

Tensiones De Combado En Las Losas De Pavimentos Rígidos En Las Condiciones Ambientales De Portoviejo

Belling Stress In Rigid Pavement Slabs In The Environmental Conditions Of Portoviejo

Autores

Rodrigo Adolfo Loor Cedeño¹, Melany Andrea Urdánigo Cedeño², Eduardo Tejeda Piusseaut³

¹Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí. email: rloor0098@utm.edu.ec

²Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Manabí. email: murdanigo9239@utm.edu.ec

³PhD. Profesor de la Universidad Técnica de Manabí. email: eduardo.tejeda@utm.edu.ec

RESUMEN

Los cambios de temperatura durante el día provocan gradientes térmicos entre las partes superior e inferior de las losas de hormigón, generando tensiones por alabeo. Basado en una investigación previa, realizada en Portoviejo, Ecuador, en la que se instrumentó una losa de hormigón simple con junta, en este trabajo se obtiene un modelo matemático que relaciona la temperatura ambiente con la temperatura de la losa a diferentes profundidades, en las condiciones climáticas de esta ciudad. Mediante este modelo se determinaron los gradientes de temperatura en la losa en cada mes del año, para estimar, por consiguiente, las tensiones de alabeo, utilizando el software EverFE de Elementos Finitos. Se presenta un gradiente máximo esperado en el mes de abril, igual a 11.8°C, con valores máximos de tracción para el interior y bordes de la losa, de 1.52MPa y 1.34MPa, respectivamente. Se ha comprobado que los esfuerzos de combado en las losas de hormigón simple, para longitudes de losa de hasta 4.50 metros, no representan un efecto significativo para el consumo de fatiga del hormigón, porque la relación de esfuerzos entre el valor máximo de tracción en los bordes y el Módulo de Rotura del hormigón, no supera el 30%, además de que son de muy baja probabilidad de ocurrencia.

Palabras claves: pavimentos rígidos, tensiones de combado, gradiente de temperatura en losas de hormigón

ABSTRACT

Temperature changes during the day cause thermal gradients between the upper and lower parts of the concrete slabs, generating warping stresses. Based on a previous investigation, carried out in Portoviejo, Ecuador, in which a simple concrete slab with a joint was instrumented, in this work a mathematical model is obtained that relates the ambient temperature with the temperature of the slab at different depths, in the climatic conditions of this city. Using this model, the temperature gradients in the slab were determined in each month of the year, to consequently estimate the warping stresses, using the EverFE Finite Element software. A maximum expected gradient is presented in the month of April, equal to 11.8°C, with maximum traction values for the interior and edges of the slab, of 1.52MPa and 1.34MPa, respectively. It has been proven that the warping stresses in simple concrete slabs, for slab lengths of up to 4.50 meters, do not represent a significant effect for the fatigue consumption of the concrete, because the stress ratio between the maximum tensile value in the edges and the Modulus of Rupture of the concrete does not exceed 30%, in addition to having a very low probability of occurrence.

Keywords: rigid pavements, warping stresses, temperature gradient in concrete slabs

Nota Editorial: Recibido: Febrero 2024 Aceptado: Abril 2024

1. INTRODUCCIÓN

El desempeño óptimo de un pavimento rígido dependerá de sus dimensiones, principalmente de su espesor [1], sin embargo, los deterioros más comunes en las losas de hormigón se ven influenciados por las tensiones que provocan las variaciones de temperatura. Los cambios de temperaturas producen expansión o contracción en las dimensiones de las losas, originando tensiones de fricción entre la losa y el cimiento, así como los gradientes térmicos a través de su espesor durante el día, causan las llamadas tensiones de combado, al calentarse en el día y al enfriarse por las noches, originadas cuando el peso propio de la losa restringe el movimiento [2].

Las losas de pavimento rígido afectadas por altas temperaturas, al calentarse en su parte superior, provocan un alargamiento en dicha zona, en forma de curvatura convexa, llamado gradiente térmico positivo, dejando un vacío debajo del centro de la losa, mientras que al disminuir las temperaturas se crea un efecto de curvatura cóncava, generando un acortamiento de la zona central superior y elevando las esquinas de la losa, conocido como gradiente térmico negativo [3].

En los estudios de las variaciones de temperaturas en los pavimentos rígidos se emplean diversas técnicas de instrumentación, las cuales permiten cuantificar la respuesta de la estructura ante varias solicitaciones (temperatura y carga), estos estudios constituyen una herramienta eficiente para evaluar el desempeño de la estructura in situ, estos propicia el desarrollo de modelos de comportamiento que permiten mejorar y optimizar los métodos de diseño, desde un enfoque empírico-mecanista [4].

Con la finalidad de analizar el comportamiento de las losas de pavimentos rígidos se han establecidos modelos teóricos para obtener las tensiones, desplazamientos y deformaciones en una losa, que se clasifican como probabilísticos, de regresión y mecanicistas, Kraemer & Val [5]. Los modelos mecanicistas están basados en la modelación mecánica de la estructura, las cargas y el establecimiento subsiguiente de los correspondientes algoritmos de cálculo [6].

Los métodos de mas actualidad en el diseño de pavimentos, denominados “empírico mecanicistas (M-E)”, combinan elementos de modelación mecánica con los resultados del estudio del comportamiento de la estructura y materiales en determinadas condiciones. La parte empírica radica en el uso de modelos que permiten predecir el comportamiento del sistema a lo largo de su vida útil [16,13].

El modelo clásico para el análisis de los pavimentos rígidos fue propuesto por Westergaard [7], quien desarrolló las ecuaciones para el cálculo de tensiones debido a las variaciones de temperaturas y cargas, considerando la losa como un sólido homogéneo, elástico e isótropo en equilibrio, así como la reacción de la subrasante solo en sentido vertical y proporcional a la deflexión de la losa, lo que representa el suelo como un sistema infinito de resortes elásticos, conocido como medio de Winkler medido con el módulo de reacción de la subrasante (k). En el modelo de Westergard se consideran tres posiciones críticas para la carga en la losa, el interior, la esquina y el borde, definiendo además el término denominado relación de rigidez relativa, que representa la rigidez de la losa con respecto a la rigidez del cimiento [6].

Con el desarrollo de la tecnología y la aparición de herramientas numérico-computacionales, aparece el Método de Elementos Finitos (*MEF*), el cual analiza el desempeño de elementos en tres dimensiones (*3D*) y posibilita evaluar el comportamiento en distintas posiciones de la losa cuando esta entra en carga, estos resultado permiten evaluar cuanto que realmente aporta la estructura en cada caso y puede brindar elementos que permiten un diseño racional. El empleo de este método pese a presentar ventajas con respecto a la solución teórica de Westergaard, aparecen problemas de sensibilidad que deben ser resueltos para obtener resultados confiables, no obstante, se puede solucionar con una serie de ajustes que permitirán una mejor aproximación al problema en cuestión [8].

En una investigación desarrollada en la Facultad de Ciencias, Matemáticas, Físicas y Químicas de la Universidad Técnica de Manabí, se construyó un tramo de prueba, que fue instrumentado para medir las temperaturas a diferentes profundidades en la losa de hormigón, además de las deformaciones producidos por la carga de un camión cargado. Basado en aquel estudio se ha desarrollado la presente investigación, donde se obtuvo un modelo matemático que relaciona la temperatura ambiente con la temperatura en la losa a diferentes profundidades, en las condiciones climática de esta ciudad.

El modelo creado ha permitido obtener los gradientes de temperatura producidos en la losa de hormigón durante los meses del año. El presente artículo tiene la finalidad de exponer los resultados sobre el estudio de las tensiones de combado generadas durante el año en la ciudad de Portoviejo, en Ecuador. Utilizando el modelo matemático creado, se han estimado los gradientes térmicos, producidos entre la superficie y el fondo de la losa, en los diferentes meses del año, con el propósito de determinar, en base a ello, las tensiones de combado, utilizando el software EverFE de elementos finitos, para modelar la estructura de pavimento rígido.

2. TENSIONES DE COMBADO EN LA LOSA DE HORMIGÓN SIMPLE

Se conoce que los gradientes térmicos producen ciertas sollicitaciones en la losa, llamadas tensiones de combado, que, unido a las sollicitaciones producidas por el tráfico, determinan los esfuerzos que pueden provocar los fallos por fatiga en el pavimento. La forma de reducir las tensiones en las losas debido al combado es utilizando tamaños de losa que no provoquen grandes esfuerzos en este sentido [13].

Westergaard propuso ecuaciones que describen el comportamiento termo-mecánico en pavimentos de hormigón, específicamente el cálculo de tensiones y deflexiones, considerando que los esfuerzos máximos de tracción se presentan en el interior y borde de la losa, mientras que las máximas deflexiones se presentan en las esquinas, no obstante, debe tenerse en cuenta que estas ecuaciones se aplican solo en casos de carga simple en pavimentos rígidos, por lo que estas limitaciones conllevaron a que otros investigadores perfeccionasen dicha teoría [9-10-11].

Las llamadas tensiones de combado se producen en las losas de hormigón debido a los gradientes de temperatura que adopta la losa por las diferencias registradas entre la parte superior e inferior de las losas, cuyos valores varían en cada momento del día.

En 1940, Bradbury [12] modificó las ecuaciones de Westergaard considerando la losa de hormigón como un elemento finito en ambas direcciones horizontales, con la finalidad de calcular las tensiones de combado producidas por las variaciones de temperatura. Para resolver las ecuaciones es necesario calcular el radio de rigidez relativa (l) que depende del módulo de elasticidad del hormigón (E), del espesor de la losa (h), del módulo de Poisson para el hormigón (μ) y del módulo de reacción de la subrasante (k) [7]. La ecuación del radio de rigidez relativa se expresa por la ecuación 1:

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}} \quad (1)$$

En el procedimiento de cálculo se determina el coeficiente de tensión diferencial por temperatura (C), que se obtiene mediante un ábaco para determinar en cada dirección, los valores de C_x y C_y , en función de las dimensiones de la losa y del radio de rigidez relativa [7]. Las siguientes ecuaciones (2, 3) permiten obtener las tensiones por temperatura en el interior y borde de las losas, así como en las dos direcciones (x, y).

$$\sigma_{interior} = \frac{E\varepsilon_t\Delta T}{2} \left(\frac{C_1 + \mu C_2}{1 - \mu^2} \right) \quad (2) \quad \sigma_{borde} = \frac{C_x E \varepsilon_t \Delta T}{2} \quad (3)$$

Donde:

- E : Módulo de elasticidad del hormigón (kg/cm^2)
- ΔT : Gradiente térmico. Diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo de la losa.
- ε_t : Coeficiente de dilatación térmica del hormigón.
- C : Coeficiente de tensión diferencial por temperatura

El coeficiente de dilatación térmica del hormigón es una medida de cuánto se expande o contrae el material por cada grado de cambio de temperatura, cuyo valor varía entre 0,7 y $1,2 \times 10^{-5}$ por cada grado centígrado

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

El tramo experimental de pavimento de hormigón creado en la Universidad Técnica de Manabí, estuvo compuesto por cuatro losas de hormigón hidráulico, de un espesor de 20 cm y divididas en dos secciones, la primera apoyada sobre la subrasante preparada a partir de suelos del propio sitio de construcción y la segunda sobre un material de subbase clase III (MTO) de 25 cm de espesor. Las losas son de 4,50m de longitud y 3,50m de ancho [13].

En la instrumentación se emplearon dos tipos de instrumentos: medidores de deformación y de temperatura en las losas. Los medidores de temperatura empleados son termo-resistencias del tipo PT-100, que son un tipo específico de detector de temperatura RTD (Detector de Temperatura por Resistencia), los que se colocaron a diferentes profundidades en la losa (2 cm, 6 cm, 10 cm, 14 cm y 18 cm) medidos desde la superficie.

En la presente investigación se han utilizado aquellas mediciones de temperatura en la losa donde fueron ubicados los medidores de temperatura y que fue apoyada sobre la subrasante natural. La caracterización del suelo de subrasante en el laboratorio arrojó como resultado un Límite Líquido de 44,1%, Índice de Plasticidad de 16,9%, humedad óptima de 28,8% y CBR = 3,9%. El Módulo de reacción (k), obtenido mediante un ensayo de Placa, dio como resultado un valor de 27 MPa/m. En la figura 1 se muestra una imagen del tramo de prueba construido [13].

El hormigón utilizado en la construcción de la losa alcanzó una resistencia a compresión de 35 MPa a los 28 días de curado, mientras que la resistencia a tracción fue de $5,08 \pm 0,173 \text{ MPa}$.



Figura 1: Tramo experimental construido en la Universidad técnica de Manabí, Ecuador [13].

En la figura 2 se muestran los resultados de las temperaturas medidas durante las 24 horas del día en el tramo experimental en la losa apoyada directamente sobre el terreno natural, además de la temperatura ambiente. Como se puede apreciar, la variación registrada en la temperatura ambiente, en el día, ocasiona variaciones en la losa, dependiendo de la profundidad, formándose un gradiente diferente en cada momento del día, como diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa.

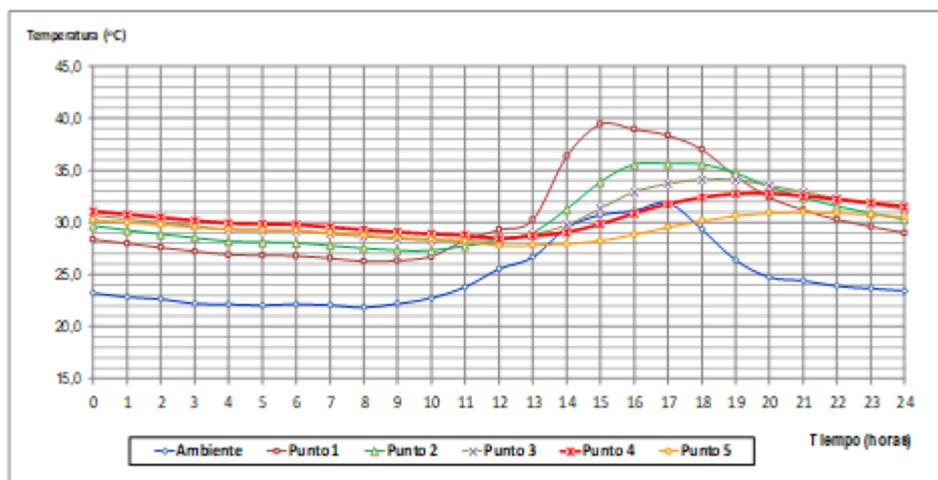


Figura 2: Temperatura de la losa de hormigón durante las horas del día, a diferentes profundidades en un día típico entre los meses de mayo a junio [13].

4. MODELO MATEMÁTICO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE Y DE LA LOSA DE HORMIGÓN PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES EN LA LOSA.

Las temperaturas en la losa a diferentes profundidades, junto con la temperatura ambiente registradas en la investigación desarrollada en [13], se utilizan como datos observados para determinar un modelo matemático que permita obtener la temperatura a cualquier profundidad en la losa, a partir de conocer la temperatura ambiente considerando parámetros estadísticos relevantes como número de iteraciones máximos, tolerancia e índice de confiabilidad (IC). Se parte de establecer un polinomio de 2do grado para correlacionar la variable dependiente temperatura del pavimento (T_h), con las variables independientes, temperatura ambiente (T_a) y profundidad en la losa (h). El modelo de regresión planteado (ecuación 4) responde, por tanto, a la siguiente ecuación polinómica:

$$T_h = b_1 * T_a + b_2 * h + b_3 * T_a * h + b_4 * T_a^2 + b_5 * h^2 + b_6 \quad (4)$$

Donde:

T_h : Temperatura en la losa de hormigón a diferentes profundidades (h)

b_i : Coeficientes de la ecuación.

h : Profundidad en la losa desde la superficie (cm)

T_a : Temperatura ambiente (Grados centígrados)

Para el desarrollo del modelo de regresión se seleccionaron los valores de temperaturas observadas a las profundidades de 0.02 m, 0.10 m y 0.18 m, en diferentes horas del día, así como las temperaturas ambientes correspondientes en cada momento.

Utilizando la herramienta informática MiniTab, se determinaron los coeficientes b_i de la ecuación mediante un análisis de regresión no lineal, aplicando el método de Gauss-Newton, con un número máximo de 200 iteraciones y una tolerancia de 0,00001 [14]. El Coeficiente de Regresión ajustado obtenido, teniendo en cuenta dos variables independientes, es de 0,72.

El modelo matemático obtenido permite relacionar la temperatura ambiente con la temperatura en la losa a diferentes profundidades y responde a la siguiente ecuación:

$$T_h = -1.73221 * T_a + 1.99007 * h - 0.0845542 * T_a * h + 0.0528636 * T_a^2 + 0.00307564 * h^2 + 41.7968 \quad (5)$$

Donde T_h es la temperatura en la losa, h la profundidad en la losa y T_a es la temperatura ambiente. En la tabla 1 se muestran los valores calculados de los parámetros del modelo de regresión no lineal, con el Intervalo de Confianza, para el 95% de confiabilidad.

Tabla 1. Cálculos de los parámetros del modelo de regresión no lineal

Parámetro	Estimar	EE de estimación	IC de 95%
b1	-1,7322	1,1518	(-3,9988; 0,5344)
b2	1,9901	0,2073	(1,5820; 2,3981)
b3	-0,0846	0,0068	(-0,0979; -0,0712)
b4	0,0529	0,0205	(0,0125; 0,0932)
b5	0,0031	0,0040	(-0,0047; 0,0109)
b6	41,7968	16,1076	(10,1002; 73,4934)

La figura 3 es la representación gráfica del modelo de regresión, en la que se aprecia la influencia de la temperatura ambiente en la temperatura de la losa y su variación con la profundidad.

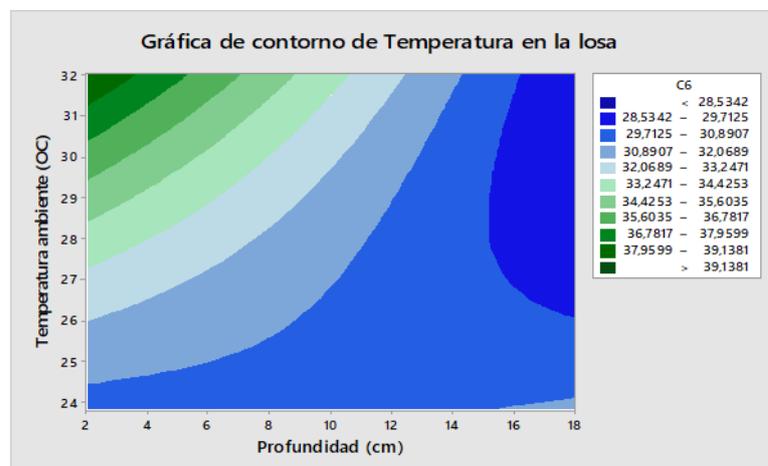


Figura 3: Contorno de la temperatura de losa en relación a su profundidad

En la figura se puede observar que, para una temperatura ambiente determinada, las temperaturas más altas en la losa se encuentran en la superficie y las menores se encuentran en el fondo, debido a la menor influencia ejercida por el ambiente y por la mayor dependencia de la temperatura de la losa de las condiciones de humedad imperantes en el suelo de cimentación.

5. GRADIENTES DE TEMPERATURA EN LA LOSA DE HORMIGÓN DURANTE EL AÑO EN LA CIUDAD DE PORTOVIEJO

Mediante la utilización del modelo de regresión y considerando las temperaturas ambientes típicas mensuales de la ciudad de Portoviejo, en base al periodo de enero a diciembre del año 2022, se estimaron los gradientes térmicos a los que se ve sometida la losa durante todo el año, calculados como las diferencias entre la temperatura en la superficie y en el fondo. En la figura 4 se muestran los gradientes térmicos máximos en la losa de hormigón calculados bajo las condiciones ambientales de esta ciudad.

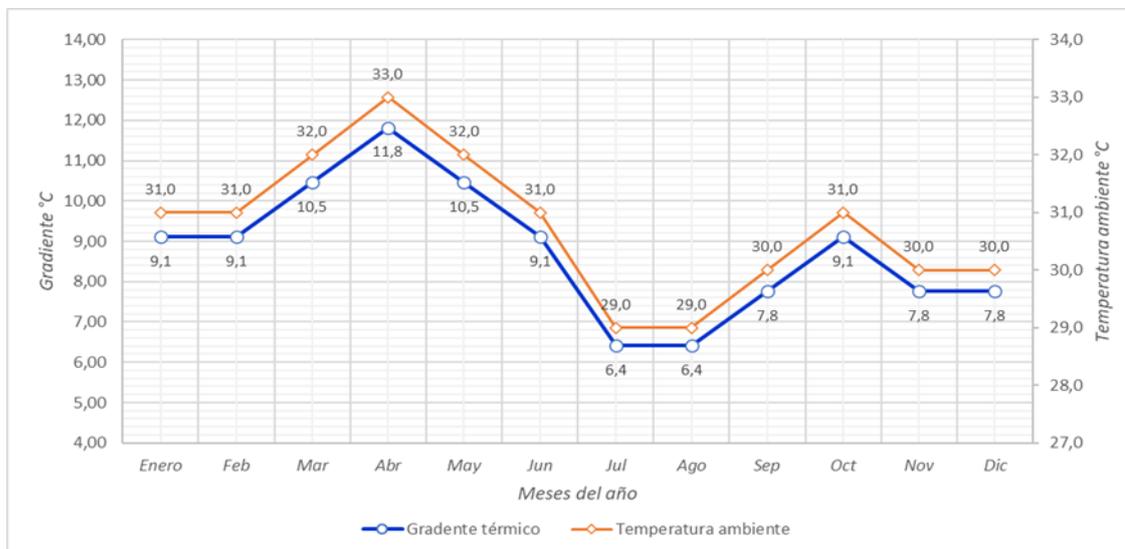


Figura 4: Gradiente térmico para el año de estudio, en su relación con la temperatura ambiente

Es evidente que entre los meses de abril y junio se presentan los mayores gradientes de temperatura durante el año, siendo $11,8^{\circ}\text{C}$ el valor máximo que se puede registrar en el año, coincidente con el mes de abril, mientras que los meses de julio y agosto suelen ser los de menor gradiente, disminuyendo hasta $6,4^{\circ}\text{C}$.

El cálculo de las tensiones de combado en la losa se realizó mediante la modelación de la estructura con el software EverFe (versión actual 2.24), herramienta de análisis de elementos finitos en 3D, para simular la respuesta de sistemas de pavimento de hormigón, ante las solicitaciones de cargas y los efectos ambientales. Facilita la modelación de geometrías complejas, en el análisis de pavimentos rígidos, proporcionando tensiones, desplazamientos y deflexiones como algunas de las respuestas.

El modelo geométrico, como parte de la modelación, fue establecido con las dimensiones de la losa en el tramo experimental, como se aprecia en la figura 5, considerando que la losa se encuentra apoyada sobre la subrasante natural, cuyo Módulo de reacción es de $k = 0,03 \text{ MPa/mm}$, obtenido mediante un Ensayo de Placa en el sitio. Además, es necesario considerar las características del hormigón, que compone la losa. En la tabla 2 se muestra un resumen de dichas propiedades.

Tabla 2: Caracterización de la subrasante y el hormigón [13].

Características		Hormigón
Módulo de elasticidad (E)		27800 MPa
Módulo de Poison (μ)		0,17
Coeficiente de dilatación térmica (ϵ)		$1,1\text{e-}005^{\circ}\text{C}$
Densidad (γ)		$2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Resistencia a los 28 días de curado	Compresión	35,79 MPa
	Módulo de rotura (MPa)	5,08 MPa

En el modelo solo se ha considerado como solicitaciones la influencia del gradiente térmico, estimado en cada mes del año a partir del modelo de regresión. Se realizaron varias iteraciones para determinar el tamaño de malla con el cual los resultados se acercan más a las ecuaciones de Westergaard, concluyendo que el tamaño más conveniente es una malla de 100 mm , dividiendo el largo de la losa en 45 partes y el ancho en 35 partes, así como el espesor de losa en dos partes.

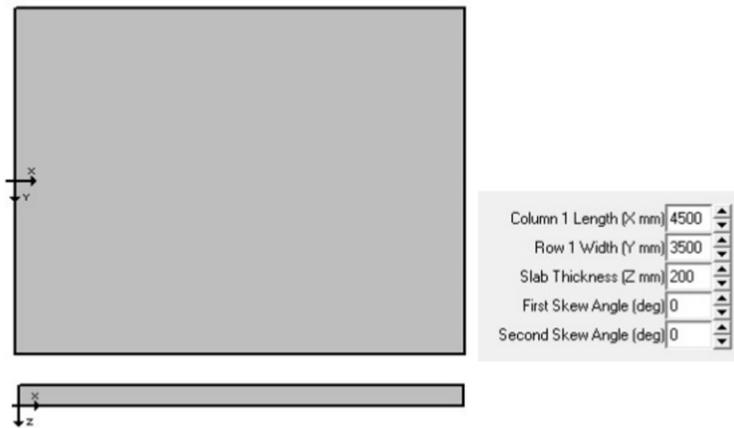


Figura 5: Gráfico que representa el modelo geométrico de la estructura en el software EverFe

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los cálculos de las tensiones de combado en el interior y bordes de la losa de hormigón simple, para los gradientes máximos esperados en todo el año, se muestran en la figura 6. Se aprecia que, en los meses de menor gradiente térmico, igual a $6,41^{\circ}\text{C}$, que corresponden con julio y agosto, se producen los menores esfuerzos en el interior y borde de la losa, iguales a $0,82\text{MPa}$ y $0,73\text{MPa}$, respectivamente. Mientras que, en el mes de abril, se espera el gradiente máximo del año, igual a $11,82^{\circ}\text{C}$, por lo que, los valores máximos de tracción son respectivamente, para el interior y bordes de la losa, de $1,52\text{MPa}$ y $1,34\text{MPa}$.

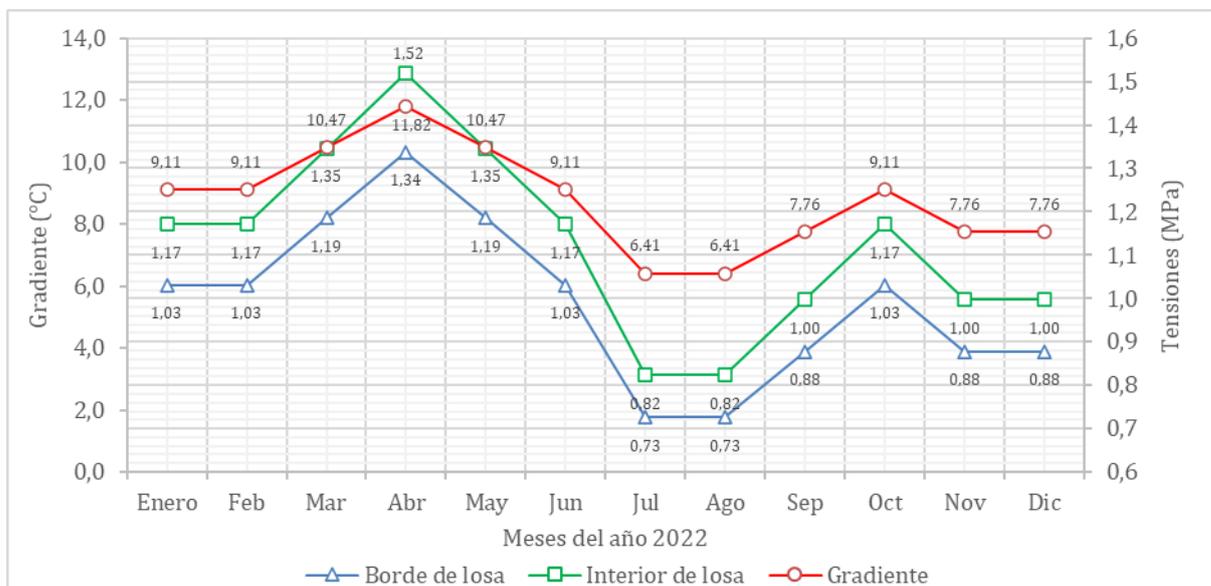


Figura 6. Tensiones de combado en el fondo e interior de la losa, relación con lo gradientes máximos mensuales.

La figura 7 representa, a modo de muestra del resultado que arroja el programa Ever FE, para el gradiente máximo del año ($11,82^{\circ}\text{C}$) las tensiones de tracción en el interior y bordes, calculadas en el fondo de la losa. Considerando que el Módulo de Rotura del hormigón utilizado en la construcción de la losa, es de $5,08\text{MPa}$, se puede estimar que la relación de esfuerzos entre el valor máximo de tracción en los bordes ($1,43\text{MPa}$) respecto a la resistencia a tracción del hormigón, es solo del $28,1\%$. Es decir, las tensiones a flexión en el fondo y bordes de la losa se encuentran consumiendo menos del 30% de la resistencia disponible de la fatiga del hormigón. Además, estos esfuerzos se presentan solo en el mes de abril, y entre las 2 y 5 de la tarde, es decir el $12,5\%$ de las horas del día, por consiguiente, la probabilidad de ocurrencia es muy baja.

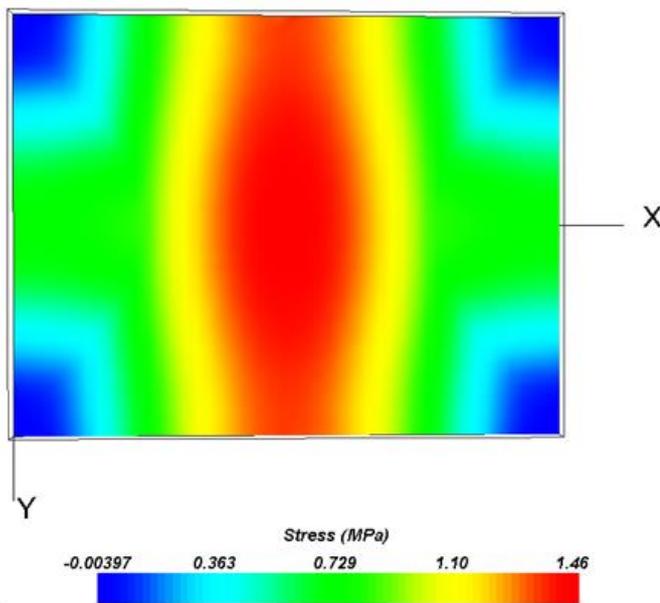


Figura 7. Tensiones de combado en el fondo de la losa y en el interior y bordes.

Como verificación de los cálculos de tensiones de combado en la losa se ha construido un gráfico donde se comparan los esfuerzos calculados para cada uno de los gradientes de temperaturas máximos en el año, calculados mediante el software EverFe y por las conocidas ecuaciones de Westergaard. En la figura 8 se muestra dicho gráfico, donde se demuestra la confiabilidad de los cálculos, tanto en las tensiones de bordes como en el interior de la losa, con valores del coeficiente de determinación (R^2) igual a 0,9801 para el interior de la losa y de 0,9792 para las tensiones en el borde.

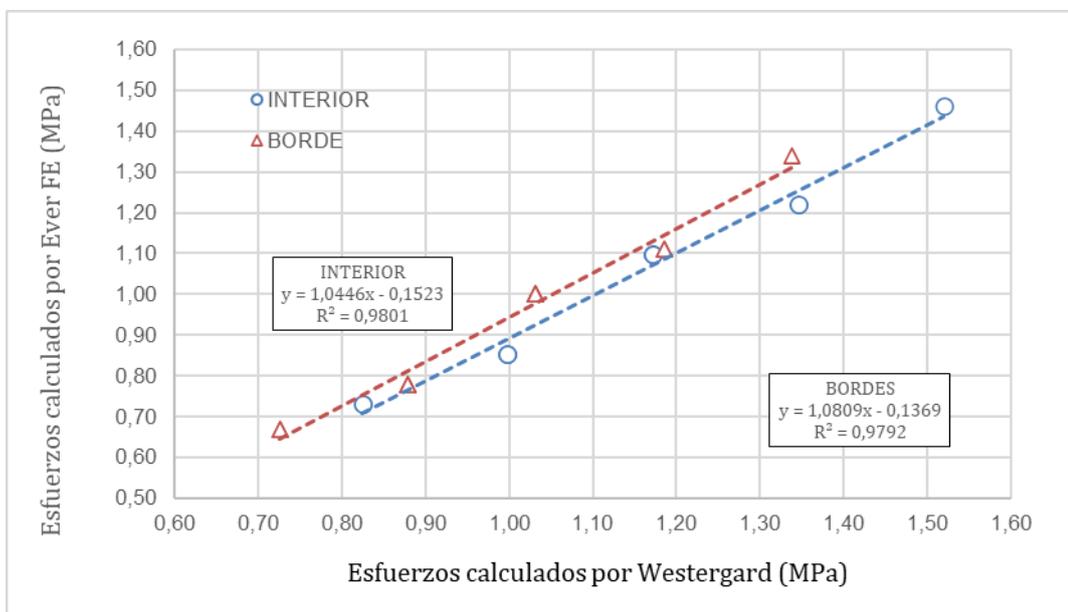


Figura 8: Relación entre las tensiones de alabeo teóricas (Westergaard) y numéricas (EverFE) en el borde e interior de la losa

7. CONCLUSIONES

La investigación realizada está basada en una instrumentación previa realizada como parte de un proyecto de investigación en el que se instrumentó un tramo de pavimento de hormigón simple, donde se midieron las temperaturas a varias profundidades en el espesor, además de la temperatura ambiente durante las 24 horas del día. Como continuación de aquel trabajo, estas observaciones se han utilizado para obtener un modelo de regresión no lineal que relaciona la temperatura ambiente con la temperatura de la losa de hormigón a cualquier profundidad (o espesor).

El modelo obtenido permite generalizar aquellas mediciones y estimar los gradientes térmicos que se producen entre la parte superior e inferior de las losas de hormigón durante todo el año, en las condiciones climáticas de la ciudad de Portoviejo, en Ecuador, por tanto, se pueden calcular los esfuerzos de alabeos provocados en los pavimentos rígidos de esta región, para lo cual se utilizó el software EverFE de Elementos Finitos, considerado solo las solicitaciones provocadas por la temperatura.

Se ha comprobado que los esfuerzos de alabeo en la losa experimental de hormigón simple, en la ciudad de Portoviejo, no representan por sí solo, un efecto significativo para el consumo de fatiga del hormigón, porque la relación de esfuerzos entre el valor máximo de tracción en los bordes (1,46MPa) y el Módulo de Rotura, no supera el 30%. Considerando además que estos valores de esfuerzos que ocurren solo en el mes de abril, y en tres horas en el día, son, por consiguiente, de muy baja probabilidad de ocurrencia.

Los esfuerzos calculados son válidos para las condiciones climáticas a las que se ven sometidas las losas de hormigón simple en esta región del país y para las dimensiones típicas que se utilizó en el trabajo experimental, sin embargo, para menores dimensiones en las losas, se espera una reducción en las tensiones de alabeo.

1. Marovic I, Androjic I, Jajac N, Hanák T. Urban Road Infrastructure maintenance planning with application of neural networks. Wiley. 2018 Mayo; 2018.
2. Rodríguez EA, Hernández López FM, Tejeda Piusseaut E. Instrumentación en pavimento de hormigón simple para estudios de tensiones originados por gradientes de temperaturas. Carreteras. 2020 Septiembre, Diciembre; 231(4).
3. AASHTO. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Illinois, USA: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) & Transportation Research Board (TRB); 2008.
4. Mc Call JT. Probability of fatigue failure of plain concrete. Journal of American Concrete Institute. 1958 Agosto 1; 55(8): p. 233-244.
5. Kraemer Heliperno C, Val Melús A. Firmes y pavimentos (2da Edición) Madrid, España: Colegios de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos; 1996.
6. Hernández López FM. Procedimiento para el diseño por fatiga de pavimentos de hormigón simple para carreteras de Cuba La Habana, Cuba: Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE); 2016.
7. Westergaard M. Tensiones en pavimentos de hormigón calculadas mediante análisis teórico. Vía Pública. 1926; 7: p. 25-35.
8. Hernández López FM, Tejeda Piusseaut E. Modelación computacional en 3D de un pavimento de hormigón con carga aplicada en el borde. Carreteras. 2015 Enero, Febrero;(199): p. 79-86.
9. Guerra Rojas A. Análisis del comportamiento de tensiones máximas inducidas en pavimentos rígidos debido al reemplazo parcial de losas. Revista ITECKNE. 2020 Diciembre; 17(2): p. 98-109.
10. Pallares Muñoz MR, Pulecio Díaz A. Aplicabilidad del método de los elementos finitos en el análisis y dimensionamiento de losas JCPC para carreteras de dos carriles. Revista ITECKNE. 2017 Diciembre; 14(2): p. 148-155.
11. Faria AW. Análisis probabilístico de un piso de concreto sujeto a un gradiente térmico en régimen permanente. Revista de ingeniería y tecnología. 2021 Junio; 13(2): p. 23-34.
12. Westergaard M, Bradbury D, Holl L, Spangler G, Sutherland E. Stresses in concrete runaways of airports. Transportation research board. 1940; 19.
13. Rodríguez Véliz EA, Tejeda Piusseaut E, 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 Echeverría (CUJAE); 2021.
14. Novales A. Estimación de modelos no lineales Madrid, España: Universidad Complutense; 2013.
15. INAMHI. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. [Online].; 2024. Available from: <https://www.inamhi.gob.ec/>.
16. Timm D, Birgisson B, Newcomb D. Development of mechanistic-empirical pavement design in Minnesota. Transportation Research Record. 1998;(1626(National Research Council)): p. 181-188.