6 Análisis De La Influencia Del Módulo De Reacción Del Cimiento En El Estado Tensional Del Pavimento Rígido Mediante El Software EverFE

Analysis Of The Influence Of The Modulus Of Reaction Of The Foundation On The Stress State Of Rigid Pavement Using EverFE Software

Autores

James Alejandro Montes Zambrano
Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí, e-mail: jmontes1462@utm.edu.ec
https://orcid.org/0009-0008-2043-4697

José Adrián Viteri Sánchez
Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí, e-mail: jviteri1699@utm.edu.ec
https://orcid.org/0009-0009-6656-8217

Edwin Alexander Rodríguez Veliz
PhD. Profesor de la Universidad Técnica de Manabí, e-mail: edwin.rodriguez@utm.edu.ec
https://orcid.org/0009-0003-1053-9659

6 Análisis De La Influencia Del Módulo De Reacción Del Cimiento En El Estado Tensional Del Pavimento Rígido Mediante El Software EverFE

RESUMEN

Este estudio investiga la influencia del módulo de reacción del cimiento en el estado tensional de pavimentos rígidos utilizando el software EverFE 2.26, un programa de simulación basado en el método de elementos finitos. Los pavimentos rígidos, esenciales para la infraestructura vial, requieren un análisis detallado de la interacción entre las cargas vehiculares y el soporte del cimiento para optimizar su diseño y prolongar su vida útil. A través de la simulación de diferentes escenarios de carga y variaciones en el módulo de reacción del cimiento, se evaluaron las tensiones de tracción en el fondo de la losa de pavimento. Los resultados muestran que un cimiento más rígido reduce las tensiones críticas, además los esfuerzos calculados no representan un estado tensional significativo que cause fatiga en la losa propuesta, ya que el valor máximo de tensión a tracción no supera el límite del Módulo de rotura del hormigón. La investigación concluye que los resultados solo son válidos para una condición de resistencia de subrasante determinada.

Palabras claves: *EverFE 2.26, módulo de reacción del cimiento, pavimento rígido, tensiones*

ABSTRACT

This study investigates the influence of the modulus of foundation reaction on the stress state of rigid pavements using EverFE 2.26, a simulation program based on the finite element method. Rigid pavements, essential for road infrastructure, require a detailed analysis of the interaction between vehicular loads and foundation support to optimize their design and prolong their service life. By simulating different loading scenarios and variations in the modulus of foundation reaction, tensile stresses at the bottom of the pavement slab were evaluated. The results show that a stiffer foundation reduces the critical stresses, and the calculated stresses do not represent a significant stress state that would cause fatigue in the proposed slab, since the maximum tensile stress value does not exceed the Modulus of Rupture limit of the concrete. The research concludes that the results are only valid for a given subgrade strength condition.

Key words: *EverFE 2.26, modulus of foundation reaction, rigid pavement, stresses.*

Nota Editorial: Recibido: Enero 2025 Aceptado: Marzo 2025

1. INTRODUCCIÓN

Los pavimentos rígidos, junto con los flexibles, son elementos esenciales en la infraestructura vial, desempeñando un papel crucial en el desarrollo económico y social al facilitar la movilidad y el transporte de bienes y personas. La interacción dinámica entre los vehículos y el pavimento ha sido ampliamente estudiada para mejorar su diseño y comportamiento, garantizando seguridad, confort y durabilidad a lo largo del tiempo. Esto está relacionado con su estado físico, como grietas o fallas que puedan afectar su capacidad de soporte [1].

En este contexto, el módulo de reacción del cimiento o subrasante emerge como un factor crítico que influye directamente en la distribución de tensiones dentro de la estructura del pavimento. La capacidad de la subrasante para resistir y distribuir las cargas aplicadas afecta directamente la respuesta estructural del pavimento, lo que subraya la importancia de explorar y cuantificar su influencia para mejorar tanto el diseño como el mantenimiento de las carreteras [2].

Este estudio tiene como objetivo determinar cómo el módulo de reacción del cimiento influye en el estado tensional del pavimento rígido de hormigón simple, con el propósito de mejorar el diseño y la durabilidad de las infraestructuras viales. La investigación, mediante simulaciones en diferentes escenarios, analiza las tensiones de tracción generadas en el fondo de la losa al variar dicha variable, permitiendo establecer criterios que optimicen el desempeño y la vida útil de las vías. Estos avances contribuirán a una infraestructura vial más eficiente, que no solo favorezca la conexión regional, sino también facilite el acceso a mercados internacionales, promoviendo el desarrollo económico [3].

Es relevante destacar que, según Guerra (2020), Westergaard fue uno de los primeros en proponer ecuaciones para calcular las tensiones y deflexiones máximas en los pavimentos rígidos, especialmente en las zonas más críticas como el interior, borde y esquina de la losa, mediante soluciones analíticas tradicionales [4]. Sin embargo, con los avances tecnológicos, el análisis de la estructura del pavimento rígido mediante el uso del método de elementos finitos (MEF), tiende a tomar en cuenta de manera más realista las cargas complejas, condiciones de contornos mixtas y geometría compleja, permitiendo un análisis más detallado y preciso de su comportamiento [5].

Este estudio se delimita a la investigación de la influencia de la variación del módulo de reacción del cimiento en un pavimento rígido de hormigón simple, apoyado sobre la subrasante natural. El análisis se lleva a cabo en una losa con dimensiones específicas (3600 mm de ancho, 4600 mm de largo y 200 mm de espesor) y bajo la aplicación de cargas de vehículos pesados, clasificadas según los tipos de ejes establecidos por AASHTO: eje simple rueda simple, simple rueda doble, tándem y trídem. El software EverFE 2.26 se utilizó como herramienta de modelación tridimensional de elementos finitos para llevar a cabo este análisis.

Inicialmente se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva para identificar estudios previos relacionados con el tema y desarrollar un modelo matemático del sistema de pavimento rígido de hormigón simple, utilizando datos precisos sobre las propiedades físicas y mecánicas del material, las condiciones de carga y las características de la subrasante. Posteriormente, se ejecutaron simulaciones para analizar el comportamiento del sistema bajo ejes distribuidos en un área determinada por la presión de contacto entre el neumático y el pavimento, generando estados tensionales en el pavimento [6].

2. PAVIMENTO RÍGIDO DE HORMIGÓN SIMPLE

El propósito de las carreteras es proporcionar una vía pública para personas y vehículos con un nivel aceptable de comodidad. Aunque el pavimento rígido tiene un alto costo inicial cuando se utiliza para tales fines, su capacidad estructural para soportar mayores cargas de tráfico y ambientales lo convierte en una opción prometedora en situaciones de uso intensivo [7].

Técnicamente, el pavimento rígido se refiere a cualquier superficie de hormigón. Según AASHTO, un pavimento rígido es una estructura de pavimento que transmite cargas a la subrasante y consta de una sola capa de hormigón de cemento Portland con buena resistencia a la flexión [8], debido a su mayor rigidez, los pavimentos rígidos distribuyen las cargas verticales sobre un área más extensa, lo que resulta en presiones significativamente más bajas. A excepción de los bordes de las losas y las juntas sin pasa-juntas, las deformaciones o deflexiones elásticas son prácticamente imperceptibles [10].

En la actualidad, el diseño de pavimentos está basado en métodos empíricos como la AASTHO 93 y en métodos empírico-mecanicista caracterizados por el análisis de esfuerzos, deformaciones y deflexiones bajo las diferentes propiedades de los materiales, clima y cargas aplicadas [12]. Este último método se considera más estable debido a que se centra en la caracterización adecuada de los materiales y condiciones de soporte de suelo, su uso aún no se ha generalizado, sin embargo en países como Ecuador, que sigue diseñando con la metodología AASHTO 93 debido a la complejidad y costos de un estudio propio para las condiciones del país indicado.

Cuando se encuentra bajo tensión, el pavimento rígido mantiene su forma; sin embargo, si la tensión es demasiado grande, se rompe. Por lo tanto, como resultado, la carga se distribuye sobre una gran superficie de la subrasante y se aprovecha toda la capacidad estructural en un pavimento rígido. Las tensiones de carga de las ruedas se pueden transmitir a un área más grande debajo de los pavimentos rígidos debido a su fuerte estructura de flexión [8].

En los pavimentos de hormigón o pavimentos rígidos, el buen comportamiento se puede asegurar mitigando dos tipos de daños principales: la fatiga causada por la acción repetida de las cargas del tráfico y la erosión en la base de la estructura. Para lograr esto, es necesario controlar las tensiones y deflexiones que se generan en ciertas áreas de la losa. Por lo tanto, diversos métodos proponen técnicas de dimensionamiento de la estructura que permiten reducir la probabilidad de fallos durante el período de diseño [9].

En este estudio, se analiza el módulo de reacción, un parámetro que impacta directamente en la distribución de las cargas en el pavimento. Un valor bajo del módulo de reacción (*k*) sugiere que la subrasante es más flexible, lo que puede provocar asentamientos y deformaciones más notables en el pavimento, afectando su estabilidad y durabilidad con el tiempo.

Cabe recalcar que cuando no se usan pasadores como en el presente estudio, el parámetro más influyente es el módulo de reacción de la subrasante (*k*), diferenciándose del módulo de rotura del concreto que se puede asignar en el diseño inicial, la resistencia de la subrasante es un valor inherente al terreno, de modo que para mejorar su resistencia se tendría que estabilizar el terreno o aplicar técnicas de mejoras de la subrasante [11].

La modelización computacional en este caso mediante EverFE 2.26 permite calcular las tensiones en los puntos críticos, bajo diversas condiciones y tipos de materiales en la cimentación y la losa, generadas al aplicar cargas de referencia, de acuerdo con la normativa de diseño. Estas tensiones se ajustan a los valores que se obtienen a una distancia de 60 cm del borde, utilizando factores establecidos por la PCA, cuyas investigaciones han demostrado que solo el 6% de los camiones pasan por esa área [14]. Por lo tanto se evalúa la influencia del módulo de reacción del cimiento (*k)* en esa zona del pavimento para la obtención de tensiones que descifren el comportamiento del pavimento rígido de hormigón simple ante estas variaciones de carga y módulos de reacción del cimiento.

2. Área De Contacto

La carga generada por el vehículo se distribuye en un área que depende de la presión de contacto entre el neumático y el pavimento, el área de contacto se puede determinar mediante la siguiente formula:

$$A_c = \frac{W_i}{T_i} \tag{1}$$

Donde A_c significa el área de contacto del neumático con el suelo, mientras que W_i representa la carga del neumático debida al vehículo y su distribución de peso, T_i la tensión del neumático o presión interna, asegura la forma y el comportamiento adecuado de un neumático, afectando a su flexión y por lo tanto al área plana del neumático y a la interacción de la rueda con la superficie. Siguiendo las normas de AASHTO, la tensión de compresión del neumático varía de 6 a 8 kg/cm^2, se establece una medida media de 7 kg/cm^2 para este estudio.

En un principio, el método de la **PCA (1966)** utilizó una huella de contacto elíptica para modelar la interacción del neumático con la superficie. Sin embargo, en **1984**, basándose en el desarrollo del **método de elementos finitos (MEF)**, se adoptó una huella de contacto de forma rectangular (Fig. 1). En este nuevo enfoque, se asume que la longitud de la huella es **0,8712L** y el ancho es **0,6L**, donde **L** representa una dimensión característica relacionada con las propiedades del neumático [16]. Este cambio permitió una modelización más precisa y detallada de las cargas más la distribución de la presión de contacto, mejorando la exactitud de los cálculos en estudios de deformación y comportamiento del neumático.

$$L = \sqrt{\frac{A_C}{0{,}5227}} \tag{2}$$

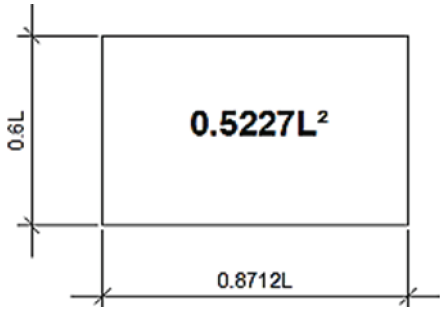

Figura 1: Dimensiones del área de contacto para una huella rectangular

Se obtienen diferentes valores geométricos de **longitud** y **ancho** para los cuatro tipos de carga mostrados en la Tabla 1, los cuales se introducen en los parámetros de carga requeridos en el software **EverFE 2.26** para la modelación computacional y obtención de las tensiones en el pavimento rígido. En los modelos de respuesta utilizados para caracterizar el comportamiento del suelo de cimentación en pavimentos de hormigón simple, se pueden emplear dos parámetros principales: el **módulo de reacción de la subrasante** y el **módulo resiliente**. Sin embargo, para los fines de la presente investigación, se considera el módulo de reacción de la subrasante, descartando el módulo resiliente debido a los alcances específicos del estudio.

Las cargas empleadas corresponden a los valores máximos establecidos para vehículos pesados de acuerdo con el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) de Ecuador, conforme a la Tabla Nacional de Pesos y Dimensiones [13]. Estos valores son: 7 Ton (69 kN) para eje rueda simple, 11 Ton (108 kN) para eje simple con rueda doble, 20 Ton (196 kN) para eje tándem, y 24 Ton (235 kN) para eje trídem.

A continuación, se presentan los valores geométricos de **longitud** y **ancho** para los cuatro tipos de carga, los cuales se ingresan dentro de las dimensiones establecidas del programa computacional EverFE 2.26:

Tabla 1: Dimensiones de huella rectangular para los diferentes tipos de ejes

Ejes	L (cm)	0,8712 L (cm)	0,6 L (cm)	Ac (cm²)
ESRS	30,93	26,94	18,56	500,02
ESRD	27,42	23,88	16,45	392,87
ETAN	26,14	22,77	15,68	357,16
ETRI	23,38	20,37	14,03	285,73

En la Tabla 2, se presentan los valores de los módulos de reacción de la subrasante (*k*) obtenidos mediante el uso del software StreetPave12. A partir de las correlaciones entre el CBR y el valor de *k*, es posible determinar la capacidad de la subrasante para resistir las cargas aplicadas, lo que permite el diseño y la evaluación de pavimentos más precisos. Estos cálculos se realizaron mediante la simulación de las propiedades del suelo tales como el valor de CBR de la subrasante, numero de capas, tipo de material y módulo de resiliencia de cada una de estos.

Tabla 2: Módulos de reacción en conjunto obtenidos mediante software **StreetPave12**:

	ESPESOR DE SUBBASE NO ESTABILIZADA (200 mm)				
CBR	**100 MPa**	**150 MPa**	**200 MPa**	**250 MPa**	**300 MPa**
(%)	**MPa/mm**	**MPa/mm**	**MPa/mm**	**MPa/mm**	**MPa/mm**
5	0,0814	0,0885	0,0939	0,0984	0,1021
10	0,1184	0,1288	0,1367	0,1431	0,1486
15	0,1475	0,1603	0,1702	0,1782	0,185
20	0,1723	0,1874	0,1988	0,2082	0,2162

3. MÉTODOS

3.1 Geometría Y Propiedades De La Losa De Hormigón Simple

En este estudio se evaluó una estructura de pavimento rígido mediante un modelo de elementos finitos utilizando el software EverFE 2.26. La losa de hormigón analizada presenta dimensiones de 3600 mm de ancho, 4600 mm de largo y 200 mm de espesor, las cuales son medidas estándar para este tipo de estructura. El análisis se enfocó exclusivamente en estudiar la influencia del módulo de reacción del suelo de apoyo, sin considerar el uso de pasadores o barras de transferencia de carga en las juntas transversales de contracción. Cabe señalar que al no considerar este mecanismo para este tipo de pavimento, permitirá una transferencia eficiente de carga mediante la trabazón de los agregados en las juntas. Para cada escenario evaluado, se utilizó el mismo modelo geométrico y se consideraron cuatro tipos de configuraciones de carga: eje simple con rueda simple, eje simple con rueda doble, eje tándem y eje trídem, cada uno con sus características geométricas específicas. La ubicación de los ejes se definió en la mitad de la longitud de la losa y a 60 cm del borde en el ancho, con el fin de validar las zonas críticas de máxima tensión propuestas por Westergaard, tal como se muestran en las Fig. 2 y 3:

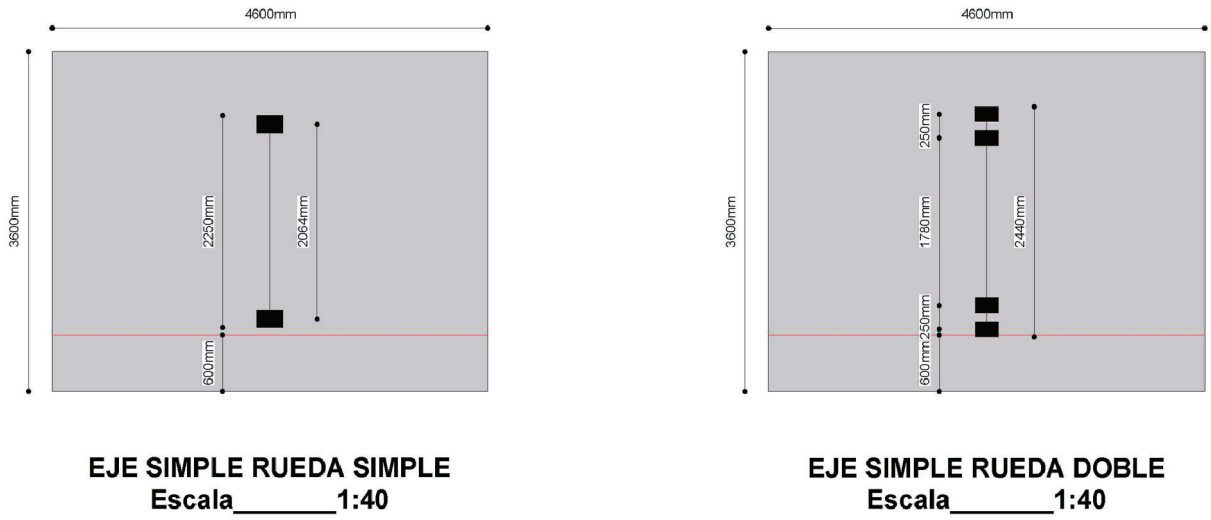

Figura 2: *Características geométricas de la estructura de pavimento rígido y ejes rueda simple y rueda doble.*

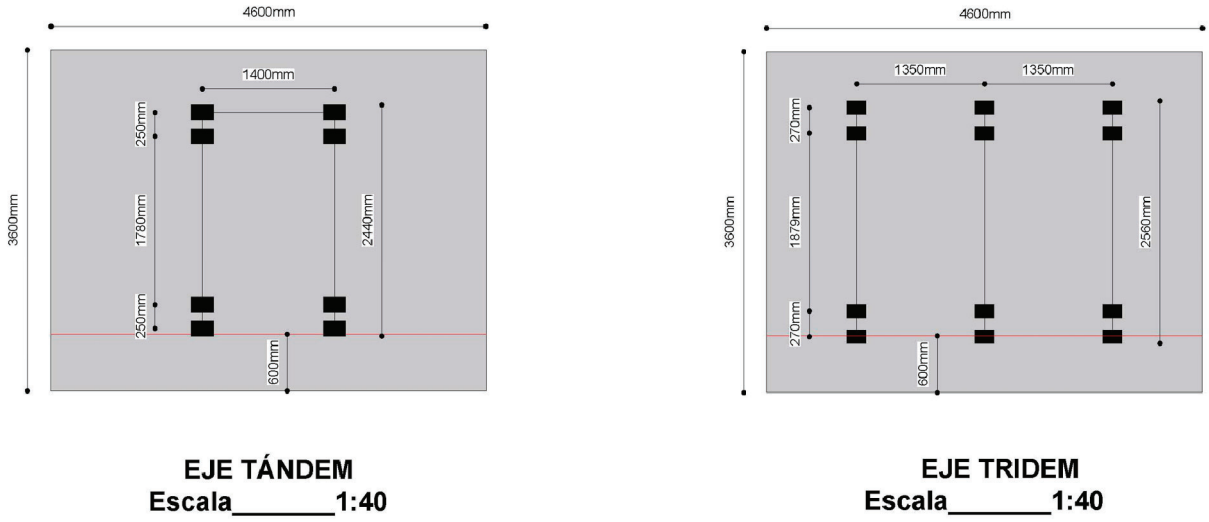

Figura 3: *Características geométricas de la estructura de pavimento rígido y ejes tándem y trídem*

En el análisis de tensiones para la caracterización del hormigón, se consideraron los siguientes parámetros iniciales: un coeficiente de Poisson de 0,17, un módulo de elasticidad de 27.800 MPa (correspondiente a una resistencia a compresión de 35,8 MPa a los 28 días de curado), un coeficiente de dilatación térmica de $1{,}1 \times 10^{-5}$ $°C^{-1}$ y una densidad de 2.400 kg/m³. Estos valores fueron tomados de un estudio previo realizado en las condiciones específicas del cantón Portoviejo [15].

Para evaluar la resistencia a compresión y el módulo de rotura, se fabricaron especímenes cilíndricos y prismáticos, los cuales fueron ensayados a los 7, 14 y 28 días. Como resultado, se obtuvo un módulo de rotura de 5,08 MPa a los 28 días con el fin de conocer la resistencia del material de la losa.

3.2 Cálculo Tenso-Deformacional En La Losa

Para determinar el estado tenso-deformacional se utilizó el software EverFE 2.26 que es una herramienta de modelación numérica de uso sencillo para el análisis de elementos finitos (MEF) en tres dimensiones que simula esfuerzos generados en pavimentos rígidos con variaciones en su geometría, condiciones de carga (tipo de ejes) e incluyendo factores ambientales que afectan a la estructura de estudio.

Diversos estudios realizados han demostrado que los métodos de elementos finitos proponen una estimación más precisa del comportamiento bajo diversas solicitaciones de tránsito en las secciones más críticas de las losas de pavimento rígido.

Una vez modelada la losa con la geometría propuesta, primero se evaluó el eje simple rueda simple, con un módulo de reacción de la subrasante (*k*) en conjunto de 0,0814 MPa/mm. Este primer valor de (*k*) corresponde a un material de subbase no estabilizada con un espesor de 200 mm y un módulo de elasticidad (E) de 100 MPa, se tomaron valores de CBR a partir de 5% donde la subrasante comienza a tener un valor aceptable según la NC 334/2004, el último valor a analizar fue de 0,2162 MPa/mm cuando el material tiene un CBR del 20% y un módulo de elasticidad (E) del material de 300 MPa como lo muestra la Tabla 1.

Se evaluaron todos los valores de (*k)* en conjunto para cada tipo de eje, es decir, se realizaron un total de 80 corridas para los diferentes escenarios, con el objetivo de obtener el estado tensional y evaluar los efectos producidos por estos parámetros independientes. Para estos cálculos se discretizó el modelo de losa dividiéndola en una retícula de 25x25x5 (en sus ejes X, Y y Z, respectivos), con el fin de obtener resultados más precisos, teniendo en cuenta la capacidad computacional requerida y el tiempo de cada corrida a un nivel razonable.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Resultados De Tensiones Máximas A Tracción En La Losa Por Elementos Finitos

Los resultados obtenidos mediante el método de elementos finitos utilizando el software EverFE, se analizó la acción combinada entre el módulo de reacción del cimiento y el tipo de eje de carga, obteniendo las siguientes tensiones máximas en el borde de la losa para el 5% de CBR : una resistencia de la subrasante de 0,0814 MPa/mm para los ejes analizados genera una tensión de 1,0882 MPa para el eje simple rueda simple (Tabla 3),una tensión de 1,5083 MPa para el eje simple con rueda doble (Tabla 4), una tensión de 1,3148 MPa para el eje tándem (Tabla 5) y por último una tensión máxima de 1,0195 MPa para el eje trídem (Tabla 6), es importante mencionar que los valores máximos se presentan en cada condición de carga y resistencia de la subrasante como se muestran en las tablas de resultados a continuación:

Tabla 3: *Resultados de las tensiones máximas obtenidas para el eje simple rueda simple*

CBR (%)	Módulo de Elasticidad de la subrasante (MPa) y Módulo de reacción k (MPa/mm)				
	100	**150**	**200**	**250**	**300**
5	**0,0814**	**0,0885**	**0,0939**	**0,0984**	**0,1021**
	1,0882	1,0708	1,0589	1,0497	1,0426
10	**0,1184**	**0,1288**	**0,1367**	**0,1431**	**0,1486**
	1,0154	1,0010	0,9912	0,9838	0,9779
15	**0,1475**	**0,1603**	**0,1702**	**0,1782**	**0,1850**
	0,9791	0,9666	0,9579	0,9529	0,9498
20	**0,1723**	**0,1874**	**0,1988**	**0,2082**	**0,2162**
	0,9563	0,9487	0,9441	0,9406	0,9379

Tabla 4: *Resultados de las tensiones máximas obtenidas para el eje simple rueda doble*

CBR (%)	Módulo de Elasticidad de la subrasante (MPa) y Módulo de reacción k (MPa/mm)				
	100	**150**	**200**	**250**	**300**
5	**0,0814**	**0,0885**	**0,0939**	**0,0984**	**0,1021**
	1,5083	1,4808	1,4619	1,4472	1,4359
10	**0,1184**	**0,1288**	**0,1367**	**0,1431**	**0,1486**
	1,3919	1,3681	1,3517	1,3393	1,3293
15	**0,1475**	**0,1603**	**0,1702**	**0,1782**	**0,1850**
	1,3312	1,3095	1,2943	1,2828	1,2735
20	**0,1723**	**0,1874**	**0,1988**	**0,2082**	**0,2162**
	1,2912	1,2704	1,2561	1,2451	1,2362

Tabla 5: *Resultados de las tensiones máximas obtenidas para el eje tándem*

CBR (%)	Módulo de Elasticidad de la subrasante (MPa) y Módulo de reacción k (MPa/mm)				
	100	**150**	**200**	**250**	**300**
5	**0,0814**	**0,0885**	**0,0939**	**0,0984**	**0,1021**
	1,3148	1,2898	1,2728	1,2597	1,2497
10	**0,1184**	**0,1288**	**0,1367**	**0,1431**	**0,1486**
	1,2114	1,1911	1,1774	1,1672	1,1589
15	**0,1475**	**0,1603**	**0,1702**	**0,1782**	**0,1850**
	1,1605	1,1429	1,1308	1,1218	1,1146
20	**0,1723**	**0,1874**	**0,1988**	**0,2082**	**0,2162**
	1,1284	1,1122	1,1013	1,0930	1,0864

Tabla 6: *Resultados de las tensiones máximas obtenidas para el eje trídem*

CBR (%)	Módulo de Elasticidad de la subrasante (MPa) y Módulo de reacción k (MPa/mm)				
	100	**150**	**200**	**250**	**300**
5	**0,0814**	**0,0885**	**0,0939**	**0,0984**	**0,1021**
	1,0195	1,0116	1,0061	1,0018	0,9984
10	**0,1184**	**0,1288**	**0,1367**	**0,1431**	**0,1486**
	0,9848	0,9772	0,9718	0,9677	0,9642
15	**0,1475**	**0,1603**	**0,1702**	**0,1782**	**0,1850**
	0,9649	0,9574	0,9520	0,9478	0,9444
20	**0,1723**	**0,1874**	**0,1988**	**0,2082**	**0,2162**
	0,9508	0,9432	0,9378	0,9335	0,9300

Los esfuerzos producidos en cada uno de los tipos de ejes se analizaron en el fondo de la losa, se presentan de forma gráfica los esfuerzos máximos generados en los bordes, centro y esquina en el plano x-y del modelo de análisis de losa, en la Fig. 4 presenta el esfuerzo máximo para la carga de eje simple correspondiente al 21,5% de la resistencia del material, de modo que no presenta la posibilidad de generar agrietamientos y falla de la losa, en la Fig. 5 presenta el esfuerzo máximo para el eje simple rueda doble de 1,51 MPa, este valor es el máximo entre los ejes analizados por lo que corresponde a la relación máxima entre la resistencia del material de la losa.

De la Fig. 6 presenta la carga por eje tándem, que representa al 25,8% de la resistencia del material, al considerar el efecto de un eje tándem, los esfuerzos no son tan altos como en el eje simple rueda doble, sin embargo, estos camiones con frecuencia llevan sobrepeso, de igual manera los esfuerzos no superan a la resistencia del concreto, por último la Fig. 7 presenta a la carga de eje trídem con una relación de 20%, la cual es la más baja considerando que es la que genera menores tensiones que las demás debido a menor carga unitaria por rueda distribuida en el eje.

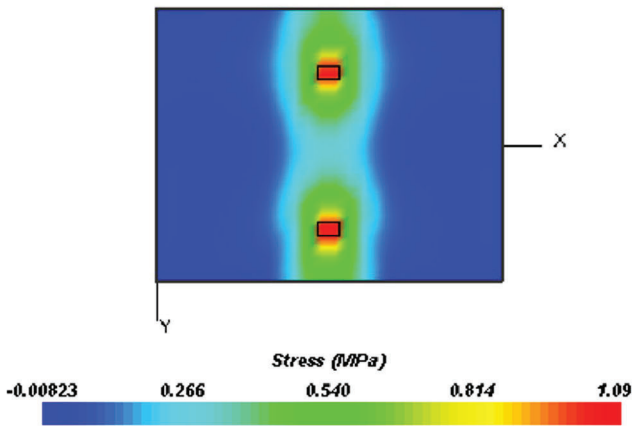

Figura 4: *Esfuerzos máximos en el plano x-y para eje simple rueda simple*

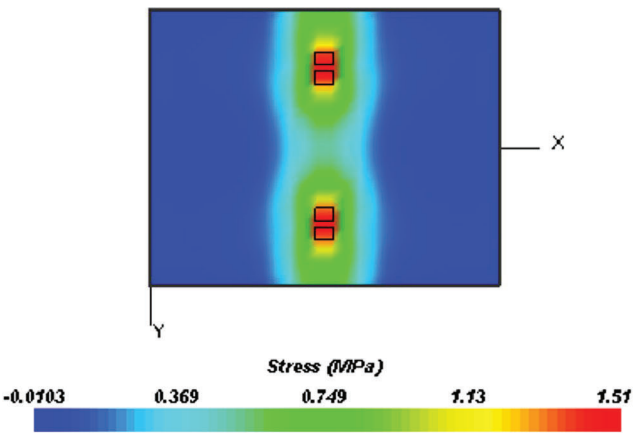

Figura 5: *Esfuerzos máximos en el plano x-y para eje simple rueda doble*

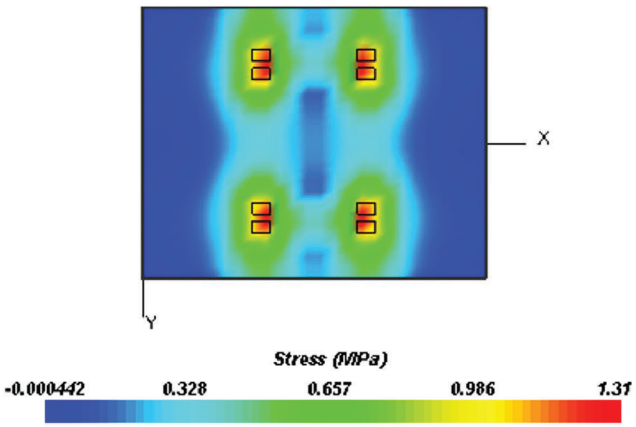

Figura 6: *Esfuerzos máximos en el plano x-y para eje Tándem*

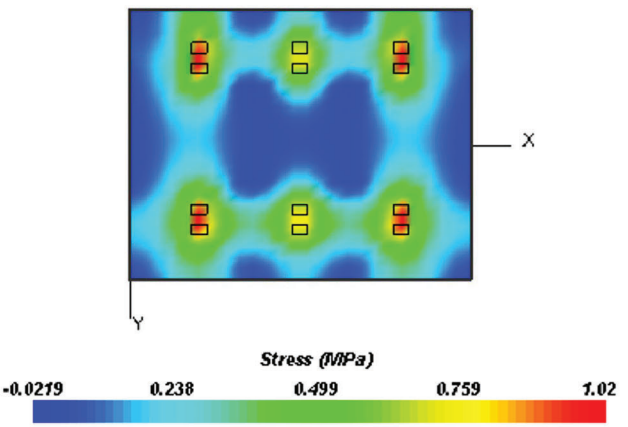

Figura 7: *Esfuerzos máximos en el plano x-y para* eje Trídem

Al analizar los resultados obtenidos, se estima que la relación de esfuerzos entre los valores máximos a tracción en el borde de la losa para los cuatro tipo de ejes, respecto al Módulo de Rotura del hormigón para esta investigación de 5,08 MPa, según la caracterización del hormigón usado en un estudio en el cantón Portoviejo [14], es del 29,7%, por lo que las tensiones a tracción en el fondo de la losa consumen menos del 30% y no superan el límite de resistencia o fatiga del material, por lo cual no se consideraría para este estudio una influencia significativa del módulo de reacción ya que estaría aún lejos de causar una probabilidad de daño a la estructura del pavimento rígido, considerando que esta relación debe ser diferente en cada condición de carga, y para valores de resistencia de subrasante y de base.

Una vez obtenidos los resultados de las tensiones máximas, se procede a evaluar estos valores en función del tipo de eje, se construye un gráfico como se muestra en la Figura 7, se visualiza la relación entre las tensiones máximas generadas y el módulo de reacción del cimiento, variando este último entre un Módulo de Elasticidad de la subrasante de 100 a 300 MPa, para un espesor de subbase no estabilizada de 20 cm. Posteriormente, se utiliza una línea de tendencia polinómica de grado 2 para generar una ecuación que permita calcular las tensiones generadas en función del módulo de reacción del cimiento en dirección (X). Con la ecuación es posible obtener la variable dependiente (y), que corresponde a la tensión generada por el valor del módulo de reacción del cimiento (*k*), proporcionando así una herramienta para predecir las tensiones bajo diferentes condiciones de carga, de modo que las ecuaciones generadas se muestran a continuación:

- ESRS: $y = 9{,}3271x^2 - 4{,}7079x + 1{,}8228$ (3)
- ESRD: $y = 9{,}0153x^2 - 4{,}2901x + 1{,}5972$ (4)
- ETAN: $y = 7{,}7685x^2 - 3{,}3853x + 1{,}309$ (5)
- ETRID: $y = 2{,}2941x^2 - 1{,}3266x + 1{,}1107$ (6)

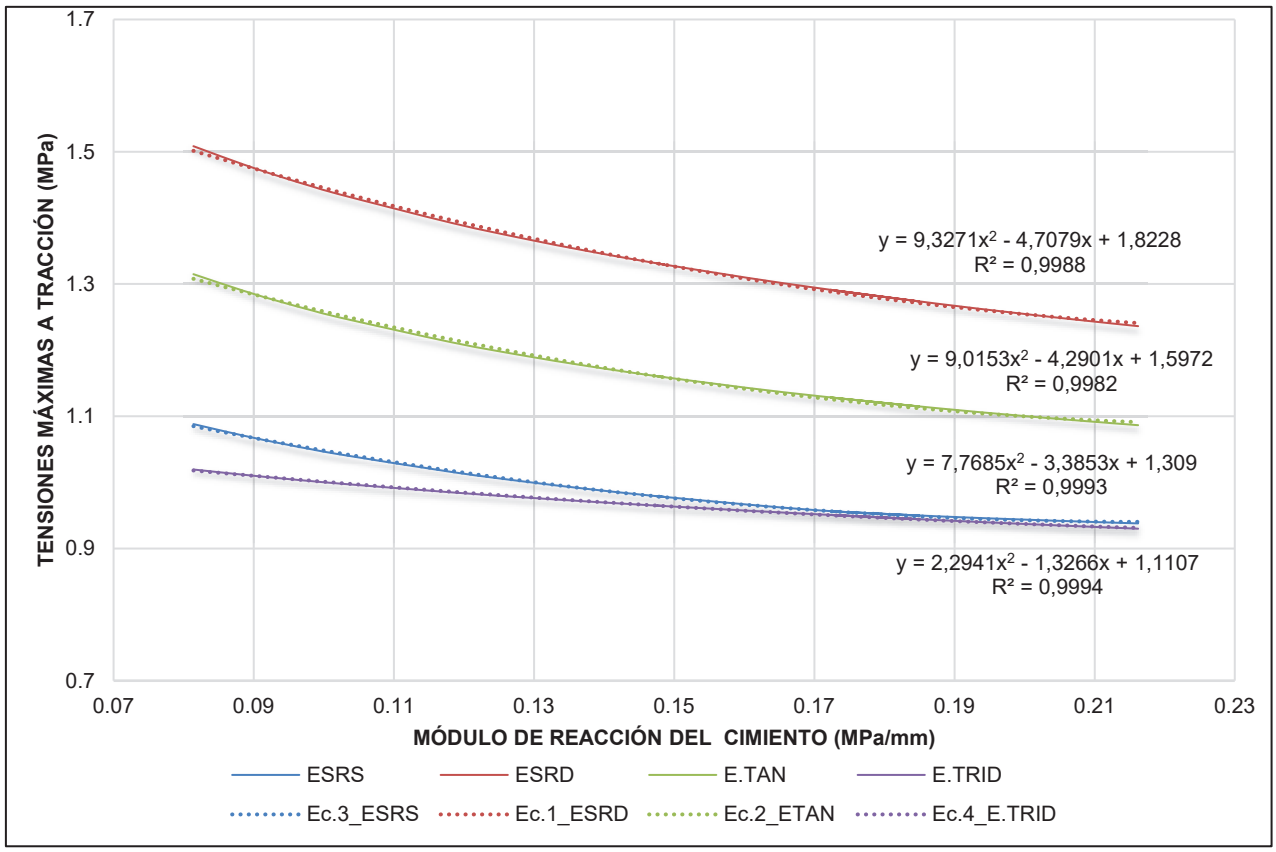

Figura 8: *Relación de Esfuerzos de tensiones a tracción y Módulos de reacción del cimiento*

Otro posible uso del gráfico es como un nomograma, en el cual se traza una línea vertical en el eje de abscisas correspondiente al módulo de reacción del cimiento requerido, extendiéndola hasta que intercepte la curva de resultados. Posteriormente, se traza una línea horizontal desde el punto de intersección, que permitirá leer la tensión generada en el eje de las ordenadas.

Este método proporciona una herramienta visual para predecir las tensiones en función del tipo de eje y el módulo de reacción del cimiento, se considera que solo son válidos para una condición de resistencia de subrasante. Como comprobación de los cálculos de tensiones en la losa generados por el software EverFE, se demuestra la confiabilidad de los valores calculados con coeficientes de determinación (R^2) de 0,9988 para ESRS, de 0,9982 para ESRD, de 0,9993 para ETAN y 0,9994 para ETRID, estos valores evalúan la relación entre las variables involucradas.

5. CONCLUSIONES

Una vez obtenido el nomograma que relaciona la tensión con el módulo de reacción de la subrasante para los cuatro tipos de ejes analizados, y considerando la variación del módulo de reacción, los cálculos de las tensiones producidas en la losa se hicieron conjuntamente con la subbase no estabilizada de 20cm. Los resultados obtenidos muestran una tendencia descendente en las tensiones máximas por tracción en el fondo de la losa cuando se tiene un mejor módulo de reacción, para todos los tipos de ejes. Esta tendencia se debe a que todas las tensiones fueron determinadas a una distancia de 60 cm del borde de la losa, lo que explica que al incrementar el valor del módulo de reacción (k), las tensiones tienden a disminuir.

En particular, el eje de rueda doble se identificó como el más crítico, ya que genera el mayor daño debido a la mayor carga unitaria por rueda distribuida en el eje. En este caso, con un módulo de elasticidad de 100 MPa y un módulo de reacción de la subrasante de 0,0814 MPa/mm, las tensiones alcanzan sus valores máximos, lo que se refleja en una curva decreciente en el nomograma. Esto sugiere que un incremento en el módulo de reacción puede mitigar las tensiones inducidas por las cargas vehiculares, lo cual es válido para cualquier configuración de ejes.

Basado en los resultados, se recomienda que en los diseños de pavimentos rígidos, especialmente aquellos sometidos a cargas de eje simple y rueda doble, se preste especial atención a la calidad del suelo de cimentación lo que lleva a la mejora del módulo de reacción. El refuerzo de la subrasante a través de técnicas de estabilización, como el uso de materiales adecuados o la incorporación de estabilizantes, puede ser clave para mitigar el daño al pavimento a largo plazo.

El espesor de la subbase no estabilizada de 20 cm se mantuvo constante en el análisis, pero sería interesante realizar un estudio de sensibilidad variando el espesor de la subbase para determinar el impacto en las tensiones generadas en el pavimento. Esto permitiría identificar un espesor óptimo que minimice las tensiones máximas sin necesidad de incrementar excesivamente los costos de construcción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AASHTO, G. (1993). Guide for design of pavement structures. *American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC*.

[2] Higuera-Sandoval, C. H. (2010). Caracterización de la resistencia de la subrasante con la información del deflectómetro de impacto. *Facultad de Ingeniería*, *19*(28), 73-92. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940761006

[3] Vargas, J. D. V., Sánchez, Y. P. M., Mendieta, C. E. S., y Romero, L. O. C. (2023). Modelo De Optimización De Estructuras Viales. *Revista ciencia y construcción*, *4*(2), 06-15. https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/199

[4] Guerra-Rojas, R. A. (2020). Análisis del comportamiento de tensiones máximas inducidas en pavimentos rígidos debido al reemplazo parcial de losas. *Iteckne*, *17*(2), 98-109. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7963891

[5] Gu, H., Jiang, X., Li, Z., Yao, K., and Qiu, Y. (2019). Comparisons of two typical specialized finite element programs for mechanical analysis of cement concrete pavement. *Mathematical Problems in Engineering*, *2019*(1), 9178626. https://doi.org/10.1155/2019/9178626

[6] F.M.H.López, "Procedimiento para el diseño por fatiga de pavimentos de hormigón simple para carreteras en Cuba,"Phd Thesis, Universidad TécnicadeLaHabana CUJAE, La Habana, Cuba, 2016. Doi: https://10.13140/RG. 2.2. 11644.64640).

[7] Shaban, A. M., Alsabbagh, A., Wtaife, S., and Suksawang, N. (2020). Effect of pavement foundation materials on rigid pavement response. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 671, No. 1, p. 012085). IOP Publishing. DOI: 10.1088/1757-899X/671/1/012085

[8] Akintayo, F. O., and Osasona, T. D. (2022). Design of Rigid Pavement for Oke-Omi Road, Ibadan, Nigeria. *Collectors*, *80*(99), 75-95. https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v7i3.837

[9] Montes de Oca Hidalgo, M. P., Sequeira Rojas, W., Ávila Esquivel, T., y Aguiar Moya, J. P. (2021). Evaluación del desempeño de los pavimentos rígidos en Costa Rica. *Infraestructura Vial*, *23*(42), 53-60. http://dx.doi.org/10.15517/iv.v23i42.46947

[10] Vásquez, M. G. C., Vásquez, L. A. C., y Vásquez, P. G. C. (2020). Aplicación práctica del método AASHTO-93 para el diseño de pavimento rígido. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, *5*(9), 640-663. DOI: 10.23857/pc.v5i9.1717

[11] Bojorque, J., Cabrera, A., y Urgiles, D. (2017). Aplicación del diseño experimental para el análisis de pavimentos rígidos basado en el método de la PCA. *Maskana*, *8*, 147-158. https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/1975

[12] Aladín, M. F. G., Ruiz, D. D. P., Guzmán, M. F. S., y Calvache, C. E. N. (2024). Desarrollo de ecuaciones sustitutivas utilizando herramientas computacionales y su aplicación en la enseñanza del diseño de pavimentos. *Revista Eduweb*, *18*(1), 9-23. https://doi.org/10.46502/issn.1856-7576/2024.18.01.1

[13] Vial, N. E. (2012). NEVI-12. *Ministerio de Transporte Y Obras Públicas del Ecuador, Normas para estudios y diseños viales*, *2B*.

[14] Hernández López, F. M., Tejeda Piusseaut, E., Rodríguez Veliz, E. A., y Recarey Morfa, C. A. (2020). 3D-FE of jointed plain concrete pavement over continuum elastic foundation to obtain the edge stress. *Revista de la construcción*, *19*(1), 5-18. http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.19.1.5-18

[15] Rodríguez Véliz EA, Tejeda Piusseaut E, y Hernández López FM. Procedimiento para diseño de pavimentos de hormigón simple empleando técnicas de modelación computacional en las condiciones del cantón Portoviejo. La Habana, Cuba: Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echevería (CUJAE); 2021. https://ojs.uc.cl/index.php/RDLC/issue/view/970

[16] PCA, "Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements," in "Thickness Concrete Pavement Desing," *Portland Cement Association*, 1984, vol. ISO10