

**MODELACIÓN NUMÉRICA DE PISOS INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA  
VARIABILIDAD EN LA SOLICITACIÓN DE CARGAS**

**LIZ STEPHANNY ÁNGEL RAMOS  
MARIA MÓNICA PRIETO PEÑA**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
ALTERNATIVA TRABAJO DE GRADO  
BOGOTÁ  
2014**

**MODELACIÓN NUMÉRICA DE PISOS INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA  
VARIABILIDAD EN LA SOLICITACIÓN DE CARGAS**

**LIZ STEPHANNY ÁNGEL RAMOS  
MARIA MÓNICA PRIETO PEÑA**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director  
Juan Carlos Ruge Cárdenas  
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
ALTERNATIVA TRABAJO DE GRADO  
BOGOTÁ  
2014**



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

Este es un resumen legible por humanos (y no un sustituto) de la [licencia](#).

[Advertencia](#)

### Usted es libre para:



Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

El licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — You must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.



**No Comercial** — Usted no puede hacer uso del material con fines comerciales.



**Sin Derivar** — Si usted mezcla, transforma o crea nuevo material a partir de esta obra, usted no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — Usted no puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Aviso:

Usted no tiene que cumplir con la licencia para los materiales en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se entregan garantías. La licencia podría no entregarle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como relativos a publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

Nota de aceptación

---

---

---

---

Director de Investigación  
Ing. Juan Carlos Ruge Cárdenas

---

Asesor Metodológico  
Ing. Saieth Cháves Pabón

---

Jurado

Bogotá, 2 diciembre, 2014

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	9
1. GENERALIDADES	10
1.1 ANTECEDENTES	10
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.2.1 Descripción del Problema	10
1.2.2 Formulación del Problema	10
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 Objetivo General	11
1.3.2 Objetivos Específicos	11
1.4 JUSTIFICACIÓN	11
1.5 DELIMITACIÓN	11
1.5.1 Espacio	11
1.5.2 Tiempo	11
1.6 CONTENIDO	12
1.7 ALCANCE	12
2. MARCO REFERENCIAL	13
2.1 GENERALIDADES PISOS EN CONCRETO	13
2.1.1 Tipos de Pisos en Concreto	13
2.2 ESTRUCTURA DE UN PISO EN CONCRETO	16
2.2.1 Subrasante	16
2.2.1 Subbases	16
2.3 DISEÑO DEL ESPESOR DE LA LOSA	17
2.3.1 Tipología de la Carga	18
2.4 ESFUERZOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS	23
2.4.1 Esfuerzos Producidos por Cambios de Temperatura	23
2.4.1.1 Alabeo por Gradiente Térmico	23
2.4.2 Contracción Durante el Fraguado.	25
2.4.3 Expansión y Contracción por Cambios Uniformes de Temperatura.	26
2.4.4 Cambios de Humedad	27
2.4.5 Cargas de Tránsito	27
3. DISEÑO METODOLÓGICO	29
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	29
3.1.1 Características del Programa	29
3.1.2 Variables	30
3.1.3 Resultados	32
3.2 PARÁMETROS	33
3.2.1 Fijos	33
3.2.2 Variables	34

	pág.
4. RESULTADOS	35
5. CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	43

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Condiciones de Carga que controlan el diseño del espesor de un piso (ACI 360R-10)	21
Figura 2. Carga a Piso de Pallets y de Rollos de Alambre	21
Figura 3. Cargas a Piso y de Estantería (“racks”).	22
Figura 4. Equipo de Levante con Ruedas de Poliuretano	22
Figura 5. Alabeo de las Losas de los Pavimentos de Concreto	24
Figura 6. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos	26
Figura 7. Alabeo por Cambio de Humedad	27
Figura 8. Interface de EverFe Donde se Especifican los Parámetros Relacionados con la Geometría	30
Figura 9. Interface de EverFe donde se definen las características del concreto y la base.	30
Figura 10. Interface de EverFe en la que se Permite Modificar lo Referente a los Pasadores o Dovelas.	31
Figura 11. Interface de EverFe para Asignar Cargas	31
Figura 12. Ejemplo de la Visualización de los Esfuerzo Presentes en un Sistema a Través del Mapa de Colores	32
Figura 13. Ejemplo de la Visualización de los Esfuerzo Presentes en un Sistema en Puntos Específicos y Valores más Exactos.	32
Figura 14. Muestra de Cómo se Presenta los Desplazamientos EverFe	33
Figura 15. Esfuerzo Contra Dimensión de Losas con Carga de 100KN	39
Figura 16. Esfuerzo Contra Dimensión de Losas con Carga de 200KN	39
Figura 17. Esfuerzo Contra Dimensión de Losas con Carga de 300KN	40

## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Clasificación de Pisos de Concreto	14
Cuadro 2. Fórmulas de Bradbury	24
Cuadro 3. Fórmulas de Westergaard ( $\mu=0.15$ ).	28
Cuadro 4. Parámetros Fijos en la Ejecución del Programa	33
Cuadro 5. Valores de los Esfuerzos Mínimos y Máximos Obtenidos en las Simulaciones para cada una de las Combinaciones, en Tres Puntos Diferentes	35
Cuadro 6. Resultados Visualizados por Mapa de Colores de los Esfuerzos de los Diferentes Sistemas al Aplicar una Carga de 100KN	36
Cuadro 7. Resultados Visualizados por Mapa de Colores de los Esfuerzos de los Diferentes Sistemas al Aplicar una Carga de 200KN	37
Cuadro 8. Resultados Visualizados por Mapa de Colores de los Esfuerzos de los Diferentes Sistemas al Aplicar una Carga de 200KN	38
Cuadro 9. Resultados de los Desplazamientos Ocurredos en cada Sistema Dependiendo la Carga a la que fue Expuesto	40



## INTRODUCCIÓN

“Los pisos industriales son por lo general estructuras en concreto, las cuales tienen unas características especiales, como su alta planicidad, resistencia mecánica, resistencia química y resistencia al impacto”<sup>1</sup>; al igual deben ser durables y tener un equilibrio entre costos y funcionalidad, ya que estos pisos son diseñados para industrias que no se pueden detener para realizar mantenimientos periódicos, mover equipos especializados o estanterías de almacenamiento de altos volúmenes de mercancía, de aquí la importancia de estos pisos y su durabilidad.

“En la actualidad los pisos industriales se construyen usando fibras sintéticas o metálicas, acero de refuerzo, aditivos reductores de contracción e incluso se utilizan concretos postensados, para disminuir los problemas causados por los diferentes tipos de contracción”<sup>2</sup>.

En el trabajo de investigación propuesto, se mostrará la modelación de los efectos causados a una estructura en pavimento rígido expuesto a diferentes magnitudes de cargas. Esta modelación se realizará por medio de la implementación de un software libre llamado EverFE 2.25.

---

<sup>1</sup> GRACIA, O., QUESADA, G., GÓMEZ, A., SANTACRUZ, A. y ARIAS, L. Estudio de la tecnología de concretos de contracción compensada aplicada a la construcción de pisos industriales, 46-56 [EN LÍNEA] <[http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-28132013000100005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-28132013000100005&script=sci_arttext)>

<sup>2</sup> VIDAUD QUINTANA, Eduardo. Breves apuntes acerca de la construcción de pisos industriales. En: Construcción y Tecnología en Concreto. Julio - Agosto, 2014. vol. 19, no. 7, p. 13

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 ANTECEDENTES

La expansión de las zonas industriales en las principales ciudades capitales de Colombia<sup>3</sup>, ha propulsado la implementación de pisos en pavimento rígido en estas zonas, gracias a sus características de resistencia y durabilidad entre otras.

Lo anterior ha generado la necesidad de examinar alternativas viables para construir pisos industriales más durables y de mejores características y con esto obtener la mejor estructura disminuyendo el número de juntas entre losas de concreto, número de pasadores de transferencia y espesor de la losa, minimizando los problemas que estos parámetros variables pueden presentar en este tipo de pisos por sus diferentes usos.

### 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

**1.2.1 Descripción del Problema.** Los pisos industriales están expuestos a una variedad de cargas como los son las cargas puntuales que se transfieren a través de los soportes de máquinas o estructuras de almacenamiento, cargas uniformemente distribuidas aplicadas directamente sobre la superficie de la losa de concreto y las cargas móviles las cuales serán tomadas en cuenta para desarrollar la investigación propuesta, en las que se citarán vehículos pesados, montacargas y cualquier vehículo con ruedas en contacto con la superficie de la losa. Es notable que las empresas constructoras y los contratistas de pisos industriales busquen a menudo construir un piso industrial con el mejor nivel de especificaciones y la mejor tecnología disponible. Infortunadamente rara vez cuentan con información suficiente para realizar adecuadamente esta función y se ven forzados a estimar cargas de diseño o hacer conjeturas sobre la función prevista de la losa.

Debido a su gran uso en sectores industriales, se ha podido observar que este tipo de pavimento presenta ciertas deflexiones ante la presencia de cargas diversas, en esta investigación se quiere determinar que estructura se comporta de la mejor manera frente a situaciones de carga en sus puntos críticos como lo son las juntas, variando ciertos parámetros de la estructura como dimensiones de losa y espaciamiento de pasadores implementando el software libre EverFe 2.25.

**1.2.2 Formulación del Problema.** ¿Es factible simular numéricamente el comportamiento de pisos industriales aplicando diferentes cargas sobre ellos?.

---

<sup>3</sup> AGENCIA DE NOTICIAS UN. La inevitable expansión de Bogotá hacia el norte [en línea]. Bogotá: Universidad Nacional [citado 14 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.agenciade-noticias.unal.edu.co/ndetalle/article/la-inevitable-expansion-de-bogota-hacia-el-norte.html>>.

## 1.3 OBJETIVOS

**1.3.1 Objetivo General.** Modelar numéricamente el comportamiento de pisos industriales incluyendo variabilidad en las cargas aplicadas.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Recopilar, analizar y comprender la mayor información posible sobre pisos industriales.
- Identificar y Definir el problema que será objeto de la modelación numérica.
- Implementar el software EverFe para obtener las simulaciones necesarias para realizar un correcto análisis.
- Analizar los resultados obtenidos y plasmar conclusiones.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

En un estudio del sector de edificaciones realizado por Davivienda<sup>4</sup> en el año 2012, se evidencia como la construcción de bodegas para uso industrial tuvo un incremento de 34% en tan solo un año.

Considerando el creciente desarrollo económico general del país, se puede advertir que con el establecimiento de nuevas industrias las exigencias de infraestructura civil apta para albergarlas, se acrecientan rápidamente y se hace necesario que esas nuevas construcciones industriales cumplan con los requerimientos actuales de calidad y prestaciones.

## 1.5 DELIMITACIÓN

**1.5.1 Espacio.** La ejecución de este proyecto se realizó en la ciudad de Bogotá Distrito Capital de Colombia.

**1.5.2 Tiempo.** La investigación de este proyecto tuvo una duración de 5 meses, comprendiendo así los meses de julio a noviembre del 2014.

---

<sup>4</sup>BANCO DAVIVIENDA. Informe del sector de edificaciones [en línea]. Bogotá: El Banco [citado 14 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.davivienda.com/wps/wcm/connect/3c9f0838-3406-42f0-a8d6-5c00440fe285/Informe+sector+de+edificaciones+oct12.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=3c9f0838-3406-42f0-a8d6-5c00440fe285>>

## **1.6 CONTENIDO**

El presente documento contiene los resultados y el análisis de las simulaciones realizadas en el software EverFe, correspondientes a los sistemas de losas propuestos sometidos a diferentes cargas.

## **1.7 ALCANCE**

Presentar los resultados obtenidos de la modelación sistemática del diseño estructural de pisos industriales en concreto rígido que fueron arrojados por el software EverFE 2.25, clasificando el tipo de estructura más adecuado para ciertas magnitudes de cargas móviles empleadas habitualmente en el sector de la industria, destacando y haciendo énfasis de las mejores condiciones de una estructura de pavimento rígida que pueda ser competitiva y tenida en cuenta en la actualidad.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 GENERALIDADES PISOS EN CONCRETO

Según el ingeniero James A. Farny, Coordinador de programas, mampostería y productos especiales de la Portland Cement Assosiation en su libro diseño y construcción de pisos en concreto, da las siguientes pautas para generar un piso industrial efectivo, resistente, económico y duradero, desde su fundación a un terminado apropiado:

**2.1.1 Tipos de Pisos en Concreto.** En la actualidad la industria de pisos de concreto ofrece diferentes alternativas dependiendo el uso y la necesidad del proyecto, de esta manera el Instituto Americano del Concreto define nueve clases de pisos teniendo en cuenta el tipo de transito anticipado, el uso, las consideraciones especiales y el acabado final; evidenciados a continuación (véase el Cuadro 1).

**Cuadro 1. Clasificación de Pisos de Concreto**

CLASE	TIPO DE TRÁNSITO PREVISTO	USO	CONSIDERACIONES ESPECIALES	ACABADO FINAL
1. Una Capa	Superficie expuesta. Tránsito peatonal.	Oficinas, iglesias, comerciales, residenciales.  Decorativos	Acabado uniforme, agregado antideslizante en áreas específicas, curado. Agregado mineral de color, pigmentación de color o agregado expuesto, estampada o patrones de incrustaciones, disposición de junta artística, curado	Acabado normal con llana de acero, terminación antideslizante cuando sea necesario.  Cuando sea necesario.
2. Una Capa	Superficie cubierta. Tránsito peatonal.	Oficinas, iglesias, comerciales, residenciales, institucionales con revestimiento de pisos.	Losas planas y a nivel adecuado para la aplicación de revestimientos, curado. Coordinar las juntas con los revestimientos aplicados.	Acabado ligero con llana de acero.
3. Dos Capas	Superficie expuesta o cubierta. Tránsito peatonal o vehicular liviano.	Recubrimiento adherido o no adherido sobre la losa edificios comerciales o no industriales.	Losa Base – tolerancia superficial uniforme, curado. Recubrimiento no adherido – espesor mínimos 75mm, reforzado, curado. Recubrimiento adherido – agregados apropiadamente dimensionados, espesor mínimo 19mm, curado	Losa Base – Acabado con llana bajo cubierta no adherida; limpia superficie texturada bajo cubierta adherida. Cubierta para superficie expuesta, acabado con llana de acero normal. Para superficie cubierta, acabado ligero con llana de acero.
4. Una Capa	Superficie expuesta o cubierta. Tránsito peatonal o vehicular liviano	Institucional o comercial	Losas planas y niveladas adecuadamente para la colocación de revestimientos, agregado antideslizante para áreas específicas, curado. Coordinar las juntas con los revestimientos aplicados	Acabado normal con helicóptero.

**Cuadro 1. (Continuación)**

CLASE	TIPO DE TRÁNSITO PREVISTO	USO	CONSIDERACIONES ESPECIALES	ACABADO FINAL
5. Una Capa	Superficie expuesta. Tránsito vehicular industrial, es decir ruedas neumáticas y ruedas solidas moderadamente blandas.	Plantas industriales para la fabricación, procesamiento y almacenamiento	Sub_rasante uniforme, distribución de juntas, resistencia a la abrasión, curado.	Acabado con helicóptero pesado.
6. Una Capa	Superficie expuesta. Tránsito vehicular industrial pesado e intenso, es decir ruedas rígidas y cargas elevadas de ruedas.	Pisos industriales sometidos a tránsito pesado; puede estar sometido a cargas de impacto.	Sub_rasante uniforme, distribución de juntas, transferencia de cargas, resistencia a la abrasión, curado.	Endurecedor superficial metálico o mineral, acabado superficial con helicóptero pesado.
7. Dos Capas	Superficie expuesta. Tránsito vehicular industrial pesado e intenso, es decir ruedas rígidas y cargas elevadas de ruedas.	Pisos en dos capas adheridas sometidas a tránsito pesado y cargas de impacto.	Losa Base - Sub_rasante uniforme, reforzada, distribución de juntas, nivel superficial, Curado. Recubrimiento agregado mineral o metálico bien graduado, espesor mínimo 19mm. Aplicación de endurecedor superficial de árido mineral o metálico, curado.	Limpio, superficie de losa de base texturizada adecuada para la colocación del recubrimiento adherido. Acabado con helicóptero pesado.
8. Dos Capas	Al igual que en las clases 4, 5 o 6	Recubrimiento no adherido en pisos nuevos o existentes.	Antiadherente en la losa base, espesor mínimo de 100mm, resistencia a la abrasión, curado.	Al igual que en las clases 4, 5 o 6
9. Una Capa o Recubrimiento	Superficie expuesta – pisos superplanos requerimientos de tolerancia superficial críticos. Vehículos especiales para el transporte de elementos o materiales o tolerancias específicas que requieren los equipos de robótica.	Pisos estrechos, almacenes de gran altura; estudios de televisión, pistas de patinaje de hielo o gimnasios.	Diversos requerimientos de calidad del hormigón. Procedimientos de aplicación especiales y se recomienda un control exhaustivo a los detalles cuando se utilizan endurecedores. FF 50 o FF 125. Curado Aislar de efectos ambientales.	Hormigonado en franjas de 6m de ancho máximo. Se requiere suministro continuo de hormigón.

Fuente. SALSILLI MURÚA, Ricardo. Manual de diseño de pisos industriales. Santiago de Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón De Chile, 2011. p. 12.

Con el fin de lograr un desempeño óptimo y eficiente de la estructura según James A. Farny en su libro “Diseño y construcción de pisos en concreto” los factores para evaluar el desempeño de un piso son los siguientes:

- Uniformidad de la subrasante y suficiencia de su capacidad de carga.
- Calidad del concreto.
- Pertinencia de la capacidad estructural (essor).
- Nivelación y planicidad de la superficie.
- Deformaciones bajo cargas.
- Transferencia de cargas en las juntas.
- Tipo y espaciamiento de las juntas.
- Mano de obra.
- Tratamientos debajo de la losa (retardad- or de vapor, rompimientos capilares).
- Contenido de humedad del concreto y tasa de secado.
- Acabados especiales de superficie, incluyendo recubrimientos, futuro mantenimiento y reparación.

## **2.2 ESTRUCTURA DE UN PISO EN CONCRETO**

**2.2.1 Subrasante.** La subrasante es el terreno natural, emparejado y compactado, sobre el cual se construye el piso. La subrasante puede mejorarse por medio del drenaje, compactación, o estabilización del suelo. En casos de un suelo extremadamente pobre, la remoción y el reemplazo de la subrasante con un material compatible puede ser la mejor opción. El soporte de la subrasante debe ser razonablemente uniforme, sin cambios abruptos de duro a blando, y la porción de más arriba de la subrasante debe ser de un material y una densidad uniforme. Debido a que las losas de pisos en concreto son rígidas, las cargas concentradas de las ruedas de los montacargas o las patas de estantes altos se distribuyen sobre áreas grandes, y las presiones en la subrasante usualmente son bajas. Por lo tanto, los pisos de concreto no necesariamente requieren un soporte resistente de la subrasante. Sin embargo, el soporte que proviene de la subrasante y/o subbase contribuye a un soporte sólido de la orilla, lo cual es benéfico en las juntas de losa expuestas a cargas pesadas de los carros montacargas. Si el soporte de la subrasante o la subbase es débil, puede ocurrir densificación a medida que cargas pesadas pasan por el piso, conduciendo a la pérdida de soporte en la orilla de la losa. En algunos casos, las presiones transmitidas a los suelos de la subrasante pueden ser significativas.

**2.2.1 Subbases.** Una subbase – capa de material granular colocada en la parte superior de la subrasante – no es obligatoria para pisos sobre terreno. Sin embargo, una subbase granular puede proporcionar beneficios durante el proceso de construcción y después (al piso terminado).

Durante la construcción, la subbase funciona como una plataforma de trabajo estable para equipo pesado. Cuando las operaciones de nivelación y compactación



no producen una subrasante uniforme, una subbase granular proporcionara un colchón para un soporte de losa más uniforme emparejando los defectos menores de la subrasante.

Una subbase también sirve como rompimiento capilar, reduciendo la migración de humedad hacia el fondo de la losa terminada. Rara vez es necesaria o económica construir la capacidad de soporte del suelo de apoyo con una subbase gruesa. Puesto que un soporte uniforme, más que un soporte fuerte, es la función más importante del suelo de apoyo y de la subbase para un piso de concreto, de esta manera la resistencia del piso se logra construyendo resistencia dentro de la losa de concreto misma – con el uso óptimo de materiales de bajo costo debajo de la losa.

### **2.3 DISEÑO DEL ESPESOR DE LA LOSA**

Muchas variables influyen directamente o indirectamente en la determinación de los requisitos de espesor para pisos de concreto sobre terreno. Incluirlos todos en un método de diseño sería un procedimiento extremadamente complejo y podría conducir a un exceso de confianza en el diseño como garantía de un buen desempeño del piso. A veces la deficiencia en la mano de obra, más que el diseño o las especificaciones inadecuadas, son la causa de un desempeño no satisfactorio del piso lo que es continua y críticamente apreciado por el usuario, la atención renovada a la construcción de la superficie de la losa y el diseño de juntas apropiado pueden contribuir más a la satisfacción del usuario, que la atención indebida al espesor de la losa misma.

Las losas de concreto simple (las que no tienen acero distribuido o refuerzo estructural) ofrecen ventajas de economía y facilidad de construcción. Reconociendo las obvias similitudes y diferencias entre un pavimento no reforzado y una losa para piso hecha de concreto simple, la teoría de pavimentos se redujo fácilmente a graficas de espesor de diseño fácilmente utilizadas para pisos sobre terreno. El método de diseño fue presentado inicialmente en Diseño del espesor de la losa para pisos industriales de concreto sobre terreno (IS-195) que se aplica también a losas sobre terreno para aéreas de almacenamiento al aire libre y para el manejo de los materiales. Al igual que en el diseño de pavimentos, los factores involucrados al determinar el espesor requerido de la losa para piso incluyen:

- Soporte de apoyo para la capa de apoyo y la subbase.
- Resistencia del concreto.
- Localización y frecuencia de las cargas impuestas.
- Magnitud de la carga, incluyendo cargas de construcción.

El procedimiento de diseño del espesor para pisos sobre terreno, tal como fue publicado previamente por la Portland Cement Association (IS-195), se presenta con algunas modificaciones en el siguiente material.

Las variaciones en las dos propiedades del concreto, el módulo de elasticidad, E, y la relación de Poisson, (u), tienen únicamente un efecto ligero sobre el diseño del espesor. Los valores usados para desarrollar las gráficas de diseño en esta publicación son E=27.6 GPa (4'000.000psi) y (u)=0.15.

Con base en artículos y revistas actualizadas como: Guía de Diseño para Pisos de Concreto, Lineamientos para la construcción de losas del alto desempeño sobre terreno, del autor Euclid Chemical Toxement junto con la revista Manual de Diseño de Pisos Industriales realizada por el Ingeniero Ricardo Salsilli Murua del Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, se puede citar otro aspecto importante como lo es la carga a las cuales están expuestas las losas lo que se encuentra a continuación:

**2.3.1 Tipología de la Carga.** “Los pisos industriales se encuentran sometidos a cargas o solicitaciones en la que se distinguen dos tipos; las provenientes de los sistemas de almacenamiento de la mercadería propiamente tal (carga a piso, cargas de pallets, descarga de pilares de estanterías, etc.) y la de los equipos utilizados para el almacenamiento de las cargas (equipos de levante en general, vehículos motorizados, etc.)”<sup>5</sup>.

En consecuencia los pisos industriales se encuentran sometidos a la acción conjunta de los siguientes tipos de cargas:

- Cargas de rueda de vehículos.
- Cargas concentradas.
- Cargas distribuidas.
- Cargas lineales.
- Cargas de construcción.
- Efectos ambientales.

Por lo anterior, para el diseño de las losas deben analizarse las diferentes condiciones de carga posibles, seleccionándose la más crítica.

Uno de los aspectos más importantes a que se encuentra sometido el profesional al momento de diseñar el pavimento, es que normalmente se desconoce la tipología de carga y configuración (layout) del sistema de almacenamiento de la mercadería, aspecto que hace muy difícil la selección y criterios a adoptar para la selección de las cargas a considerar en el diseño. Uno de los sistemas más comunes del almacenamiento de mercadería es mediante el uso de estanterías o racks los que normalmente son del tipo espalda con espalda y paralelo a la línea o eje de columnas de la bodega. La alineación de las líneas de columnas con frecuencia coincide con juntas de contracción o construcción.

---

<sup>5</sup> SALSILLI MURÚA, Ricardo. Manual de Diseño de Pisos Industriales, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. Santiago de Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón De Chile, 2011. p. 35.

Las cargas distribuidas son las cargas que convencionalmente actúan sobre un área grande del piso. Las cargas son el resultado del material almacenado directamente en el piso dentro del área de almacenamiento.

Normalmente las cargas distribuidas colocadas directamente sobre la losa de hormigón no son lo suficientemente grandes para provocar asentamientos excesivos de subrasantes bien preparadas y compactadas.

Las cargas concentradas son las que normalmente controlan el diseño del piso, pues estas producen esfuerzos a tracción mayores que las cargas distribuidas. La descarga a piso de estanterías individuales varía de 35 a 100 kN. En los depósitos de gran altura las cargas puntuales pueden acercarse a 200 kN.

El diseño del piso, bajo la condición de cargas distribuidas tiene por objetivo prevenir la formación de grietas en los pasillos o áreas no cargadas debidas al momento negativo que se produce en la superficie de la losa<sup>6</sup>.

En la eventualidad que las cargas distribuidas sean muy elevadas, es posible que se requiera la verificación del comportamiento del subsuelo desde el punto de vista geotécnico en el sentido de verificar que como consecuencia de la carga no se producirán asentamientos especialmente de consolidación en el caso de estar frente a suelos arcillosos.

Para el caso de cargas distribuidas con pasillos intermedios, existe el concepto del ancho crítico del pasillo, para el cual se presenta el esfuerzo máximo en la losa. El ancho crítico del pasillo existe cuando el momento actuante máximo debido a la carga de un lado del pasillo, coincide con el punto máximo momento debido a la carga en el otro lado del pasillo, por lo que duplica el momento negativo (tracción en la parte superior de la losa) en el centro del pasillo. Para cualquier otro ancho de pasillo, diferente al crítico, el momento actuante máximo debido a las cargas de cada lado del pasillo no coincide, haciendo que de hecho la carga de un lado contrarreste el esfuerzo causado por la carga en el otro lado.

La capacidad de los equipos de levante por lo general no es superior a 3 toneladas, pero puede ser mayor en aplicaciones especializadas. Muchos de estos equipos tienen ruedas pequeñas (normalmente poliuretano) y así las cargas puntuales pueden ser altas<sup>7</sup>.

Las superficies del piso en el que operan estos equipos deben estar planas y niveladas. Un problema con el uso de este tipo de vehículos son las juntas de los pavimentos, las que de no presentar una alta transferencia de carga las losas experimentan movimientos verticales diferenciales al paso de la rueda sobre la junta con el consiguiente deterioro de las juntas y de las ruedas de estos equipos convirtiéndose en un eventual elevado costo de mantenimiento. Por lo

---

<sup>6</sup> Ibíd., p. 36

<sup>7</sup> Ibíd., p. 36

anteriormente señalado, en los pisos que se proyecte el uso intensivo de este tipo de equipos se recomienda el diseño de un piso “sin juntas” o con un reducido número de ellas.

En pasillos muy estrechos, los elevadores recorren rutas definidas por lo que es apropiado medir y controlar la planicidad en cada una de las pistas.

La mayoría de estos elevadores tienen tres ruedas, dos en el eje de carga frontal y una rueda motriz en la parte trasera. Algunos tienen dos acoplamientos cerrados y ruedas en la parte trasera que actúan como una rueda. Algunos elevadores tienen cuatro ruedas con una en cada “esquina”. Cuando se opera en los pasillos, los elevadores son guiados por carriles en los lados del pasillo o por alambres de guía inductivos en el suelo y no son controlados directamente por el operador.

En la losa la inclusión de los cables de guía inductivos puede afectar el espesor de diseño de la losa. Los alambres de guía tienen que mantenerse alejados de las barras de acero de refuerzo. Las fibras de acero en el hormigón no suelen afectar a los sistemas de orientación.

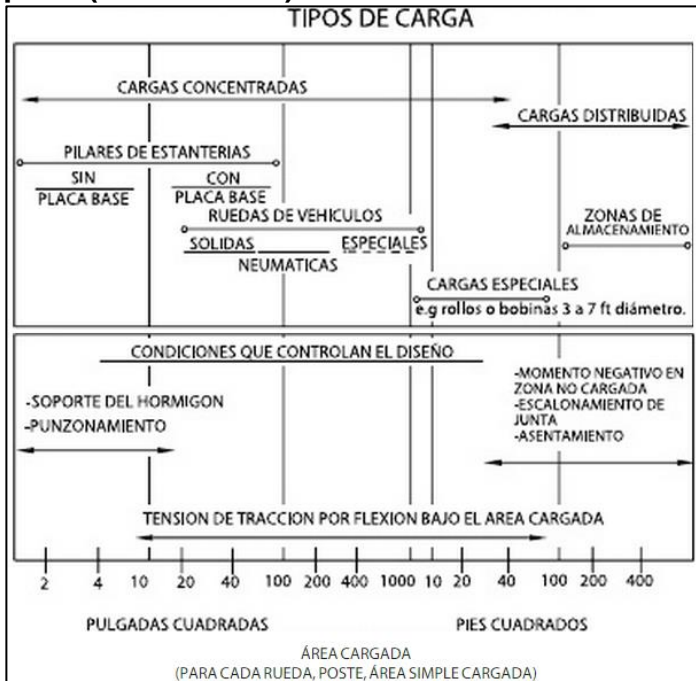
Un aspecto muy importante en el comportamiento y análisis de un piso tiene relación con las variaciones de la temperatura y/o humedad a través del espesor de la losa. Estas variaciones tienen asociados cambios volumétricos en el hormigón los que hacen que las losas experimenten deformaciones, normalmente conocidas como deformaciones de alabeo (por temperatura, hídrico o ambos). Aun cuando en este documento se aborde el tema de pisos industriales (en recintos cerrados), donde el pavimento se encuentra protegido de los efectos medioambientales ello no significa que las losas no puedan alabearse. Lo anterior, principalmente debido a que durante el proceso constructivo del pavimento, se produce variaciones de la temperatura y humedad en el espesor de la losa, generándose igualmente deformaciones en el piso. Cuando la temperatura en la superficie de la losa es mayor que en la cara inferior de la losa, la superficie de la losa tiende a expandirse con respecto a la fibra neutra mientras que las fibras inferiores de la losa tienden a contraerse (alabeo convexo).

Sin embargo, el peso propio de la losa restringe su expansión y contracción; por lo tanto, se inducen tensiones de compresión en la fibra superior de la losa mientras que en la fibra inferior se producen tensiones de tracción. En caso contrario cuando la superficie de la losa tiene una temperatura menor que la cara inferior de la losa, las fibras superiores tienden a contraerse con respecto a las fibras inferiores (alabeo cóncavo). La variación de humedad en el espesor de la losa produce un efecto similar al de la temperatura. Por lo anterior, los pisos más susceptibles a experimentar alabeo son los pisos de hormigón simple sin armadura. Por el contrario, pisos de hormigón de retracción compensada y de hormigón postensado, minimizan este efecto en forma importante<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Ibíd., p. 37

**Figura 1. Condiciones de Carga que controlan el diseño del espesor de un piso. (ACI 360R-10)**



Fuente. SALSILLI MURÚA, Ricardo. Manual de Diseño de Pisos Industriales, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. Santiago de Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón De Chile, 2011. p. 38.

A continuación se presentan fotos que muestran diferentes tipos de almacenamiento de carga y equipos de levante (véase las Figuras 2, 3 y 4).

**Figura 2. Carga a Piso de Pallets y de Rollos de Alambre**



Fuente. SALSILLI MURÚA, Ricardo. Manual de Diseño de Pisos Industriales, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. Santiago de Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón De Chile, 2011. p. 38.

**Figura 3. Cargas a Piso y de Estantería (“racks”).**



Fuente. SALSILLI MURÚA, Ricardo. Manual de Diseño de Pisos Industriales, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. Santiago de Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón De Chile, 2011. p. 38.

En la Figura 3 se observa además equipo de levante con ruedas neumáticas.

**Figura 4. Equipo de Levante con Ruedas de Poliuretano**



Fuente. SALSILLI MURÚA, Ricardo. Manual de Diseño de Pisos Industriales, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. Santiago de Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón De Chile, 2011. p. 39.

## 2.4 ESFUERZOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

A continuación se presenta tanto la teoría como las ecuaciones en que se basa el software EverFe 2.25 para realizar los cálculos y simulaciones numéricas de los esfuerzos que presentan los sistemas de losas frente a diferentes cargas.

“Los esfuerzos de todo índole que teóricamente pueden presentarse al estar expuestas a cargas, temperaturas, reacciones durante el proceso de fraguado y el comportamiento del refuerzo que lleva inmerso, para este caso los Ingenieros Fernando Sánchez Sabogal y Eduardo Becker comparten el mismo pensamiento y desarrollo para reconocer los esfuerzos que puedan presentar un piso en concreto para pisos industriales”<sup>9</sup>.

Algunos factores que contribuyen al desarrollo de esfuerzos en pavimentos rígidos:

- Cambios de temperatura.
- Cambios de humedad.
- Cargas de tránsito.
- Otros (bombeo, cambios volumétricos del soporte).

### 2.4.1 Esfuerzos Producidos por Cambios de Temperatura. Uno

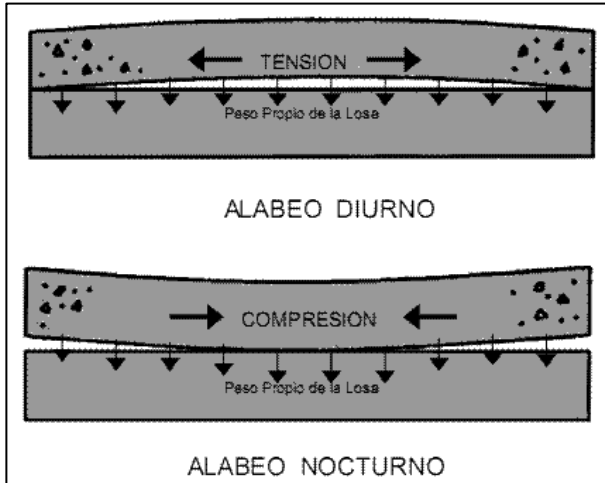
#### 2.4.1.1 Alabeo por Gradiente Térmico.

- Al cambiar la temperatura ambiente durante el día, también cambia la temperatura del pavimento.
- Este ciclo térmico crea un gradiente térmico en la losa.
- El gradiente produce un alabeo en la losa.
- El peso propio de la losa y su contacto con la superficie de apoyo restringen el movimiento, generándose esfuerzos.
- Dependiendo de la hora del día, estos esfuerzos se pueden sumar o restar de los efectos producidos por las cargas del tránsito.

---

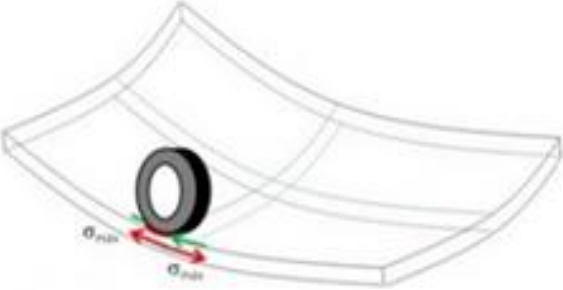
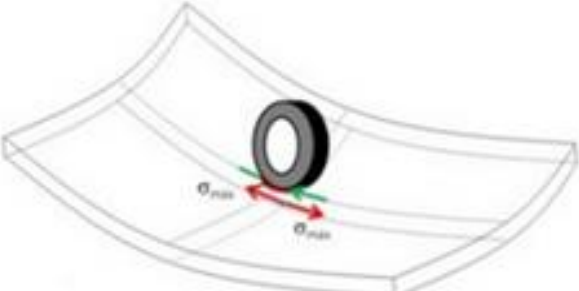
<sup>9</sup> SÁNCHEZ SABOGAL, F. Módulo 3. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos [en línea]. Bogotá: Escuela de Ingenieros [citado 20 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%203.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%203.pdf)>.

**Figura 5. Alabeo de las Losas de los Pavimentos de Concreto**



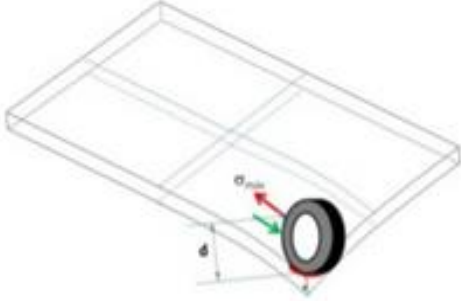
Fuente. SÁNCHEZ SABOGAL, F. Módulo 3. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos [en línea]. Bogotá: Escuela de Ingenieros [citado 20 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%203.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%203.pdf)>.

**Cuadro 2. Fórmulas de Bradbury**

Ilustración	Formula
<p>Borde de losa</p> 	$\sigma_t = \frac{C * E * \alpha * \Delta t}{2}$
<p>Interior de losa</p> 	$\sigma_t = \frac{E * \alpha * \Delta t}{2} \left[ \frac{C_1 + \mu C_2}{1 - \mu^2} \right]$



**Cuadro 2. (Continuación)**

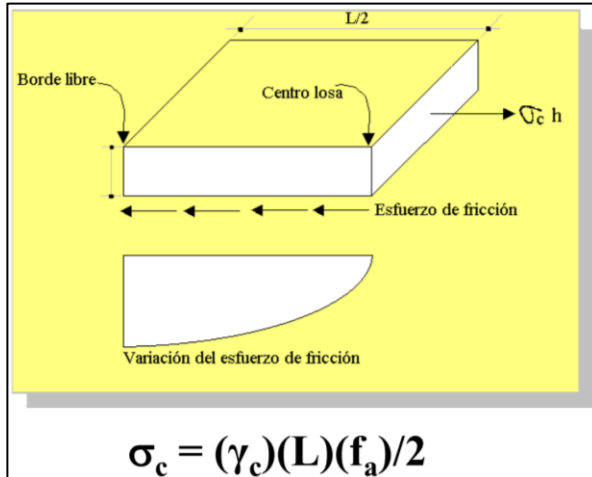
Ilustración	Formula
<p data-bbox="313 327 540 359">Esquina de losa</p> 	$\sigma_t = \frac{E * \alpha * \Delta t}{3(1 - \mu)} \left[ \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{l}} \right]$
$\sigma_t$	Esfuerzo en el sitio considerado
E	Módulo elástico del concreto
$\alpha$	Coeficiente de dilatación térmica del concreto (0.000005/°F)
$\Delta t$	Diferencia de temperatura entre las dos caras de la losa (gradiente).
C	Coeficiente que depende de la longitud de la losa y del radio de rigidez relativa.
$C_1$	Coeficiente en la dirección en la cual se calcula el esfuerzo.
$C_2$	Coeficiente en la dirección perpendicular a $C_1$ .
$\mu$	Relación de Poisson del concreto.
a	Radio del área cargada en el borde de la losa.
l	Radio de rigidez relativa.

Fuente. SÁNCHEZ SABOGAL, F. Módulo 3. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos [en línea]. Bogotá: Escuela de Ingenieros [citado 20 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%203.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%203.pdf)>.

#### 2.4.2 Contracción Durante el Fraguado.

- La fricción entre la losa y la fundación, debido a la caída de temperatura durante el fraguado del concreto, produce esfuerzos en el concreto y en la armadura que contenga.
- El diseño de la armadura de refuerzo de un pavimento rígido se basa en la consideración de los esfuerzos de fricción (véase la Figura 6).

**Figura 6. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos**



Fuente. SÁNCHEZ SABOGAL, F. Módulo 3. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos [en línea]. Bogotá: Escuela de Ingenieros [citado 20 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%203.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%203.pdf)>.

L = longitud de la losa

$\gamma_c$  = peso unitario del concreto

$f_a$  = coeficiente de fricción entre la losa y la subrasante (generalmente 1.5)

NOTA: Los esfuerzos friccionales solo son importantes en losas de gran longitud.

### 2.4.3 Expansión y Contracción por Cambios Uniformes de Temperatura.

➤ Las aberturas de las juntas cambian a causa de los cambios de temperatura, alterando las condiciones de transferencia de carga.

➤ Las características de contracción controlan la abertura de las juntas transversales del pavimento.

➤ El material que se coloque para sellar las juntas deberá ser capaz de soportar, sin despegarse, los movimientos del concreto cuando ocurra la máxima contracción.

$$\Delta L = CL(\alpha\Delta T + \delta)$$

$\Delta L$  = abertura de la junta o cambio en la longitud de la losa.  
(si  $\Delta L > 1\text{mm}$ , se requieren varillas de transferencia de carga).

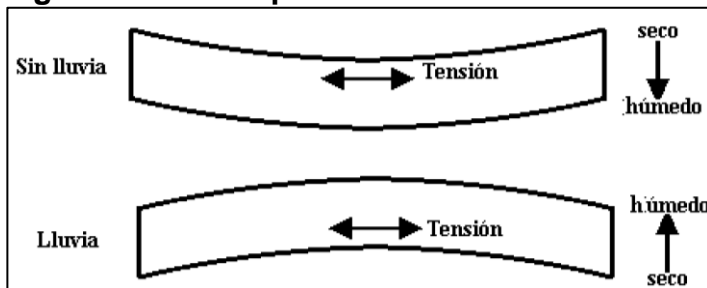
C = factor de ajuste debido a la fricción entre losa y soporte  
(0.65 para subbase estabilizada y 0.80 para subbase granular).

- L = longitud de la losa (espacio entre juntas).  
 $\alpha$  = coeficiente de dilatación del concreto (aprox. 0.00001/°C)  
 $\Delta T$  = rango máximo de diferencia de temperatura.  
 $\delta$  = coeficiente de contracción del concreto  
 (depende de la resistencia a la tracción indirecta).

#### 2.4.4 Cambios de Humedad.

El humedecimiento y secado del concreto genera un fenómeno similar al que se produce cuando se presentan gradientes térmicos. Los cambios de humedad generan un encogimiento, o un alargamiento, de menor magnitud a los que se producen por los gradientes térmicos y se deben tener en cuenta al calcular los cambios dimensionales. Los gradientes de humedad en el espesor generan encorvamientos (alabeos) en la superficie de los elementos de concreto, que pueden afectar el comportamiento de cualquier pieza puesta sobre esa superficie<sup>10</sup>.

**Figura 7. Alabeo por Cambio de Humedad**



Fuente. BECKER, Ernesto. Esfuerzos en pavimentos rígidos [en línea]. Bogotá: Ismocol de Colombia [citado 10 septiembre, 2014]. Disponible en Internet: <URL: <http://es.slideshare.net/ingeniero34/esfuerzos-en-pavimentos-rigidos>>.

**2.4.5 Cargas de Tránsito.** Las losas de concreto hidráulico al estar expuestas a cargas de tránsito presentan los siguientes esfuerzos:

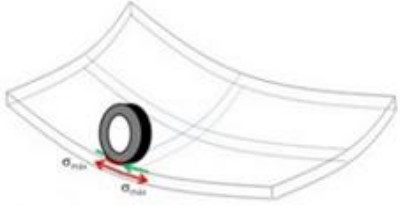
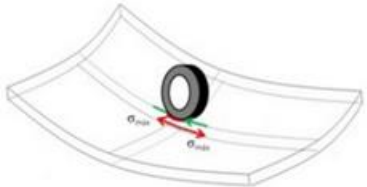
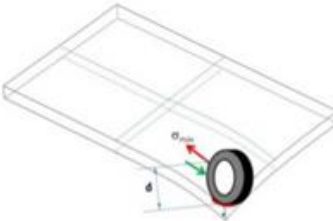
- Esfuerzos abrasivos causados por las llantas de los vehículos.
- Esfuerzos directos de compresión y cortante causados por las cargas de las ruedas.
- Esfuerzos de compresión y tensión que resultan de la flexión de las losas bajo las cargas de las ruedas.

Los esfuerzos más importantes debido a las cargas son los de flexión, dado el alto impacto que tiene sobre la estructura.

<sup>10</sup> LONDOÑO, Cipriano. Pisos y Pavimentos en Concreto: Fisuras Por Cambios Dimensionales [en línea]. Bogotá: 360° en Concreto [citado 12 septiembre, 2014]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.360gradosenconcreto.com/pisos-y-pavimentos-en-concreto-fisuras-por-cambios-dimensionales/>>.

A continuación se presentan las fórmulas en los puntos críticos de localización de las cargas, deducidas por el Dr. H. M. Westergaard, luego de realizar un estudio de los esfuerzos producido por efecto de las cargas de ruedas sobre pavimentos de concreto (véase el Cuadro 3).

**Cuadro 3. Fórmulas de Westergaard ( $\mu=0.15$ ).**

Ilustración	Formula
<p>Borde de losa</p> 	$\sigma_b = \frac{0.572P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{l}{b} \right) + 0.359 \right]$
<p>Interior de losa</p> 	$\sigma_i = \frac{0.3162P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{l}{b} \right) + 1.069 \right]$
<p>Esquina de losa</p> 	$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right]$
$\sigma_b, \sigma_j, \sigma_i$	Esfuerzos máximos en las localizaciones respectivas
P	Carga por rueda
h	Espesor de la losa
a	Radio del área cargada
l	Radio de rigidez relativa
b	Radio de la sección resistente $b = \sqrt{1.6(a)^2 + h^2} - 0.675(h)$
<p style="text-align: center;">Suposiciones para las fórmulas de Westergaard</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La losa actúa como un sólido homogéneo, isotrópico y elástico en equilibrio.</li> <li>- La losa tiene sección transversal uniforme.</li> <li>- Todas las fuerzas son normales a la superficie.</li> <li>- No hay fuerzas friccionales o de corte.</li> <li>- El eje neutro se encuentra en la mitad de la losa.</li> <li>- La deformación por corte es despreciable.</li> <li>- La losa se considera infinita para carga en el interior y semi-infinita para carga en el borde.</li> </ul>	

Fuente. SÁNCHEZ SABOGAL, F. Módulo 3. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos [en línea]. Bogotá: Escuela de Ingenieros [citado 20 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%203.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%203.pdf)>.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

Con el fin de cumplir con el objetivo plantado en el presente documento, se recurrió a la implementación del software EverFe 2.25.

#### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

EverFE es un software libre desarrollado conjuntamente por las universidades de Maine y de Washington (Estado Unidos), las cuales contaron con la financiación de los Departamentos de Transporte de los Estados de Washington y de California.

Este programa permite modelar de forma fácil en 3D elementos finitos y simula la repuesta de sistemas de pavimento en hormigón articulados sometidos a cargas axiales y a (acciones) fenómenos ambientales, y a encogimientos.

**3.1.1 Características del Programa.** El núcleo del solucionador para ecuaciones, lineales y no lineales, es la solución de un sistema simétrico de ecuaciones lineales definidas positivas. Para lograrlo EverFE utiliza un proceso iterativo realizado por un solucionador Preacondicionado Multi-grilla gradiente conjugado, MG-PGC por su sigla en inglés (Multi-Grid Preconditioned Conjugate Gradient) específicamente desarrollado para ser usado en modelos 3D de elementos finitos que incorporan múltiples tipos de elementos.

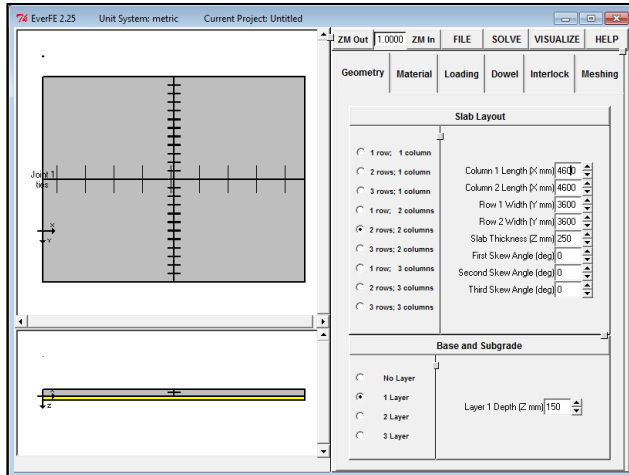
Las características específicas de EverFE se enumeran a continuación:

- Se pueden modelar 1, 2, o 3 unidades de losas longitudinales y/o transversales. (hasta 9 unidades losa en total en configuración de 3X3).
- Barras de amarre adyacentes a la losa que pueden especificarse explícitamente.
- Se pueden especificar hasta 3 capas de base, pudiendo ser estas mezcladas o no mezclada.
- Es posible modelar una variedad de diferentes configuraciones de ejes que se pueden definir fácilmente con una cantidad mínima de entradas.
- Gradientes térmicos, lineales, bilineales y trilineales a través del espesor de la losa pueden ser capturados.
- Las Amplias capacidades de post-procesamiento de EverFE permiten la visualización de tensiones, fuerzas, desplazamientos y momentos de los pasadores internos. Valores críticos de respuesta en cualquier punto en el modelo pueden ser fácilmente recuperados.

**3.1.2 Variables.** Una de las cualidades más notorias del programa EverFe, es que cuenta con diversos parámetros que pueden ser modificados por el usuario de acuerdo a sus requerimientos específicos.

Entre los parámetros modificables se encuentran los geométricos que permiten escoger la dimensión del sistema y su geometría (véase las Figuras 8, 9 y 10).

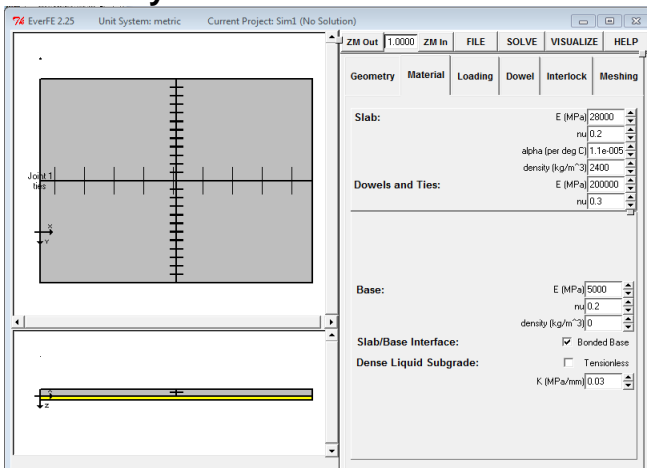
**Figura 8. Interface de EverFe Donde se Especifican los Parámetros Relacionados con la Geometría**



Fuente. Los Autores.

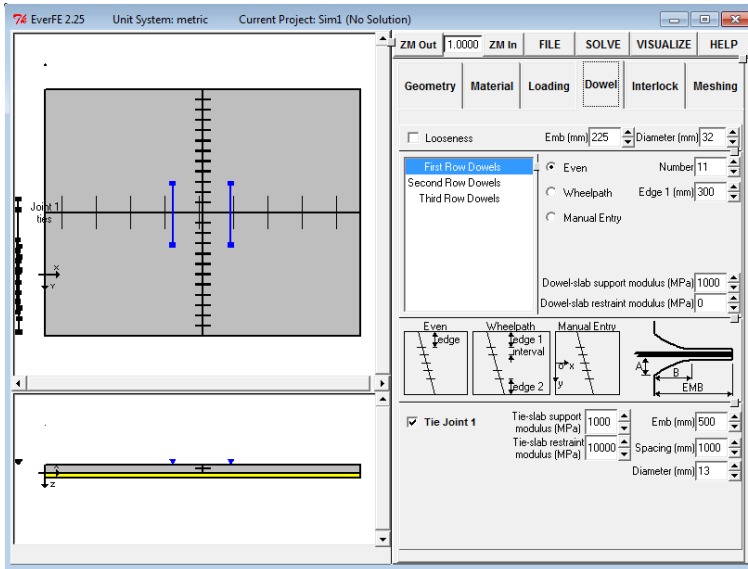
Otros parámetros igualmente importantes a los geométricos son los referentes a los materiales, en la pestaña Material se definen las características básicas tanto del concreto como de la base y en la pestaña Dowel se especifica el material de los pasadores y su distribución.

**Figura 9. Interface de EverFe donde se definen las características del concreto y la base.**



Fuente. Los Autores.

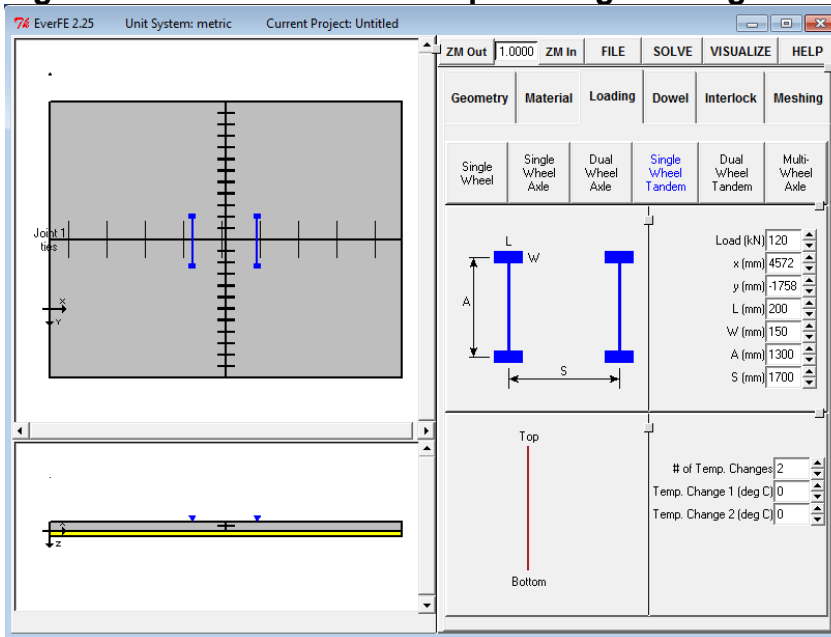
**Figura 10. Interface de EverFe en la que se Permite Modificar lo Referente a los Pasadores o Dovelas.**



Fuente. Los Autores.

La asignación de las cargas a las cuales se expondrá el sistema se realiza en la pestaña Loading, aquí se asigna la carga, el número de ejes, sus dimensiones y de ser necesario se agregan cambios de temperatura (véase la Figura 11).

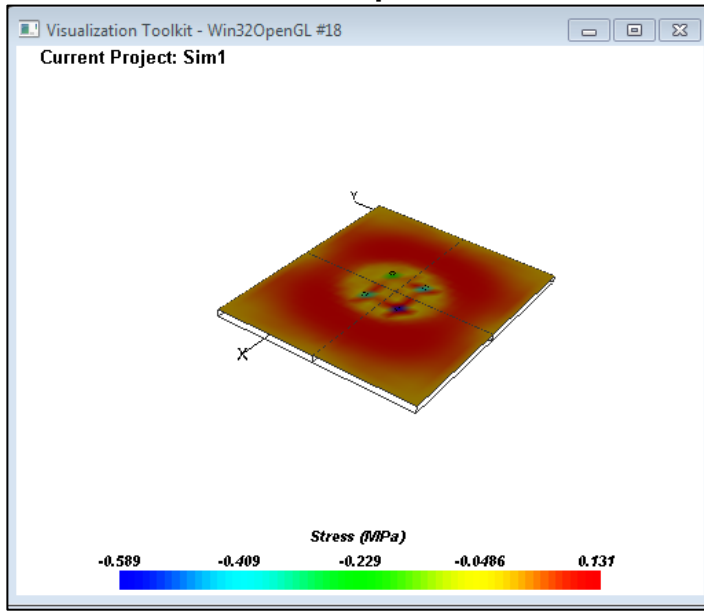
**Figura 11. Interface de EverFe para Asignar Cargas**



Fuente. Los Autores.

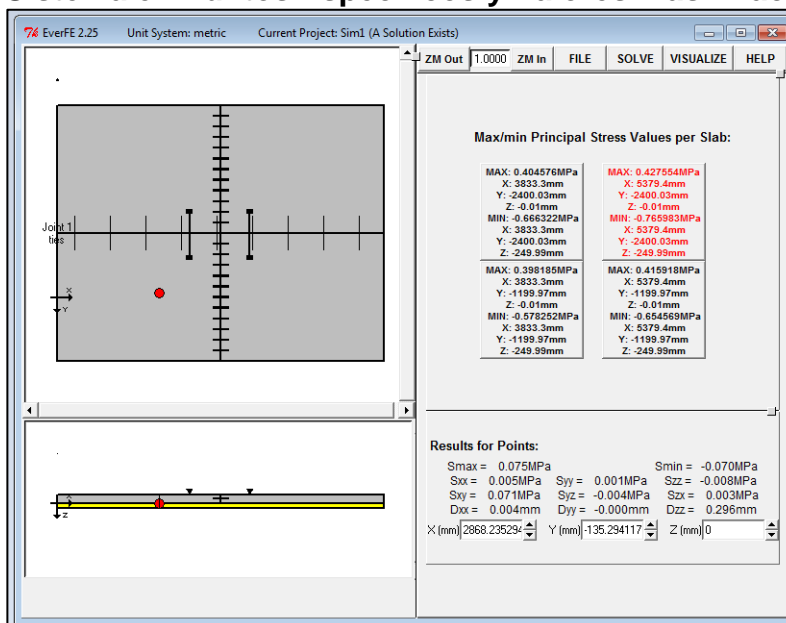
**3.1.3 Resultados.** Los resultados arrojados por EverFe permiten ver los esfuerzos presentes en el sistema, tanto en las losa como en los pasadores, y observar los desplazamientos que se presentan (véase las Figuras 12, 13 y 14).

**Figura 12. Ejemplo de la Visualización de los Esfuerzo Presentes en un Sistema a Través del Mapa de Colores**



Fuente. Los Autores.

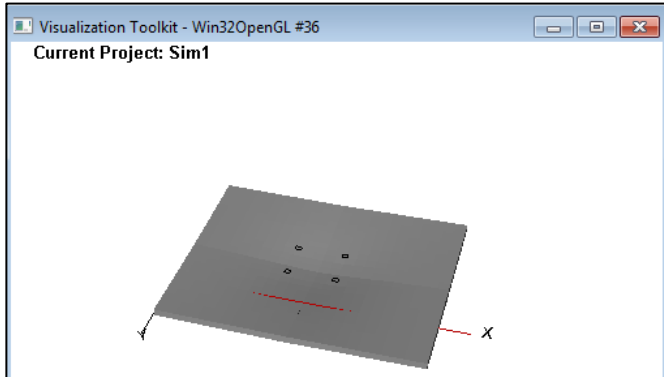
**Figura 13. Ejemplo de la Visualización de los Esfuerzo Presentes en un Sistema en Puntos Específicos y Valores más Exactos.**



Fuente. Los Autores.



**Figura 14. Muestra de Cómo se Presenta los Desplazamientos EverFe**



Fuente. Los Autores.

### 3.2 PARÁMETROS

Con el fin de conseguir resultados concluyentes, se realizaron 15 simulaciones, en las cuales se dejaron algunos parámetros fijos y otros se modificaron según se requirió. El programa se ejecutó con las unidades en el sistema métrico decimal y modelo lineal y con sistema de losas de 2 x 2.

**3.2.1 Fijos.** A continuación se presentan los parámetros que se dejaron fijo para las 15 simulaciones realizadas (véase el Cuadro 4).

**Cuadro 4. Parámetros Fijos en la Ejecución del Programa**

Geometría		
No. de losas:		4
Distribución:		2 x 2
Espesor de la losa:		250 mm
No. de bases:		1
Espesor de la base:		150 mm
Materiales		
Losas (Concreto)	Módulo de Elasticidad <b>E</b> :	28.000 Mpa
	$\mu$ :	0,2
	Densidad $\gamma$ :	2.400 Kg/m <sup>3</sup>
Pasadores (Acero)	Módulo de Elasticidad <b>E</b> :	200.000 Mpa
	$\mu$ :	0,3
Base	Módulo de Elasticidad <b>E</b> :	5.000 Mpa
	$\mu$ :	0,2
	Densidad $\gamma$ :	0 Kg/m <sup>3</sup>
Temperatura		
No se ingresaron cambios de temperatura		
Pasadores		
Diámetro:		32 mm
Longitud embebida en la placa:		225 mm
Longitud borde de placa - primer pasador:		300 mm
No. de dovelas :		11

Fuente. El Autor.

**3.2.2 Variables.** Los valores que se modificaron para realizar las simulaciones, fueron las dimensiones de las losas y las cargas aplicadas sobre ellas.

Entre los parámetros que se variaron están las magnitudes de las cargas, las cuales fueron:

- 100KN.
- 200KN.
- 300KN.

Otra característica que se modificó para las simulaciones fueron las dimensiones de las losas, (todos fueron sistemas 2 x 2) quedando así:

- Losa 5,0m x 4,0m.
- Losa 4,6m x 3,6m.
- Losa 3,8m x 2,8m.
- Losa 3,0m x 2,0m.
- Losa 3,4m x 2,4m.

Cada uno de estos sistemas fue expuesto a cada una de las 3 cargas, consiguiendo así 15 combinaciones.

#### 4. RESULTADOS



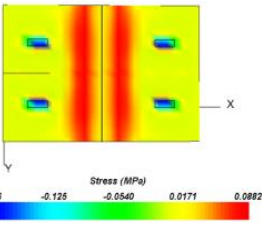
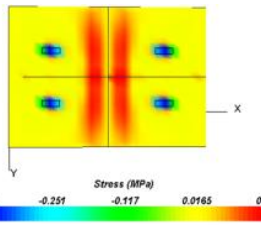

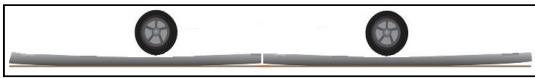
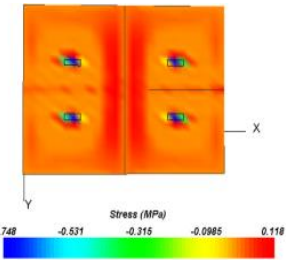
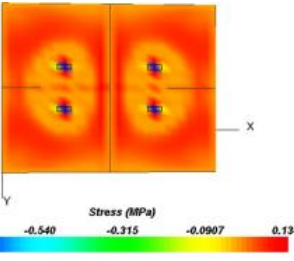

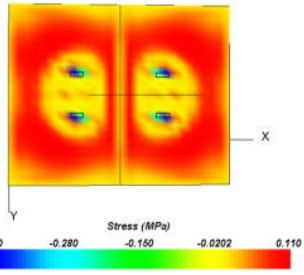
A continuación se muestran los resultados arrojados por el programa EverFe, con los cuales se buscó dar respuesta al problema planteado.

**Cuadro 5. Valores de los Esfuerzos Mínimos y Máximos Obtenidos en las Simulaciones para cada una de las Combinaciones, en Tres Puntos Diferentes**

Losa 4,6m x 3,6m						
Cargas	Centro		Media Losa		Esquiniao	
	Smáx	Smín	Smáx	Smín	Smáx	Smín
100	0,016 Mpa	-0,003 Mpa	0,002 Mpa	-0,127 Mpa	0,017 Mpa	-0,047 Mpa
200	0,032 Mpa	-0,006 Mpa	0,005 Mpa	-0,253 Mpa	0,035 Mpa	-0,094 Mpa
300	0,048 Mpa	-0,009 Mpa	0,007 Mpa	-0,380 Mpa	0,053 Mpa	-0,140 Mpa
Losa 3,8m x 2,8m						
Cargas	Centro		Media Losa		Esquiniao	
	Smáx	Smín	Smáx	Smín	Smáx	Smín
100	0,006 Mpa	-0,017 Mpa	-0,001 Mpa	-0,202 Mpa	0,005 Mpa	-0,065 Mpa
200	0,012 Mpa	-0,034 Mpa	-0,001 Mpa	-0,401 Mpa	0,005 Mpa	-0,133 Mpa
300	0,017 Mpa	-0,052 Mpa	-0,002 Mpa	-0,601 Mpa	0,008 Mpa	-0,198 Mpa
Losa 3,0m x 2,0m						
Cargas	Centro		Media Losa		Esquiniao	
	Smáx	Smín	Smáx	Smín	Smáx	Smín
100	0,011 Mpa	-0,002 Mpa	0,011 Mpa	-0,163 Mpa	0,001 Mpa	-0,098 Mpa
200	0,023 Mpa	-0,003 Mpa	0,021 Mpa	-0,325 Mpa	0,001 Mpa	-0,196 Mpa
300	0,033 Mpa	-0,005 Mpa	0,032 Mpa	-0,486 Mpa	0,002 Mpa	-0,293 Mpa
Losa 5,0m x 4,0m						
Cargas	Centro		Media Losa		Esquiniao	
	Smáx	Smín	Smáx	Smín	Smáx	Smín
100	0,003 Mpa	-0,008 Mpa	0,027 Mpa	-0,096 Mpa	0,020 Mpa	-0,039 Mpa
200	0,006 Mpa	-0,017 Mpa	0,053 Mpa	-0,192 Mpa	0,040 Mpa	-0,076 Mpa
300	0,009 Mpa	-0,026 Mpa	0,080 Mpa	-0,288 Mpa	0,060 Mpa	-0,114 Mpa
Losa 3,4m x 2,4m						
Cargas	Centro		Media Losa		Esquiniao	
	Smáx	Smín	Smáx	Smín	Smáx	Smín
100	0,002 Mpa	0,001 Mpa	0,014 Mpa	-0,214 Mpa	0,000 Mpa	-0,080 Mpa
200	0,005 Mpa	0,002 Mpa	0,029 Mpa	-0,426 Mpa	0,000 Mpa	-0,158 Mpa
300	0,008 Mpa	0,003 Mpa	0,043 Mpa	-0,638 Mpa	0,001 Mpa	-0,236 Mpa



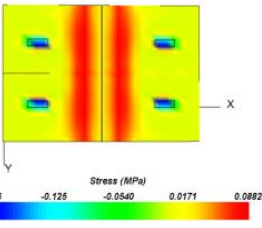
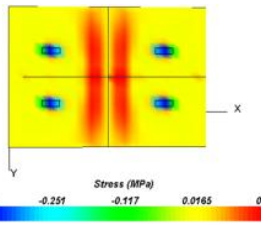

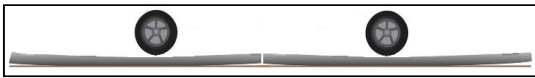
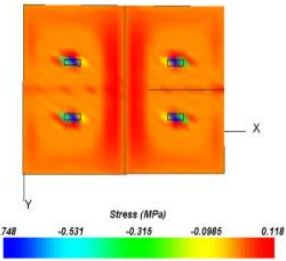
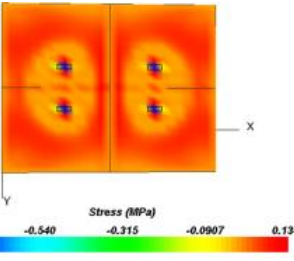

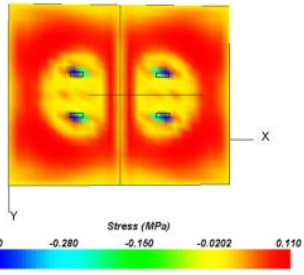
Fuente. Los Autores.

**Cuadro 6. Resultados Visualizados por Mapa de Colores de los Esfuerzos de los Diferentes Sistemas al Aplicar una Carga de 100KN**

<b>CARGA 100 KN (eje Tamden de una sola rueda)</b>	
	
<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>	<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>
	
ESPESOR: 0,25 m (Concreto) LOSA: 3.00 m x 2.00 m ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 3.44 kg/cm2	ESPESOR: 0,25 m (Concreto) LOSA: 3.40 m x 2.40 m ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 2.62 kg/cm2
	
<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>	<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>
	
ESPESOR: 0,25 m (Concreto) LOSA: 3.80 m x 2.80 m ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 2.81kg/cm2	ESPESOR: 0,25 m (Concreto) LOSA: 4.60 m x 3.60 m ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 2.95 kg/cm2
	
<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>	
	ESPESOR: 0,25 m (Concreto) LOSA: 4.60 m x 3.60 m ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 2.75 kg/cm2



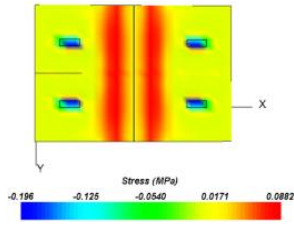
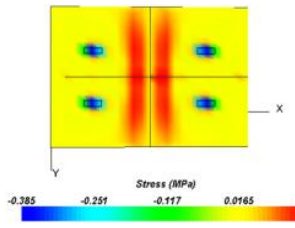

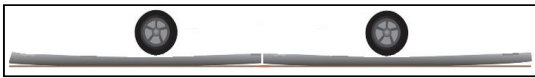
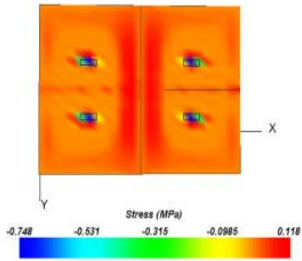
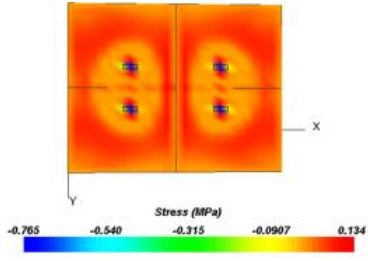

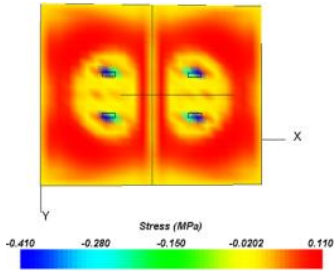
Fuente. Los Autores.

**Cuadro 7. Resultados Visualizados por Mapa de Colores de los Esfuerzos de los Diferentes Sistemas al Aplicar una Carga de 200KN**

<b>CARGA 200 KN (eje Tamden de una sola rueda)</b>	
	
<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>	<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>
	
ESPESOR: 0,25 m (Concreto) LOSA: 3.00 m x 2.00 m ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 5.16 kg/cm2	ESPESOR: 0,25 m (Concreto) LOSA: 3.40 m x 2.40 m ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 3.93 kg/cm2
	
<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>	<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>
	
ESPESOR: 0,25 m (Concreto) LOSA: 3.80 m x 2.80 m ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 4.18 kg/cm2	ESPESOR: 0,25 m (Concreto) LOSA: 4.60 m x 3.60 m ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 4.40 kg/cm2
	
<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>	
	ESPESOR: 0,25 m (Concreto) LOSA: 4.60 m x 3.60 m ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 4.14 kg/cm2

Fuente. Los Autores.

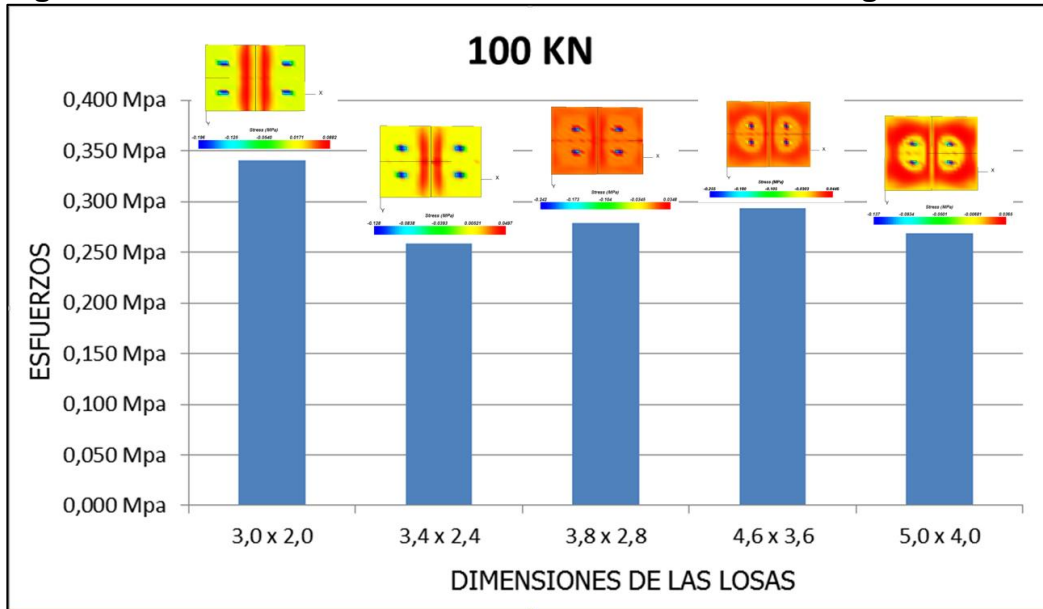
**Cuadro 8. Resultados Visualizados por Mapa de Colores de los Esfuerzos de los Diferentes Sistemas al Aplicar una Carga de 200KN**

<b>CARGA 300 KN (eje Tamden de una sola rueda)</b>	
	
<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>	<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>
	
<p>ESPESOR: 0,25 m (Concreto)                      LOSA: 3.00 m x 2.00 m                      ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 10.31kg/cm<sup>2</sup></p>	<p>ESPESOR: 0,25 m (Concreto)                      LOSA: 3.40 m x 2.40 m                      ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 7.85 kg/cm<sup>2</sup></p>
	
<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>	<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>
	
<p>ESPESOR: 0,25 m (Concreto)                      LOSA: 3.80 m x 2.80 m                      ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 8.36 kg/cm<sup>2</sup></p>	<p>ESPESOR: 0,25 m (Concreto)                      LOSA: 4.60 m x 3.60 m                      ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 8.78 kg/cm<sup>2</sup></p>
	
<i>ESFUERZOS PRINCIPALES</i>	
	<p>ESPESOR: 0,25 m (Concreto)                      LOSA: 4.60 m x 3.60 m                      ESFUERZO EN LA SUPERFICIE (punto medio): 8.26 kg/cm<sup>2</sup></p>

Fuente. Los Autores.

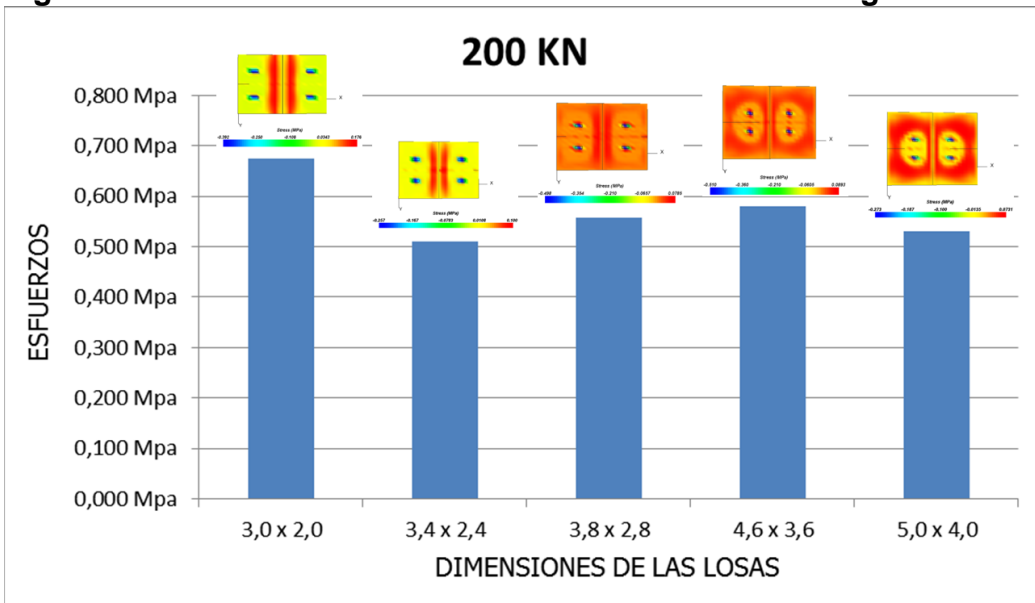
Para comprender de forma más fácil los resultados obtenidos, se graficó el esfuerzo contra las dimensiones de las losas para lograr observar el comportamiento de los sistemas (véase las Figuras 15 y 16).

**Figura 15. Esfuerzo Contra Dimensión de Losas con Carga de 100KN**



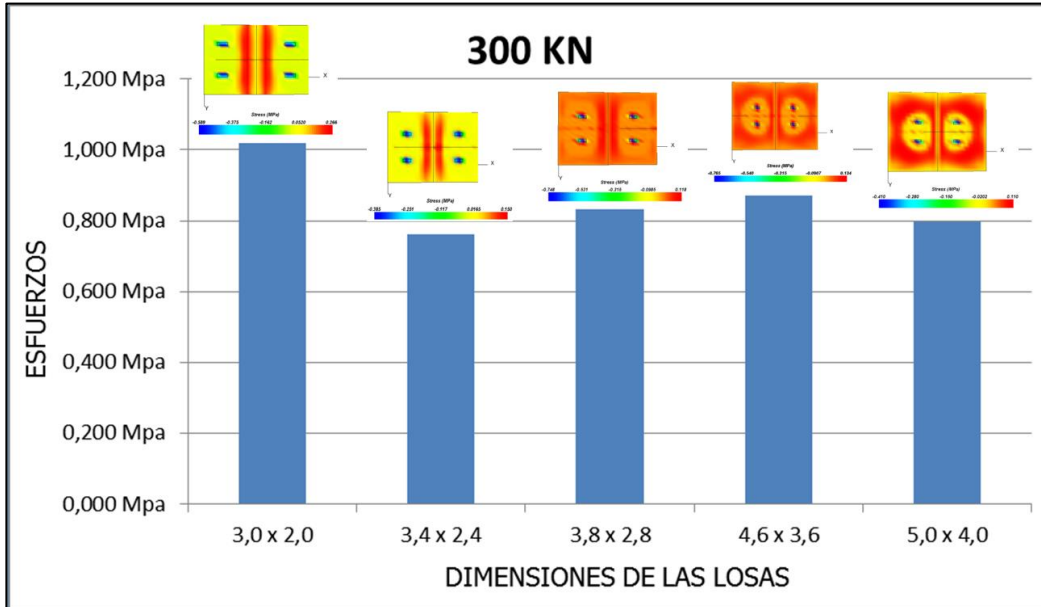
Fuente. Los Autores.

**Figura 16. Esfuerzo Contra Dimensión de Losas con Carga de 200KN**



Fuente. Los Autores.

**Figura 17. Esfuerzo Contra Dimensión de Losas con Carga de 300KN**



Fuente. Los Autores.

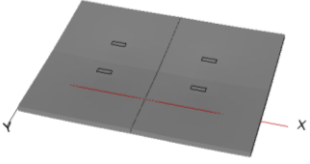
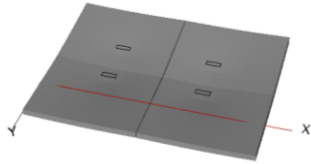
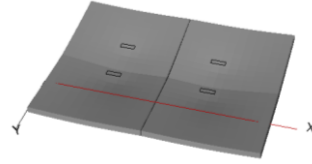
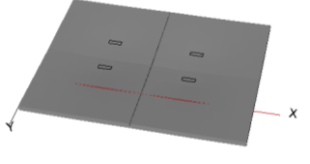
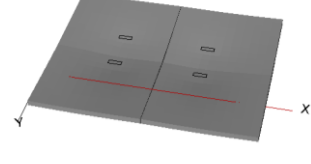
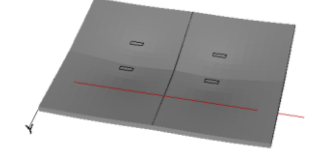
En cuanto a los resultados arrojados referentes a los desplazamientos, estos resultados son más visuales, ya que no arroja valores exactos.

**Cuadro 9. Resultados de los Desplazamientos Ocurridos en cada Sistema Dependiendo la Carga a la que fue Expuesto**

Losa	100 KN	200 KN	300 KN
3,0 x 2,0			
3,4 x 2,4			
3,8 x 2,8			



Cuadro 9. (Continuación)

Losa	100 KN	200 KN	300 KN
4,6 x 3,6			
5,0 x 4,0			

Fuente. Los Autores.

## 5. CONCLUSIONES

- Se evidenció que el software utilizado es una herramienta útil para la modelación numérica de elementos finitos aplicada a pisos industriales, debido a su versatilidad, variación de parámetros y su fácil simulación
- Al ejecutar varias simulaciones con diferentes dimensiones de losas y combinación 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.
- Al analizar los resultados de los esfuerzos máximos presentes en cada una de las losas frente a las diferentes cargas, se encontró que la que reportó mayores esfuerzo, fue el sistema de losas de menores dimensiones (3,0 x 2,0)
- Observamos que al aplicar 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 la losa no son los únicos métodos confiables para calcular los esfuerzos en pavimentos rígidos, ya que se compararon con los resultados arrojados en el software EverFe y los resultados son bastantes similares con estas teorías, lo que nos da confiabilidad y un proceso mucho más eficaz por el método de elementos finitos que desarrolla este software.

## BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA DE NOTICIAS UN. La inevitable expansión de Bogotá hacia el norte [en línea]. Bogotá: Universidad Nacional [citado 14 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.agenciade-noticias.unal.edu.co/ndetalle/article/la-inevitable-expansion-de-bogota-hacia-el-norte.html>>.

BANCO DAVIVIENDA. Informe del sector de edificaciones [en línea]. Bogotá: El Banco [citado 14 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.davivienda.com/wps/wcm/connect/3c9f0838-3406-42f0-a8d6-5c00440fe285/Informe+sector+de+edificaciones+oct12.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=3c9f0838-3406-42f0-a8d6-5c00440fe285>>.

BATEZINI Rafael. Estudio Preliminar de Concretos en Pavimentos para áreas de vehículos leves, aplicación de EverFe. Sao Paulo: Universidad de Passo Fundo. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de grado, 2013. 122 p.

BECKER, Edgardo. Pavimentos y pisos industriales [en línea]. Bogotá: Lomanegra [citado 20 septiembre, 2014]. Disponible en Internet: <URL: [http://es.slideshare.net/EdgardoBecker/e-becker-presentacin-sobre-pavimentos-y-pisos-industriales?qid=a0aa391b-628b-498e-af91-3e8bd5e11e2&v=default&b=&from\\_search=3](http://es.slideshare.net/EdgardoBecker/e-becker-presentacin-sobre-pavimentos-y-pisos-industriales?qid=a0aa391b-628b-498e-af91-3e8bd5e11e2&v=default&b=&from_search=3)>

GRACIA, O.; QUESADA, G.; GÓMEZ, A.; SANTACRUZ, A. y ARIAS, L. Estudio de la tecnología de concretos de contracción compensada aplicada a la construcción de pisos industriales [en línea]. Bogotá: Obras y Proyectos [citado 10 septiembre, 2014]. Disponible en Internet: <URL: [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-28132013000100005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-28132013000100005&script=sci_arttext)>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio tesis y otros trabajos de grado. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: ICONTEC, 2008. 36 p.

JAMES A. Farny. Diseño y Construcción de Pisos en Concreto. 3 ed. Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto ASOCRETO, 2007. 174 p.

LONDOÑO, Cipriano. Pisos y Pavimentos en Concreto: Fisuras Por Cambios Dimensionales [en línea]. Bogotá: 360° en Concreto [citado 12 septiembre, 2014]. Disponible en Internet: <URL: <http://blog.360gradosenconcreto.com/pisos-y-pavimentos-en-concreto-fisuras-por-cambios-dimensionales/>>.

REVISTA CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA EN CONCRETO. México. Agosto, 2014. vol. 19, no. 7.

REVISTA INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN. Orono. Diciembre, 2012. vol. 27, no 3.

SALSILLI MURÚA, Ricardo. Manual de Diseño de Pisos Industriales, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. Santiago de Chile: Instituto del Cemento y del Hormigón De Chile, 2011. 81 p.

SÁNCHEZ SABOGAL, F. Módulo 3. Esfuerzos en Pavimentos Rígidos [en línea]. Bogotá: Escuela de Ingenieros [citado 20 agosto, 2014]. Disponible en Internet: <URL: [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%203.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%203.pdf)>.

TOXEMENT. Guía de Diseño para Pisos en Concreto - Lineamientos para la construcción de losas de alto desempeño sobre terreno. Bogotá: La Empresa, 2010. 18 p.

VALVERDE, Osmar y CASANOVA, Eduardo. Aplicación de la tecnología de pavimento TPC en las calles 56 y 78 de la habilitación urbana. Quito: Universidad Nacional del Santa. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de Grado, 2012. 90 p.