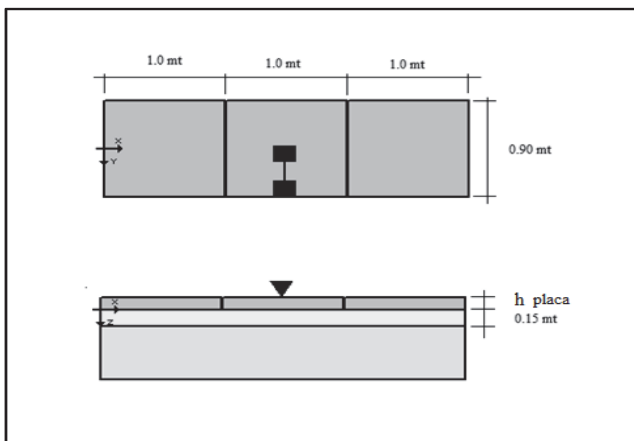


Figura 5. Modelo 2 con semieje SRD en posición centro-borde
Fuente: Los autores.

- Modelo 1:** Este modelo consistió en una placa-huella de concreto de 0.9 mt de ancho, longitud variable entre 3.0 mt y 1.0 mt, y espesor variable entre 0.15 mt y 0.20 mt, la placa-huella estaba soportada sobre una capa granular de 0.15 mt de espesor con módulo de 200 MPa, apoyada sobre una subrasante blanda con módulo resiliente de 20 MPa. Este modelo fue utilizado para analizar el comportamiento de la placa huella ante carga vehicular y gradiente de temperatura (Fig. 3), con el fin de identificar las condiciones más críticas. La carga utilizada en este modelo fue un semieje simple de rueda doble de 40 KN (Correspondiente a un eje estándar de 80 KN), con separación entre ruedas de 0.30 mt, la cual se ubicó en diferentes posiciones; Centro-Centro, Centro-Borde y Esquina (Fig. 4).
- Modelo 2:** Este modelo se utilizó para hacer análisis posteriores a la identificación de las condiciones más críticas identificadas con el modelo 1; el modelo 2 consistió en evaluar placas-huella cortas, de 1.0 mt de longitud. Se evaluaron tres placas-huellas cortas unidas mediante trabazón de agregados o con pasadores de transferencia de carga (Fig. 5). Este modelo se evaluó con cargas del semieje simple de rueda simple (27 kN), semieje simple de rueda doble (50 kN) y semieje tándem

(100 kN). Con los ejes simples se utilizó la carga en posición centro-borde, que resultó ser la más crítica entre todas las posiciones evaluadas; Centro-Centro, Centro-Borde y Esquina. Con el eje tándem la posición más crítica resultó ser cuando una de las ruedas dobles del tándem está en posición borde-centro de la placa-huella (Fig. 6).

Para todos los casos se consideró la interface entre la placa y la subbase granular como ligada, esto se asume debido a que en el proceso constructivo las placas-huella se funden directamente sobre la subbase previamente compactada. Las características del concreto se definieron de la siguiente manera: El módulo de elasticidad 28.000 MPa, relación de Poisson's del concreto 0.2, coeficiente de expansión térmica 1.1×10^{-5} por $^{\circ}\text{C}$ y la densidad 2400 Kg/m³. Para la subbase granular se utilizó relación de Poisson's de 0.4 y para la subrasante 0.45, el módulo resiliente de estos materiales fue variable durante la evaluación. Para el modelo 1 la malla se conformó por 17 elementos en el eje x, 17 elementos el eje y, en el eje z se definieron 4 elementos para la losa, 4 para la subbase y 4 para la subrasante. Para el modelo 2, para cada una de las tres placas, la malla se conformó por 12 elementos en el eje x, 12 elementos el eje y, en el eje z se definieron 4 elementos para la losa, 4 para la subbase y 4 para la subrasante. Para la trabazón de agregados entre placas, se consideraron juntas entre 1 mm de espesor con una rigidez de 0.5 MPa/mm, considerando que las placas se funden continuamente y cuando el concreto ha endurecido se inducen las juntas con una cortadora.

3. Resultados de la evaluación

Con el propósito de entender mejor el comportamiento de los pavimentos de placa-huella y evaluar la posibilidad de construir pavimentos de placa-huella en concreto simple, eliminar los requerimientos de las cuantías de acero, facilitar la construcción y reducir los costos de este tipo de pavimentos, se evaluaron ambos modelos (modelo 1 y modelo 2) bajo diferentes condiciones.

Este tipo de pavimento debe evaluarse bajo los criterios de falla por carga última, fatiga y erosión, que son determinantes para el diseño del espesor mínimo de la placa. Además, debe estudiarse el efecto del gradiente de temperatura en los esfuerzos de las placas, fenómeno de alabeo.

3.1. Resultados de la evaluación del modelo 1

El modelo 1 se evaluó para placas-huellas de diferentes longitudes y espesores, con carga en las tres posiciones estudiadas (Centro-Centro, Centro-Borde y Esquina). La Tabla 1 muestra los resultados de los máximos esfuerzos de tensión obtenidos para las longitudes y espesores de placa evaluados, en todos los casos el esfuerzo máximo de tensión se presenta cuando la carga está ubicada en la posición centro-borde. En cada longitud de placa-huella evaluada, el esfuerzo disminuye con el incremento del espesor de la placa. Cuando se comparan los esfuerzos entre las diferentes longitudes, se encuentra que a menor longitud de la placa-huella, menor es el esfuerzo máximo de tensión al comparar placas del mismo espesor. Para efectos prácticos, si se reduce la longitud de la placa-huella se logran esfuerzos máximos de tensión menores, si se desea hacer una evaluación rápida de la magnitud de los esfuerzos calculados, se puede tomar como referencia el módulo de rotura del concreto (MR), los pavimentos de concreto generalmente se diseñan para MR entre 3.8 MPa y 4.5 MPa [5], para el caso de los pavimentos en placa-huella, que son para vías rurales y que generalmente se construyen con concreto hecho en obra, resulta conveniente requerir un valor bajo de MR, como factor de seguridad para reducir el máximo esfuerzo admisible antes de que el pavimento se fisure por carga última, sólo para efectos del presente análisis se tomará como referencia un MR de 3.0 MPa, que significaría trabajar con el 80% del valor de MR de 3.8 MPa.

Tabla 1. Esfuerzo máximo de tensión (MPa) para diferentes posiciones de carga

Longitud (m)	Espesor (m)	Centro-Centro	Esquina	Centro-Borde	Centro-Borde (L+°T)
3.0	0.15	3.53	2.91	4.39	5.19
	0.16	3.25	2.67	4.01	4.74
	0.17	3.00	2.45	3.70	4.34
	0.18	2.77	2.25	3.39	3.98
	0.19	2.57	2.07	3.12	3.65
	0.20	2.38	1.90	2.88	3.36
2.5	0.15	3.27	2.65	4.17	4.80
	0.16	2.98	2.40	3.77	4.35
	0.17	2.73	2.18	3.43	3.95
	0.18	2.50	1.98	3.13	3.59
	0.19	2.30	1.81	2.86	3.25
	0.20	2.11	1.66	2.63	2.98
2.0	0.15	2.89	2.26	3.74	4.22
	0.16	2.61	2.02	3.36	3.79
	0.17	2.37	1.82	3.04	3.42
	0.18	2.15	1.64	2.75	3.10
	0.19	1.97	1.48	2.51	2.82
	0.20	1.80	1.35	2.29	2.57
1.5	0.15	2.39	1.74	3.18	3.51
	0.16	2.14	1.55	2.83	3.13
	0.17	1.92	1.38	2.54	2.82
	0.18	1.74	1.24	2.30	2.54
	0.19	1.57	1.12	2.08	2.30
	0.20	1.44	1.01	1.89	2.09
1.0	0.15	1.75	1.47	2.43	2.66
	0.16	1.55	1.30	2.17	2.37
	0.17	1.39	1.16	1.95	2.13
	0.18	1.25	1.04	1.76	1.92
	0.19	1.13	0.94	1.59	1.74
	0.20	1.03	0.85	1.44	1.58

L: Carga °T: Gradiente de temperatura
Fuente: Los autores.

Cuando se compara el esfuerzo máximo de tensión (columna Centro-borde de la Tabla 1) con el valor de esfuerzo de 3.0 MPa, se observa que si se quiere evitar la falla por carga última de la placa-huella bajo las condiciones de carga estudiadas, sería posible utilizar placas-huella de longitud 3.0 mt con espesores superiores a 0.20 mt, de 2.5 mt con espesor superior a 0.19 mt, de 2.0 mt con espesor superior a 0.18 mt y de 1.0 mt con espesor superior a 0.15 mt. Sin embargo, se debe considerar el efecto del gradiente de la temperatura en los esfuerzos de la placa.

En las dos últimas columnas centro-borde y centro-borde (L+°T) de la Tabla 1, la primera columna (centro-borde) muestra esfuerzos de tensión cuando la carga está en la posición más crítica centro-borde, la segunda columna (centro-borde L+°T), presenta los resultados del efecto combinado de carga y gradiente de temperatura sobre el esfuerzo máximo de tensión, la carga se ubica en la posición más crítica (Centro-Borde) y se considera un gradiente de temperatura de 5 °C, -5 °C. El comportamiento de los esfuerzos de estas dos columnas se presenta en la Fig. 7, (a) centro-borde y (b) centro-borde (L+°T).

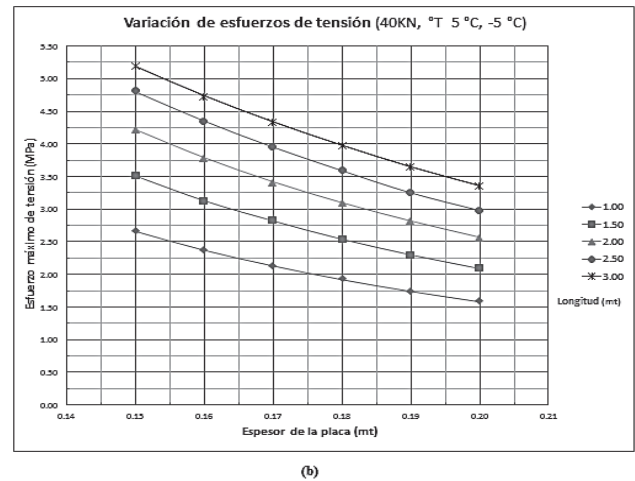
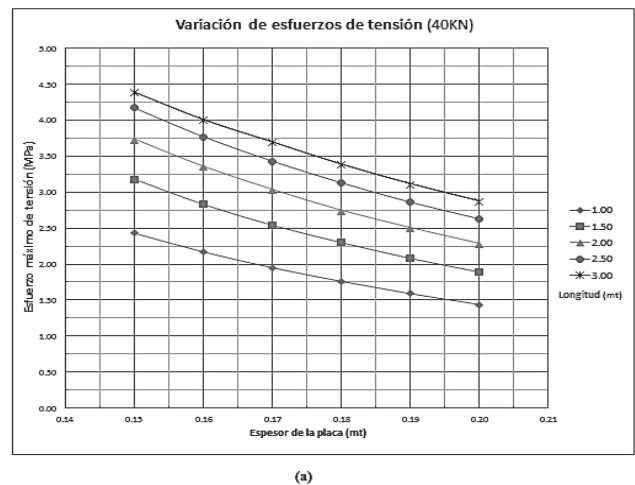


Figura 7. Esfuerzos máximos de tensión del modelo 1
Fuente: Los autores.

Al comparar estas dos columnas, se observa que al considerar el gradiente de temperatura se produce un incremento del esfuerzo máximo de tensión para todas las longitudes y espesores estudiados. Dentro de una misma longitud de Placa-huella, el efecto del gradiente de temperatura es menor a medida que se incrementa el espesor de la placa. Cuando se comparan diferentes longitudes, el efecto de gradiente de temperatura disminuye considerablemente con la disminución de la longitud de la Placa-huella, Figura 7. Este último comportamiento toma gran importancia debido a que existe muy poca información sobre gradientes de temperatura en pavimentos de concreto en Colombia, lo que dificulta enormemente considerar este parámetro en la práctica, una mejor alternativa es controlar el efecto del gradiente de temperatura controlando la longitud de las placas-huella. Esta forma de controlar el efecto del gradiente de temperatura en losas de concreto es utilizada en otros métodos de diseño de pavimentos de concreto [5].

El efecto de la calidad de la subrasante también fue investigado con el modelo 1, la Fig. 8 muestra los resultados para placas-huella de diferentes espesores y longitudes de 1.0 mt y 2.0 mt, sobre 15 cm de material granular de 100 MPa de módulo resiliente, sobre subrasantes de módulos resilientes de 20, 30, 40, y 50 MPa, con carga del semieje SRD de 50 kN en posición centro-borde.

En la Fig. 8 se puede apreciar que, según las condiciones evaluadas, existe poca sensibilidad del esfuerzo máximo de tensión con respecto al módulo resiliente de la subrasante. Para la longitud de placa-huella de 1.0 mt el efecto es despreciable, para la longitud de placa-huella de 2.0 mt se pueden observar diferencias para espesores inferiores a 0.14 mt, pero estos espesores presentan esfuerzos máximos de tensión demasiado altos en relación con el valor de referencia del estudio de 3.0 MPa.

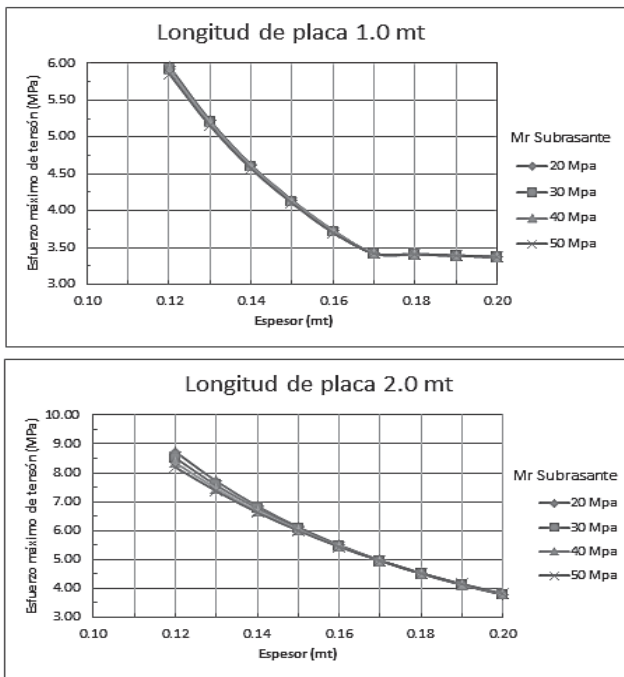


Figura 8. Efecto de la subrasante
Fuente: Los autores.

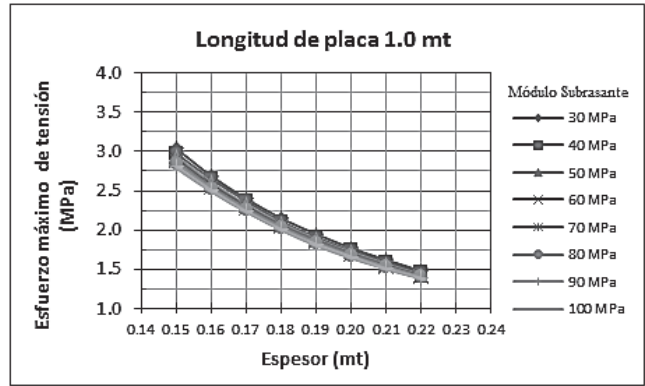


Figura 9. Esfuerzo máximo de tensión en función del espesor de placa (modelo 2, Eje SRS de 27 kN)

Fuente: Los autores.

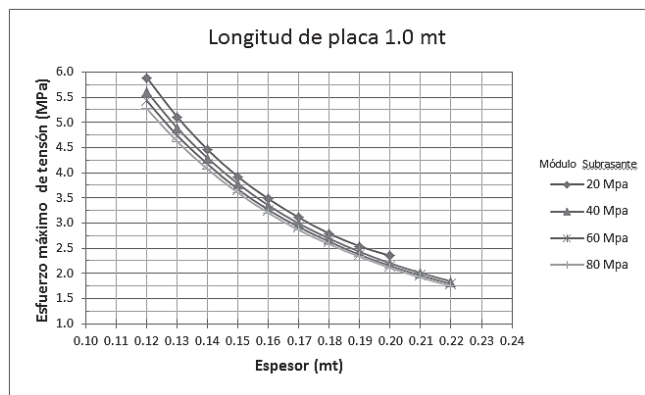


Figura 10. Esfuerzo máximo de tensión en función del espesor de placa (modelo 2, Eje SRD 50 kN)

Fuente: Los autores.

3.2. Resultados de la evaluación del modelo 2

El modelo 2 se evaluó con diferentes espesores de placa y diferentes módulos resilientes de la subrasante, para ejes SRS, SRD y Tándem. La longitud de placa fue fijada en 1.0 mt con base en los resultados de los análisis hechos con el modelo 1.

3.2.1. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje SRS

Cuando evalúa el modelo 2 con un semieje SRS de 27 kN ubicado en la posición crítica centro-borde, en la placa central y con trabazón de agregados entre las placas, para módulos de subrasante entre 30 MPa y 100 MPa, los esfuerzos máximos de tensión resultan inferiores a 3.0 MPa para espesores de placa de 0.15 mt o superiores (Fig. 9), valor tomado como referencia en este análisis para falla por carga última, lo que indica que para ejes livianos este tipo de pavimento no fallaría por este criterio.

3.2.2. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje SRD

La Fig. 10 presenta la variación del esfuerzo máximo de tensión con relación al espesor de la losa para diferentes módulos resilientes de subrasante entre 20 MPa y 80 MPa,

los esfuerzos son para un semieje SRD de 50 kN en la posición crítica centro-borde en la placa central y trabazón de agregados entre las placas. En la Fig. 10 se observa que en todas las calidades de subrasante evaluadas, para espesores de losa de 0.17 mt los esfuerzos máximos de tensión son del orden de 3.0 MPa. Pavimentos en placa-huella de concreto simple, con espesores inferiores a 0.17 mt no serían viables bajo las condiciones del presente análisis.

3.2.3. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje tándem

Al evaluar el modelo 2 con un semieje tándem de 100 kN, 50 kN en cada rueda doble del semieje del tándem, con uno de los ejes del tándem ubicado en la posición crítica centro-borde de la placa central y en otro eje del tándem en la placa adyacente (Fig. 6), con trabazón de agregados entre las placas, diferentes espesores de placas y módulos de subrasante entre 30 MPa y 100 MPa, se observa que los esfuerzos máximos de tensión en placas de espesor 0.17 mt o superior son inferiores al valor de referencia de 3.0 MPa para todas las calidades de subrasante (Fig. 11), lo que implica que bajo un eje tándem con las características estudiadas, placas-huellas de espesores superiores a 0.17 mt no fallarían por carga última.

Se identificó que se presenta un contacto entre las esquinas inferiores de las placas, bajo el borde cargado que está en contacto con el material granular de soporte, generando unos esfuerzos altos en esos puntos que podrían inducir a la falla de la esquina (despicadura), sin embargo, se asume que una vez esta falla ocurre, la integridad de la placa no se ve mayormente afectada y los esfuerzos máximos se presentarían en el punto esperado.

3.2. Análisis de la placa-huella por fatiga y erosión

Los criterios de diseño de pavimentos de concreto son la fatiga y la erosión, si se quiere evaluar la posibilidad de diseñar pavimentos en placa-huella de concreto simple, estos dos criterios deben ser evaluados considerando las características de este tipo de pavimento.

3.3.1. Análisis del pavimento placa-huella por criterio de fatiga

La fatiga es la falla del concreto debida a carga repetida, la falla ocurre mediante la fisuración de la losa de concreto.

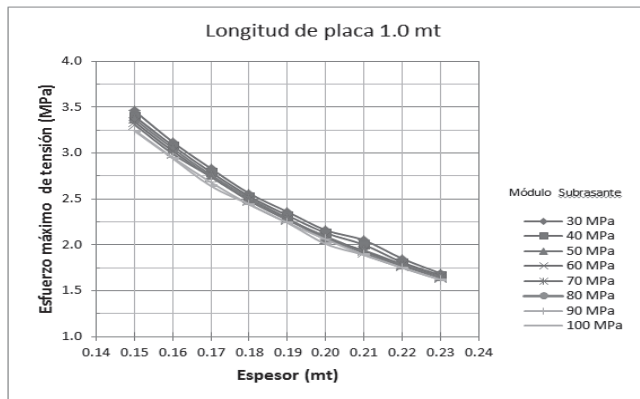


Figura 11. Esfuerzo máximo de tensión en función del espesor de placa (modelo 2, Eje tándem 100 kN)
Fuente: Los autores.

En los pavimentos, la fatiga se mide en vigas de concreto simplemente apoyadas, sometidas a ensayo de carga repetida en los tercios de la luz libre, el tiempo de iniciación de la fisura depende en gran medida de la magnitud del esfuerzo, cuando el esfuerzo aplicado es muy inferior al módulo de rotura del concreto no se produce la falla por fatiga. Se ha definido que esto ocurre con una relación de esfuerzo de 0.5, que es el cociente del esfuerzo aplicado y el módulo de rotura del concreto [6].

El análisis por fatiga de la placa-huella se realizó utilizando la ecuación recomendada por la Portland Cement Association – PCA [7].

$$\text{Log } N_f = 11.737 - 12.077 \left(\frac{\sigma}{S_c} \right) \quad \text{para } \frac{\sigma}{S_c} \geq 0.55 \quad (1)$$

$$N_f = \left(\frac{4.2577}{\frac{\sigma}{S_c} - 0.4325} \right)^{3.268} \quad \text{para } 0.45 < \frac{\sigma}{S_c} < 0.55 \quad (2)$$

$$N_f = \text{Ilimitado} \quad \text{para } \frac{\sigma}{S_c} \leq 0.45 \quad (3)$$

Donde,

N_f : Número de repeticiones de carga permitidas

σ : es el esfuerzo de tensión aplicado

S_c : es el módulo de rotura del concreto

$\frac{\sigma}{S_c}$: Relación de esfuerzo

Con base en el modelo 2 se evaluó la fatiga para placa-huellas de 1.0 mt de longitud con varios espesores placa entre 0.17 mt y 0.23 mt y diferentes módulos resilientes de subrasante entre 30 MPa y 100 MPa. Se analizaron eje SRD, SRD y Tándem, las cargas utilizadas fueron las del semieje, considerando una distribución de 50% del peso total a cada lado del eje.

En la Tabla 2 se presenta el esfuerzo crítico en posición centro-borde, las repeticiones admisibles y el número promedio de ejes diarios permitido para un periodo de 20 años, esta tabla se realizó para la investigación y por el momento no se recomienda para otros usos. Si se revisa el promedio de ejes diarios permitidos para un periodo de 20 años, los datos de la tabla indican que para vías con tránsito de bajo y ejes livianos (SRS), las placas-huella de 1.0 mt de longitud, en concreto simple, con espesores 18 cm o superior podrían ser una alternativa, pero si se espera tener ejes SRD o tándem el espesor requerido debería ser 20 cm. Por ejemplo, si por una vía circula un camión C3 (1 SRS + 1 Tándem) 5 veces al día, si la subrasante tiene módulo de 30 MPa, el espesor de la placa huella debería ser de mínimo 20 cm, que es el requerimiento del eje tándem. Si se chequea el eje SRS este espesor podría soportar hasta 176 repeticiones diarias de este eje durante 20 años.

Si se conoce el tránsito esperado de una vía, con los datos de la Tabla 2 se podría utilizar la teoría del daño acumulado para calcular el consumo total de fatiga [5] y así determinar el espesor de una placa-huella de las características analizadas para soportar este tránsito.

Tabla 2.
Análisis de fatiga para placa-huella de 1.0 mt de largo y módulo de rotura de 3.8 MPa

Módulo de Subrasante (MPa)	Espesor Placa (Cm)	Semieje SRS (27 kN)			Semieje SRD (50 kN)			Semieje Tandem (100 kN)		
		Esfuerzo (MPa)	# Repeticiones Admisibles	# Ejes diarios en 20 años	Esfuerzo (MPa)	# Repeticiones Admisibles	# Ejes diarios en 20 años	Esfuerzo (MPa)	# Repeticiones Admisibles	# Ejes diarios en 20 años
30	17	2.52	5,837	1	3.06	90	0	2.83	277	0
	18	2.26	40,886	6	2.76	833	0	2.56	1,995	0
	19	2.05	166,533	23	2.50	5,837	1	2.36	8,620	1
	20	1.86	1,286,914	176	2.28	30,960	4	2.16	37,252	5
	21	1.70	Ilimitadas	Ilimitadas	2.08	124,351	17	2.05	84,613	12
	22	1.55	Ilimitadas	Ilimitadas	1.90	762,043	104	1.85	773,906	106
	23				1.75	14,335,236	1,964	1.69	Ilimitadas	Ilimitadas
40	17	2.49	7,708	1	3.00	157	0	2.79	371	0
	18	2.22	53,993	7	2.70	1,453	0	2.53	2,484	0
	19	2.01	229,127	31	2.45	10,179	1	2.32	11,552	2
	20	1.83	2,402,754	329	2.23	40,886	6	2.13	46,397	6
	21	1.67	Ilimitadas	Ilimitadas	2.04	166,533	23	2.00	129,932	18
	22	1.53	Ilimitadas	Ilimitadas	1.87	1,286,914	176	1.81	1,564,102	214
	23				1.72	Ilimitadas	Ilimitadas	1.67	Ilimitadas	Ilimitadas
50	17	2.45	10,179	1	2.95	207	0	2.76	462	0
	18	2.19	53,993	7	2.67	1,919	0	2.51	2,876	0
	19	1.98	326,334	45	2.41	13,443	2	2.29	14,388	2
	20	1.81	2,402,754	329	2.20	53,993	7	2.06	78,153	11
	21	1.65	Ilimitadas	Ilimitadas	2.01	229,127	31	1.94	237,285	33
	22	1.50	Ilimitadas	Ilimitadas	1.84	2,402,754	329	1.79	2,376,236	326
	23				1.69	Ilimitadas	Ilimitadas	1.66	Ilimitadas	Ilimitadas
60	17	2.43	10,179	1	2.91	274	0	2.74	534	0
	18	2.16	71,303	10	2.63	2,534	0	2.49	3,329	0
	19	1.96	326,334	45	2.38	13,443	2	2.28	15,480	2
	20	1.79	5,202,474	713	2.17	71,303	10	2.09	62,176	9
	21	1.63	Ilimitadas	Ilimitadas	1.98	326,334	45	1.93	265,438	36
	22	1.49	Ilimitadas	Ilimitadas	1.81	2,402,754	329	1.78	2,993,873	410
	23				1.67	Ilimitadas	Ilimitadas	1.65	Ilimitadas	Ilimitadas
70	17	2.39	13,443	2	2.87	362	0	2.74	534	0
	18	2.15	71,303	10	2.59	3,347	0	2.48	3,582	0
	19	1.95	485,184	66	2.35	17,753	2	2.27	16,655	2
	20	1.77	5,202,474	713	2.14	94,163	13	2.08	67,047	9
	21	1.62	Ilimitadas	Ilimitadas	1.96	326,334	45	1.91	336,255	46
	22	1.48	Ilimitadas	Ilimitadas	1.76	14,335,236	1,964	1.77	3,838,973	526
	23				1.64	Ilimitadas	Ilimitadas	1.64	Ilimitadas	Ilimitadas
80	17	2.37	17,753	2	2.84	478	0	2.70	716	0
	18	2.13	94,163	13	2.56	4,420	1	2.46	4,147	1
	19	1.93	485,184	66	2.33	23,444	3	2.27	16,655	2
	20	1.75	14,335,236	1,964	2.11	94,163	13	2.07	72,322	10
	21	1.61	Ilimitadas	Ilimitadas	1.93	485,184	66	1.91	336,255	46
	22	1.47	Ilimitadas	Ilimitadas	1.77	5,202,474	713	1.77	3,838,973	526
	23				1.63	Ilimitadas	Ilimitadas	1.64	Ilimitadas	Ilimitadas
90	17	2.35	17,753	2	2.81	631	0	2.68	829	0
	18	2.11	94,163	13	2.54	4,420	1	2.44	4,800	1
	19	1.91	762,043	104	2.30	23,444	3	2.24	20,744	3
	20	1.74	14,335,236	1,964	2.10	124,351	17	2.06	78,153	11
	21	1.59	Ilimitadas	Ilimitadas	1.91	762,043	104	1.89	433,900	59
	22	1.46	Ilimitadas	Ilimitadas	1.75	14,335,236	1,964	1.75	6,737,028	923
	23				1.61	Ilimitadas	Ilimitadas	1.62	Ilimitadas	Ilimitadas
100	17	2.34	17,753	2	2.78	833	0	2.64	1,111	0
	18	2.10	124,351	17	2.51	5,837	1	2.44	4,800	1
	19	1.89	762,043	104	2.28	30,960	4	2.24	20,744	3
	20	1.72	Ilimitadas	Ilimitadas	2.08	124,351	17	2.01	118,701	16
	21	1.58	Ilimitadas	Ilimitadas	1.90	762,043	104	1.89	433,900	59
	22	1.45	Ilimitadas	Ilimitadas	1.74	14,335,236	1,964	1.75	6,737,028	923
	23				1.60	Ilimitadas	Ilimitadas	1.62	Ilimitadas	Ilimitadas

Fuente: Los autores.

Es importante anotar que, desde el punto de vista exclusivo de la fatiga, pavimentos de placa-huella en concreto simple podrían ser una solución para muchas vías de bajos volúmenes de tránsito en el territorio nacional, por las que circula un número reducido de camiones al día, sin embargo, el criterio de erosión también debe ser evaluado en este tipo de pavimentos.

3.3.2. Análisis del pavimento placa-huella por criterio de erosión

Una causa frecuente del deterioro de pavimentos de concreto es el bombeo, que consiste en la expulsión del material granular bajo la losa, generando pérdida de soporte de la misma. La erosión ocurre debido a la acción combinada de la carga y la presencia de agua en el material de soporte, que genera la expulsión del material por las esquinas y juntas de las losas, generando vacíos que inducen escalonamiento y fisuración del pavimento [5]. La deflexión más crítica ocurre en la esquina de las losas bajo la acción de las cargas de tránsito [6]. A partir de mediciones hechas en el AASHO Road Test, la Portland Cement Association – PCA desarrolló la siguiente ecuación para estimar el número de repeticiones admisibles por erosión en pavimentos de concreto [8]:

$$\log N = 14.524 - 6.777(C_1 P - 9.0)^{0.103} \quad (4)$$

$$P = 268.7 \frac{p^2}{hk^{0.73}} \quad (5)$$

$$\text{Porcentaje de daño por erosión} = 100 \sum_{i=1}^m \frac{C_2 n_i}{N_i} \quad (6)$$

Donde,

P : Relación de trabajo o potencia

p : Presión en la interface losa-soporte en psi

h : Espesor de la losa en pulgadas

k : Módulo de reacción de la subrasante en pci

C_1 : Factor de ajuste (1 subbase no tratada, 0.9 subbase tratada)

C_2 : Factor de ajuste (0.06 sin bermas de concreto, 0.94 con bermas de concreto)

Para el análisis de erosión en las placas-huellas de concreto de 1.0 mt, se utilizó el modelo 2, la carga se colocó en la esquina de la placa central para calcular la deflexión de la losa, la Fig. 12 muestra la posición del eje tándem, esta condición es la más crítica entre los ejes estudiados debido a que cada eje representa dos repeticiones de carga.

En la Tabla 3 se presenta el número de ejes admisibles por erosión para 20 años, para un suelo con módulo resiliente de 100 MPa y diferentes espesores de placa, estos datos se presentan como ejemplo y soporte para posterior discusión. La tabla muestra que, a pesar de que el módulo de la subrasante tiene un valor aceptable, las repeticiones admisibles por erosión para el eje tándem son bastante bajas, no se encontraron mayores diferencias cuando se utilizan pasadores de carga en las juntas de la placa-huella, para subrasantes de menor calidad los resultados son más bajos.

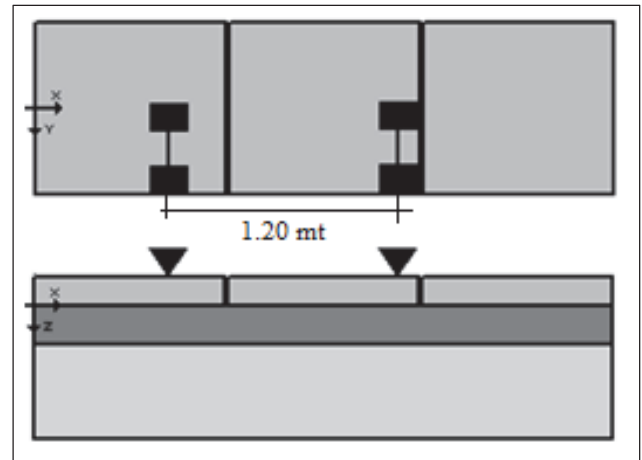


Figura 12. Evaluación de la deflexión de la esquina de la losa para cálculo de erosión
Fuente: Los autores.

Los resultados del análisis de erosión no representan el comportamiento esperado para placas-huellas con base a las experiencias actuales en Colombia, esto plantea interrogantes sobre la aplicabilidad de este modelo de erosión para pavimentos de placa-huella. Cuando se desarrolló el método PCA se modelaron losas de 4.57 mt de longitud y 3.65 mt de ancho con elementos finitos [9], estas losas permiten mejor distribución del esfuerzo sobre la superficie de soporte que las placas-huellas de 1.0 mt de largo y 0.90 mt ancho analizadas, esto hace que los esfuerzos en la interface placa-soporte sean mayores en estas últimas, por lo tanto, se requiere una calibración del modelo para poder aplicarlo a las placas-huella. En la actualidad no existe un modelo de evaluación de la erosión en pavimentos de placa-huella, se requiere mayor investigación sobre el para poder considerar este criterio en el diseño pavimentos con placa-huella.

Aunque el modelo de fatiga de la PCA es claramente aplicable (ecuación 1) para el caso de pavimentos en placa-huella porque el modelo se desarrolló en laboratorio con vigas de concreto, el análisis de fatiga que se realiza con el método de diseño de la PCA no es aplicable para definir espesores de placa-huella, debido a que este considera el esfuerzo tensión equivalente, que es una reducción del esfuerzo máximo de tensión en el borde de la losa, considerando que solo el 6% de los camiones circulan por el borde de la losa y que el esfuerzo disminuye a medida que la

Tabla 3.
Análisis de erosión con placa huella de 1.0 mt y semieje tándem

Módulo de Subrasante (MPa)	Espesor Placa (Cm)	# Ejes tándem Admisibles
100	15	3
	16	4
	17	5
	18	6
	19	7
	20	8
	21	10
	22	11
	23	13

Fuente: Los autores.

carga se aleja del borde [5], situación que es diferente al caso de pavimentos de placa-huella, en donde por su ancho angosto los vehículos se ven obligados a circular por el borde. En consecuencia, el método de diseño de pavimentos de concreto de la PCA, no es aplicable, tal y como está propuesto, para determinar espesores de pavimentos en placa-huella.

4. Conclusiones

Se realizó un análisis extensivo del comportamiento de los pavimentos en placa-huella, bajo las expectativas de carga que se tiene en Colombia para las vías de bajos volúmenes de tránsito. El análisis permitió aclarar dudas sobre el comportamiento de este tipo de pavimentos que se viene utilizando en el país.

El análisis con elementos finitos reveló que el esfuerzo máximo de tensión ocurre cuando la carga está en la posición centro-borde de la placa, el esfuerzo disminuye con el incremento del espesor de la placa, y con la disminución de la longitud de la placa. Dependiendo del tipo de eje y espesor de placa, la longitud de placa que no supere el módulo de rotura del concreto es variable, pero la falla por carga última bajo los ejes evaluados (SRS, SRD y Tándem) se puede controlar con la disminución de la longitud de la placa.

El efecto más crítico del gradiente de temperatura, es incrementar los esfuerzos máximos de tensión en el borde inferior de la placa, este efecto también se puede minimizar disminuyendo la longitud de la placa, situación que es una ventaja dado que no existe mayor información sobre gradientes en losas de concreto en todo el territorio nacional.

Cuando se limita la longitud de la placa a 1.0 mt de largo con 0.9 mt de ancho, el análisis de fatiga revela que es posible diseñar pavimentos en placa-huella de concreto simple con las cargas estudiadas, sin embargo, no es posible evaluar el comportamiento a erosión de estos pavimentos debido a que no existe un modelo adecuado.

Se encontró que el método de diseño de pavimentos de concreto de la Portland Cement Association – PCA, no es aplicable para la determinación de espesores de pavimentos en placa-huella en concreto, ya que sus procedimientos de análisis de fatiga y erosión están concebidos para losas de concreto con geometría distinta a las placas-huella de concreto, por lo cual varios de los criterios del método de la PCA, no son aplicables para los pavimentos en placa-huella.

Referencias

- [1] Especificación 500-1P Placa-huella en concreto. [En línea]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/276515876/Especificacion-Placa-huella-500-1p-Invias>.
- [2] Ministerio de Transporte, Límites de pesos y dimensiones de los vehículos de carga en Colombia, Resolución 004100 Ministerio de Transporte, Bogotá DC, 2004.
- [3] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Calibrated Mechanistic Structural Analysis Procedure for Pavement, Report 1-26, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1990. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=502452>
- [4] Davids, W.G. EverFE: Software for the 3D Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavements, Maine, USA, 2005.
- [5] Packard, R.G., Thickness design for concrete highway and street pavements, Portland Cement Association, 1984.

- [6] Huang, Y.H., Pavement analysis and design, Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [7] Packard, R.G.a.S.D.T., New PCA thickness design procedure for concrete highway and street pavements, The Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, 1985.
- [8] Packard, R.a.T.S., Mechanistic design of concrete pavements to control joint faulting and subbase erosion, Portland Cement 1985.
- [9] Ying-Haur, L. and Carpenter, S.H., PCAWIN Program for jointed concrete pavement design, Tamkang Journal of Science and Engineering, [Online]. 4(4), pp. 293-300, 2001. Available at: <http://www2.tku.edu.tw/~tkjse/4-4/4-4-7.pdf>
- [10] Packard, R.G., Thickness design for concrete highway and street pavements, Portland Cement Association, 1984.

A. Orobio, es PhD. en Ing. Civil de West Virginia University, USA. Ing. Civil, MSc. y Esp. en Infraestructura Vial de la Universidad del Cauca, Colombia. Esp. en Gerencia de Construcciones de la Universidad Javeriana, Colombia. Es profesor titular de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, Colombia. Ha sido consultor, especialista y asesor en pavimentos de diferentes empresas nacionales. ORCID: 0000-0001-7166-3061]

J.C. Orobio, es Ing. Civil, MSc. y Esp. En Infraestructura Vial de la Universidad de Cauca, Colombia. MSc. En Economía de la Universidad Javeriana, Colombia. Con más de 20 años de experiencia en la gestión de proyectos de transporte e infraestructura vial, puesta en marcha de sistemas de transporte, gestión de recursos ante el Gobierno Nacional y Municipal y administración de concesiones de transporte, tecnológicas e infraestructura. Ha sido Secretario de Infraestructura de Cali, Director de Transporte y Jefe de Planeación de Metrocali, Ingeniero de Proyectos de las empresas Consultoría Colombiana y Conalvias, Gerente de las firmas MG Consultores Empresariales y el Alcázar, y profesor de ingeniería de pavimentos en la Universidad Javeriana. ORCID: 0000-0001-9665-5121



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas
de Transporte
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5172