

**MODELACIÓN NUMÉRICA DE LOSAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA  
PAVIMENTOS RÍGIDOS CONSIDERANDO LA VARIACIÓN DE LOS  
ESFUERZOS DEBIDO A LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA**

**MARIO ALEJANDRO CASTIBLANCO QUINTERO**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS**

**BOGOTA D. C.**

**2018**

**MODELACIÓN NUMÉRICA DE LOSAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA  
PAVIMENTOS RÍGIDOS CONSIDERANDO LA VARIACIÓN DE LOS  
ESFUERZOS DEBIDO A LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA**

**MARIO ALEJANDRO CASTIBLANCO QUINTERO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de posgrado en  
Ingeniería de Pavimentos**

**Director Temático**

**Ing. Juan Carlos Ruge Cárdenas**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS**

**BOGOTÁ D. C.**

**2018**



## Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Sin Obras Derivadas** — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Director de Investigación  
Ing. Juan Carlos Ruge Cárdenas

---

Jurado

Bogotá D.C, diciembre de 2018

A Dios.

Por su inconmensurable guía.

A mi madre Flor Alba Quintero.

Por su apoyo incondicional.

A la memoria de mi abuelo Emilio Quintero.

Por todas sus valiosas enseñanzas en la vida.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	9
1. JUSTIFICACION .....	10
2. EL PROBLEMA .....	11
2.1. Título del Proyecto .....	11
2.2. Línea de Investigación.....	11
3. DESCRIPCION DEL PROYECTO .....	12
3.1. Descripción del Problema.....	12
3.2. Formulación del problema.....	13
4. OBJETIVO GENERAL .....	14
4.1. Objetivos Específicos .....	14
5. MARCO REFERENCIAL .....	15
5.1. Marco Teórico .....	15
5.2. Marco Conceptual .....	28
6. METODOLOGIA .....	35
6.1. Descripción del Programa .....	35
6.2. Descripción de Parámetros .....	36
7. RESULTADOS.....	42
8. CONCLUSIONES .....	55
BIBLIOGRAFIA .....	57

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Alabeo en losas de concreto.....	23
Figura 2. Losa de dimensiones finitas.....	24
Figura 3. Ábaco de Bradbury .....	25
Figura 4. Tipos de pavimentos .....	28
Figura 5. Estructura típica de un pavimento rígido .....	29
Figura 6. Partes principales de un terraplén .....	31
Figura 7. Carpeta de pavimento .....	32
Figura 8. Sección típica de una cuneta .....	33
Figura 9. Bombeo en pavimentos rígidos.....	34
Figura 10. Losa dimensión 4.5m x 3.65m .....	36
Figura 11. Losa dimensión 4.3m x 3.55m .....	37
Figura 12. Losa Dimensión 4.1m x 3.45m.....	37
Figura 13. Variación de temperatura entre -5°C y 5°C .....	38
Figura 14. Variación de temperatura entre 5°C y 15°C.....	39
Figura 15. Variación de temperatura entre 15°C y 25°C.....	39
Figura 16. Características físico-mecánicas de los materiales .....	40
Figura 17. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura -5°C y 5° .....	42
Figura 18. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura -5°C y 5°C .....	42
Figura 19. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura -5°C y 5°C .....	43
Figura 20. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura -5°C y 5°C .....	43
Figura 21. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura -5°C y 5°C .....	44
Figura 22. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura -5°C y 5°C .....	44
Figura 23 Variación del esfuerzo dependiendo la temperatura gradiente -5°C y 5°C.....	54
Figura 24 Variación del esfuerzo dependiendo la temperatura gradiente 5°C y 15°C.....	54
Figura 25 Variación del esfuerzo dependiendo la temperatura gradiente 15°C y 25 .....	55

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Tabla manual de diseño Portland Cement Association (PCA - 1984) .....	41
Tabla 2. Valores de esfuerzos losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	45
Tabla 3. Valores de esfuerzos losas 4,3m x 3.55m, carga central, espesor 0.25m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	46
Tabla 4. Valores de esfuerzos losas 4,1m x 3.45m, carga central, espesor 0.25m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	46
Tabla 5. Valores de esfuerzos losas 4,5m x 3.65m, carga borde, espesor 0.25m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	47
Tabla 6. Valores de esfuerzos losas 4,3m x 3.55m, carga borde, espesor 0.25m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	48
Tabla 7. Valores de esfuerzos losas 4,1m x 3.45m, carga borde, espesor 0.25m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	48
Tabla 8. Valores de esfuerzos losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.30m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	49
Tabla 9. Valores de esfuerzos losas 4,3m x 3.55m, carga central, espesor 0.30m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	50
Tabla 10. Valores de esfuerzos losas 4,1m x 3.45m, carga central, espesor 0.30m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	50
Tabla 11. Valores de esfuerzos losas 4,5m x 3.65m, carga borde, espesor 0.30m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	51
Tabla 12. Valores de esfuerzos losas 4,3m x 3.55m, carga borde, espesor 0.30m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	52
Tabla 13. Valores de esfuerzos losas 4,1m x 3.45m, carga borde, espesor 0.30m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C .....	52



## **INTRODUCCIÓN**

Las losas de concreto en pavimentos rígidos están expuestas a diferentes cargas de tráfico producidas por el paso de los vehículos, las cuales generan sobre estas esfuerzos por flexión y cortante. El concreto como parte fundamental de la losa debe proveer la resistencia adecuada para evitar la fisuración y contener el fenómeno de retracción de fraguado.

Sin embargo, el concreto tiene alta resistencia a la compresión, pero prácticamente nula a la tracción, por lo cual se utilizan mallas de refuerzo para absorber los esfuerzos por flexión. De igual manera las losas de concreto se deben interconectar entre sí, mediante juntas transversales y longitudinales, y barras de transferencia o dovelas que permitan transferir las cargas producidas por el tráfico de manera adecuada entre las losas que componen el pavimento.

En el presente trabajo de investigación se realizará la modelación numérica de losas de concreto hidráulico para pavimentos rígidos, con el fin de observar la variación de los esfuerzos a través de la losa debido a los gradientes de temperatura que se presentan en esta, ya sea por cambios climáticos repentinos o por la transición de día a noche.

## **1. JUSTIFICACIÓN**

Durante el diseño y la construcción de los pavimentos rígidos, se hace hincapié en varios factores tales como la geometría, el espesor de la losa, el tipo de concreto hidráulico a utilizar, cuales losas se deben reforzar por factores como relación de esbeltez, irregularidad o cercanía de elementos fijos como sumideros o pozos de alcantarillado, o que ventana de corte se utilizara para el corte de las losas.

Sin embargo, nunca se tienen en cuenta en el diseño la variación de los esfuerzos en las losas de concreto debido a los gradientes de temperatura y como estos pueden afectar el desempeño del pavimento y su durabilidad ante eventuales fenómenos como el alabeo.

## **2. EL PROBLEMA**

### **2.1. Título del Proyecto**

Modelación numérica de losas de concreto hidráulico para pavimentos rígidos considerando la variación de los esfuerzos debido a los gradientes de temperatura.

### **2.2. Línea de Investigación**

Investigación y desarrollo.

### **3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

#### **3.1. Descripción del Problema**

Mejorar los índices de competitividad en infraestructura con más y mejores vías es una prioridad del país, y hoy más que nunca la reducción en el número y costo de las intervenciones durante la vida útil de una carretera es tan relevante como la economía en todo el proceso de diseño y construcción. La pavimentación de vías en concreto juega un papel clave, pues más que cualquier otra tecnología se ajusta a la realidad económica de un país que mueve el 98% de sus mercancías por vía terrestre, según el Anuario Estadístico del Sector Transporte 2012. Esto porque los pavimentos en concreto tienen gran capacidad para soportar cargas de tránsito pesado, son indicados para suelos con bajas capacidades portantes, y entre otras, se adaptan bien a diferentes condiciones topográficas y climáticas (Uribe , 2014).

Los esfuerzos generados en los pavimentos de concreto tienen diferentes orígenes. Algunos se deben a las características mismas del concreto y se presentan como consecuencia de las reacciones del cemento con el agua y se conocen como esfuerzos de retracción por secado, otros esfuerzos que se presentan en las losas se deben a las cargas a que se ven sometidas durante la vida útil, otro tipo de esfuerzos son los que se presentan por los cambios térmicos y de humedad en las losas. Los esfuerzos generados por las cargas que solicitan los pavimentos son conocidos y muchos libros dedican varios capítulos a modelos que permitan calcular su magnitud. Los generados por las reacciones de fraguado se controlan durante la construcción con una adecuada modelación de las losas (Londoño, 2013).

El presente proyecto tiene como propósito realizar la modelación numérica de losas de concreto hidráulico para pavimentos rígidos, con el fin de observar la variación de los esfuerzos a través de la losa debido a los cambios de temperatura que se presentan en la misma, ya sea por cambios climáticos repentinos encontrados muy comúnmente en nuestro territorio o por la transición de día a noche.

### **3.2. Formulación del Problema**

¿Es factible realizar la modelación numérica de losas de concreto hidráulico para pavimentos rígidos, con el fin de observar la variación de los esfuerzos a través de las losas debido a gradientes de temperatura?

## **4. OBJETIVO GENERAL**

- Modelar numéricamente el comportamiento de losas de concreto hidráulico para pavimentos rígidos considerando la variación de los esfuerzos debido a los gradientes de temperatura.

### **4.1. Objetivos Específicos**

- Generar un estado del conocimiento relacionado con la modelación numérica de pavimentos rígidos, haciendo énfasis en la variación de los esfuerzos debido a los gradientes de temperatura.
- Definir los parámetros y las variables necesarias para la generación del modelo computacional en el programa de elementos finitos.
- Simular numéricamente el modelo computacional propuesto, teniendo en cuenta las dimensiones, parámetros y demás variaciones planteadas en la metodología.

## 5. MARCO REFERENCIAL

### 5.1. Marco Teórico

En la actualidad para el dimensionamiento de estructuras de pavimentos rígidos para carreteras de dos carriles se emplean métodos empíricos y empíricos-mecanísticos, definiendo comúnmente para ello: el eje de diseño (eje simple de 8.2T (80kN)) o el espectro de carga, el espesor de las capas y las características de los materiales. De manera que se pueda calcular los máximos esfuerzos principales a tensión en las fibras inferiores o superiores de la losa (fatiga) y deformaciones verticales en las capas granulares y subrasante (deformación permanente). Orientado a estudios en una o dos dimensiones que conlleven a omitir condiciones de frontera más amplias.<sup>1</sup>

Para el estudio de antecedentes sobre modelación numérica en pavimentos rígidos, son amplios los temas que abarcan capacidad de soporte y configuración de estructuras de refuerzo en losas de concreto. Sin embargo, el estudio de los efectos de la temperatura sobre las mismas es bastante reducido, razón por la cual en el presente proyecto se abordará la variación de los esfuerzos en losas de concreto debido a los gradientes de temperatura.

La **Universidad Tecnológica de la Habana**, en el año 2017, evaluó la influencia del comportamiento mecánico de los materiales de la subrasante y subbase en un pavimento de concreto, midiendo el modulo sobre la superficie de la subbase (módulo efectivo) y empleando para ello un ensayo de placa simulado numéricamente. Para esto se combinaron indistintamente características de los materiales en ambas capas y el espesor de la subbase. Primero se presentó un modelo numérico axial-simétrico

---

<sup>1</sup> Loannides, A. M. (1997). Pavement Fatigue Concept: A Historical View. Purdue University, West Lafayette: 6th International Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance Vol. 3.

calibrado numérica y físicamente, validado posteriormente con medidas realizadas en un tramo experimental. Además, se realizó un análisis paramétrico de los factores que inciden en el incremento del módulo en la superficie, a través de un diseño experimental combinando calidades de subrasante, subbase y diferentes espesores de subbase. Finalmente, con los resultados del experimento, se obtuvo un modelo matemático que relaciona estas variables con el módulo en la superficie y un nomograma que facilita el trabajo en la práctica ingenieril.<sup>2</sup>

La **Universidad Sur Colombiana de Neiva**, en el año 2017, evaluó la aplicabilidad del método de elementos finitos en el análisis y dimensionamiento de losas para carreteras de dos carriles, para ello se analizaron y dimensionaron losas planas de concreto con juntas (Jointed-Plain-Concrete-Pavement“JCPC” en inglés) para carreteras de dos carriles por medio del modelador de elementos finitos EverFE 2.25, intentando reproducir de una manera más ajustada a la realidad los esfuerzos del conjunto de losas de pavimento. Para la validación se empleó el método analítico Westergaard 1948. Los resultados de esfuerzos y número de repeticiones de carga permitidos llevaron a concluir que el diseño de losas JCPC para carreteras de dos carriles no requiere el peso propio de la estructura en el análisis y dimensionamiento porque el porcentaje de variación obtenido es poco significativo. Por lo cual, se recomendó omitir el parámetro de densidad en el análisis para generar un costo computacional menor.<sup>3</sup>

La **Universidad Católica de Colombia**, en el año 2014, evaluó el comportamiento de las barras de transferencia en un piso industrial de concreto hidráulico, empleando para ello el Software EverFe 2.25, mediante el cual se analizó el comportamiento de

---

<sup>2</sup> Hernández López, F. M., Tejada Piusseaut, E., Recarey Morfa, C. A., & Camapum de Carvalho, J. (2017). Modelo Numérico para Estimar el Módulo Efectivo del Soporte de un Pavimento Rígido. *Revista Cubana de Ingeniería - Vol. VIII, 7*.

<sup>3</sup> Pallares Muñoz, M. R., & Pulecio Díaz, J. A. (2017). Aplicabilidad del Método de los Elementos Finitos en el Análisis y Dimensionamiento de Losas JCPC para Carreteras de Dos Carriles. *Universidad Sur Colombiana de Neiva*.



las barras de transferencia con parámetros estructurales establecidos tales como el posicionamiento de la carga, las características físicas del concreto, del acero y la base granular. Dentro del estudio se realizó una variación de los parámetros que influyen en el comportamiento de la dovela, tales como la longitud embebida, el número de barras y la distancia del eje de la placa hasta donde empieza la primera dovela. Determinando los momentos y cortantes máximos en cada dovela y los esfuerzos en cada losa de concreto rígido, se logró evidenciar que el comportamiento estructural de las barras de transferencia está directamente afectado por el número de estas y por la posición de la carga crítica, así mismo para el caso de la carga ubicada sobre las juntas de concreto, se obtuvieron momentos en las dovelas centrales de menor magnitud, que las que se encontraban en el borde externo de la losa. Además se encontró que en cuanto a los esfuerzos obtenidos para el caso de la carga en el centro de la losa, aumentando el número de barras de transferencia, la longitud y la distancia desde el borde, estos eran de menor magnitud que cuando se ubicaba la carga en el centro de las juntas, asegurando de este manera que la transferencia de carga se realiza de modo efectivo con la colocación de dovelas en las uniones de las placas de concreto rígido.<sup>4</sup>

La **Universidad Católica de Colombia**, en el año 2014, realizó un estudio en el cual se evaluó la variabilidad en la solicitación de cargas en pisos industriales empleando para ello el Software EverFe 2.25. En este se tuvo como parámetros estructurales establecidos las características físicas del concreto, acero y la base granular. Para este caso se realizó una variación en los parámetros de magnitud de carga y dimensión de las losas de concreto. Al ejecutar las diferentes simulaciones con diferentes dimensiones de losas y combinaciones de cargas aplicadas a un mismo punto, se concluyó que el esfuerzo es directamente proporcional a la carga. Al duplicar la carga, el esfuerzo reacciona de la misma manera; del mismo modo al analizar los resultados

---

<sup>4</sup> Botia Rodríguez, L. M., & Rodríguez Fonseca, A. Y. (2014). Modelación Numérica de Barras de Transferencia en Pisos Industriales de Concreto Rígido. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.

de los esfuerzos máximos presentes en cada una de las losas frente a las diferentes cargas, se encontró que las que reportaron mayores esfuerzos fueron las losas de menores dimensiones. Dentro de la investigación también se observó una gran confiabilidad de los resultados arrojados en el software EverFe, ya que al compararlos con los métodos empíricos de Westergaard y Bradbury sobre el tema de esfuerzos en pavimentos rígidos aplicando la carga en la zona del borde, interior y esquina de las losas, los resultados son bastantes similares a los obtenidos con estas teorías.<sup>5</sup>

En el **XIX Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos**, en el año 2013, se presentó una investigación sobre el efecto de la desviación de las dovelas en las losas de pavimento rígido. En los pavimentos rígidos, las dovelas o barras pasajunta tienen como función transmitir la carga entre losas de concreto de cemento Portland, por lo general están dispuestas de forma transversal al sentido del flujo vehicular. Las dovelas contribuyen con la disminución de los esfuerzos y deformaciones debidas a las cargas de tránsito; sus características de diseño tienen en cuenta la longitud, el diámetro y el espaciamiento, y son determinadas a partir de los esfuerzos producidos entre la interacción dovela–losa. La correcta instalación de las dovelas requiere que estas sean horizontales y paralelas al flujo vehicular y que estén ubicadas en la mitad del espesor de la losa. En esta investigación se presentó la modelación numérica del efecto de la desviación horizontal sobre el comportamiento de las dovelas mediante la comparación con una condición de construcción ideal. Los análisis numéricos realizados indicaron que la deflexión horizontal, aún con valores tan altos como 30°, no afecta de forma significativa la fuerza cortante calculada en las dovelas. Los resultados mostraron además una reducción de la fuerza cortante con el incremento de la desviación horizontal en la dovela. La magnitud de los cambios en la fuerza cortante debidos a la desviación horizontal son pequeños comparados con aquellos debidos a los incrementos del espesor de la losa o del módulo de reacción de la

---

<sup>5</sup> Ángel Ramos, L. S., & Prieto Peña, M. M. (2014). Modelación Numérica de Pisos Industriales Considerando la Variabilidad en la Solicitación de Cargas. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.

fundación. Así mismo los resultados numéricos obtenidos y la información técnica consultada sugieren que el efecto de la desviación de las dovelas puede ser importante cuando esta no es uniforme (diferentes orientaciones) o combina ángulos horizontales y verticales a la vez, es decir cuando se presenta el bloqueo de la junta.<sup>6</sup>

## **INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTAL EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO:**

La fabricación de concretos con cemento Portland en condiciones climáticas extremas, ya sean de altas temperaturas o de bajas temperaturas, influyen de manera directa en las características del concreto para cualquier etapa del mismo: amasado, puesta en obra o curado, así como en las propiedades físicas y mecánicas.

Una alta temperatura ambiental tiene como consecuencia una mayor demanda de agua del concreto y un incremento en la temperatura de éste en estado fresco. Lo anterior, tiene como resultado un incremento en la velocidad de pérdida de fluidez y en una más rápida hidratación del cemento, lo cual conduce a un aceleramiento en el fraguado y en una menor resistencia del concreto.

Como resultado de todo lo anterior, la temperatura ambiental alta puede afectar adversamente las propiedades mecánicas y de servicio del concreto endurecido.

Cuando el cemento Portland es mezclado con agua se libera calor, este calor es llamado calor de hidratación, que es el resultado de la reacción química exotérmica entre el cemento y el agua.

---

<sup>6</sup> Vasquez Varela, L. R., & Vidal Londoño, L. (2013). Modelación Numérica del Efecto de la Desviación de las Dovelas en Losas de Pavimento Rígido. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.

Algunos problemas potenciales del concreto en estado fresco son los siguientes:

- ❖ Incremento en la demanda de agua.
- ❖ Incremento en la pérdida de fluidez o asentamiento.
- ❖ Incremento en la tendencia de agrietamiento por retracción plástica.

Por otro lado, el concreto en estado endurecido tiene los siguientes problemas en climas cálidos:

- ❖ Pérdida de resistencia a edades de 28 días y posteriores como resultado de una mayor demanda de agua y de una temperatura mayor del concreto.
- ❖ Tendencia a la retracción por secado y al agrietamiento debido a gradientes térmicos.
- ❖ Reducción de la durabilidad.

Otros factores que complican las operaciones del vaciado de concreto en climas cálidos son los siguientes:

- ❖ La utilización de cementos con una alta finura de molido.
- ❖ El uso de hormigones de altas resistencias con altos contenidos de cemento.
- ❖ El diseño de secciones estructurales estrechas y con una cuantía grande de acero de refuerzo.

## **EFFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO:**

- **Propiedades afectadas en estado fresco:**
  - Trabajabilidad y pérdida de trabajabilidad

La temperatura juega un papel muy importante en la trabajabilidad del concreto, es bien sabido que, bajo condiciones de clima cálido, se requiere una mayor cantidad de agua para una determinada consistencia o asentamiento.

Un aumento de 10 °C en la temperatura del concreto tiene como consecuencia la disminución en el asentamiento inicial de aproximadamente 25 mm; de igual forma,

por cada 10 °C de aumento en la temperatura del hormigón, se necesitarán de 4 a 6 kg/m<sup>3</sup> de agua para mantener un mismo asentamiento.

El efecto de la temperatura en la demanda de agua es principalmente producido por la velocidad de la hidratación del cemento y también por la tasa de evaporación del agua.

➤ **Tiempos de fraguado**

Cuando la temperatura es elevada, tiene lugar una disminución del agua libre presente en la masa del concreto, con lo que la relación agua/cemento es menor a la teórica (aumento de la concentración de sólidos) y los procesos de cristalización de los productos de reacción se verán acelerados.

Así, a 35 °C el endurecimiento es casi dos veces más rápido que a 20 °C, que es la temperatura que se acostumbra a tomar como referencia.

El incremento de temperatura y velocidad del viento aceleran el fraguado inicial y final del concreto, de igual forma, un incremento en la humedad relativa tiene un efecto retardante en el fraguado inicial y final del concreto.

➤ **Retracción plástica y fisuración**

La retracción plástica es un fenómeno característico del concreto fresco, motivado por la tensión capilar del agua en el interior de los poros y que tiene lugar durante las primeras horas después del amasado del concreto. Es frecuente su presencia en losas de gran superficie, y suele coincidir su aparición con el momento en el que desaparece el brillo de la superficie húmeda del concreto por la evaporación del agua.

➤ **Propiedades afectadas en estado endurecido:**

➤ **Resistencia mecánica**

Varios estudios indican que las condiciones de contorno en climas cálidos aceleran la resistencia del concreto a edad temprana, mientras que la resistencia a edades posteriores tiende a disminuir.

La resistencia del hormigón viene determinada por:

- Relación agua/cemento.
- La resistencia de la interfase pasta-árido.
- Las propiedades de los áridos, generalmente, la aspereza de la superficie de los áridos (textura), tiene efectos benéficos sobre la interfase pasta-árido, lo cual también aumenta la resistencia. La composición química y mineralógica de los áridos puede ser también un factor de influencia en la resistencia de la interfase. La resistencia del concreto disminuye cuando se utilizan áridos gruesos, y aumenta cuando la rigidez de éstos en su conjunto es mayor, es decir, su módulo de elasticidad aumenta.

La temperatura tiene efectos sobre la resistencia del concreto ya que influye sobre:

- La velocidad de hidratación.
- La naturaleza de la estructura del concreto.
- La velocidad de evaporación y el resultante secado del concreto.

Generalmente, debido al incremento en la velocidad de hidratación, la temperatura acelera la ganancia de resistencia a edades tempranas, sin embargo, la resistencia a edades posteriores será perjudicada.<sup>7</sup>

## **ESFUERZOS TÉRMICOS EN PAVIMENTOS DE CONCRETO:**

Los esfuerzos generados por las cargas que solicitan los pavimentos son conocidos y muchos libros dedican varios capítulos a modelos que permitan calcular su magnitud. Los generados por las reacciones de fraguado se controlan durante la construcción con una adecuada modelación de las losas.

---

<sup>7</sup> Titus-Glover, L., Mallela, J., Darter, M., Voigt, G., & Waalkes, S. (2005). Enhanced Portland Cement Concrete Fatigue Model for Street Pave. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board.

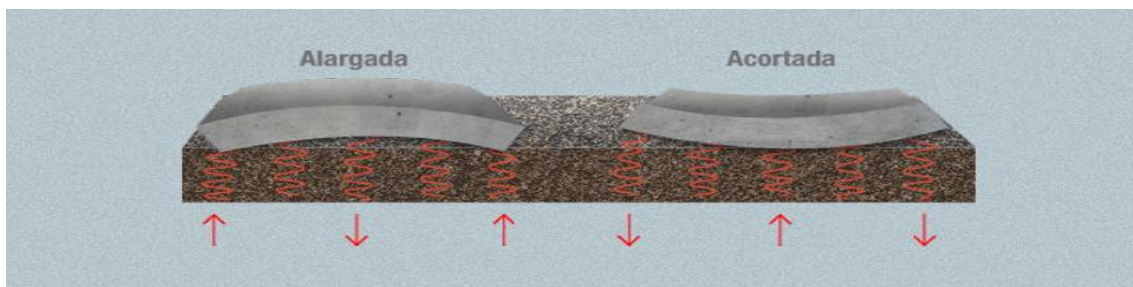
Los esfuerzos de alabeo también han sido estudiados pero su difusión en nuestro medio ha sido menor, a continuación, se presentará una descripción de cómo se generan, cómo se calculan y finalmente que se debe hacer para controlarlos.

### ➤ **Esfuerzos debidos al alabeo**

Durante el día cuando la temperatura en la parte superior de la losa es más alta que en la inferior, la superficie superior tiende a expandirse con respecto al eje neutro mientras que la inferior tiende a contraerse. Sin embargo, el peso de la losa restringe tanto la expansión como la contracción; entonces, se inducen esfuerzos de compresión en la parte superior y de tracción en la inferior. En la noche cuando la temperatura en la parte superior de la losa es más baja que la de la inferior y así se inducen esfuerzos de tensión en la parte superior y de compresión en la inferior.

El análisis de los esfuerzos de alabeo se puede hacer con la teoría de placa sobre una fundación Winkler o líquida. Una fundación Winkler está caracterizada por una placa a la que están pegados una serie de resortes, tal como se muestra en la Figura 1.

*Figura 1. Alabeo en losas de concreto*



Fuente. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/esfuerzos-termicos-en-pavimentos-de-concreto>

Cuando la temperatura en la parte superior de la losa es más alta que la de la inferior la losa se vuelve convexa. En esa posición los resortes de los extremos de la losa están sometidos a compresión y empujan la losa hacia arriba, mientras que los que están en el interior de la losa están sometidos a tracción y halan la losa hacia abajo. El resultado de la anterior situación es que la parte superior de la losa está en compresión y la inferior en tracción.

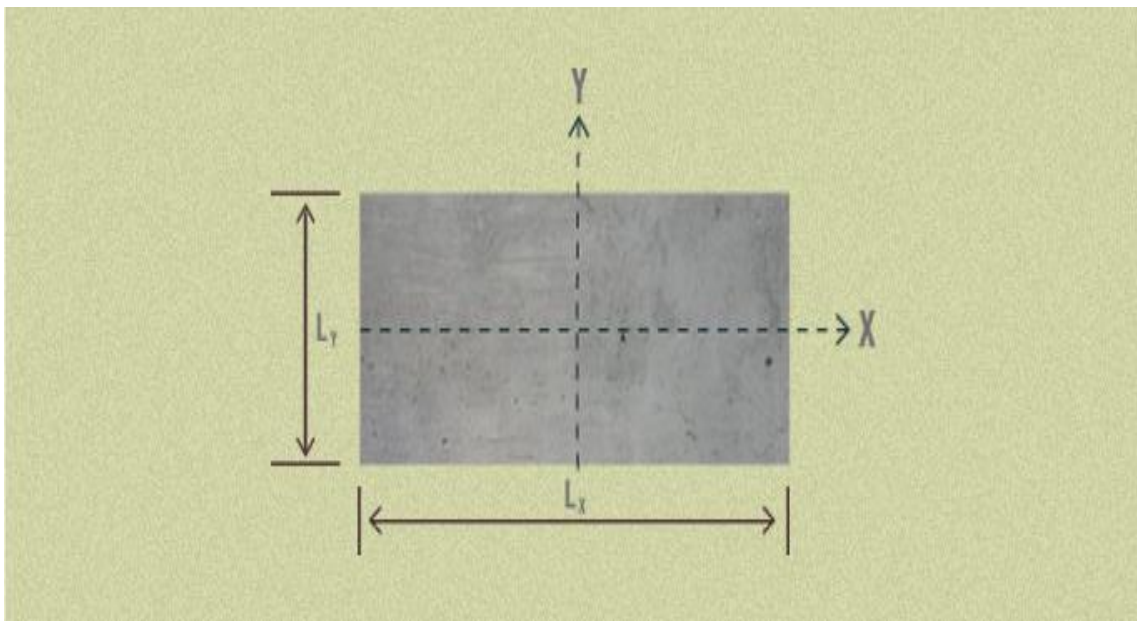
Cuando la temperatura en la cara expuesta es más baja que la de la de apoyo, la losa asume una forma cóncava. En esta posición los resortes exteriores halan la losa hacia abajo y los resortes interiores empujan la losa hacia arriba, el resultado es que se desarrollan esfuerzos de tracción en la superficie superior y de compresión en la cara inferior.

Westergaard (1926) desarrolló las ecuaciones para determinar los esfuerzos por alabeo en los pavimentos de concreto basado en la teoría de placa.<sup>8</sup>

### ➤ Esfuerzos de alabeo en losas finitas

La Figura 2 muestra una losa de dimensiones finitas, con longitud  $L_x$  en la dirección y longitud  $L_y$  en la dirección y

Figura 2. Losa de dimensiones finitas



Fuente. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/esfuerzos-termicos-en-pavimentos-de-concreto>

---

<sup>8</sup> Argos concreto. [En línea]. Colombia. [Consulta: 14 de noviembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL:<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/esfuerzos-termicos-en-pavimentos-de-concreto>>.



El esfuerzo total en la dirección x se puede expresar así:

$$\sigma_x = \frac{C_x E \alpha_t \Delta t}{2(1-\mu^2)} + \frac{C_y \mu E \alpha_t \Delta t}{2(1-\mu^2)} = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1-\mu^2)} (C_x + \mu C_y)$$

Ecuación 1

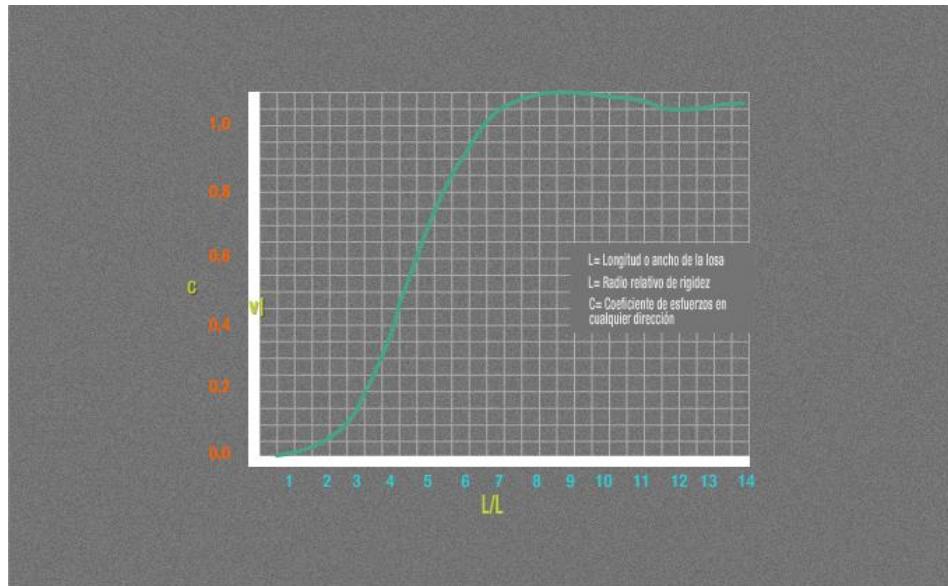
En la Ecuación 1  $C_x$  y  $C_y$  son dos factores de corrección para losas finitas. El primer término de esta ecuación es el esfuerzo debido a la flexión en la dirección x y el segundo corresponde al esfuerzo generado en la dirección y. De manera similar el esfuerzo en la dirección y es

$$\sigma_y = \frac{E \alpha_t \Delta T}{2(1-\mu^2)} (C_y + \mu C_x)$$

Ecuación 2

Con base en el análisis de Westergaard, Bradbury, en el año 1938, desarrolló un ábaco para determinar los valores  $C_x$  y  $C_y$ . Ese ábaco se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Ábaco de Bradbury



Fuente: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/esfuerzos-termicos-en-pavimentos-de-concreto>

El factor de corrección  $C_x$  depende del cociente entre la longitud de la losa en la dirección  $x$   $-L_x-$  y el radio relativo de rigidez de la losa  $i$ . El factor  $C_y$  depende de la relación entre la longitud de la losa en la dirección  $y$   $-L_y-$  y el radio relativo de rigidez de la losa  $i$

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

*Ecuación 3*

En la cual  $E$  es el módulo de elasticidad del concreto,  $h$  el espesor de la losa y  $\mu$  el Módulo de Poisson y  $k$  es el módulo de reacción de la subrasante.

La ecuación 1 y la ecuación 2 permiten obtener el máximo valor de los esfuerzos en el centro de la losa.

Los esfuerzos de borde en el centro de la losa se pueden determinar con la siguiente ecuación

$$\sigma = \frac{CE\alpha_t \Delta t}{2}$$

*Ecuación 4*

En la Ecuación 4  $\sigma$  puede ser  $-\sigma_x-$  o también  $-\sigma_y-$  dependiendo de si  $C$  es  $C_x$  o  $C_y$ . Hay que resaltar que la Ecuación 4 es similar a las Ecuaciones 1 y 2 cuando el Módulo Poisson en el borde es cero.

Se puede observar en la Figura 3 que el factor de corrección  $C$  se incrementa cuando lo hace la relación  $L/i$ , llega al valor de uno (1) cuando  $L=6,7i$  y alcanza el máximo valor de 1,084 cuando  $L=8,5i$  y decrece hasta uno (1) cuando la relación  $L/i$  tiende a infinito.

El hecho de que  $C$  pueda tener un valor mayor que la unidad se puede explicar por el hecho de que en losas cuya longitud supere  $6,7i$  la reacción de la subrasante reverse ligeramente la curvatura que el alabeo por temperatura produce.

La relación entre C y L/i sigue la Ecuación 5 hasta cuando la relación L/i es de 8,5. Para efectos prácticos este es el rango de aplicación de C. La Ecuación 5 tiene un coeficiente de correlación R de 0,989

$$y = 81,547x^6 + 385,01x^5 - 654,61x^4 + 523,7x^3 - 207,1x^2 + 41,375x$$

Ecuación 5

### ➤ Ecuación de Westergaard

La ecuación desarrollada por Weestergard y en la que se basó Bradubury para desarrollar el ábaco con el que se determina C es la siguiente:

$$\sigma_x = \sigma_0 \left[ 1 - \frac{2 \cos \lambda \cosh \lambda}{\operatorname{sen} 2 \lambda \operatorname{senh} \lambda} \left( (\tan \lambda + \tanh \lambda) \cos \frac{y}{\sqrt{2}} \cosh \frac{y}{\sqrt{2}} + (\tan \lambda - \tanh \lambda) \operatorname{sen} \frac{y}{\sqrt{2}} \operatorname{senh} \frac{y}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

Ecuación 6

En donde

$$\lambda = b / \sqrt{s}$$

Siendo b el ancho de la losa

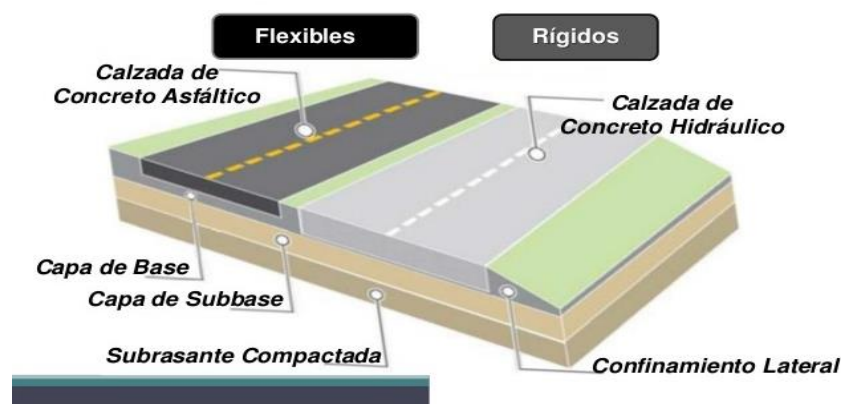
## 5.2. Marco Conceptual

### Pavimento

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: ancho, trazado horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos y adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento.

El pavimento deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, y los de menor calidad en las capas inferiores. De igual manera la resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye sino también del proceso constructivo, de la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

Figura 4. Tipos de pavimentos

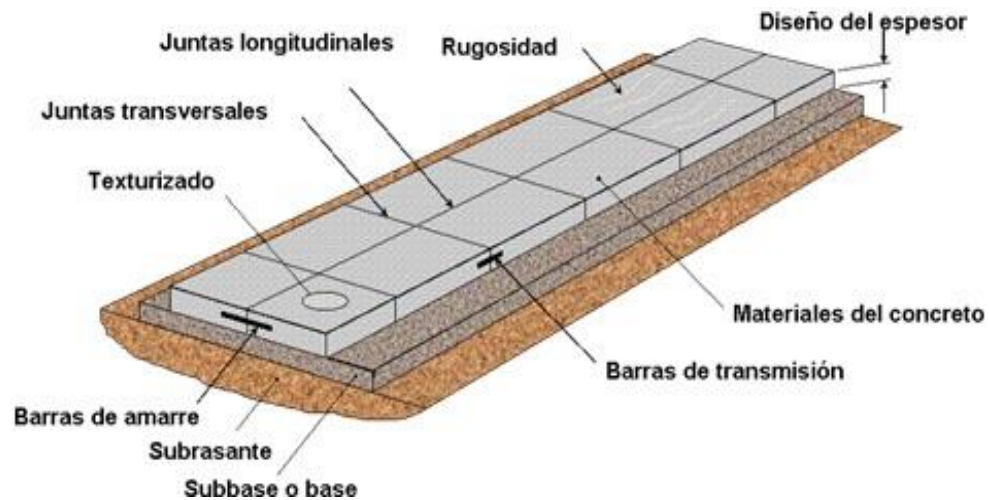


Fuente. <https://www.duravia.com.pe/blog/pavimentos>

## Pavimento rígido

Los pavimentos rígidos son aquellos formados por losas de concreto Portland sobre una base granular o directamente sobre la sub-rasante, los cuales transmiten directamente los esfuerzos al suelo en una forma minimizada ya que son auto portantes. Las losas que lo componen están interconectadas mediante juntas transversales y longitudinales y conectores de acero cuya principal función es la adecuada transferencia de las cargas.<sup>9</sup>

Figura 5. Estructura típica de un pavimento rígido



Fuente. <https://revistavial.com/rugosidad-en-pavimentos-de-hormigon-influencia-de-la-temperatura/>

## Losa

Las losas de concreto son elementos estructurales de sección transversal y geometría rectangular, cuyas funciones principales en el pavimento son las de soportar y transmitir a un nivel adecuado las cargas que se aplican sobre este, además de proporcionar una superficie de rodadura plana y uniforme sobre la cual puedan rodar los vehículos de manera confortable y segura.

---

<sup>9</sup> Sánchez Sabogal, F. Módulo 3. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos [en línea]. Bogotá: Escuela de Ingenieros [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos.pdf)

## **Concreto hidráulico**

El concreto hidráulico es una mezcla de tres elementos, cemento, agua y agregados los cuales tienen la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera. Los cementantes que se utilizan para la fabricación del concreto son hidráulicos, es decir, fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, los principales cementantes hidráulicos son las cales y cementos hidráulicos, algunas escorias y ciertos materiales con propiedades puzolánicas.

## **Juntas**

Las juntas en los pavimentos de concreto tienen la función principal de copiar el patrón de fisuración que naturalmente desarrolla el pavimento en servicio mediante un adecuado diseño y ejecución de juntas transversales y longitudinales, e incorporar en los mismos mecanismos apropiados para la transferencia de cargas.

## **Pasadores o pasajuntas**

Las barras pasajuntas o pasadores son barras de acero lisas con un límite de fluencia  $f_y=4,200\text{kg/cm}^2$ , las cuales están colocadas o montadas sobre una canastilla metálica, ubicada en las juntas de contracción y/o juntas de construcción.

La barra pasajuntas mantiene los dos lados de la junta a la misma elevación cuando una rueda pasa sobre la junta, transfiriendo el cortante y experimentando desplazamientos verticales iguales para reducir el daño en estas. A fin de que las juntas permitan movimiento horizontal, las barras pasajuntas no deben adherirse al concreto por lo menos a un lado de la junta.

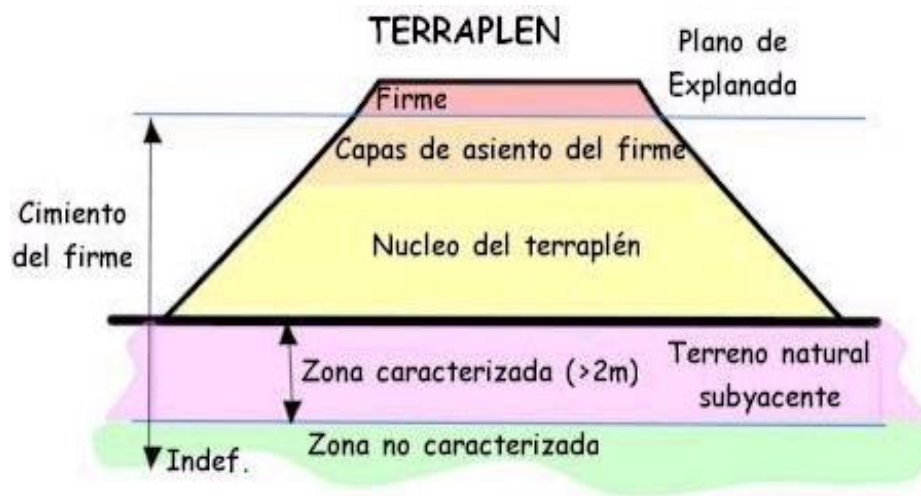
## **Terraplén**

Los terraplenes son estructuras formadas por capas compactadas de suelo colocado sobre el terreno natural, que tiene como objetivo principal dar un determinado nivel de proyecto, así como el mejoramiento de las condiciones de apoyo del pavimento.

En los terraplenes se distinguen tres partes principales:

- a) Corona (capa subrasante): Parte superior del terraplén en la cual se apoya la estructura de pavimento.
- b) Núcleo: Parte del terraplén comprendida entre el cimientado y la corona.
- c) Cimientado: La parte inferior del terraplén, que está por debajo de la superficie original del terreno, la que ha sido variada por el retiro de material inadecuado. El núcleo y el cimientado constituyen el cuerpo del terraplén.

Figura 6. Partes principales de un terraplén



Fuente: [https://www.carreteros.org/ccaa/legislacion/carreteras/andalucia/normativa/firmes/apartados/3\\_2.htm](https://www.carreteros.org/ccaa/legislacion/carreteras/andalucia/normativa/firmes/apartados/3_2.htm)

## Subrasante

La subrasante es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y las pendientes especificadas en el diseño. Esta se considera como la cimentación del pavimento y una de sus funciones principales es la de soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, así como evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías.

### **Capa de sub-base**

La subbase es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura, de igual manera esta debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que pueden ser dañinos para el pavimento. También se utiliza como capa de drenaje para controlar la ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura.

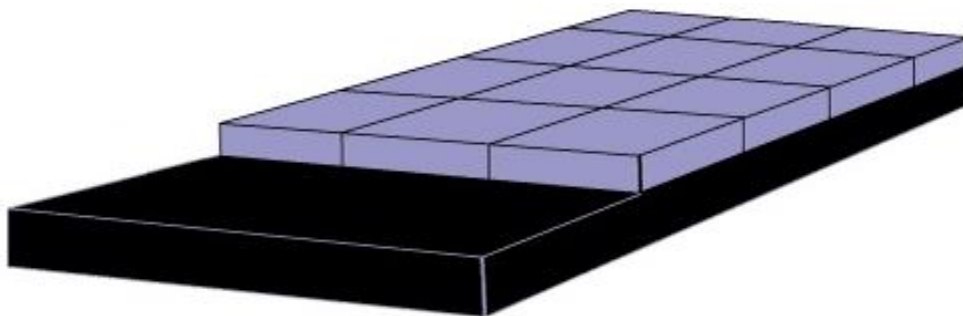
### **Capa de base**

La base es la capa intermedia entre la capa de rodamiento y la capa sub-base, generalmente se usa en los pavimentos flexibles y se compone de materiales pétreos con buena distribución granulométrica; esta capa permite reducir los espesores de carpeta ya que tiene una función estructural importante al reducir los esfuerzos cortantes que se transmiten hacia las capas inferiores, proporcionando además una función drenante del agua atrapada dentro del cuerpo del pavimento.

### **Carpeta**

La carpeta es la superficie de rodamiento constituida por materiales endurecidos para disipar los esfuerzos hacia las terracerías. Se forma de materiales granulares con o sin liga o más comúnmente de concreto hidráulico en sus diferentes variantes.

*Figura 7. Carpeta de pavimento*



Fuente. <https://docplayer.es/16518430-Whitetopping-una-alternativa-de-rehabilitacion.html>

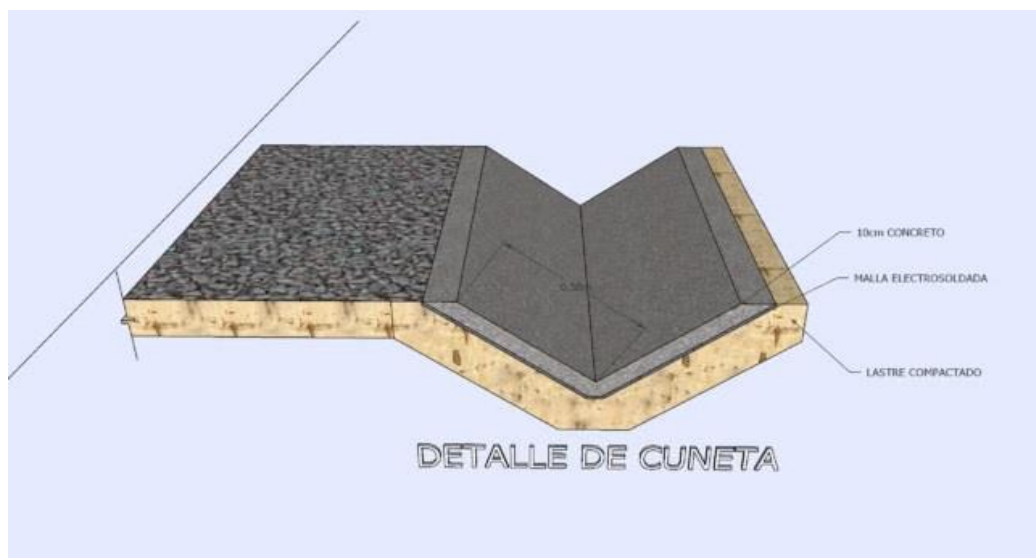


## Drenaje

El drenaje de pavimentos es esencial para mantener un buen nivel de servicio y seguridad en el tráfico. El agua sobre el pavimento puede interrumpir el tráfico, reducir la resistencia al deslizamiento, incrementar el potencial de “hidroplaneo”, limitar la visibilidad debido al salpique y rocío, y causar la consecuente dificultad en la conducción del vehículo.

El drenaje de pavimentos requiere de la consideración del escurrimiento superficial, del flujo en cunetas y de la capacidad de captación de los sumideros. El diseño de estos elementos depende de la frecuencia de la lluvia y del spread permisible del agua sobre la superficie del pavimento.

Figura 8. Sección típica de una cuneta



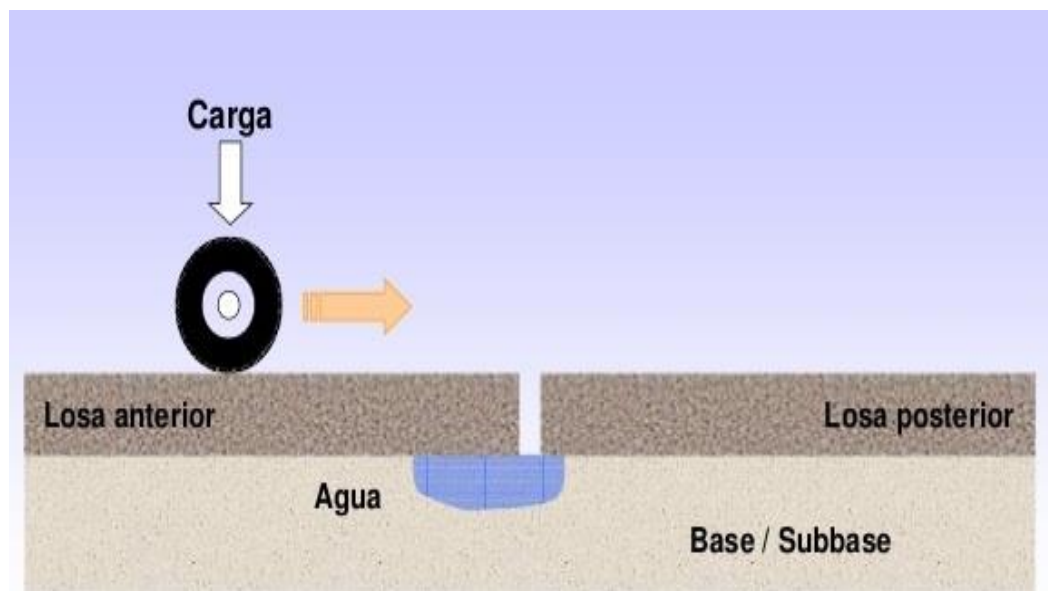
Fuente. <https://libro-pavimentos.blogspot.com/2012/06/fuentes-de-humedad-en-pavimentos.html>

## Acción de “bombeo”

Los pavimentos de concreto comienzan a deteriorarse por las juntas, especialmente cuando la transferencia de cargas en ellas es inadecuada. Esos deterioros se presentan en forma de expulsión del material de base (bombeo), escalonamiento y fisuración de las losas, que en algunos casos pueden reducir la vida útil del pavimento a la mitad del tiempo. El bombeo se

presenta cuando se dan simultáneamente las tres condiciones siguientes: 1) repetición de cargas pesadas, 2) presencia de agua en el interior de la estructura y 3) por ultimo bases erodables. La primera de ellas no se puede evitar en muchos de los proyectos de pavimentación, por lo cual se recomienda la utilización de los pasadores de carga en las juntas transversales y la construcción de bermas de concreto unidas al pavimento mediante barras de anclaje. El efecto de las causas 2 y 3 se puede atenuar si se reduce, tanto como sea posible, el tiempo de la presencia del agua en el contacto entre la losa y su soporte, así como haciendo mínimo el riesgo de la formación de cavidades bajo los pavimentos de concreto. El bombeo en los pavimentos se evita eliminando una de las causas que lo generan, pero lo ideal es actuar sobre aquellas en las que es posible hacerlo.

Figura 9. Bombeo en pavimentos rígidos



Fuente. <https://docplayer.es/9735163-Diseno-de-pavimentos-rigidos-ing-diego-h-calo.html>

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. Descripción del Programa

El programa EverFE 2.24 trabaja con mallados de distintos grados de refinamiento y se compone de seis interfaces que realizan diferentes funciones:

- a) Geometry, contiene una herramienta CAD que permite construir un modelo geométrico e introducir los datos característicos de las capas y definir las fronteras del dominio del modelo.
- b) Material, almacena los parámetros de rigidez de cada material, densidades, coeficiente de expansión térmica del concreto hidráulico y las condiciones de liga entre capas.
- c) Loading, almacena los parámetros de carga, tipo de eje, lado y ancho del contacto de rueda (área de contacto rectangular), ubicación sobre el plano x-y de la(s) losa(s) y carga por temperatura.
- d) Dowel, contiene los parámetros de rigidez y geometría de las dovelas y barras de amarre, además, condiciones de liga entre dovelas y el concreto hidráulico de la(s) losa(s).
- e) Interlock, almacena abertura de las juntas con su respectiva rigidez, acompañado de la opción de modelo lineal a no lineal.
- f) Meshing, determina los parámetros de mallado.
- g) Solver, ejecuta el solucionador de elementos finitos.
- h) Results, permite obtener los resultados del análisis.

Los pasos típicos del procedimiento de análisis de un problema con EverFE 2.24, son: ingresar los datos de dimensionamiento, número de capas, condiciones de frontera, espesores y parámetros de rigidez (módulos elásticos, reacción y de Poisson), otros factores inherentes al material (densidades y coeficiente de expansión térmica del concreto hidráulico), carga, ancho y largo del área de contacto (el programa trabaja con área de contacto rectangular)

espaciamiento de las llantas, carga por temperatura, dovelas y barras de amarre con sus propiedades geométricas, de rigidez y liga con el concreto hidráulico, rigidez y abertura de las juntas, elegir combinación de mallado, ejecutar el solucionador y obtener resultados.

W. G. Davids, *EverFE Theory Manual*. United States of American, University of Maine Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2003.

## 6.2. Descripción de Parámetros

- **Dimensiones de las losas y espesor de la base granular:**

Se utilizarán losas rectangulares con las siguientes dimensiones 4.5m x 3.65m, 4.3m x 3.55m y 4.1m x 3.45m (relaciones de esbeltez inferiores a 1.25), con espesores de 0.25m y 0.30 m. En cuanto a la estructura del pavimento, para todas las modelaciones se utilizó una base granular con un espesor constante de 0.30m y se consideró la subrasante infinita.

Figura 10. Losa dimensión 4.5m x 3.65m

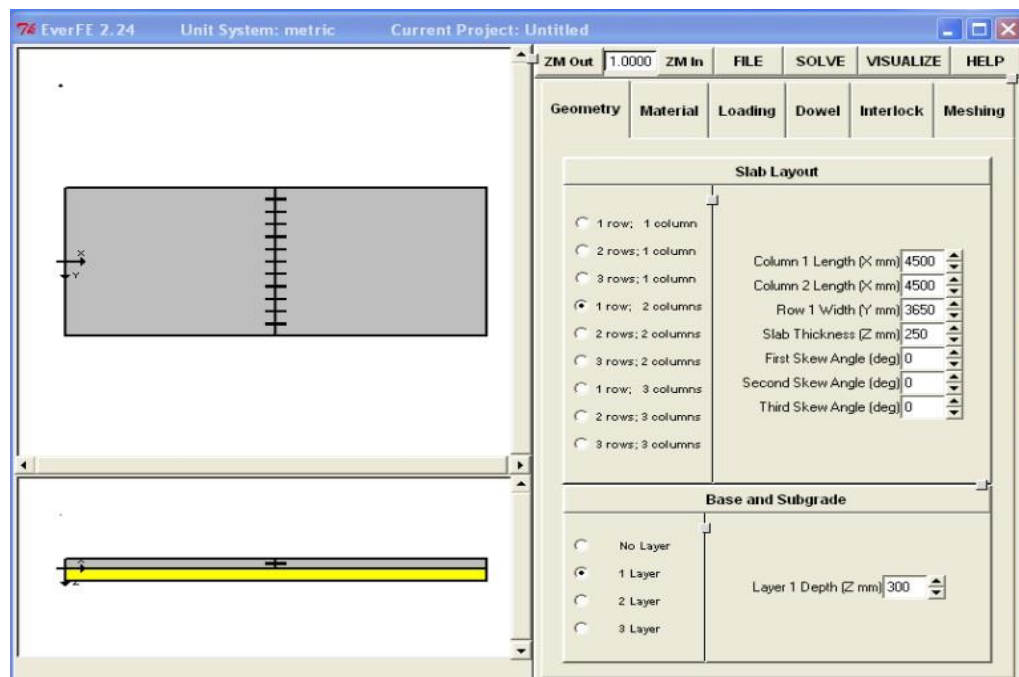


Figura 11. Losa dimensión 4.3m x 3.55m

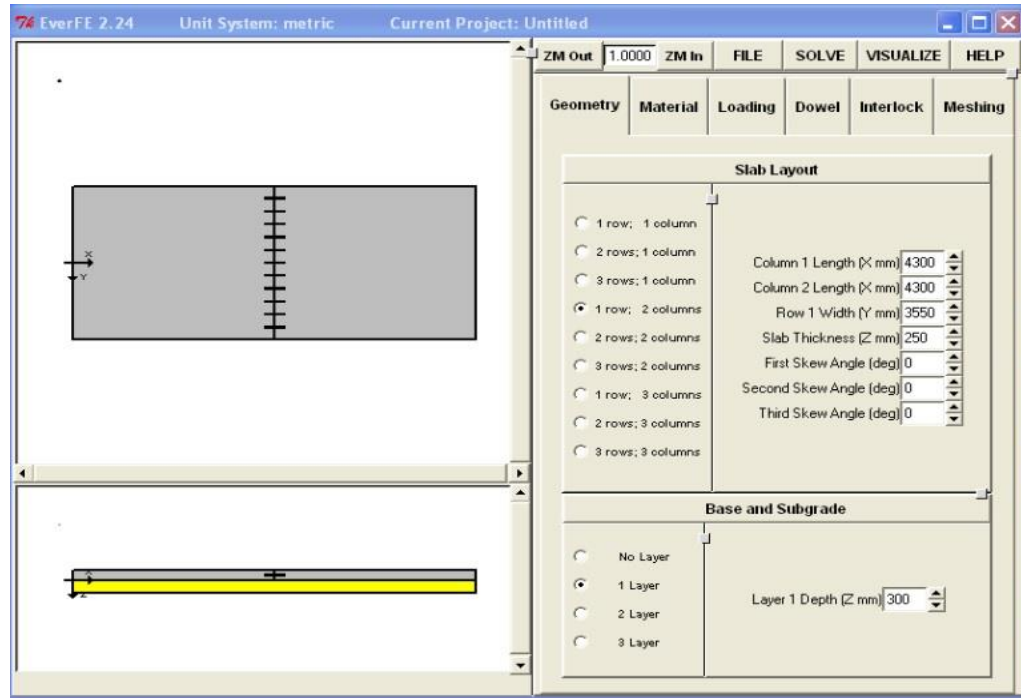
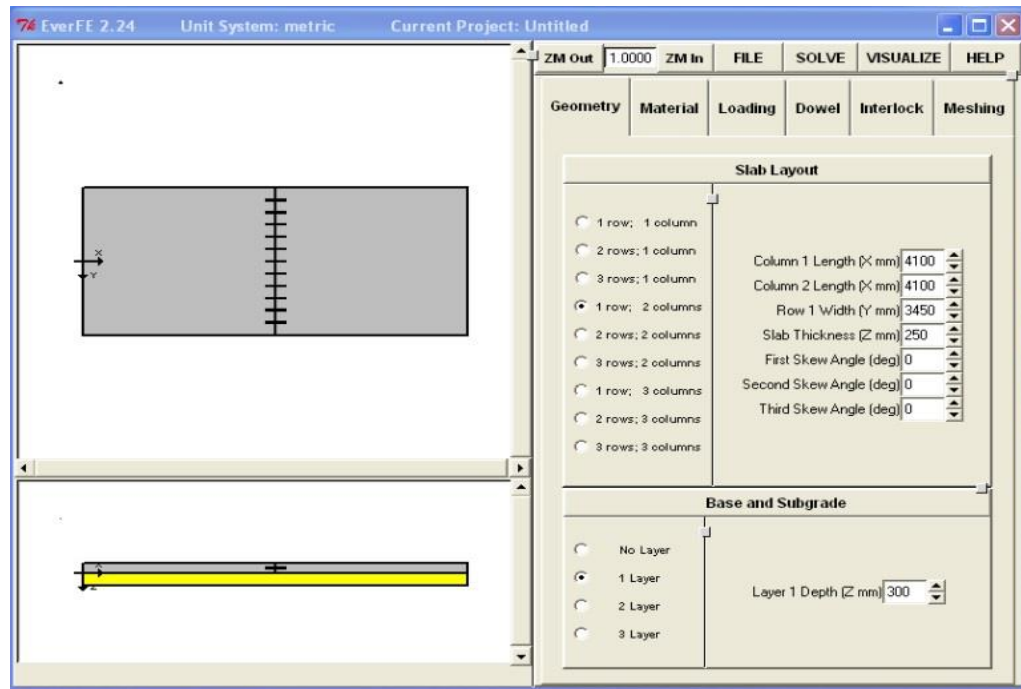


Figura 12. Losa Dimensión 4.1m x 3.45m



- **Tipo de carga y posición de la carga:**

Se utilizó un camión tipo C2 de dos ejes sencillos, con una longitud total de 10.40 m, una distancia entre ejes de 8.1m y un ancho de eje de 2.5m. La carga total del camión es de 16.000kg  $\pm$  400kg o dos ejes equivalentes de 8.2 Ton(80KN). Los ejes se distribuyeron a lo largo de las dos losas y se utilizaron dos hipótesis de carga: la primera cuando los dos ejes se encuentran en el medio de las dos losas y la segunda cuando los dos ejes se encuentran al borde de las dos losas.

- **Temperatura:**

Se utilizaron variaciones de temperatura para la modelación entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$ .

Figura 13. Variación de temperatura entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$

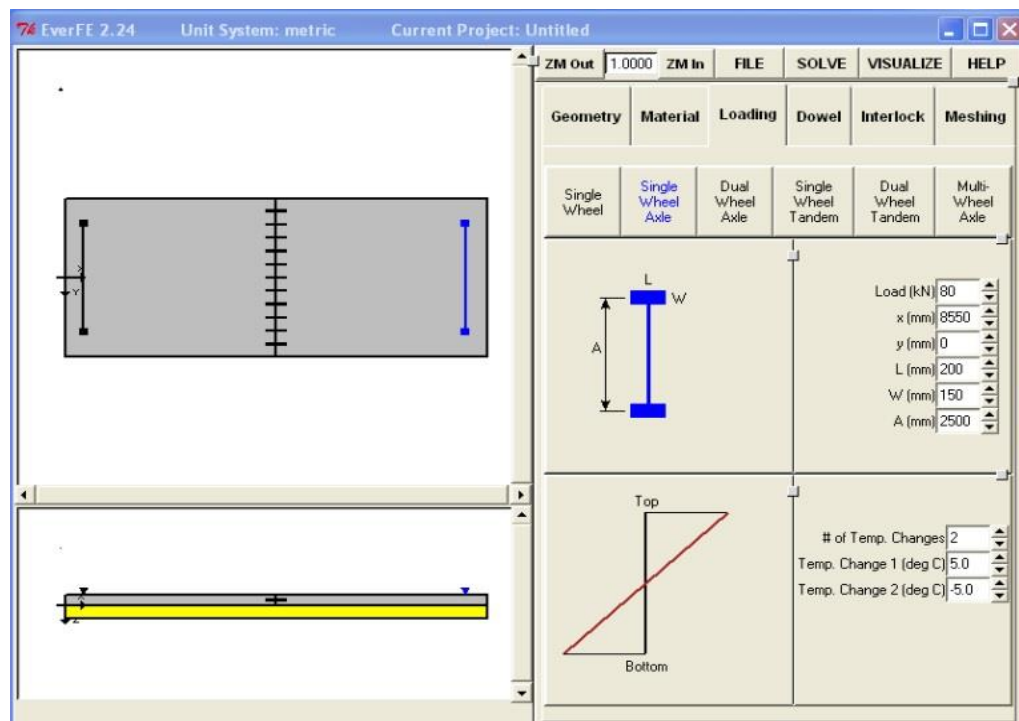


Figura 14. Variación de temperatura entre 5°C y 15°C

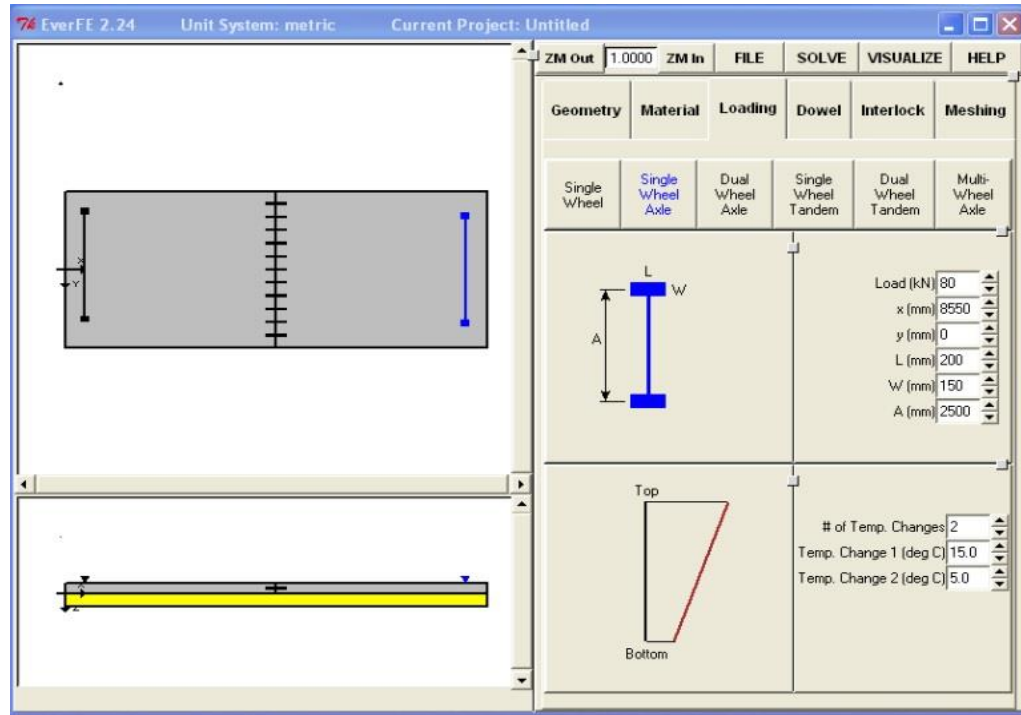
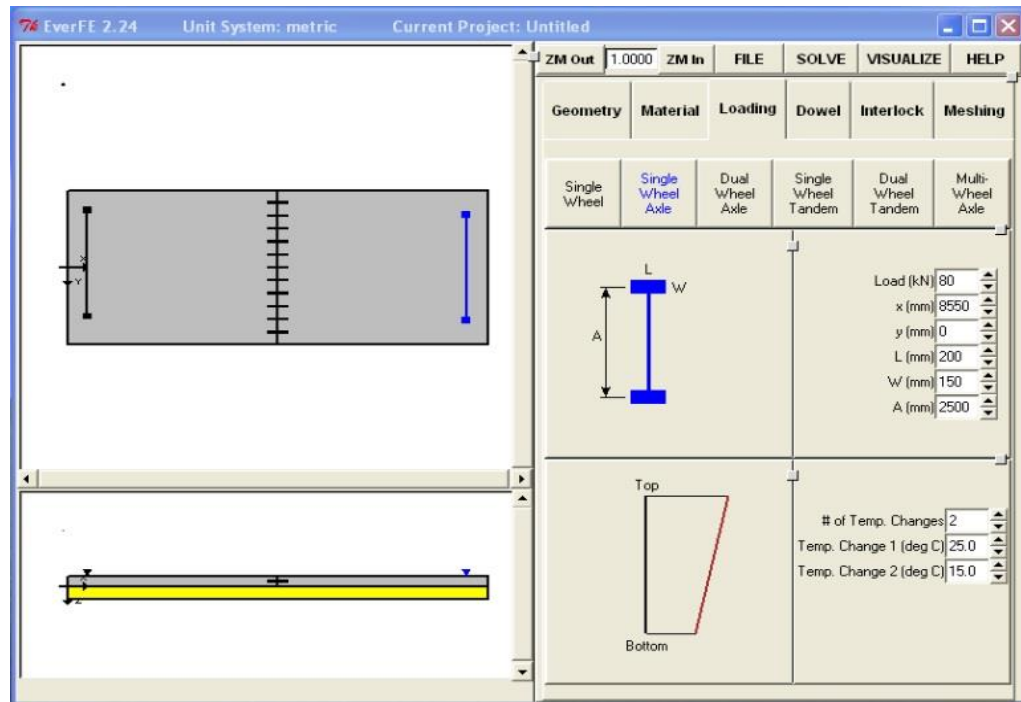


Figura 15. Variación de temperatura entre 15°C y 25°C

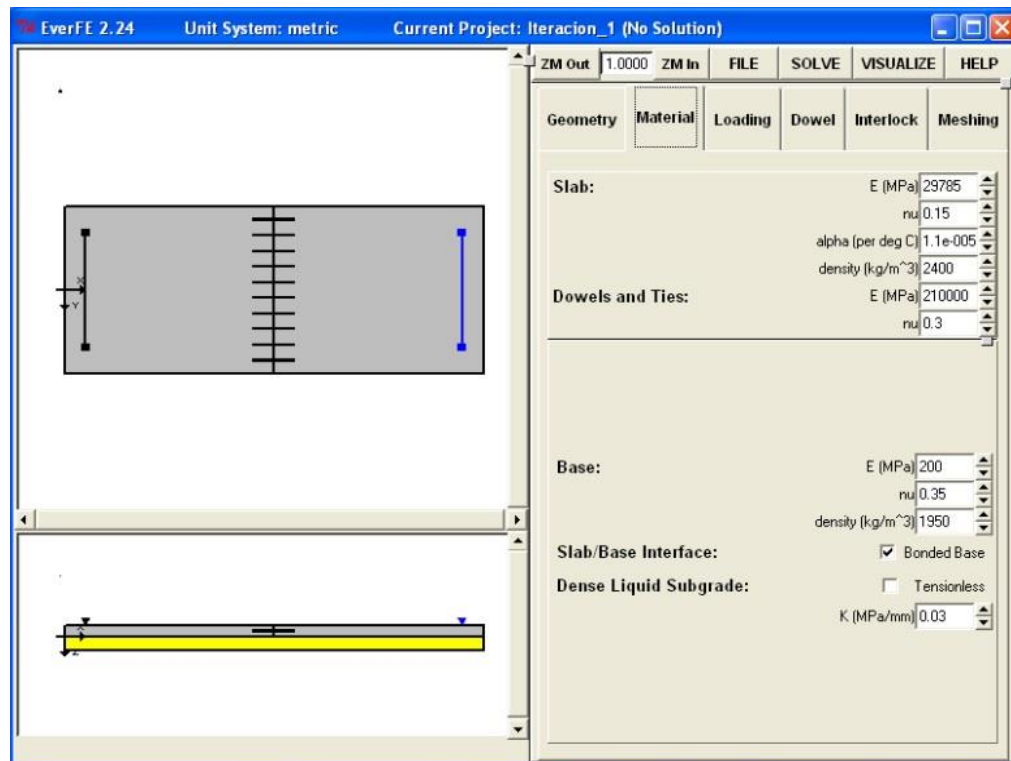


- **Características de los materiales:**

Para la modelación se utilizaron materiales con las siguientes características físico-mecánicas:

- Concreto Hidráulico MR 45, Módulo de Elasticidad=29.785 MPa,  $\mu=0.15$ , Densidad=2400 kg/m<sup>3</sup>.
- Dovelas=Modulo de Elasticidad 210.000 MPa,  $\mu$  0.3.
- Base Granular: Módulo de Elasticidad =200 MPa,  $\mu=0.35$ , Densidad=1950Kg/m<sup>3</sup>.

Figura 16. Características físico-mecánicas de los materiales



- **Parámetros de la Dovela:**

Se utilizaron dovelas o pasajuntas de acero liso de diámetro  $\varnothing=1\frac{1}{4}$ " (32mm), longitud de 460mm y espaciamiento entre dovelas de 300mm de acuerdo a la tabla de la PCA.



Para todas las modelaciones se utilizaron 10 dovelas con las características anteriormente descritas.

*Tabla 1 - Tabla manual de diseño Portland Cement Association (PCA - 1984)*

Espesor de la Losa (mm)	Dimensiones de las Pasajuntas (mm)		
	Diámetro	Largo	Separación
125 a 150	19	410	300
150 a 200	25	460	300
200 a 300	32	460	300
300 a 430	38	510	380
430 a 500	45	560	460

- **Resultados:**

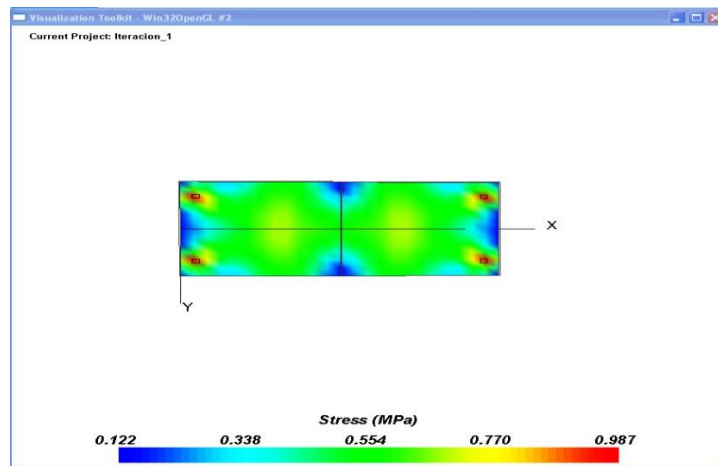
Se realizaron 36 modelaciones involucrando todos los parámetros y variables anteriormente mencionadas y evaluando los esfuerzos principales en la base de las losas de concreto para observar la variación de estos con los diferentes gradientes de temperatura.

## 7. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados de los esfuerzos obtenidos en la base de las losas mediante las modelaciones realizadas en el programa EverFE 2.24:

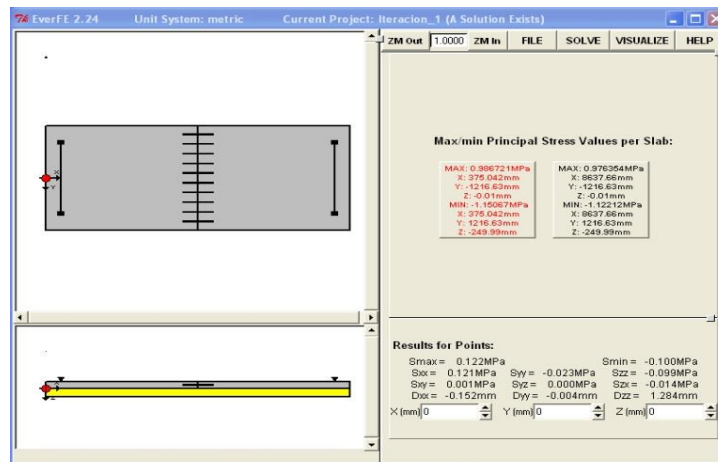
En la figura 17 se muestra el gráfico de colores con los esfuerzos máximos principales arrojados por el programa para el modelo planteado.

Figura 17. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}$



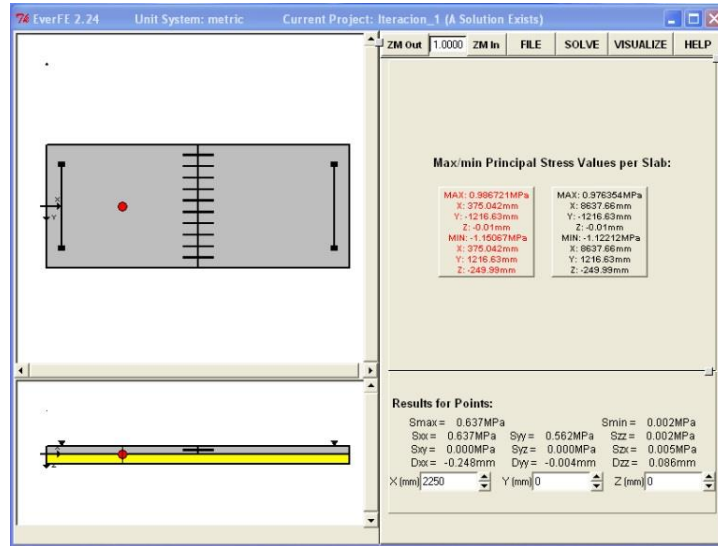
En la figura 18 se muestra el esfuerzo máximo y mínimo en el borde de la losa No 1, así como los esfuerzos en los diferentes planos.

Figura 18. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$



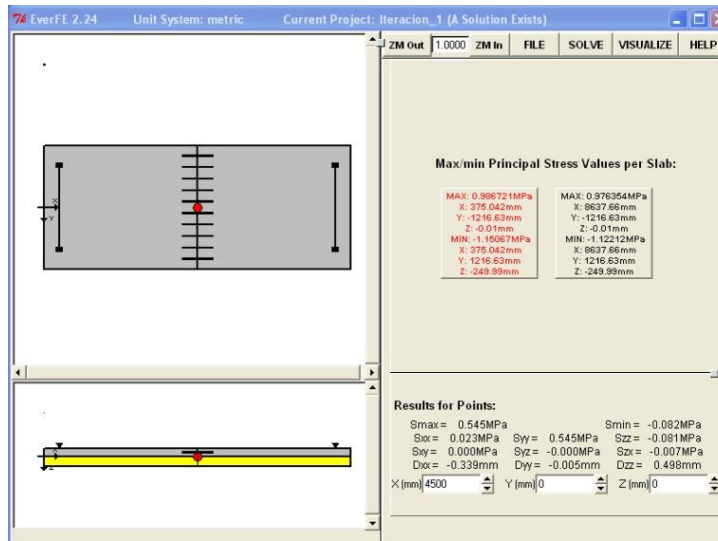
En la figura 19 se muestra el esfuerzo máximo y mínimo en la mitad de la losa No 1, así como los esfuerzos en los diferentes planos.

Figura 19. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura -5°C y 5°C



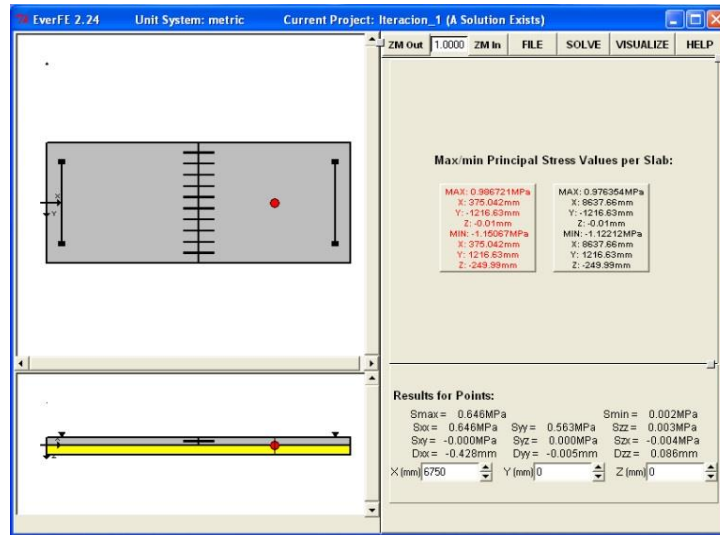
En la figura 20 se muestra el esfuerzo máximo y mínimo en la junta de la losa No 1, así como los esfuerzos en los diferentes planos.

Figura 20. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura -5°C y 5°C



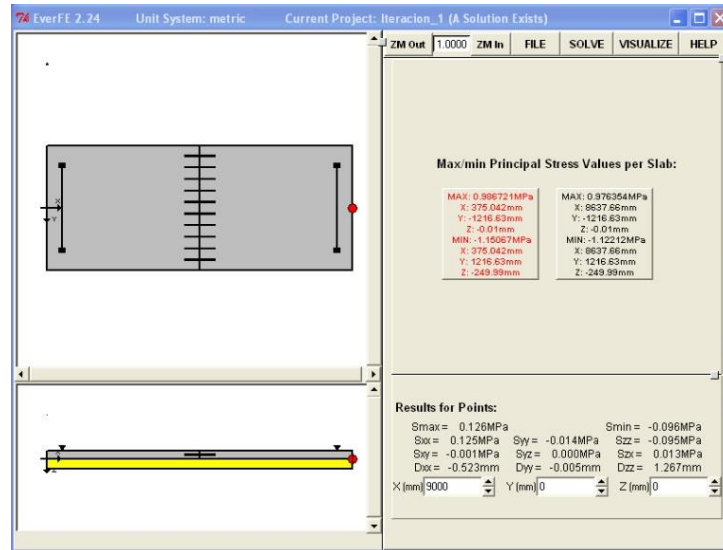
En la figura 21 se muestra el esfuerzo máximo y mínimo en la mitad de la losa No 2, así como los esfuerzos en los diferentes planos.

Figura 21. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura -5°C y 5°C



En la figura 22 se muestra el esfuerzo máximo y mínimo en la esquina de la losa No 2, así como los esfuerzos en los diferentes planos.

Figura 22. Resultados de la modelación losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperatura -5°C y 5°C



En las tablas 2, 3 y 4 se pueden observar los resultados obtenidos mediante las modelaciones realizadas en el programa de elementos finitos para losas de concreto con dimensiones de 4,5m x 3.65m, 4,3m x 3.55m y 4,1m x 3.45m, espesor 0.25m, carga central y gradientes de temperatura entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$ . En estas modelaciones se obtuvieron los esfuerzos máximos y mínimos evaluados en la base de la losa y en diferentes posiciones tales como borde losa No 1, mitad losa No 1, junta losa No 1, mitad losa No 2 y esquina losa No 2. El esfuerzo máximo principal fue de un 1.32 MPa en la losa de 4.1m x 3.45m y gradiente de temperatura entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$ , de igual manera se observa que en las posiciones evaluadas los esfuerzos máximos tienden a presentarse en la mitad de las losas No 1 y No 2.

Tabla 2-Valores de esfuerzos losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.25m, temperaturas  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$

Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: $-5^{\circ}\text{C}$ y $5^{\circ}\text{C}$												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.987	0.122	0.122	-0.100	0.637	0.002	0.545	-0.082	0.646	0.002	0.126	-0.096
Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: $5^{\circ}\text{C}$ y $15^{\circ}\text{C}$												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.787	-0.0241	0.049	-0.194	0.502	0.003	0.323	-0.245	0.515	0.003	0.026	-0.193
Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: $15^{\circ}\text{C}$ y $25^{\circ}\text{C}$												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.582	-0.0469	0.076	-0.348	0.359	0.004	0.100	-0.502	0.384	0.004	-0.016	-0.372

Tabla 3-Valores de esfuerzos losas 4,3m x 3.55m, carga central, espesor 0.25m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C

Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: -5°C y 5°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	1.03	0.118	0.139	-0.201	0.513	0.002	0.519	-0.081	0.514	0.002	0.139	-0.189
Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: 5°C y 15°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.854	-0.0249	0.053	-0.380	0.307	0.003	0.294	-0.243	0.320	0.003	0.039	-0.372
Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: 15°C y 25°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.673	-0.0472	0.065	-0.541	0.156	0.004	0.069	-0.501	0.183	0.004	-0.023	-0.555

Tabla 4-Valores de esfuerzos losas 4,1m x 3.45m, carga central, espesor 0.25m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C

Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: -5°C y 5°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	1.39	0.00910	0.160	-0.385	0.464	0.001	0.501	-0.079	0.465	0.001	0.154	-0.373
Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: 5°C y 15°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	1.22	-0.0223	0.061	-0.571	0.252	0.002	0.271	-0.236	0.254	0.002	0.057	-0.559
Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: 15°C y 25°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	1.04	-0.0421	0.055	-0.738	0.041	0.062	0.044	-0.494	0.042	-0.041	-0.025	-0.745

En las tablas 5, 6 y 7 se pueden observar los resultados obtenidos mediante las modelaciones realizadas en el programa de elementos finitos para losas de concreto con dimensiones de 4,5m x 3.65m, 4,3m x 3.55m y 4,1m x 3.45m, espesor 0.25m, carga borde y gradientes de temperatura entre -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C. En estas modelaciones se obtuvieron los esfuerzos máximos y mínimos evaluados en la base de la losa y en diferentes posiciones tales como borde losa No 1, mitad losa No 1, junta losa No 1, mitad losa No 2 y esquina losa No 2. El esfuerzo máximo principal fue de un 1.74 MPa en la losa de 4.1m x 3.45m y gradiente de temperatura entre -5°C y 5°C, de igual manera se observa que en las posiciones evaluadas los esfuerzos máximos tienden a presentarse en la mitad de las losas No 1 y No 2, siendo estos muy similares en magnitud y con variaciones menores al 10% entre ellos.

Tabla 5-Valores de esfuerzos losas 4,5m x 3.65m, carga borde, espesor 0.25m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C

Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: -5°C y 5°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	1.14	0.114	0.114	-0.106	0.672	0.002	0.541	-0.082	0.678	0.002	0.125	-0.098
Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: 5°C y 15°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.941	-0.0304	0.048	-0.146	0.521	0.003	0.319	-0.242	0.532	0.003	0.028	-0.146
Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: 15°C y 25°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.773	-0.0603	0.074	-0.299	0.372	0.004	0.101	-0.494	0.396	0.004	-0.018	-0.324

Tabla 6-Valores de esfuerzos losas 4,3m x 3.55m, carga borde, espesor 0.25m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C

Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: -5°C y 5°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	1.27	0.116	0.133	-0.159	0.556	0.002	0.516	-0.082	0.559	0.002	0.138	-0.145
Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: 5°C y 15°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	1.09	-0.0276	0.051	-0.330	0.375	0.003	0.290	-0.241	0.382	0.003	0.038	-0.323
Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: 15°C y 25°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.898	-0.0460	0.063	-0.491	0.197	0.003	0.068	-0.495	0.217	0.003	-0.023	-0.506

Tabla 7-Valores de esfuerzos losas 4,1m x 3.45m, carga borde, espesor 0.25m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C

Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: -5°C y 5°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	1.74	0.00636	0.155	-0.344	0.484	0.001	0.495	-0.080	0.486	0.001	0.155	-0.329
Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: 5°C y 15°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	1.56	-0.0244	0.060	-0.524	0.279	0.001	0.266	-0.233	0.282	0.002	0.057	-0.512
Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,25m												
Temperatura: 15°C y 25°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	1.37	-0.0408	0.049	-0.691	0.073	-0.108	0.035	-0.503	0.081	-0.090	-0.031	-0.698



En las tablas 8, 9 y 10 se pueden observar los resultados obtenidos mediante las modelaciones realizadas en el programa de elementos finitos para losas de concreto con dimensiones de 4,5m x 3.65m, 4,3m x 3.55m y 4,1m x 3.45m, espesor 0.30m, carga central y gradientes de temperatura entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$ . En estas modelaciones se obtuvieron los esfuerzos máximos y mínimos evaluados en la base de la losa y en diferentes posiciones tales como borde losa No 1, mitad losa No 1, junta losa No 1, mitad losa No 2 y esquina losa No 2. El esfuerzo máximo principal fue de 0.946 MPa en la losa de 4.1m x 3.45m y gradiente de temperatura entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$ , de igual manera se observa que en las losas con dimensiones de 4,5m x 3.65m, 4,3m x 3.55m y 4,1m x 3.45m y gradiente de temperatura entre  $15^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$  el esfuerzo máximo tiende a presentarse en el borde de la losa No 1.

Tabla 8-Valores de esfuerzos losas 4,5m x 3.65m, carga central, espesor 0.30m, temperaturas  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$

Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: $-5^{\circ}\text{C}$ y $5^{\circ}\text{C}$												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.684	0.0717	0.072	-0.131	0.43	0.001	0.381	-0.078	0.429	0.001	0.109	-0.097
Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: $5^{\circ}\text{C}$ y $15^{\circ}\text{C}$												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.517	-0.0224	0.043	-0.185	0.294	0.001	0.187	-0.207	0.306	0.001	0.022	-0.184
Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: $15^{\circ}\text{C}$ y $25^{\circ}\text{C}$												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.353	-0.0511	0.076	-0.326	0.158	0.002	-0.001	-0.424	0.183	0.002	-0.014	-0.339

Tabla 9-Valores de esfuerzos losas 4,3m x 3.55m, carga central, espesor 0.30m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C

Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: -5°C y 5°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.722	0.0838	0.084	-0.168	0.349	-0.001	0.367	-0.076	0.350	-0.001	0.120	-0.151
Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: 5°C y 15°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.576	-0.0205	0.047	-0.313	0.170	0.001	0.172	-0.197	0.171	0.001	0.033	-0.308
Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: 15°C y 25°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.430	-0.0488	0.067	-0.458	0.005	-0.011	0.003	-0.417	0.020	-0.009	-0.018	-0.465

Tabla 10-Valores de esfuerzos losas 4,1m x 3.45m, carga central, espesor 0.30m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C

Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: -5°C y 5°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.946	-0.0120	0.098	-0.294	0.313	-0.001	0.356	-0.072	0.314	-0.001	0.130	-0.277
Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: 5°C y 15°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.805	-0.0195	0.052	-0.433	0.132	-0.035	0.159	-0.182	0.133	-0.028	0.046	-0.436
Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Central												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: 15°C y 25°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.663	-0.0475	0.058	-0.592	0.001	-0.179	0.011	-0.406	0.001	-0.155	-0.021	-0.595

En las tablas 11, 12 y 13 se pueden observar los resultados obtenidos mediante las modelaciones realizadas en el programa de elementos finitos para losas de concreto con dimensiones de 4,5m x 3.65m, 4,3m x 3.55m y 4,1m x 3.45m, espesor de losa 0.30m, carga de borde y gradientes de temperatura entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$ . En estas modelaciones se obtuvieron los esfuerzos máximos y mínimos evaluados en la base de la losa y en diferentes posiciones tales como borde losa No 1, mitad losa No 1, junta losa No 1, mitad losa No 2 y esquina losa No 2. El esfuerzo máximo principal fue de un 1.15 MPa en la losa de 4.1m x 3.45m y gradiente de temperatura entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$ , de igual manera se observa que en las posiciones evaluadas los esfuerzos máximos tienden a presentarse en la mitad de las losas No 1 y No 2, sin embargo, en la losa de 4.1m x 3.45m y gradiente de temperatura entre  $15^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$  el esfuerzo máximo se presenta en el borde de la losa No 1.

*Tabla 11-Valores de esfuerzos losas 4,5m x 3.65m, carga borde, espesor 0.30m, temperaturas  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}$*

Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: $-5^{\circ}\text{C}$ y $5^{\circ}\text{C}$												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.782	0.093	0.100	-0.106	0.468	0.001	0.377	-0.077	0.472	0.001	0.109	-0.098
Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: $5^{\circ}\text{C}$ y $15^{\circ}\text{C}$												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.616	-0.0264	0.042	-0.153	0.324	0.001	0.185	-0.205	0.333	0.001	0.025	-0.154
Losa 4,5m X 3,65m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: $15^{\circ}\text{C}$ y $25^{\circ}\text{C}$												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1(Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.510	-0.0496	0.070	-0.294	0.184	-0.005	0.006	-0.421	0.204	-0.002	-0.015	-0.309

Tabla 12-Valores de esfuerzos losas 4,3m x 3.55m, carga borde, espesor 0.30m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C

Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: -5°C y 5°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.876	-0.0932	0.114	-0.132	0.385	-0.001	0.363	-0.074	0.388	-0.001	0.119	-0.123
Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: 5°C y 15°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.723	-0.0231	0.045	-0.280	0.219	0.001	0.170	-0.192	0.223	0.001	0.032	-0.275
Losas 4,3m X 3,55m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: 15°C y 25°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.565	-0.0498	0.062	-0.425	0.060	-0.088	0.007	-0.416	0.073	-0.075	-0.019	-0.432

Tabla 13-Valores de esfuerzos losas 4,1m x 3.45m, carga borde, espesor 0.30m, temperaturas -5°C y 5°C, 5°C y 15°C y 15°C y 25°C

Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: -5°C y 5°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	1.15	0.0134	0.130	-0.256	0.333	-0.001	0.351	-0.072	0.335	-0.001	0.131	-0.247
Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: 5°C y 15°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.995	-0.0209	0.052	-0.411	0.155	-0.070	0.155	-0.182	0.157	-0.061	0.046	-0.404
Losas 4,1m X 3,45m												
Carga Borde												
Espesor de la Losa: 0,30m												
Temperatura: 15°C y 25°C												
	Esfuerzos Principales (Mpa)		Esfuerzos Borde Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Junta Losa 1 (Mpa)		Esfuerzos Mitad Losa 2 (Mpa)		Esfuerzos Esquina Losa 2 (Mpa)	
	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin
Base de la Losa	0.837	-0.0464	0.051	-0.560	0.001	-0.221	0.013	-0.404	0.002	-0.202	-0.027	-0.562

En las figuras 23,24 y 25 puede observarse que los mayores esfuerzos máximos principales se presentan en las losas con dimensiones de 4.1m x 3.45m con carga borde y espesor de 0.25m con gradiente entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}=1.74$  MPa, gradiente entre  $5^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}=1.56$  MPa y gradiente entre  $15^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}=1.37$  Mpa y los menores esfuerzos máximos principales se presentan en las losas con dimensiones de 4.5m x 3.65m con carga central y espesor de 0.30m con gradiente entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}=0.684$  MPa, gradiente entre  $5^{\circ}\text{C}$  y  $15^{\circ}\text{C}=0.517$  MPa y gradiente entre  $15^{\circ}\text{C}$  y  $25^{\circ}\text{C}=0.353$  Mpa.

También se observa que en todas las modelaciones realizadas los esfuerzos máximos principales disminuyen a medida que los gradientes de temperatura aumentan, de igual forma al comparar losas con el mismo espesor, el mismo gradiente de temperatura, la misma posición de la carga y diferentes dimensiones de la losa, se observa que a medida que el área disminuye el esfuerzo máximo aumenta en todas las modelaciones.

En cuanto a los espesores de las losas se observa claramente que los esfuerzos máximos principales son menores en las losas que tienen espesor de 0.30m, que en las que tienen espesor de 0.25m.

Figura 23 Variación del esfuerzo dependiendo la temperatura gradiente -5°C y 5°C

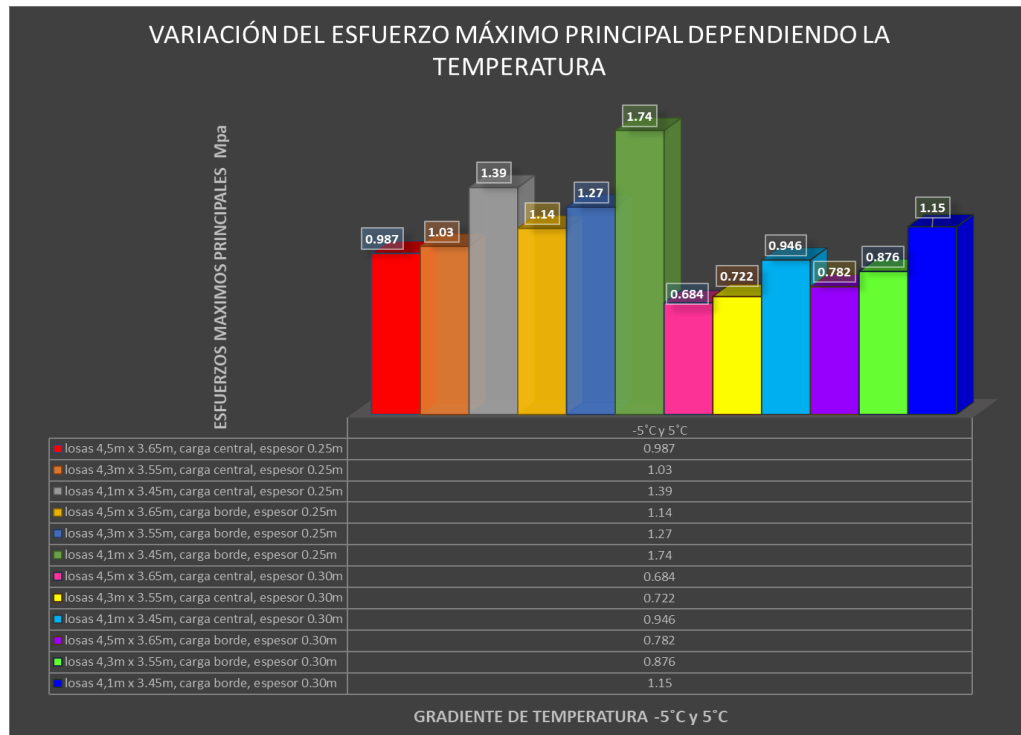


Figura 24 Variación del esfuerzo dependiendo la temperatura gradiente 5°C y 15°C

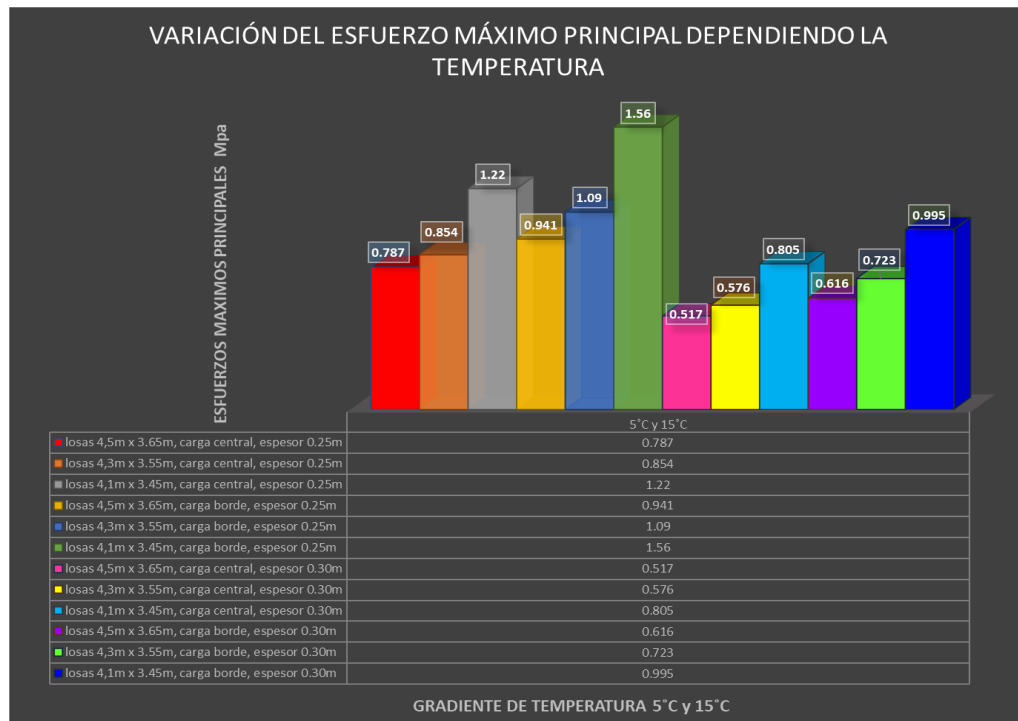
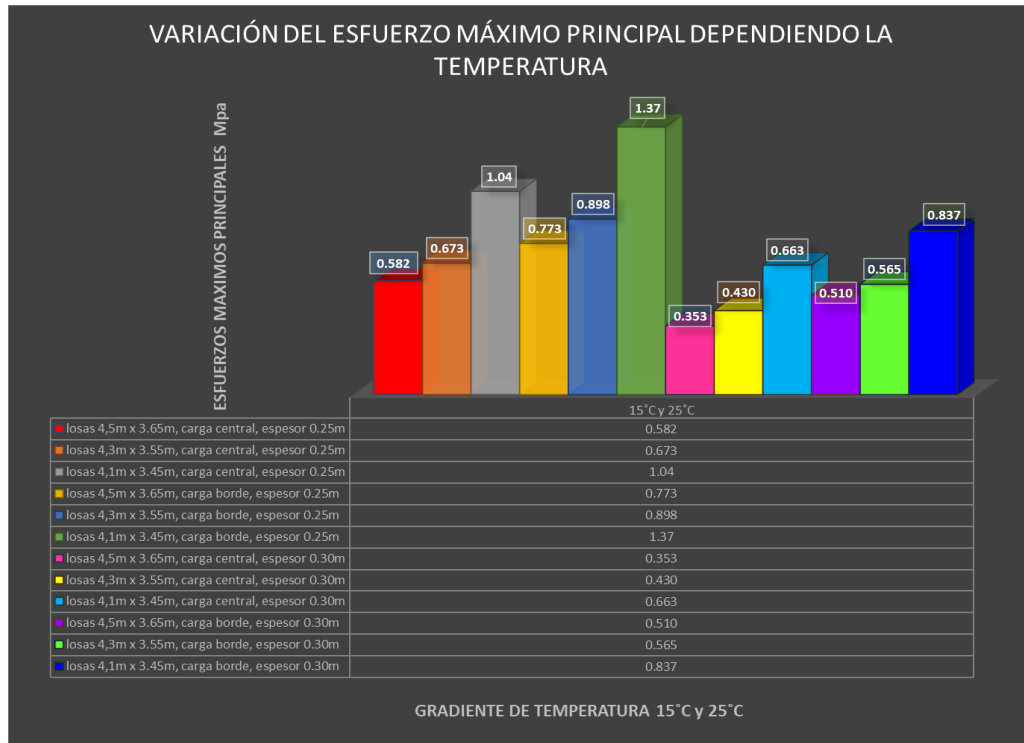


Figura 25 Variación del esfuerzo dependiendo la temperatura gradiente 15°C y 25°C



## 8. CONCLUSIONES

- ❖ De acuerdo a las 36 modelaciones que se realizaron con el programa EverFE 2.24, se pudo observar que a medida que aumenta el gradiente de temperatura los esfuerzos máximos principales en la base de las losas disminuyen.
- ❖ De igual manera se pudo observar que los esfuerzos máximos en los puntos que se evaluaron borde losa No 1, mitad losa No 1, junta losa No 1, mitad losa No 2, esquina losa No 2 disminuyen de igual forma cuando los gradientes de temperatura aumentan.
- ❖ En todas las modelaciones realizadas se observó que los esfuerzos mínimos tienden a cero, tanto los principales, como los evaluados en los diferentes puntos del modelo.
- ❖ El esfuerzo máximo principal en todas las modelaciones fue de 1.74 MPa en el gradiente de temperatura  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $5^{\circ}\text{C}$  en las losas de 4,1m x 3.45m, carga de borde y espesor 0.25m.
- ❖ Al comparar los esfuerzos máximos en losas con diferentes espesores y bajo la misma geometría, las mismas posiciones de la carga y los mismos gradientes de temperatura, se puede concluir que los esfuerzos son menores en las losas con mayor espesor, ya que para el análisis de esfuerzos planteado por Westergaard, el espesor de la losa es un parámetro crítico en la variación de los esfuerzos en la base de esta.
- ❖ La geometría de las losas es un factor a tener en cuenta en la variación de los esfuerzos, ya que, de acuerdo a los resultados obtenidos mediante las modelaciones realizadas, se pudo observar que cuando las dimensiones de las losas disminuyen el esfuerzo máximo aumenta.
- ❖ Las variaciones en los esfuerzos producidos en las losas por los diferentes gradientes de temperatura, se deben tener en cuenta durante el diseño, ya que se podrían estar diseñando los pavimentos para esfuerzos menores a los realmente requeridos, afectando la duración de estos y por ende su vida útil.
- ❖ La importancia del software de elementos finitos EverFE 2.24 para modelación de losas de concreto, radica en que se pueden simular diferentes condiciones y variables para determinar los esfuerzos en cualquier punto de la losa tanto en el eje X, Y y Z.



## BIBLIOGRAFÍA

- Angel Ramos, L. S., & Prieto Peña, M. M. (2014). Modelación Numerica de Pisos Industriales Considerando la Variabilidad en la Solicitud de Cargas. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.
- Botia Rodriguez, L. M., & Rodriguez Fonseca, A. Y. (2014). Modelación Numerica de Barras de Transferencia en Pisos Industriales de Concreto Rígido. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia .
- Hernandez Lopez , F. M., Tejada Piusseaut , E., Recarey Morfa , C. A., & Camapum de Carvalho , J. (2017). Modelo Numerico para Estimar el Módulo Efectivo del Soporte de un Pavimento Rígido. Revista Cubana de Ingenieria - Vol. VIII, 7.
- Ioannides, A. M. (1997). Pavement Fatigue Concept: A Historical View . Pardue University, West Lafayette : 6th International Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance Vol. 3.
- Londoño, C. (Diciembre de 2013). Blog 360° en Concreto . Obtención de Esfuerzos Termicos en Pavimentos de Concreto : <http://blog.360gradosenconcreto.com/esfuerzos-termicos-en-pavimentos-de-concreto/>
- Pallares Muñoz , M. R., & Pulecio Diaz , J. A. (2017). Aplicabilidad del Método de los Elementos Finitos en el Análisis y Dimensionamiento de Losas JCPC para Carreteras de Dos Carriles . Universidad Sur Colombiana de Neiva.
- Titus-Glover, L., Mallela, J., Darter, M., Voigt , G., & Waalkes , S. (2005). Enhanced Portland Cement Concrete Fatigue Model for StreetPave. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board .
- Uribe , J. G. (Marzo de 2014). Argos - Grandes Realidades. Obtenido de La Verdadera Revolución de las Vías 4G: Pavimentos en Concreto : <http://grandesrealidades.argos.co/la-verdadera-revolucion-de-las-vias-4g-pavimentos-en-concreto/>
- Vasquez Varela, L. R., & Vidal Londoño, L. (2013). Modelacion Numerica del Efecto de la Desviacion de las Dovelas en Losas de Pavimento Rigido. Bogota D.C.: Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales.
- Sánchez Sabogal, F. Módulo 3. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos [en línea]. Bogotá: Escuela de Ingenieros [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos.pdf)
- Argos concreto. [En línea]. Colombia. [Consulta: 14 de noviembre, 2018]. Disponible en Internet: <URL:<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/esfuerzos-termicos-en-pavimentos-de-concreto>>.