

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL



**MODELACIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO  
HIDRÁULICO PARA LA OBTENCIÓN DE LA  
RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL MISMO**

PRESENTADO POR:

**LILIAN MARGARITA MIRANDA GRANADOS**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERA CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE 2018

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL:

**MSc. CRISTOBAL HERNAN RIOS BENITEZ**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

DIRECTOR:

**ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERA CIVIL**

Título:

**MODELACIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO  
HIDRÁULICO PARA LA OBTENCIÓN DE LA  
RESPUESTA ESTRUCTURAL DEL MISMO**

Presentado por:

**LILIAN MARGARITA MIRANDA GRANADOS**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA**

SAN SALVADOR, SEPTIEMBRE 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso por mostrarme su amor a través de cada persona que me rodea, por la oportunidad de vivir para culminar mi carrera.

A mis padres por guiarme y educarme con amor por enseñarme que no existe sueño imposible, gracias por acompañarme en este camino y animarme en todas esas ocasiones cuando quería abandonar mis sueños. A ti mi pequeña hermana menor porque me impulsaste a vencer mis miedos y día tras día me motivas a seguir adelante. A ustedes mis tías-mamás: Coco, Hilda, Marta, Sandra, Lilian, Yolanda, Beatriz e Imelda por educarme con paciencia, por cuidar de mí con mucho amor, por los sacrificios que hicieron por mí; a mis tíos Santos, Jony, Héctor, Alex, Tomas y a mi tío-papá William por apoyarme en cada momento y por creer en mí; Dios me ha mostrado su amor a través de ustedes. A mis primas y primos en especial a William Alejandro por ser mi hermano mayor, por cuidarme y apoyar todas mis locuras; a mis ángeles en la tierra Tito López y Byan Aranzamendi por siempre tener un abrazo para mí en momentos de tristeza.

A la generación Insane, por las experiencias y momentos vividos, a ustedes mis amigos Víctor, Paola, Andrés, Rudy, Victoria y Tommy por aguantar mis ocurrencias y algunos cuantos disgustos. A José, Silvia, Carlos, Ed y Eunice por acompañarme durante el proceso de este trabajo y nunca dejarme sola.

Al movimiento estudiantil de la FIA, a mi asociación de escuela ASEIC y asociación general ASEIAS porque me permitieron servir a los demás y al mismo tiempo conocer a personas maravillosas, con diferentes creencias religiosas y políticas, a quienes ahora puedo llamar ¡Amigos!

Al Ing. Jorge Flores por su apoyo, sus consejos y siempre escuchar mis ideas, a mi asesor Ing. Mauricio Valencia por la paciencia para guiarme durante este trabajo de grado.

Al equipo LIP-PAR de FOMILENIO II, por su apoyo incondicional y sus consejos, gracias por enseñarme que trabajando en equipo se pueden alcanzar grandes metas.

A mi familia en Cristo, mi comunidad *Cristo la Piedra Angular* por sus oraciones en momentos difíciles, a MIRE por impulsarme a lograr grandes cosas, por acompañarme en cada etapa de mi vida y sobre todo gracias por nunca dejar que perdiera la fe, este triunfo también es de ustedes.

¡Gracias totales!

*Margarita Miranda*

## DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, por permitirme superar cada obstáculo del camino, por prestar la condiciones necesaria para poder conocer a personas maravillosas que han estado a mi lado apoyándome.

A mis abuelos: Joaquina, Alejandro, Margarita y Martin porque el poco tiempo que Dios nos permitido estar juntos fue suficiente para darme cuenta que quería ser grande en valores y amor como ellos.

A mi padre: Francisco Miranda, por educarme con amor, porque tu ejemplo siempre me inspira y recordar todo tú esfuerzo y sacrificio me llenó de fuerzas en momentos de flaqueza.

A mi madre: Vilma Otilia de Miranda, porque nunca me dejaste sola, porque siempre tuviste un abrazo para mí cuando el mundo se me venía encima, por tu sacrificio y dedicación para educarme.

A mi hermana: Kelly Geraldine Miranda, por ser mi confidente, mi compañera de fórmula, mi cómplice de aventuras; me inspiraste a soñar en grande y juntas estamos alcanzando todo aquello que soñamos de niñas.

A mi Familia: tías, tíos, primas, primos, sobrinas y sobrinos por llenarme de amor a través de sus cuidados y consejos.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I:GENERALIDADES.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Antecedentes .....	4
1.3 Planteamiento del problema.....	8
1.4 Objetivos .....	9
1.4.1 Objetivo general.....	9
1.4.2 Objetivos específicos.....	9
1.5 Alcances .....	10
1.6 Limitaciones .....	11
1.7 Justificación.....	12
CAPÍTULO 2:COMPORTAMIENTO DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	13
2.1 Generalidades de los pavimentos rígidos.....	14
2.1.1 Partes componentes de los pavimentos rígidos.....	14
2.2 Esfuerzos debido al alabeo de losas .....	20
2.2.1 Gradientes de temperatura.....	20
2.2.2 Gradientes de humedad.....	22
2.2.3 Cálculo de esfuerzos.....	23
2.3 Esfuerzos y deflexiones debido a las cargas de tránsito.....	26
2.3.1 Soluciones cerradas.....	27
2.3.2 Cartas de influencia.....	31
2.3.3 Elementos finitos.....	37
2.4 Esfuerzos de fricción.....	37
CAPITULO 3:MODELO DE ELEMENTOS FINITOS .....	40
3.1 Introducción al método de elementos finitos.....	41
3.1.1 Descripción general del método.....	41
3.1.2 Pasos para el análisis de Elementos Finitos.....	44
3.1.3 Tipos de Elementos Finitos.....	45
3.1.4 Selección del tipo de Elementos.....	52
3.2 Factores de entrada al proceso de modelación .....	54

3.2.1 Tránsito vehicular. ....	54
3.2.2 Propiedades de los materiales componentes. ....	60
3.2.3 Factores Climáticos. ....	64
3.3 Selección de software de elementos finitos ....	64
3.3.1 Descripción de EverFE 2.24. ....	66
3.3.2 Descripción de Ap-Rigid 1.0. ....	67
3.3.3 Software para retrocalculo BAKFAA. ....	68
<b>CAPÍTULO 4: MODELACIÓN DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO</b> .....	<b>69</b>
4.1 Descripción del tramo en estudio ....	70
4.1.1 Características del tramo. ....	71
4.2 Parámetros para la modelación en EverFE ....	72
4.2.1 Geometría. ....	73
4.2.2 Propiedades de los materiales. ....	74
4.2.3 Cargas de eje de rueda y térmicas. ....	77
4.2.4 Propiedades de barras de amarre. ....	79
4.2.5 Trabazón de agregado. ....	81
4.2.6 Mallado, ....	82
4.2.7 Resolver. ....	83
4.2.8 Resultados del programa. ....	85
4.3 Parámetros para la modelación en ApRigid 1.0. ....	87
4.4 Metodología para la caracterización del pavimento. ....	89
4.4.1 Determinación de tramos homogéneos. ....	89
4.4.2 Calculo de módulos elásticos. ....	93
4.4.3 Modelación de elementos finitos. ....	97
4.5 Resumen de Resultados ....	97
4.5.1 Análisis estructural mediante la determinación de esfuerzos. ....	97
4.5.2 Comparación de deflexiones. ....	99
<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>103</b>
5.1 Conclusiones.....	104

5.2 Recomendaciones.....	105
REFERENCIAS.....	106
ANEXOS.....	109
Anexo A .....	110
Anexo B. ....	112
Anexo C.....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1</i> Pavimento de concreto simple.....	15
<i>Figura 2.2</i> Pavimento de Concreto Simple con Dovelas.....	15
<i>Figura 2.3</i> Pavimento de concreto reforzado .....	16
<i>Figura 2.4</i> Pavimento con refuerzo continuo .....	17
<i>Figura 2.5</i> Tasa de evolución del calor de hidratación del cemento portland ....	21
<i>Figura 2.6</i> Alabeo por temperatura en las losas de concreto hidráulico. ....	22
<i>Figura 2.7</i> Gráfico de Bradbury para determinar esfuerzos en losas finitas .....	25
<i>Figura 2.8</i> Posiciones de la carga para las ecuaciones de Westergaard.....	28
<i>Figura 2.9</i> Carta de Influencia para la aplicación de determinación de momentos	
<i>Figura 2.10</i> Carta de Influencia para la deflexión debido a carga en el interior.	35
<i>Figura 2.11</i> Carta de influencia para momento debido a la carga del borde.....	36
<i>Figura 2.12</i> Gráfico de influencia para la deflexión debido a la carga del borde.	
<i>Figura 2.13</i> Esfuerzos de fricción en losas de concreto.....	38
<i>Figura 3.1</i> placa de dimensiones finitas, sometida a tracción en sus lados superior e inferior,.....	42
<i>Figura 3.2</i> Modelación por elementos finitos, empleando elementos triangulares	
<i>Figura 3.3</i> Elemento Truss tridimensional.....	46
<i>Figura 3.4</i> Elemento Beam tridimensional .....	47
<i>Figura 3.5</i> Elemento bidimensional en esfuerzo plano: (a) Triangular; (b) Cuadrilátero .....	48
<i>Figura 3.6</i> Elementos cuadriláteros y triangulares. ....	49
<i>Figura 3.7</i> (a) Cilindro bajo presión interna;(b) Modelo Axisimétrico; (c) Elemento Cuadrilatero; (d) Elemento Triangular.....	50
<i>Figura 3.8</i> Elemento brick y sus grados de libertad por nodo (8 nodos). ....	50
<i>Figura 3.9</i> (a) Tetraedro de 4 nodos; (b) tetraedro de 10 nodos.....	51
<i>Figura 3.10</i> (a) Cilindro con extremos empotrados y carga puntual en la mitad; (b)Modelo de viga; (c) Modelo con elementos Plate/shell.....	53

<i>Figura 3.11</i> Imagen que ilustra la diversidad de vehículos y cargas que se pueden encontrar en la actualidad sobre una carretera en El Salvador. ....	54
<i>Figura 3.12</i> Espectro de carga característico de un eje Sencillo Dual.....	57
<i>Figura 3.14</i> Esquema de los montajes en flexión y tensión indirecta para la determinación de la resistencia a la tensión de concretos hidráulicos y materiales estabilizados.....	61
<i>Figura 4.1</i> Localización del tramo vial en estudio .....	70
<i>Figura 4.2</i> Estructura de Pavimento Boulevard Diego de Holguín tramo I.....	72
<i>Figura 4.3</i> Parámetros Geométricos del tramo es estudio.....	73
<i>Figura 4.4</i> Panel de entrada de propiedades mecánicas y estructurales de los materiales de la estructura de pavimento rígido .....	76
<i>Figura 4.5</i> Parámetros geométricos de los ejes de rueda, eje tándem.....	78
<i>Figura 4.9</i> Panel de trabajo dentro del software para especificar las propiedades de dovelas y barras de amarre. ....	80
<i>Figura 4.10</i> Panel de entrada para datos de trabazón de agregados. ....	81
<i>Figura 4.11</i> Panel para afinar el mallado según la necesidad del análisis.....	83
<i>Figura 4.12</i> Cuadro de dialogo Ejecutar .....	84
<i>Figura 4.13</i> Cuadro de avance de la solución.....	84
<i>Figura 4.14</i> Ventana de visualización de esfuerzos.....	85
<i>Figura 4.15</i> Máximos esfuerzos principales en la superficie de la losa.....	86
<i>Figura 4.17</i> Interfaz principal de ApRigid 1.0 .....	87
<i>Figura 4.18</i> Venta de resultados de análisis individual de ApRigid.....	88
<i>Figura 4.19</i> Grafico Diferencia de área vrs Distancia.....	91
<i>Figura 4.20</i> Sección de propiedades de la estructura del pavimento. ....	94
<i>Figura 4.22</i> Sección para las propiedades del equipo. ....	95
<i>Figura 4.23</i> Nomograma para el cálculo del módulo de reacción de la subrasante.....	96
<i>Figura 4.24</i> Deflexiones medidas por FWD y calculadas con EverFE de la estación 1+500 .....	101

<i>Figura 4.25</i> Deflexiones medidas por FWD y calculadas con EverFE de la estación 2+250 .....	101
<i>Figura 4.26</i> Deflexiones medidas por FWD y calculadas con EverFE de la estación 3+730 .....	102
<i>Figura 4.27</i> Deflexiones medidas por FWD y calculadas con EverFE de la estación 4+480 .....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 <i>Elementos Finitos según su dimensión</i> .....	45
Tabla 3.2 aplicación de cada tipo de elemento.....	52
Tabla 3.3 <i>Configuraciones de ejes, cargas máximas permitidas por tipo de eje.</i>	
Tabla 3.4 <i>Espetros de carga vehicular del año 2015</i> .....	60
Tabla 4.1 <i>Parámetros considerados en el diseño del pavimento</i> .....	71
Tabla 4.2. <i>Dimensiones de la estructura del pavimento.</i> .....	74
Tabla 4.3 <i>Resumen de las propiedades de los materiales.</i> .....	76
Tabla 4.4 <i>Cargas por ejes y gradientes térmico.</i> .....	77
Tabla 4.5 <i>Parámetros geométricos de ejes de ruedas</i> .....	78
Tabla 4.6. <i>Método de las diferencias acumuladas</i> .....	92
Tabla 4.7 <i>Resumen de resultados BakFAA</i> .....	96
Tabla 4.8 <i>Resumen de resultados obtenidos con EverFE 2.24</i> .....	98
Tabla 4.9. <i>Resumen de resultados obtenidos con Ap-Rigid.Regresión lineal múltiple.</i> .....	99
Tabla 4.10 <i>Resumen de resultados obtenidos con Ap-Rigid. Red Neuronal Artificial.</i> .....	99
Tabla 4.11 <i>Deflexiones medidas por FWD y calculadas por EverFE</i> .....	100

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES**

## 1.1 Introducción

Actualmente países latinoamericanos como Costa Rica y Chile están desarrollando investigaciones para definir parámetros mecanicista con los que se puedan obtener criterios para el diseño empírico-mecanicista de pavimentos de concreto hidráulico. Estos nuevos criterios de diseño buscan garantizar el desempeño de los pavimentos a lo largo de su vida de diseño.

El Salvador ha destacado a nivel Centroamericano por la calidad de sus carreteras, sin embargo es casi nula la investigación que se ha realizado para poder ejecutar un cambio del diseño empírico tradicional al diseño empírico-mecanicista.

Para emplear estas nuevas metodologías es necesario conocer las propiedades de los materiales que se utilizaran, considerar factores climáticos y las cargas dinámicas a las que están expuestos constantemente los pavimentos. Sin embargo muy poco se ha investigado acerca de estos factores. A pesar de existir investigaciones de las propiedades de suelos de nuestro país, se conoce poco de la influencia del factor clima que juega un papel muy importante debido a que el cambio de temperatura es el principal causante del fenómeno de alabeo en los pavimentos rígidos.

La presente investigación busca determinar la respuesta estructural de losas de pavimento empleando modelación no tradicional basada en la Teoría de Elementos Finitos. Para dicha investigación se consideran las características

propias de materiales utilizados en la construcción del tramo en estudio, apoyándose en investigaciones realizadas en nuestro país; de igual manera se considera el gradiente de temperatura.

De forma simple la investigación puede dividirse en tres etapas, la primera busca definir los conceptos necesario para la comprensión de los resultados, la segunda realizar un análisis estructural, modelando el tramo en estudio y determinando los esfuerzos resultantes ante la exposición a diferentes cargas por ejes, tomando como base el resultado de investigaciones realizadas en el país respecto a los espectros de carga.

En la tercera etapa, se modela considerando las cargas del ensayo de deflectometría de impacto (FWD, Falling Weight Deflectometer) para comparar las deflexiones calculadas por el software de elementos finitos y las deflexiones obtenidas en el ensayo en el tramo y verificar la aplicabilidad que tiene este software para las condiciones de nuestro país.

## 1.2 Antecedentes

Los primeros avances en el análisis de pavimentos rígidos se dieron en 1920. En 1926, H.M Westergaard (Ingeniero Danés) plantea una serie de hipótesis basadas en la teoría de láminas delgadas de Love-Kirchhoff y el Modelo de Winkler.:

- La losa de concreto se considera como un sólido homogéneo, elástico e isótropo en equilibrio, (teoría Love-Kirchhoff.)
- La reacción de la subrasante es solo vertical y proporcional a la deflexión de la losa (macizo de Winkler). La resistencia de la subrasante se mide con  $k$ , al que Westergaard caracterizó como módulo de reacción de la subrasante, el cual es una medida de la rigidez del medio a partir de medir la fuerza que se aplica en un área por unidades de deflexión.
- Se consideran tres posiciones de carga: carga en el interior, en la esquina, y en el borde.

En 1932, la agencia de carreteras públicas dirigió las Pruebas de Carreteras de Arlington, Virginia, usando la teoría de Westergaard como base. Luego de estas pruebas, Westergaard modificó sus fórmulas y los resultados de estas pruebas quedaron expuestos en los trabajos que desarrolló en 1933.(Hernández,2013,p.15)

En 1951 Pickett y Ray crearon las *cartas de Influencia*, estas cartas permiten que las ecuaciones de Westergaard sean aplicables a diferentes

configuraciones de carga. Las cartas de influencia fueron usadas por la Portland Cement Association (PCA) para el diseño de pavimentos rígidos. Las cartas para cargas en el interior fueron usadas en el diseño pavimentos para aeropuertos (1955), mientras que las cartas para cargas en el borde se emplearon en el diseño de pavimentos para carreteras (1966).

Las cartas se presentaron con cuatro tipos diferentes de aplicaciones de cargas:

1. En el interior asumiendo la explanación como un líquido denso.
2. En el interior asumiendo la explanación como un sólido-elástico.
3. En el borde asumiendo la explanación como un líquido denso.
4. Localizada a  $l/2$ , del borde asumiendo la explanación como un líquido denso.

En otros trabajos, Pickett presentó dieciséis cartas de influencia adicionales para deflexiones, momentos, y presiones reactivas, para el caso de losas cargadas en el interior, cerca del borde, y cerca del centro, y para explanaciones consideradas con capas líquidas, sólidas-elásticas o elásticas.

Desde la idea original de Westergaard algunos otros investigadores como Robert G. Packard en 1968 y M.T. Darter en 1987, hicieron aportes para perfeccionar las hipótesis iniciales.

Se desarrollaron programas que brindan soluciones computarizadas para la teoría de Westergaard, entre los más destacados están H-51, H51-ES y PDILB

(comúnmente referidos al PCA AIRPORT). Estos, al estar basados en la teoría de Westergaard están también limitados por la deficiencia del modelo.

Debido a las muchas limitantes, en el año 1970 se hace uso de la teoría de elementos finitos como herramienta para el análisis de pavimentos.

En 1972, Sue K. Wang y Michel Sargious estudian la respuesta del pavimento rígido ante las cargas de las ruedas usando un modelo de elementos finitos elástico bidimensional; realizando de esta forma uno de los primeros aportes para el desarrollo del método de elementos finitos.

En 1978 Tabatabaie y Barenberg desarrollaron ILLI-SLAB, uno de los primeros programas de elementos finitos bidimensional. De esta manera se fueron desarrollando diferentes programas como: WESLIQID, WESLAYER, KENSLABS (1983 por Huang and Deng), RISC (1984) y FEACONS (1987), todos estos para análisis bidimensional considerando la carga de prueba estática. Luego en 1994 Chatti, Lysmer crea DYNA-SLAB para estudiar los efectos que tienen las cargas dinámicas aplicadas por camiones en la respuesta estructural del pavimento.

En 1998 el Dr. Bill Davidt, desarrolla otro modelo de elementos finitos estático tridimensional llamado EverFE que permite modelar pavimentos de hormigón masivo (JPCP) para determinar su respuesta estructural ante las cargas de tráfico y los efectos ambientales. Hasta la actualidad se sigue haciendo uso de este software para la modelación de pavimentos de concreto hidráulico.

Sin embargo en Latinoamérica se han desarrollado investigaciones para crear nuevos software considerando las características particulares de la región, por ejemplo: en el 2013 en Chile se lanza la segunda versión del software Optipave 2 esta segunda versión tiene la característica de que utiliza redes neuronales en el cálculo de las esfuerzos del pavimento y que muestra el escalonamiento en la junta de un pavimento utilizando diferenciales de temperatura en el cálculo.

En el 2015 en Costa Rica se crea ApRigid 1.0 para facilitar la determinación de las respuestas mecánicas críticas de pavimentos rígidos, en el proceso de diseño empírico mecanicista de pavimentos rígidos mediante técnicas de regresión lineal múltiple y de redes neurales artificiales.

### **1.3 Planteamiento del problema**

Históricamente el análisis de pavimentos se ha realizado en base a métodos empíricos en los cuales influyen las propiedades físicas de los materiales y tienen como limitante el tipo de suelo, método de construcción y configuración vehicular de la época.

En la actualidad muchos de los países de Latinoamérica, están desarrollando investigaciones para obtener parámetros mecanicistas en los que las propiedades fundamentales de los materiales se conocen y puedan determinarse en un laboratorio o en campo, lo anterior con el fin de definir criterios para el diseño empírico-mecanicista de pavimentos de concreto hidráulico. Con estas nuevas metodologías en estudio, se busca garantizar el desempeño de los pavimentos a lo largo de la vida del proyecto en los que son utilizados.

A pesar de que El Salvador destaca en la calidad de sus carreteras a nivel Latinoamericano, muchas de estas presentan daños severos que afectan de forma directa al desarrollo del país y a la economía de sus ciudadanos. Por lo que se vuelve necesario realizar un análisis de los pavimentos de concreto hidráulico para obtener su respuesta estructural antes los diferentes tipos de carga a los que comúnmente se encuentran expuestos.

Todo esto para poder mejorar la metodología de diseño y esta manera aumentar en gran medida la confiabilidad de los diseños.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general.**

- Efectuar la modelación de losas de pavimento de concreto hidráulico para la obtención de la respuesta estructural del mismo.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- Determinar los esfuerzos teóricos producidos en losas de pavimento de concreto hidráulico por medio del uso de programa computacional de Elementos Finitos.
- Identificar las deformaciones teóricas producidas en losas de pavimento de concreto hidráulico por medio del uso de programa computacional de Elementos Finitos.
- Definir las deflexiones teóricas producidas en losas de pavimento de concreto hidráulico por medio del uso de programa computacional de Elementos Finitos.

## 1.5 Alcances

La investigación es orientada a definir una base teórica para el desarrollo de alternativas que faciliten la aplicabilidad de las metodologías empírico-mecanicistas para la modelación de losas de pavimento de concreto hidráulico utilizando el método de elementos finitos.

Para tener una base de comparación debe trabajarse con datos de un tramo de carretera ya existente por lo tanto en este caso, el tramo en estudio es el tramo I del Boulevard Monseñor Romero (antes *Diego de Holguín*), que cuenta con una longitud de 5.05 km y un ancho con 3 carriles por sentido que varía entre 3.50 y 3.65 metros. Se busca determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones, a los que las losas del tramo de prueba se encuentran sometidas.

Para efectuar la modelación se utilizara el software EverFE 2.24 que para su simulación emplea la teoría de elementos finitos, estático tridimensional. Debido a que no se tiene acceso a otro software libre que trabaje bajo la metodología de elementos finitos, se emplea el software desarrollado por el Programa de Infraestructura de Transporte de la Lanamme ApRigid 1.0 que modela con técnicas de regresión lineal múltiple y de redes neurales artificiales.

Aunque se cuenta con tramo de carretera para el estudio, los resultados no serán verificados en campo debido al inconveniente de no contar con el equipo necesario y las gestiones con instituciones externas a la universidad que si cuentan con el equipo se vuelven complicadas.

## 1.6 Limitaciones

- En nuestro país existe poca o nula investigación referente a la modelación de pavimentos rígidos empleando la teoría de elementos finitos para obtención de la respuesta estructural del pavimento.
- La falta de cooperación de las entidades correspondientes para tener acceso a los datos del tramo en estudio y que son necesarios para efectuar la modelación.
- La información teórica en su mayoría es con base a investigaciones de países que tienen mayor desarrollo en la exploración de esta área, por lo que no se puede verificar las condiciones en las que fueron desarrolladas, por tanto queda fuera de los alcances de la investigación.
- Los datos necesarios para la modelación de losas del tramo en estudio serán proporcionados por la institución encargada de la gestión de su construcción.
- El tiempo establecido para poder realizar la investigación es de nueve meses, con una prórroga de tres meses según el reglamento interno de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Los datos del ensayo de deflectometría de impacto (FWD, Falling Weight Deflectometer), serán proporcionados por Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOP). De la institución dependerá el tiempo necesario para tener acceso a los datos.

## 1.7 Justificación

Esta investigación surge ante la necesidad de ahondar en el conocimiento acerca del estado de la modelación de pavimentos de concreto hidráulico; en búsqueda de avanzar hacia la aplicación de las nuevas metodologías empírico-mecanicista, dichas metodologías han empezado a ser adaptadas en algunos países de Latinoamérica como Costa Rica donde se ha llegado a crear software basados en las propiedades de materiales y condiciones climáticas del país.

La investigación contribuirá a profundizar los conocimientos en la modelación de losas de pavimentos de concreto hidráulico y posteriormente podrá utilizarse como base teórica para el desarrollo de software para el diseño y modelación de pavimentos de concreto, en los que se podrá considerar y representar de mejor manera la influencia de las características particulares de los materiales en cada región de nuestro país.

Con la modelación de este tipo de pavimentos podemos obtener los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en puntos claves dentro de la sección de una losa, la respuesta de la estructura respecto a cargas dinámicas vehiculares puede usarse para el análisis estructural del pavimento y la estimación de la evolución de los diferentes tipos de deterioro de los pavimentos, con lo que se puede mejorar el desempeño del pavimento a lo largo de su vida de diseño y garantizar la satisfacción de todos los usuarios que transitan por las carreteras.

**CAPÍTULO 2**  
**COMPORTAMIENTO DE LOS**  
**PAVIMENTOS RÍGIDOS**

## **2.1 Generalidades de los pavimentos rígidos**

Cuando hablamos de pavimentos nos referimos a una estructura compuesta por capas de diferentes materiales que al trabajar en conjunto logran ser suficientemente resistentes para soportar cargas estáticas y dinámicas de grandes magnitudes, causadas por el tránsito de vehículos. Considerando la capacidad de transmitir las cargas entre capas subyacentes, un pavimento puede clasificarse en: pavimentos rígidos y pavimentos flexibles

Los pavimentos rígidos están compuesto por tres capas: sub-rasante, base o sub-base y la superficie de rodadura. En el caso de los pavimentos rígidos está superficie de rodadura es elaborada con una mezcla de cemento portland, agregados pétreos y agua en proporciones según la necesidad del diseño del pavimento.

### **2.1.1 Partes componentes de los pavimentos rígidos.**

#### **2.1.1.1 Losa de concreto.**

En cuanto a su tipología, las losas de concreto rígido pueden clasificarse en:

**Pavimentos de concreto simple:** (Figura 2.1) en este tipo de pavimento las losas son relativamente cortas en general menores de 6 m de largo y 3.50 m de ancho, en las cuales la transferencia de carga se da a través de la trabazón de agregados entre juntas, no tienen refuerzo de acero ni dovelas. Los espesores pueden variar de acuerdo al uso previsto, dentro de un rango de 10 a 25 cm. Este tipo de pavimento es usado principalmente en vías de bajo tránsito.

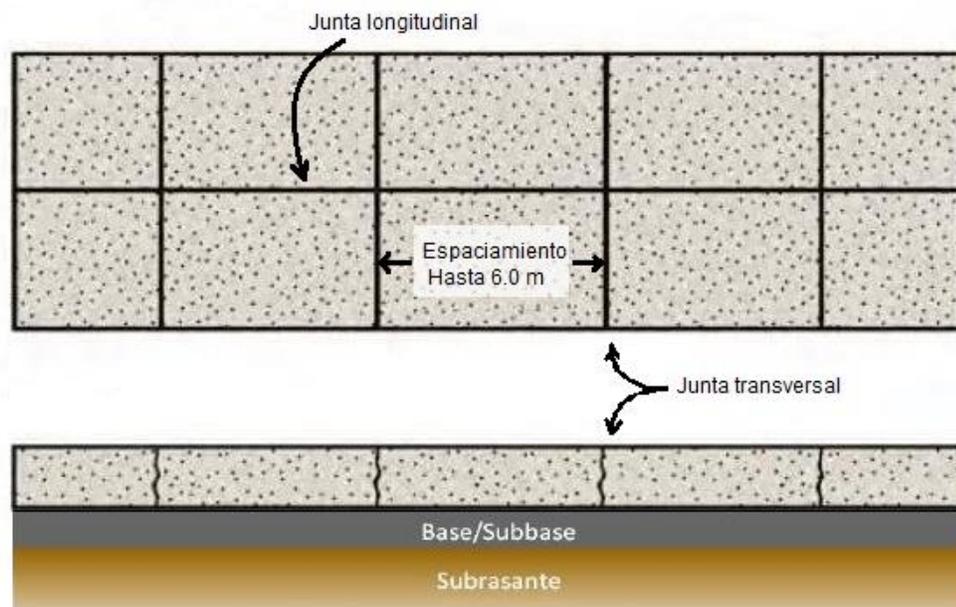


Figura 2.1 Pavimento de concreto simple

Fuente: elaboración propia

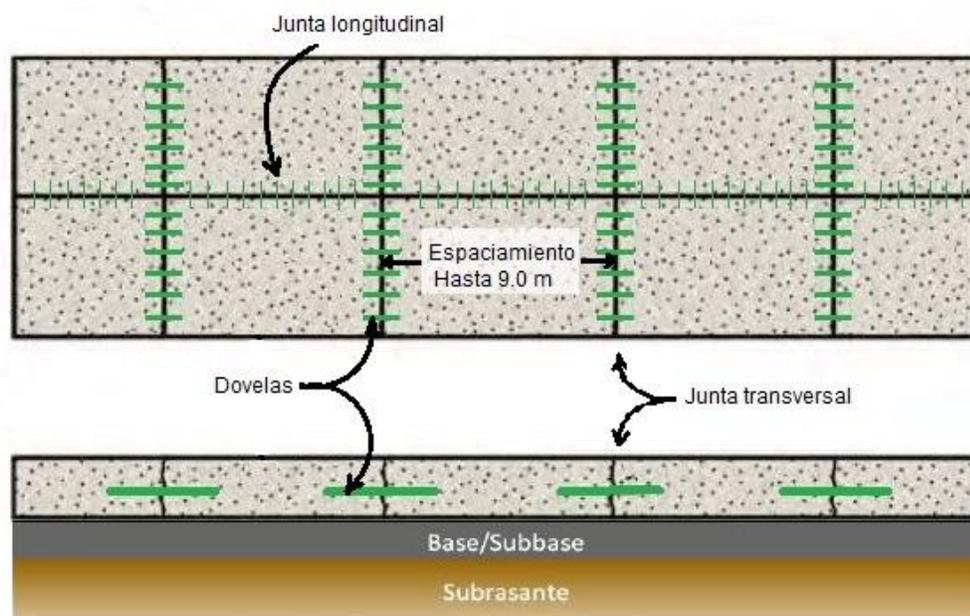


Figura 2.2 Pavimento de Concreto Simple con Dovelas

Fuente: elaboración propia.

**Pavimentos de concreto simple con dovelas:** (Figura 2.2) en este tipo de pavimento se usan dovelas para la transferencia de carga entre una losa y losa adyacente evitando así el escalonamiento. La longitud de estas losas puede ser hasta de 9.0 m con espesor mayor o igual a 15 cm ya que usualmente se construye en vías donde el tráfico es constante y excede ejes equivalentes a 8.2 ton.

**Pavimentos de concreto reforzado:** (Figura 2.3) este pavimento además de tener dovelas entre losa y losa también lleva refuerzo transversal y longitudinal a lo largo de toda la losa, su finalidad es resistir las tensiones de contracción del concreto y controlar los agrietamientos.

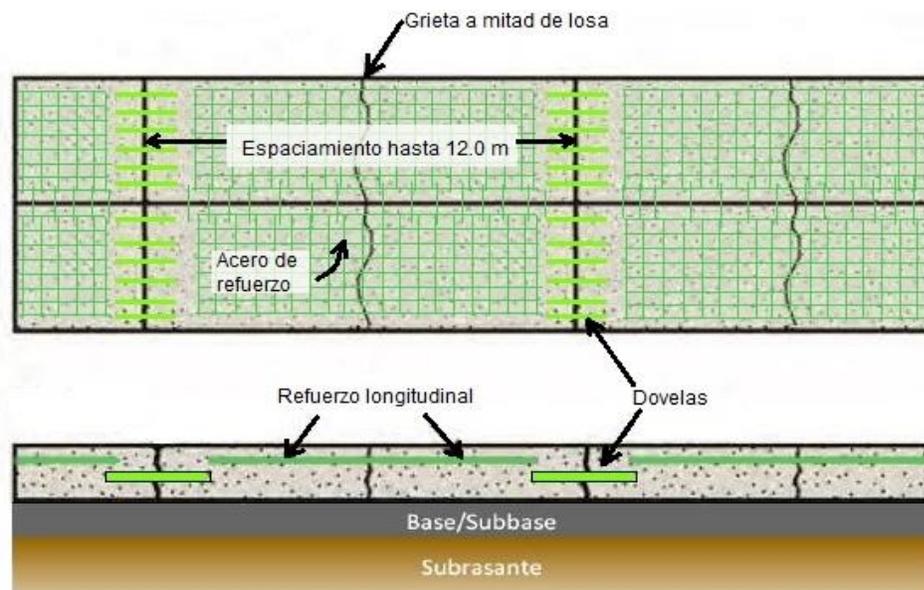


Figura 2.3 Pavimento de concreto reforzado

Fuente: elaboración propia.

La separación entre juntas es mayor que los dos tipos de losa mencionados anteriormente, puede tener una longitud de 9 a 12 m.

**Pavimento con refuerzo continuo:**(Figura 2.4) este pavimento no tiene juntas transversales a excepción de las juntas de construcción y está reforzado transversal y longitudinalmente con el objetivo de controlar las fisuras de contracción. La cantidad máxima de acero es 1.5% de la sección transversal.

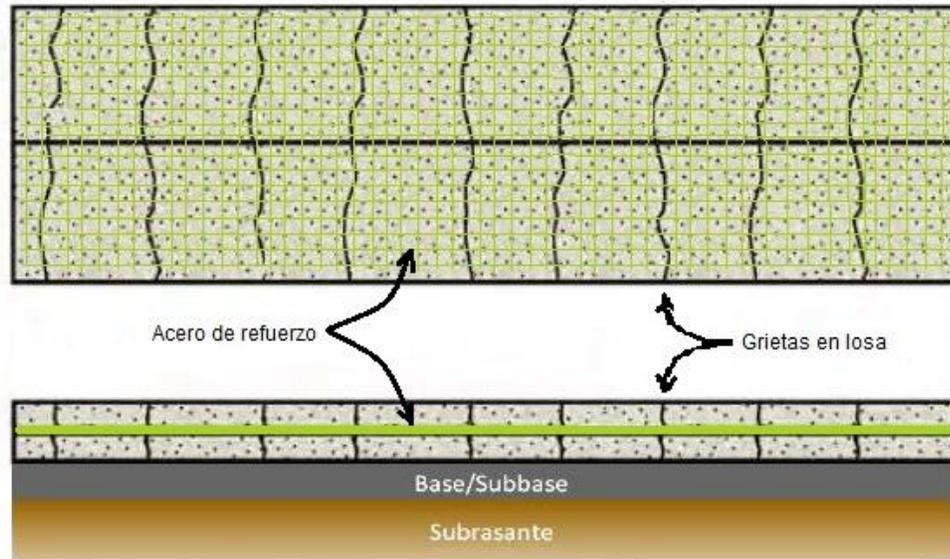


Figura 2.4 Pavimento con refuerzo continuo

Fuente: elaboración propia.

### **2.1.1.2 Base o sub-base.**

En pavimentos de concreto hidráulico (rígidos) a diferencia de los pavimentos asfálticos (flexibles) no es necesario colocar base; debido a sus características estructurales, por lo tanto únicamente se colocan materiales de sub-base sobre la sub-rasante, cuando ésta no presente condiciones adecuadas de soporte.

La sub-base es una capa relativamente delgada de materiales seleccionados o especificados de espesor determinado colocado entre la sub-rasante y la losa, con el objeto de mejorar el soporte, prevenir el bombeo (perdida de finos) o controlar la humedad del suelo, para sub-rasantes de alto cambio volumétrico. El espesor de la sub-base oscila entre 10 y 25 cm, si son menores de los 10 cm puede ocurrir que las irregularidades de la sub-rasante propicien espesores de sub-bases demasiados delgados y no se de una resistencia de soporte uniforme a la losa; por otro lado si son mayores de 25 cm solo se ocupan cuando en la sub-rasante existen suelos altamente expansivos ya que la sub-base controla los hinchamientos y contracciones de estos suelos.

#### ***2.1.1.3 Sub-rasante.***

Es la parte de una carretera que sirve para el soporte de las capas del pavimento, por tanto debe de cumplir con ciertas características estructurales, de manera que los materiales seleccionados que se colocan sobre ella se acomoden en espesores uniformes y su resistencia debe ser homogénea en toda la superficie para evitar fallas en el pavimento.

La sub-rasante es de vital importancia en cualquier tipo de pavimento, la capacidad de soporte de la sub-rasante y de las capas de apoyo de un pavimento se cuantifica por medio de un parámetro llamado Modulo de Reacción, conocido también como coeficiente de balasto o Modulo de Westergaard representado convencionalmente por (k); que es igual a la relación entre la presión aplicada sobre el terreno y el asentamiento correspondiente.

$$k = \frac{p}{d} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Dónde:

k: Modulo de reacción.

p: Presión aplicada.

d: Asentamiento correspondiente.

Las unidades de k son  $\text{kg} / \text{cm}^2 / \text{cm}$  o  $\text{kg} / \text{cm}^3$ . Este valor depende del tipo de suelo, su densidad y su contenido de humedad. Los suelos blandos como las arcillas plásticas tienen valores de k de  $1.40 \text{ kg} / \text{cm}^3$  aproximadamente, los suelos densamente graduados arena - grava no plásticos, pueden tener valores de k hasta de  $14.0 \text{ kg} / \text{cm}^3$ .

Uno de los métodos para encontrar este valor, es el ensayo de placa de carga. Los ensayos de carga de placa son una herramienta para la determinación del comportamiento de un suelo.

El ensayo consiste en aplicar una carga y medir el desplazamiento vertical de un punto de la superficie de un suelo bajo el centro de una placa circular rígida, sometida a uno o varios ciclos de carga predefinidos. El objetivo principal es verificar y conocer los esfuerzos admisibles del terreno y las deformaciones asociados, determinando la curva carga-deformación del terreno.

Existen diversas normas que rigen este ensayo como son las normas ASTM D1194, D 1195, D1196 y AASHTO T 222.

## **2.2 Esfuerzos debido al alabeo de losas**

Los factores que afectan la magnitud del alabeo en una losa son determinados por los cambios de humedad y de temperatura en la losa, estos incluyen el material de base, las características de la mezcla, el manejo del concreto y las condiciones en servicio después de la construcción.

### **2.2.1 Gradientes de temperatura.**

Cuando el cemento entra en contacto con el agua inicial, este se hidrata y empieza a experimentar cambios en su temperatura, como se muestra en la figura 2.5, ocasionando la denominada reacción exotérmica.

La mayoría de los cuerpos se dilatan cuando aumenta su temperatura y se contraen cuando la temperatura disminuye. Mientras la temperatura va en aumento el concreto gana resistencia, endureciendo y a la vez dilatándose hasta que se convierte en sólido. Al bajar la temperatura el concreto sufre un proceso de contracción denominado contracción térmica, posteriormente este cuerpo sólido va a experimentar la expansión y contracción a lo largo de su vida considerando los cambios de temperatura del ambiente y el diferencial de humedad entre la parte superior e inferior de la losa. Produciendo la curvatura hacia arriba o hacia debajo de la losa, a este fenómeno se le denomina alabeo.

El alabeo es definido por el comité ACI 116 como “la distorsión de un miembro originalmente lineal o plano en forma curva como la deformación de una losa debido a la fluencia o las diferencias de temperatura o contenido de humedad en las zonas adyacentes a sus caras opuestas” (p.29)

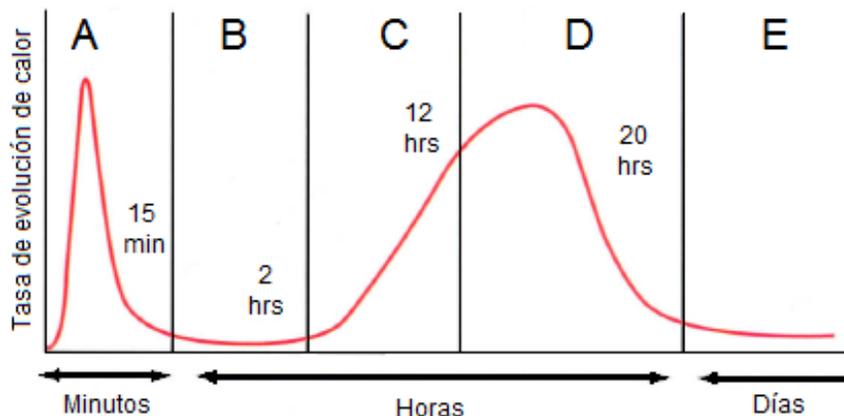


Figura 2.5 Tasa de evolución del calor de hidratación del cemento portland

Fuente: Universidad de Illinois

El alabeo puede presentarse en las losas de forma convexa o cóncava dependiendo del diferencial de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa, provocando esfuerzos de compresión y tensión.

Durante el día la superficie de la losa de concreto se encuentra expuesta a los rayos de sol que aumentan su temperatura provocando la expansión de la parte superior respecto a su eje de simetría causando alabeo con los borde hacia abajo causando esfuerzos de tensión en la superficie y esfuerzos de compresión en la parte inferior de la losa. Mientras tanto por la noche la temperatura en la parte superior es menor respecto a la parte inferior de la losa causando alabeo hacia arriba de los bordes provocando esfuerzos de compresión en la parte superior y esfuerzos de tensión en la parte inferior.

Otra explicación de alabeo puede darse en términos de la teoría de una placa de Winkler. Una fundación Winkleriana se caracteriza por una serie de resortes adheridos a un plato, como se muestra en la figura 2.6. Huang (2003) Afirma:

Cuando la temperatura en la parte superior es mayor que en la parte inferior, la parte superior es más larga que la parte inferior y la losa riza hacia abajo. Los resortes en el borde exterior están en compresión y empujan la losa hacia arriba, mientras que los resortes en el interior están en tensión y tiran de la losa hacia abajo. Como resultado, la parte superior de la losa está en compresión y el fondo está en tensión. Cuando la temperatura en la parte superior es menor a la de la parte inferior, la losa riza hacia arriba. Los resortes exteriores tiran de la losa abajo mientras que los resortes interiores empujan la losa hacia arriba lo que resulta en una tensión en la parte superior y una compresión en la parte inferior.

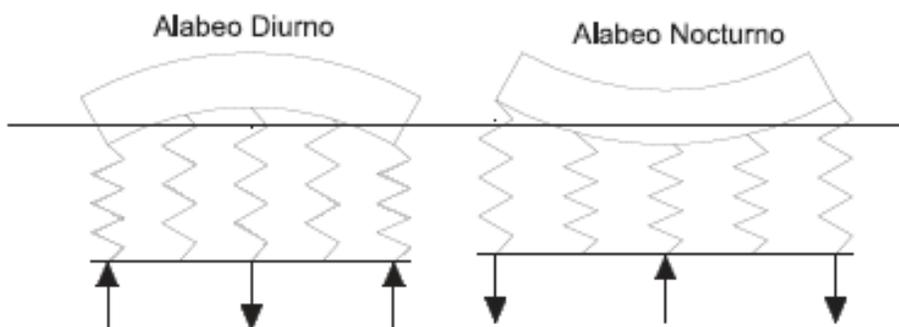


Figura 2.6 Alabeo por temperatura en las losas de concreto hidráulico.

Fuente: Huang, Yang. Pavement Analysis and Design.

### 2.2.2 Gradientes de humedad.

Las condiciones de humedad causan efectos similares a los térmicos en las estructura de pavimento dado que el incremento de humedad en el concreto endurecido provoca expansión y por lo tanto, esfuerzos de tensión. Por lo general, pese a que en la superficie se encuentra seca, a unos cuantos

centímetros de profundidad en la losa se tiene un nivel de humedad prácticamente constante.

Los gradientes de humedad provocan un labeo de la losa hacia arriba, similar al alabeo producto de un diferencial térmico negativo, por lo que el efecto en las respuestas mecánicas (especialmente en esfuerzos de tensión longitudinales en la superficie de la losa), es considerable.

En la práctica, es usual convertir este gradiente de humedad en un gradiente de temperatura equivalente.

### **2.2.3 Cálculo de esfuerzos.**

#### **2.2.3.1 Flexión de placa infinita.**

Para poder determinar los esfuerzos en una placa infinita es necesario destacar que esta placa puede estar expuesta a esfuerzos de alabeo bidireccionales. El desarrollo de las siguientes ecuaciones se realiza en base a lo expuesto por Hung (2004).

Para el cálculo en una dirección “x” se inicia considerando la Ley de Hooke

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad \text{Ec.2.1}$$

De igual manera puede calcularse para la dirección “y”

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Si la placa solo sufre deflexión en una la dirección “x”  $\varepsilon_y = 0$  , entonces

$$0 = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} \quad \rightarrow \quad \sigma_y = \nu \sigma_x \quad \text{Ec. 2.3}$$

Sustituyendo la Ecuación 2.3 en Ecuación 2.1 el esfuerzo en “x” será:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\nu \sigma_x}{E} \quad \rightarrow \quad \sigma_x = \frac{E \varepsilon_x}{1 - \nu^2} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Cuando la Flexión se produce en las dos direcciones como en caso del alabeo por temperatura los esfuerzos deben ser superpuestos para obtener el esfuerzo total. El esfuerzo máximo puede obtenerse a sumiendo restricción total de la losa.

$$\sigma_x = \frac{E \varepsilon_x}{(1 - \nu^2)} + \nu \frac{E \varepsilon_y}{(1 - \nu^2)} \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$\sigma_y = \frac{E \varepsilon_y}{(1 - \nu^2)} + \nu \frac{E \varepsilon_x}{(1 - \nu^2)} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Ahora, si consideramos la temperatura tenemos:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\alpha_t \Delta t}{2} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Si sustituimos la ecuación 2.7 en ecuación 2.5, entonces tendremos los esfuerzos totales:

$$\sigma_x = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \nu^2)} + \nu \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \nu^2)} = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \nu)} \quad \text{Ec. 2.8}$$

### 2.2.3.2 Esfuerzos en losa finita.

Para determinar las ecuaciones para losas finitas se pueden empezar considerando las ecuaciones para esfuerzos totales de una placa infinita pero afectándolas con un factor de corrección por las dimensiones.

$$\sigma_x = \frac{C_x E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \nu^2)} + \nu \frac{C_y E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \nu^2)} = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \nu)} (C_x + \nu C_y) \quad \text{Ec. 2.9}$$

Los factores de corrección  $C_x$  y  $C_y$  se pueden obtener a partir de las relaciones  $L_y/l$  y  $L_x/l$ , respectivamente, a partir del gráfico de Bradbury presentado en la figura 2.7. Un término importante es el de rigidez de la losa basada en la teoría de Westergaard denominado radio de rigidez relativa, el cual se expresa a continuación en la ecuación 2.10 :

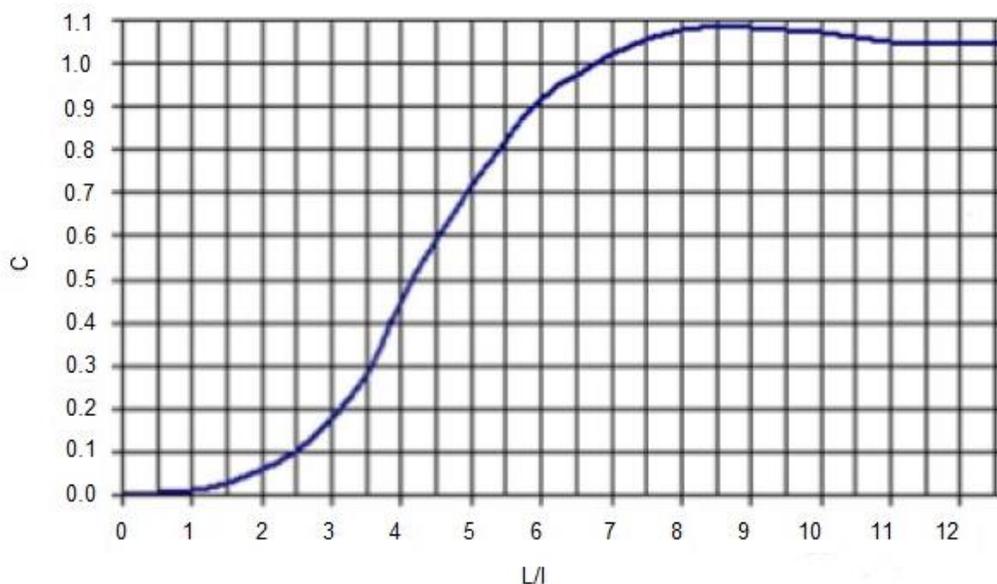


Figura 2.7 Gráfico de Bradbury para determinar esfuerzos en losas finitas

Fuente: Huang (2004). Pavement Analysis and Design.

$$l = \left[ \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k} \right]^{0.25} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Dónde:

$l$ : Radio de rigidez relativa de la losa

$E$ : Módulo de elasticidad del hormigón

$h$ : Espesor de la losa

$\mu$ : Coeficiente de Poisson del hormigón

$k$ : Módulo de reacción de la capa de apoyo

La ecuación 2.9 calcula el esfuerzo interior máximo en el centro de una losa. El esfuerzo de borde en el tramo medio de la losa puede determinarse con la ecuación 2.11

$$\sigma = \frac{CE\alpha_t\Delta t}{2} \quad \text{Ec. 2.11}$$

### 2.3 Esfuerzos y deflexiones debido a las cargas de tránsito

(Huang 1994) Existen tres formas de determinar los esfuerzos y deformaciones en una losa de pavimento de concreto hidráulico debido a las cargas, la primera de ellas es a través de las llamadas “Soluciones Cerradas” que son resultado de las investigaciones de Westergaard, que en 1926 realizó los primeros aportes en esta área al definir una serie de ecuaciones asumiendo la distribución de cargas como uniformes sobre un área circular o semicircular. Las otras dos formas tienen como base las investigaciones de Westergaard pero con algunas modificaciones buscando resolver algunas de las limitaciones

presentadas por el modelo teórico de original, (Pickett and Ray 1951) desarrollaron una serie de cartas de influencia que permiten que las ecuaciones de Westergaard sean aplicadas a múltiples configuraciones de cargas. Por último se considera además la Teoría de elementos finito dado que este enfoque es más razonable si se habla de analizar una serie de capas apoyada en una superficie líquida o de Winkler.

### **2.3.1 Soluciones cerradas.**

Westergaard planteó algunas hipótesis en su trabajo original:

- La losa de concreto se considera como un sólido homogéneo, elástico e isótropo en equilibrio, partiendo de la teoría clásica de láminas delgadas de Love-Kirchhoff.
- La reacción de la subrasante es solo vertical y proporcional a la deflexión de la losa, considerando el medio como infinitos soportes elásticos (macizo de Winkler).
- Se consideran tres posiciones de carga:(figura 2.8) carga en el interior, en la esquina, y en el borde, asumiendo la distribución de estas como uniforme sobre un área circular o semicircular de radio  $a$  llamada presión de contacto equivalente.

#### **Cargas en la esquina de la losa**

A continuación se muestran las ecuaciones originales desarrolladas por Westergaard para carga en esquina:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \quad \text{Ec.2.13}$$

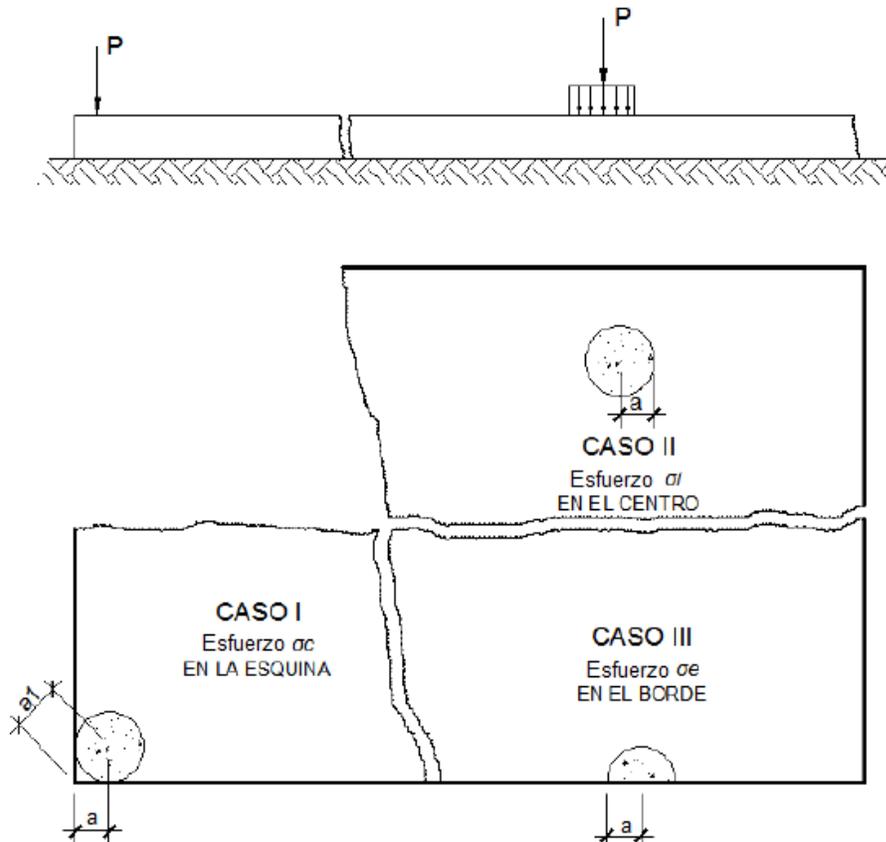


Figura 2.8 Posiciones de la carga para las ecuaciones de Westergaard

Fuente: Reporte "Estado del conocimiento de en la modelación de pavimentos rígidos"

$$\Delta_c = \frac{P}{kl^2} \left[ 1.1 - 0.88 \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right) \right] \quad \text{Ec.2.14}$$

Dónde:

$a$  = radio del elemento que carga (in)

$P$  = carga aplicada (lbs)

$k$  = módulo de reacción de la subrasante (psi)

$h$  = espesor de losa (in)

$l$  = radio de rigidez relativa.

Desde el trabajo original de Westergaard, algunos investigadores como (Packard 1968) (Darter 1987) buscaron perfeccionar las ecuaciones originales.

(Ioannides 1985) aplicó la teoría de elementos finitos para evaluar las soluciones de Westergaard recomendando el uso de las siguientes ecuaciones por ser más exactas:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{c}{l} \right)^{0.72} \right] \quad \text{Ec.2.15}$$

$$\Delta_c = \frac{P}{kl^2} \left[ 1.205 - 0.69 \left( \frac{c}{l} \right) \right] \quad \text{Ec.2.16}$$

Dónde:

$c$  = es la longitud de un área de contacto cuadrada.

### **Cargas en el interior de la losa.**

La fórmula más antigua desarrollada por Westergaard (1926b) para la tensión en el interior de una losa debajo de un área cargada circular de radio “ $a$ ” es:

$$\sigma_i = \frac{3(1 + \nu)P}{2\pi h^2} \left( \ln \frac{l}{b} + 0.6159 \right) \quad \text{Ec.2.18}$$

En la que " $l$ " es el radio de relativa rigidez y:

$$b = a \text{ cuando } a \geq 1.724h \quad \text{Ec.2.19}$$

$$b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h \text{ cuando } a < 1.724h \quad \text{Ec.2.20}$$

Para una relación de Poisson de 0.15 y en términos de logaritmos base-10, la ecuación 2.18 puede ser expresada como:

$$\sigma_i = \frac{0.316P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{l}{b} \right) + 1.069 \right] \quad \text{Ec.2.21}$$

La ecuación de deflexión debido a la carga interior (Westergaard, 1939) es:

$$\Delta_i = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{a}{2l} \right) - 0.673 \right] \left( \frac{a}{l} \right)^2 \right\} \quad \text{Ec.2.22}$$

### **Cargas en el borde de la losa.**

Westergaard (1926, 1933, 1948) presento en diferentes documentos los esfuerzos debido a la cargar en el borde de la losa pero fue esta 1948 cuando se publicaron las relaciones que eran válidas para el cálculo de los esfuerzos causados en el borde por grandes cargas en grandes zonas de contacto (Westergaard 1948). Sus fórmulas cambiadas permitieron que la carga fuera caracterizada como una elipse en vez de ser limitada la forma de un neumático circular. (Ioannides, Thompson et al. 1985) recomendaron el uso de estas ecuaciones por ser más exactas que las ecuaciones de 1926.

$$\sigma_e \text{ (Circulo)} = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 1.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1.18(1+2\nu)a}{l} \right] \quad \text{Ec.2.23}$$

$$\Delta_e \text{ (Circulo)} = \frac{\sqrt{2 + 1.2 \times \nu P}}{\sqrt{E \times h^3 k}} \left[ 1 - \frac{(0.76 + 0.4 \times \nu)a}{l} \right] \quad \text{Ec.2.24}$$

$$\sigma_e \text{ (Semicirculo)} = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 3.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{(1+2\nu)a}{2l} \right] \quad \text{Ec.2.25}$$

$$\Delta_e \text{ (Semicirculo)} = \frac{\sqrt{2 + 1.2 \times \nu P}}{\sqrt{E \times h^3 k}} \left[ 1 - \frac{(0.323 + 0.17\nu)a}{l} \right] \quad \text{Ec.2.26}$$

### 2.3.2 Cartas de influencia.

(Pickett y Ray 1951) desarrollaron cartas de influencia basados en las ecuaciones de Westergaard pero en las que pueden ser aplicadas múltiples configuraciones de cargas, con una relación de Poisson de 0.15 para losas de concreto hidráulico. Las soluciones gráficas planteadas fueron simplificadas en la determinación de las desviaciones teóricas y los momentos causados por la carga sobre la losa. Hubo dos consideraciones principales para la creación de los gráficos y estas son:

- Explanación como líquido denso (macizo de Winkler).
- Explanación como sólido elástico.

Estas cartas fueron usadas por la Portland Cement Association (PCA) para el diseño de pavimentos rígidos. Las cartas para cargas en el interior fueron usadas en el diseño pavimentos para aeropuertos (PCA,1955) mientras que las cartas para cargas en el borde se emplearon en el diseño de pavimentos para carreteras (PCA, 1966)

### **Carga en el interior de la losa.**

Para usar las cartas primero se debe calcular el radio de rigidez relativa de la sección del pavimento., ya que la escala de la carta se encuentra en función del valor de la rigidez relativa y de la huella del neumático, posteriormente se analiza el dibujo a esta escala. Se cuenta el número de bloques cubierto por la huella del neumático inclusive los bloques parciales el resultado se multiplica por la relación apropiada para obtener el momento, deflexión o presión reactiva.

La figura 2.9 muestra la aplicación de las cartas de influencia para la determinación de los momentos en el interior de la losa. El momento es el punto 0 en la dirección n.

(Huang 2004) define con un ejemplo simple el uso de estas cartas, para empezar se calcula la relación de rigidez de acuerdo a la ecuación 2.27:

$$l = \left[ \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)k} \right]^{0.25} \quad \text{Ec.2.27}$$

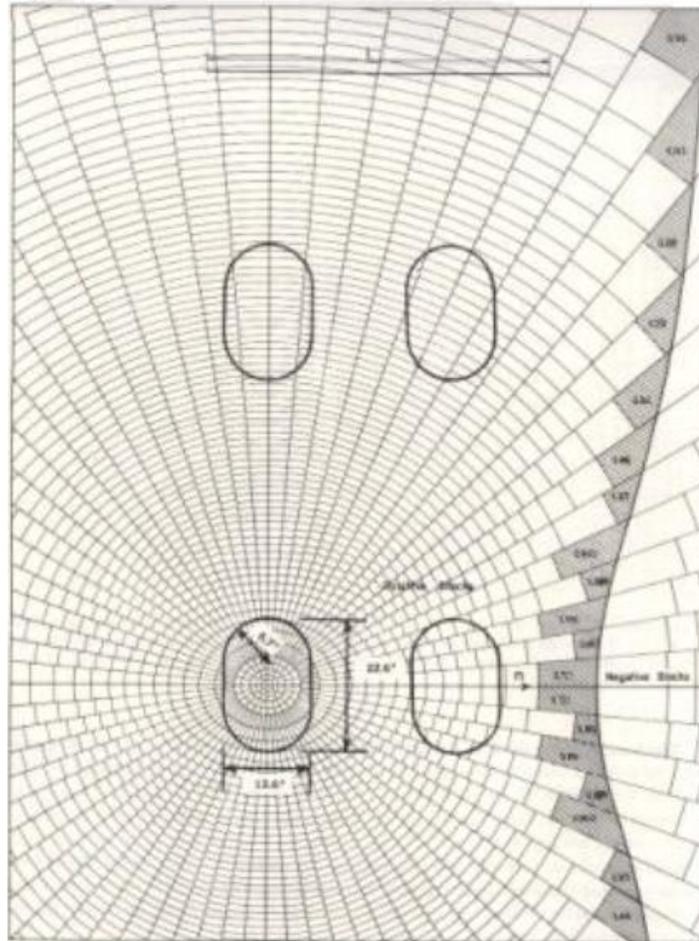


Figura 2.9 Carta de Influencia para la aplicación de determinación de momentos  
Fuente: Huang (2004). Pavement Analysis and Design.

Si  $l$  es 57.1 pulg. (1.45m), la escala en lo alto de la figura es 57.1 pulg. (1.45m). Esta escala debe ser usada para dibujar la configuración del área de contacto. Si la longitud real de impresión de la llanta es 22.6 pulg. (574mm), la longitud para ser dibujada en la carta de influencia es  $22.6/57.1$  ó 39.6% de la longitud mostrada en la escala  $l$ . La localización de otras llantas está basada en la misma escala.

Se cuenta el número de bloques  $N$  cubierta por la impresión de la llanta, el momento  $M$  en la dirección  $n$  puede ser determinada por la ecuación 2.28:

$$M = \frac{ql^2N}{10,000} \quad \text{Ec: 2.28}$$

En donde “ $q$ ” es la presión de contacto. El esfuerzo es determinado dividiendo el momento por la sección del módulo con la ecuación 2.29:

$$\sigma_i = \frac{6M}{h^2} \quad \text{Ec: 2.29}$$

Para la impresión de llantas mostrada en la figura el momento es bajo el centro de la parte más baja en la dirección lateral izquierda. Si el momento en la dirección longitudinal es el requerido, la llanta total montada debe rotar  $90^\circ$  en el sentido horario así que dos de las llantas yace en la zona de los bloques negativos, y los momentos se vuelven más pequeños.

La Figura 2.10 muestra la deflexión en las cartas de influencia debido a la cargada en el Interior de la losa. La carta es simétrica y los bloques están formados por círculos concéntricos y líneas radiales. La deflexión está en el centro de los círculos. El uso de la carta es similar a la de la figura 2.7

Después que el número de bloques cubiertos por la llanta son contados, se puede obtener la deflexión por medio de la ecuación 2.30:

$$\Delta_i = \frac{0.0005ql^4N}{D} \quad \text{Ec: 2.30}$$

En donde D es el módulo de rigidez:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$$

Ec: 2.31

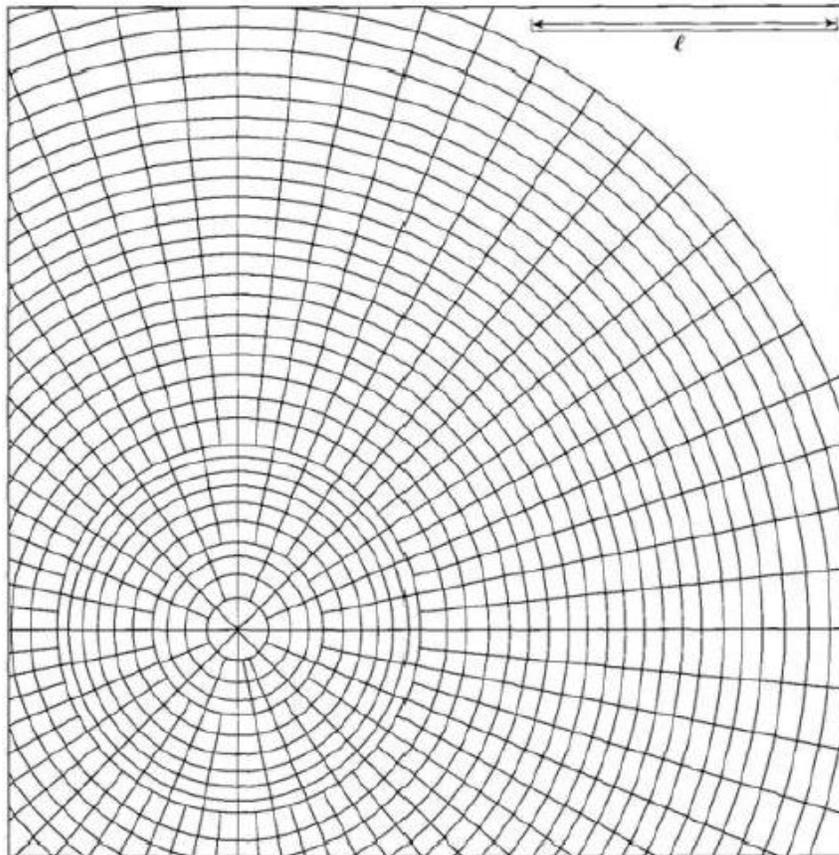


Figura 2.10 Carta de Influencia para la deflexión debido a carga en el interior.

Fuente: Huang (2004). Pavement Analysis and Design.

### **Carga en los bordes de la losa.**

Para cargas en los bordes el uso de las cartas de influencia es similar a las cartas para cargas en el interior de la losa y de igual manera se utilizan las mismas formulas. En las siguientes figuras (2.11 y 2.12) se muestran las cartas de influencia para cálculo de momentos y deflexiones en el punto O en los bordes de la losa.

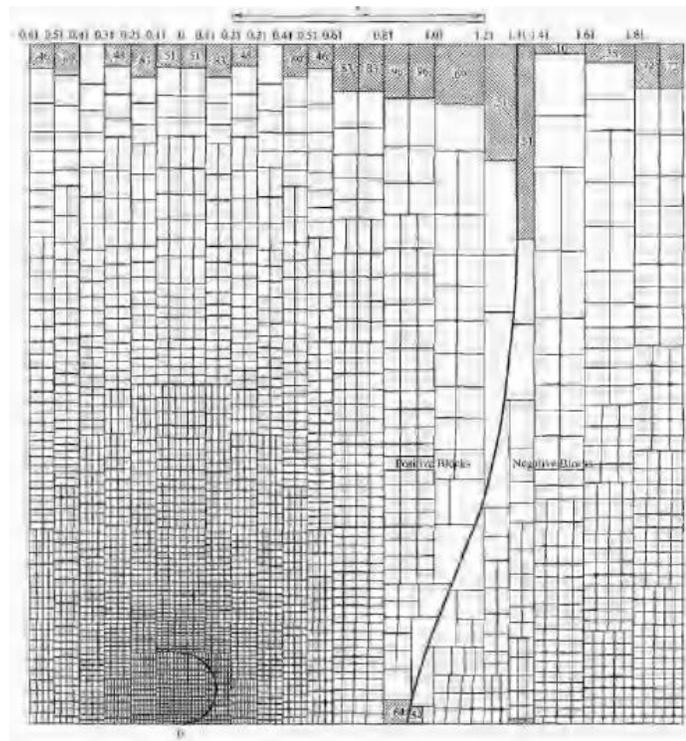


Figura 2.11 Carta de influencia para momento debido a la carga del borde  
Fuente: Huang (2004). Pavement Analysis and Design.

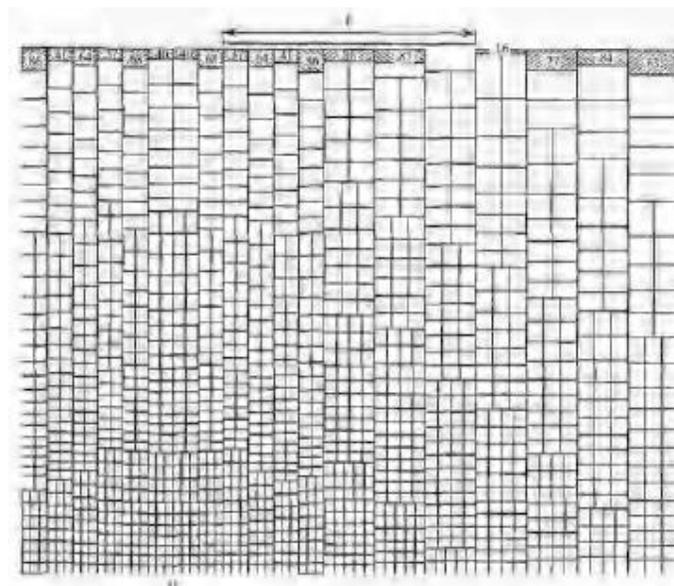


Figura 2.12 Gráfico de influencia para la deflexión debido a la carga del borde.  
Fuente: Huang (2004). Pavement Analysis and Design.

### **2.3.3 Elementos finitos.**

(Salazar) Si el caso en estudio es una serie de capas apoyadas en una superficie líquida o de Winkler con mecanismos de transferencia de carga entre las juntas es mucho más factible utilizar el método de elementos finitos ya que el apoyo “líquido” de las losas se puede asemejar a una serie de resortes independientes entre sí, por lo que las deflexiones en un punto debido a las cargas aplicadas en él será solo función directa de esta última e independiente a las fuerzas aplicadas en otros puntos.

Existen programas de elementos finitos bidimensionales: Modelo de la lámina delgada (2D) y tridimensionales: Modelo Continuo (3D).

El método posee ventajas porque con él se puede realizar el cálculo de las estructuras que antes era muy difícil calcular de forma manual, tanto por el gran número de operaciones que su resolución presenta o por lo engorroso de las mismas. Con él se reduce a límites despreciables el riesgo de errores operativos. (Hernández, 2013)

### **2.4 Esfuerzos de fricción**

Debido a las condiciones ambientales que producen cambios de temperatura durante el día, en las losas de concreto puede presentarse el fenómeno de contracción y expansión que conlleva un movimiento relativo entre la losa de concreto y la subrasante, causando esfuerzos debido a la fricción que se origina entre las capas. (Fwa, 2006) afirma que estos esfuerzos en condiciones de campo toman mayor relevancia en losas que exceden 30 metros de longitud.

En la figura 2.13 Se muestra como varían los esfuerzos por fricción en una losa bajo el efecto de contracción al reducir la temperatura. Al contraerse volumétricamente en la superficie de contacto se generan esfuerzos que se oponen al movimiento relativo debido a la contracción. Estos esfuerzos son cero en el centro debido a que en este lugar la losa no sufre deformación, mientras los esfuerzos van incrementando hacia los extremos.

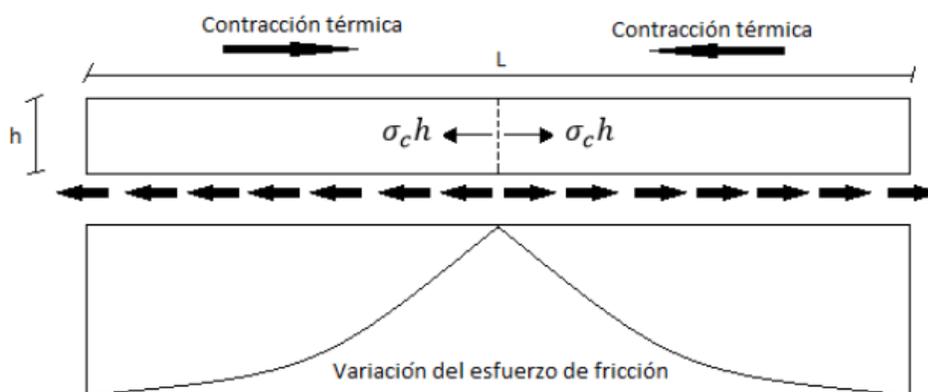


Figura 2.13 Esfuerzos de fricción en losas de concreto

Fuente: Quirós (2015)

La fuerza de tensión  $\sigma_c h$  por unidad de ancho se puede encontrar al igualar las fuerzas de fricción por unidad de ancho producto del peso propio unitario de la losa mitad de la losa  $\frac{\gamma_{chL}}{2}$  multiplicada por el coeficiente de fricción. (Huang, 2004) se observa que el esfuerzo es independiente del espesor de la losa y que la expresión planteada no depende del sistema de unidades, por lo tanto

$$\sigma_c h = \frac{\gamma_{chL} f_a}{2} \quad \text{Ec. 2.32}$$

Simplificando la ecuación 2.32 tenemos:

$$\sigma_c = \frac{\gamma_c L f_a}{2} \quad \text{Ec:2.33}$$

Los esfuerzos de fricción en el área de contacto losa-subrasante afectan al concreto, las varillas de sujeción y al acero de refuerzo cuando existe. En pavimentos de concreto sin refuerzo debe proponerse un adecuado espaciamiento entre juntas para que la fricción no provoque grietas.

**CAPITULO 3**  
**MODELO DE ELEMENTOS**  
**FINITOS**

### **3.1 Introducción al método de elementos finitos**

El método de elementos finito con el uso de las computadoras ha adquirido gran importancia para la solución de problemas de ingeniería ya que permite resolver problemas que hace algunos años solo podrían ser resueltos usando métodos matemáticos tradicionales.

Este método es utilizado para el análisis de estructuras y diferentes sistemas continuos y es considerado de utilidad práctica. Sin embargo a pesar de ser considerado un método muy bueno, este no proporciona una solución “exacta” a los problemas, pero si posibilita el poder obtener una solución aproximada a través del conocimiento y criterio del ingeniero calculista.

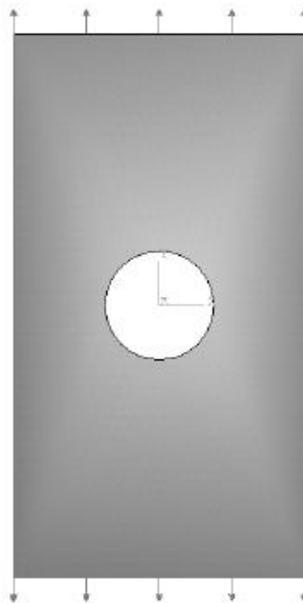
Ya que el objetivo de esta investigación no es el desarrollo de programas computacionales de elementos finitos sino más bien, lograr la comprensión básica teoría para poder entender el uso de los programas a utilizar se busca aclarar los conceptos básicos del método y conocer las capacidades y limitaciones de dichos programas.

#### **3.1.1 Descripción general del método.**

Dado un cuerpo solido continuo sometido a un sistema de cargas y coaccionado por unas ligaduras. El método consiste en subdividir el sólido en partes pequeñas interconectadas entres si a través de los nudos de los elementos, de manera que suponemos que el campo de desplazamiento en el interior de cada elemento, puede expresarse en función de los desplazamientos

que sufren los nudos del elemento, posteriormente se podrá determinar la matriz de rigidez de cada elemento, las cuales una vez ensambladas, permitirán la obtención de los desplazamientos en los nudos de cada elemento. Una vez conocidos dichos desplazamientos, podríamos determinar, de una forma aproximada los esfuerzos y deformaciones en el interior del elemento.

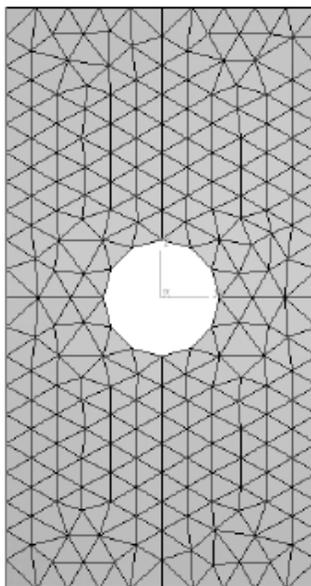
Por ejemplo si consideramos la Figura 3.1 como un problema de una placa de dimensiones finitas, sometidas a tensión en sus lados superior e inferior y que posee un agujero circular, de un determinado radio, en su centro.



*Figura 3.1* placa de dimensiones finitas, sometida a tracción en sus lados superior e inferior,

Fuente: Navarro, 2009 Ingeniería Estructural

Una modelación por elementos finitos de este problema, empleando elementos triangulares, podría ser representada en la Figura 3.2 en la que se representa la malla de un modelo que podría utilizarse para la resolución del problema.



*Figura 3.2* Modelación por elementos finitos, empleando elementos triangulares

Fuente: Navarro, 2009 Ingeniería Estructural

Como se puede observar la placa ha sido subdividida en elementos triangulares de manera que estos elementos se suponen interconectados a través de sus vértices. Dado al número de elementos utilizados el agujero circular, no es circular en realidad sino más bien un dodecágono.

Dadas las condiciones es evidente que los resultados que se obtendrían no serían exactos, muchas veces este dato poco exacto puede ser útil para resolver algunos problemas en ingeniería sin embargo se podría reducir el tamaño de los elementos, esto aumentaría el número de elementos y la exactitud de los resultados.

El método no solo se limita a casos bidimensionales sino que , también se puede analizar problemas tridimensionales.

### 3.1.2 Pasos para el análisis de Elementos Finitos.

Una manera rápida de identificar la aplicación del método es dividiendo el procedimiento en pasos:

1. Modelado de la estructura: Se divide la estructura en un número finito de puntos en la región analizada. Estos puntos se denominan puntos nodales o nodos. La desventaja es que, si no se eligen cuidadosamente los nodos que definen la malla de elementos finitos, los resultados pueden ser muy aproximados o inclusive, alejarse mucho de la solución exacta.
2. Definir las propiedades del elemento: En este paso se debe definir las propiedades del elemento.
3. Ensamblar las matrices de rigidez de los elementos: La matriz de rigidez de un elemento, consiste de coeficientes los cuales pueden ser derivados del equilibrio, residuos ponderados o métodos de energía. La matriz de rigidez del elemento se refiere a los desplazamientos nodales al ser aplicadas fuerzas en los nodos ( $K \cdot F = U$ ): El ensamble de las matrices de rigidez, implica la aplicación de equilibrio para toda la estructura.
4. Aplicación de las cargas: Fuerzas externas concentradas o fuerzas uniformes y momentos son especificados en este paso.
5. Definir las condiciones de frontera: Las condiciones de apoyo deben ser dadas, por ejemplo, si el desplazamiento de ciertos nodos es conocido. Usando los elementos de la frontera se pueden determinar las reacciones en los mismos.

6. Solucionar el sistema de ecuaciones algebraicas lineales: La secuencial aplicación de los pasos descritos, conduce a un sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas, donde los desplazamientos nodales son desconocidos.
7. Calcular los esfuerzos: El usuario puede entonces calcular los esfuerzos, reacciones, deformaciones u otra información relevante. El post-procesador ayuda a visualizar la salida en forma gráfica.

### 3.1.3 Tipos de Elementos Finitos.

Esta sección describe muchas características sobresalientes de los elementos más utilizados; denominados, *truss*, *beam*, *plane stress*, *plane strain*, *axisymmetric*, *membrane*, *plate*, *shell*, *solid* ó *brick*, *tetrahedral*, *hexahedral*, *boundary*, y *gap*. Los programas comerciales de elementos finitos poseen una gran cantidad de elementos en sus librerías. Sin embargo, la mayoría de las estructuras y aplicaciones mecánicas pueden ser solucionadas con los elementos básicos ya mencionados.

Considerando la dimensión, los elementos básicos se pueden dividir en tres categorías: elemento de *línea*, *área* y *volumen*, como es encuentran clasificados en la tabla 3.1

Tabla 3.1 *Elementos Finitos según su dimensión*

Dimensión	Elementos
Lineal	Truss, beam y los elementos de

	restricción
<b>Área</b>	Plane stress, plain strain, axisymmetric, membrane, plate y shell
<b>Volumen</b>	Solidó brick, tetrahedral y hexahedral

## 1. Elementos Truss

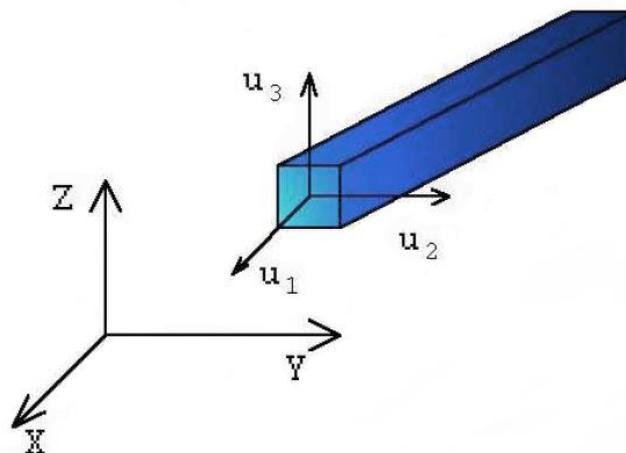


Figura 3.3 Elemento Truss tridimensional

Fuente: Cubillos, 2007 Introducción al método de elementos finitos.

### Características:

- Solo puede comportarse como un miembro sometido a dos fuerzas
- Solo pueden ser sometidos a tracción o compresión
- La única propiedad de la sección que se debe especificar es el área axial del elemento.
- Posee tres grados de libertad por nodo

## Requerimiento para modelar

- Su longitud es mucho mayor que su alto o ancho (entre 8 y 10 veces);
- Esta es conectada con el resto de la estructura con pasadores que no transfieren momentos.
- Las cargas externas solo son aplicadas en el extremo de los elementos, y son paralelas al mismo (Carga Axial).

## 2. Elemento Beam

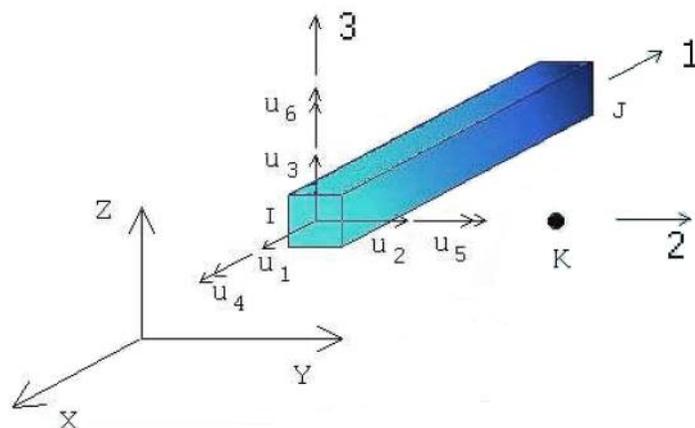


Figura 3.4 Elemento Beam tridimensional

Fuente: Cubillos, 2007 Introducción al método de elementos finitos.

## Características

- El elemento beam puede estar sometido a cargas transversales y/o momentos flectores en adición a la tracción y compresión.
- El elemento beam tridimensional posee seis grados de libertad por nodo, esto es, tres desplazamientos y tres rotaciones sobre los ejes globales X, Y y Z.

- Dentro de las propiedades de la sección, se debe especificar el área axial, la resistencia a la torsión y el momento de inercia.

### Requerimiento para modelar

- Una de sus dimensiones debe ser mucho mayor, por lo menos 10 veces más grande que las otras dos.

### 3. Elementos sometidos a Esfuerzo Plano y Deformación Unitaria Plana

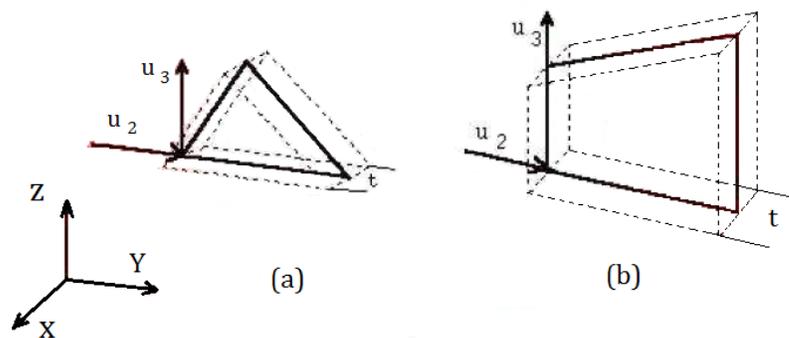


Figura 3.5 Elemento bidimensional en esfuerzo plano: (a) Triangular; (b) Cuadrilátero

Fuente: Cubillos, 2007 Introducción al método de elementos finitos

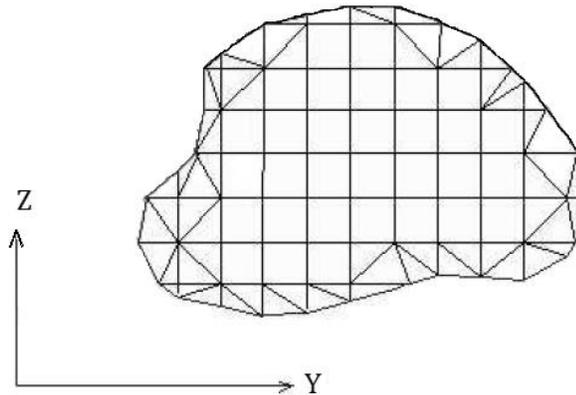
### Características

- Existen principalmente dos tipos de elementos: Triangular y Cuadrilátero.
- Dependiendo del tipo de esfuerzo al que está sometido el elemento, este se debe modelar como esfuerzo plano o deformación unitaria plana.

### Regla

Se prefieren los elementos cuadriláteros a los triangulares por razones de isotropía geométrica. Sin embargo, se sugiere el uso de elementos triangulares

cuando se presentan irregularidades en la geometría del elemento a modelar, como se muestra en la figura XXX



*Figura 3.6* Elementos cuadriláteros y triangulares.

Fuente: Cubillos, 2007 Introducción al método de elementos finitos

#### 4. Elementos Axisimetricos

Como algunos ejemplos de elementos axisimetricos tenemos: tanques de acero y concreto, rotores, conchas, toberas y contenedores

##### **Características**

Las estructuras axisimétricas sometidas a cargas axisimétricas, pueden ser analizadas en un modelo bidimensional.

Ejemplo: para analizar una estructura axisimétrica, como un cilindro de pared delgada  $t$ , sujeta a una presión constante  $p$ , el modelo es la intersección del cilindro con el plano  $YZ$  como se muestra en la figura 3.7.

La carga  $p$ , es aplicada al modelo de elementos finitos como se muestra en la figura 3.7 (b). Cuadrilateros y triangulos axisimétricos poseen dos grados de libertad en cada nodo, figuras.3.7 (c) y (d).

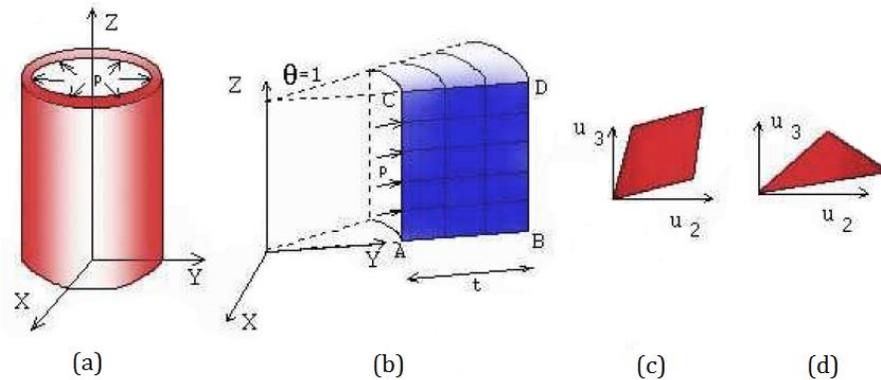


Figura 3.7 (a) Cilindro bajo presión interna; (b) Modelo Axisimétrico; (c) Elemento Cuadrilatero; (d) Elemento Triangular.

Fuente: Cubillos, 2007 Introducción al método de elementos finitos

## 5. Sólidos elásticos tridimensionales ó elementos 'Brick'

Los elementos sólidos son elementos tridimensionales con tres grados de libertad translacional por nodo, ver figura 3.8 Los nodos son usualmente introducidos en la intersección de los tres planos, o el mitad de la intersección de dos planos Un elemento brick de 8 nodos, con sus respectivos grados de libertad se puede apreciar en la figura 3.8

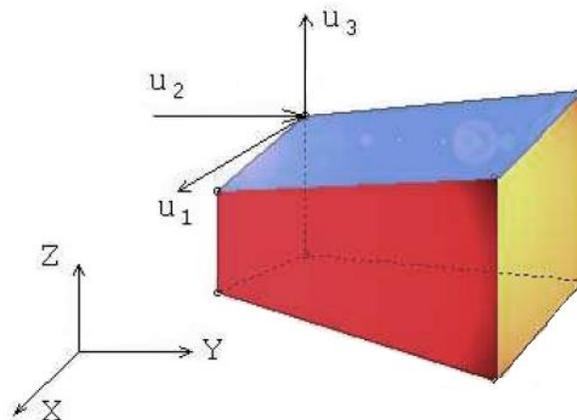


Figura 3.8 Elemento brick y sus grados de libertad por nodo (8 nodos).

Fuente: Cubillos, 2007 Introducción al método de elementos finitos

El elemento brick puede proveer información acerca de la variación tridimensional de los esfuerzos y deformaciones del elemento.

## 6. Elementos 'Tetrahedral' and 'Hexahedral'

### Características

- Así como los elementos brick, los elementos 'tetrahedral' y 'hexahedral' pueden ser usados para modelar estructuras tridimensionales.
- El tetraedro puede ser visto como un triángulo en tercera dimensión, como se ve en a figura 3.9
- El hexaedro puede ser visto como un cuadrilátero extendido en la tercera dimensión.

Se puede apreciar entonces que el hexaedro tiene la misma geometría del elemento brick de 8 nodos. La diferencia entre estos dos, es la formulación y precisión computacional. Por lo general los elementos tetraedro y el hexaedro poseen solo tres grados de libertad por nodo, y la precisión de estos elementos se puede incrementar colocando nodos en la mitad de los lados.

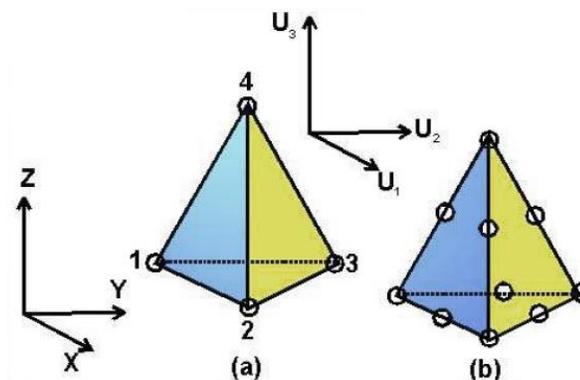


Figura 3.9 (a) Tetraedro de 4 nodos; (b) tetraedro de 10 nodos.

Fuente: Cubillos, 2007 Introducción al método de elementos finitos

### 3.1.4 Selección del tipo de Elementos.

Previo a elegir el tipo de elemento para modelar una estructura, se deben seguir una serie de pasos:

1. Se debe dibujar un bosquejo del sistema físico indicando su geometría, condiciones de frontera, cargas y discontinuidades geométricas o de material. El bosquejo debe además incluir un sistema de coordenadas globales y las dimensiones de la estructura.

2. Después, se debe examinar si el modelo puede ser reducido, o simplificado. Esfuerzo plano, deformación plana y modelos axisimétricos, permiten la reducción de problemas tridimensionales a bidimensionales. Además la presencia de planos de simetría permite modelar sólo una parte de la estructura.

El bosquejo de un sistema físico, puede ayudar en la selección del elemento apropiado.

Tabla 3.2 aplicación de cada tipo de elemento.

Elemento	Para modelar
Elementos Beam o Truss.	modelar cargas transversales o axiales en elementos mecánicos, eléctricos y estructuras civiles
Elementos de esfuerzos planos	En el plano de acción, placas y vigas cortas.
Elementos de deformación plana	Modelar paredes de contención y largos

	diques.
Los elementos axisimétricos	Modelar estructuras que son rotacionalmente simétricas sobre uno de los ejes y cargado simétrico o anti simétricamente sobre el mismo eje, como los cilindros sometidos a presión interna.

La selección del tipo de elemento o elementos también depende del tipo de resultados esperados. Por ejemplo el cilindro mostrado en la figura 3.10 con los extremos empotrados y sujeto a una carga puntual, puede ser modelado de diferentes formas:

- a. Un modelo de viga puede ser usado si se está interesado en una aproximación de la deflexión del elemento.
- b. Un modelo usando elementos shell/plate puede ser usado si el objetivo es obtener un cálculo de los esfuerzos.

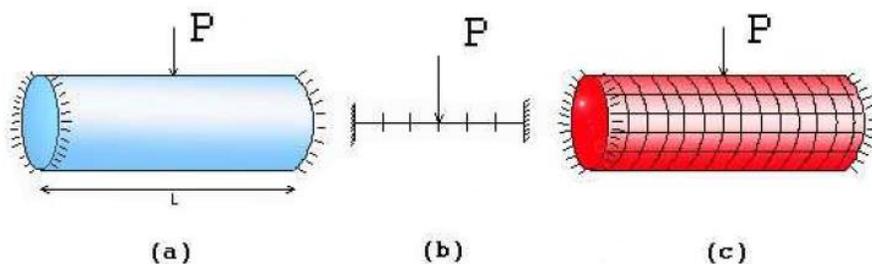


Figura 3.10 (a) Cilindro con extremos empotrados y carga puntual en la mitad; (b) Modelo de viga; (c) Modelo con elementos Plate/shell..

## 3.2 Factores de entrada al proceso de modelación

### 3.2.1 Tránsito vehicular.

El tránsito es uno de los elementos más importantes requeridos para el análisis y diseño de las estructuras del pavimento, es necesario para estimar las cargas que se aplicarán y la frecuencia con la que serán aplicadas a lo largo de la vida de servicio de un pavimento. Su participación es tan importante en los métodos de diseño, como lo son las características de los materiales o las condiciones climáticas. (Hernández, Garnica y Solorio, 2011)

Su caracterización es fundamental, y a la vez muy compleja dada la gran distribución de tipos de vehículos y, por tanto, de cargas que se pueden encontrar en la actualidad (figura 3.11)



*Figura 3.11* Imagen que ilustra la diversidad de vehículos y cargas que se pueden encontrar en la actualidad sobre una carretera en El Salvador.

Fuente: [www.laprensagrafica.com](http://www.laprensagrafica.com)

Para la caracterización del tránsito vehicular tradicionalmente en Centroamérica se transforma en un cierto número de ejes equivalentes sencillos duales de 8 toneladas para el período de diseño, siempre y cuando logremos estar de acuerdo con los factores de equivalencia a utilizar, ya que entre otras cosas dependerán de cómo definamos esa equivalencia.

Los factores serán diferentes en términos de agrietamiento por fatiga, o en términos de magnitud de roderas.

Después de varias investigaciones se propuso trabajar directamente con las configuraciones vehiculares y su correspondiente distribución de cargas por eje, a través del concepto de espectro de carga.

#### **3.2.1.1 Espectros de carga.**

Las nuevas metodologías mecanicistas, piden una caracterización de tránsito más precisa, en especial la nueva guía AASHTO Mecanicista Empírica la cual utiliza el concepto de Espectro de Carga, que puede entenderse como la distribución normalizada de la carga de un tipo de eje dado (Sencillo Direccional, Sencillo Dual, Tándem, Tridem), de un tipo de vehículo en particular o de un conjunto de ellos durante un periodo de tiempo.

La PCA (Portland Cement Association) reconoce desde 1966 la necesidad de información detallada de los ejes de carga en su método de diseño, desde entonces ha usado el espectro de carga.

La ventaja del uso del espectro de carga es que utiliza la información del tránsito directamente en vez de convertir el flujo de tránsito mixto a un número

que depende del deterioro, tipo de pavimento y espesor. Los espectros de carga, proveen información real de los ejes de carga que transitan por una carretera.

*Definición de espectro de carga:* Los espectros se definen como la relación entre el número de un tipo de eje con un rango de carga y el número total de ese tipo de eje, expresado en porcentaje, se calculan usualmente para cada tipo de eje: Sencillo direccional, Sencillo dual, Tándem y Tridem. (Rico, 2018, p.15) Los espectros de carga son una representación realista de la distribución de cargas. Algunos estudios del tránsito han definido los espectros de carga como la manera más eficiente de caracterización en términos de tipos de ejes y su respectivo daño.

Otra definición de espectro de carga: “La Distribución normalizada de la carga de un tipo de eje dado (Sencillo direccional, Sencillo dual, Tándem, Tridem), de un cierto tipo de vehículo o de un conjunto de ellos durante un periodo de tiempo”

El uso de los espectros permite estimar los efectos del tránsito actual sobre el pavimento y ser utilizados de manera directa en el análisis de esfuerzos y deformaciones unitarias. La Figura 3.12 es un ejemplo de espectro de carga de un eje sencillo dual.

### ***Características de los espectros de carga.***

Los espectros tienen ciertas características. Rico, (2018) describió una lista detallada a continuación:

1. Cada punto del espectro de carga representa el porcentaje de ejes de un cierto tipo que circula con cierto nivel de carga.
2. El área bajo la curva de cada espectro de carga debe ser unitaria.
3. El espectro de carga caracteriza al tránsito pesado en el tramo carretero en donde se hace la medición. El seguimiento en el tiempo permite valorar la evolución de la distribución de las cargas, aspecto que está relacionado con la intensidad de las actividades económicas en el sector transporte.
4. Los valores máximos permiten identificar los niveles de carga más usuales; niveles que se pueden asociar a si los vehículos circulan vacíos o con carga completa.
5. Permite identificar si los niveles de carga exceden el reglamento y en qué porcentaje.

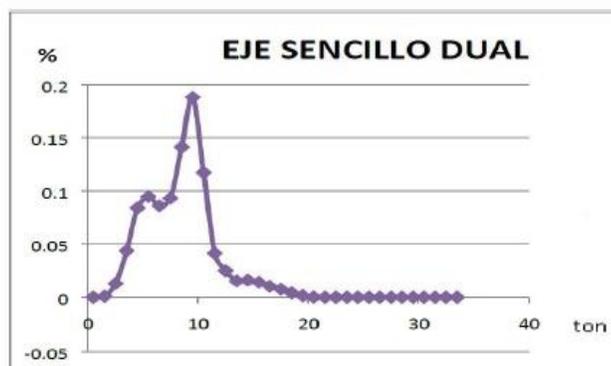


Figura 3.12 Espectro de carga característico de un eje Sencillo Dual

Fuente: López, Generación de los espectros de carga vehicular de los años 2014, 2015 y 2016 para el salvador (Tesis pregrado) Universidad de El Salvador.

6. Se pueden asociar comportamientos del tránsito de vehículos de carga similares y establecer espectros regionales.

7. Permiten diseñar y revisar la capacidad estructural de un pavimento con datos realmente representativos de una red carretera.
8. Son indicadores de la severidad que se puede esperar de los distintos deterioros en una carretera a lo largo del tiempo. Esto puede de ser de particular interés para los responsables de la conservación y mantenimiento de una red carretera en términos de desempeño. (p.15)

***Configuraciones de ejes para elaboración de espectros de carga.***

Para la generación de los espectros de carga vehicular los ejes a analizar se clasifican de la siguiente manera:

- Eje sencillo direccional,
- Eje sencillo dual,
- Eje tándem, y
- Eje Tridem.

Estos se explican en la Tabla 3.3

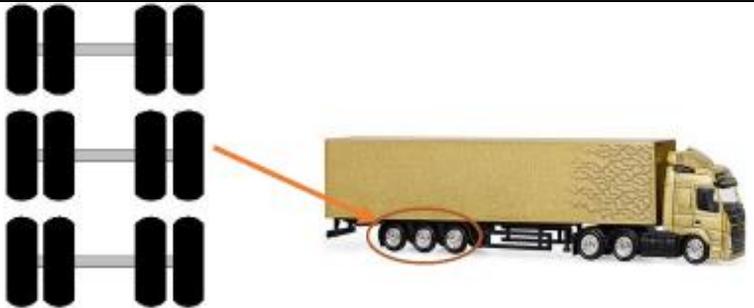
*Ejes Sencillo Direccional:* Se denomina eje sencillo direccional al elemento que consta únicamente de dos ruedas (una por lado) puede ser direccional o no, anterior, central o posterior.

*Eje Sencillo Dual:* Se denomina eje sencillo dual al elemento que consta de cuatro ruedas (dos por lado) puede ser central o posterior.

*Eje Tándem:* Se denomina eje tándem al elemento que consta de dos ejes sencillos, con rueda doble en sus extremos.

*Eje Tridem:* Se denomina eje tridem al elemento que consta de tres ejes sencillos, con rueda doble en sus extremos.

Tabla 3.3 Configuraciones de ejes, cargas máximas permitidas por tipo de eje.

Tipo de eje	Figura	Peso máximo permitido
Eje sencillo direccional		5.0 Ton
Eje sencillo dual		10.0 Ton
Eje tándem		16.5 Ton
Eje tridem		20.0 Ton

Fuente: López, Generación de los espectros de carga vehicular de los años 2014, 2015 y 2016 para el salvador (Tesis pregrado) Universidad de El Salvador.

Los ejes sencillo direccional se encuentran en todos los tipos de vehículos, los ejes sencillo dual se pueden encontrar en los vehículos C-2, T2-S1 y T3-S1, los ejes tridem son exclusivos de las configuraciones T3-S3 y C-4, en cambio los tándems participan prácticamente en todas las configuraciones de los vehículos de carga a excepción del C-2 y C-4.

Para el proceso de modelación de pavimento se utilizan espectros de carga resultado de la investigación *Generación de los espectros de carga vehicular de los años 2014, 2015 y 2016 para El Salvador (Trabajo de grado)* Universidad de El Salvador, de donde se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 3.4 *Espectros de carga vehicular del año 2015*

<b>ESPECTROS DE CARGA (2015)</b>	
Eje Sencillo Direccional	45 kN
Eje Sencillo Dual	94 kN
Eje Tándem	152 kN
Eje Tridem	192 kN

### **3.2.2 Propiedades de los materiales componentes.**

Para la modelación de un pavimento es importante conocer las propiedades de los diferentes elementos que componen el mismo. Las propiedades de los materiales de los que están compuestas las diferentes capas de la estructura de pavimento pueden obtenerse a través de ensayos de laboratorio. Para esta investigación se trabaja con datos de un tramo ya construido por lo tanto no se realizan pruebas de laboratorio, pero es de suma importancia mencionar que de realizarse ensayos estos deberán ser bajo un rango de temperaturas

esperado en el lugar, la velocidad de operación esperada, y para el diseño volumétrico de la mezcla seleccionado.

### 3.2.2.1 Concreto.

Para el caso del concreto hidráulico y materiales estabilizados, se requiere el valor del módulo de elasticidad tal y como se obtiene convencionalmente con la norma ASTM C469, y una estimación del valor de la resistencia a la tensión, ya sea obtenido a flexión (ASTM C78) ó en tensión indirecta (ASTM C496/C496M) (figura 3.14), a fin de determinar el módulo de ruptura de esa clase de materiales. Para el concreto, también se requiere el valor del coeficiente de expansión térmica.

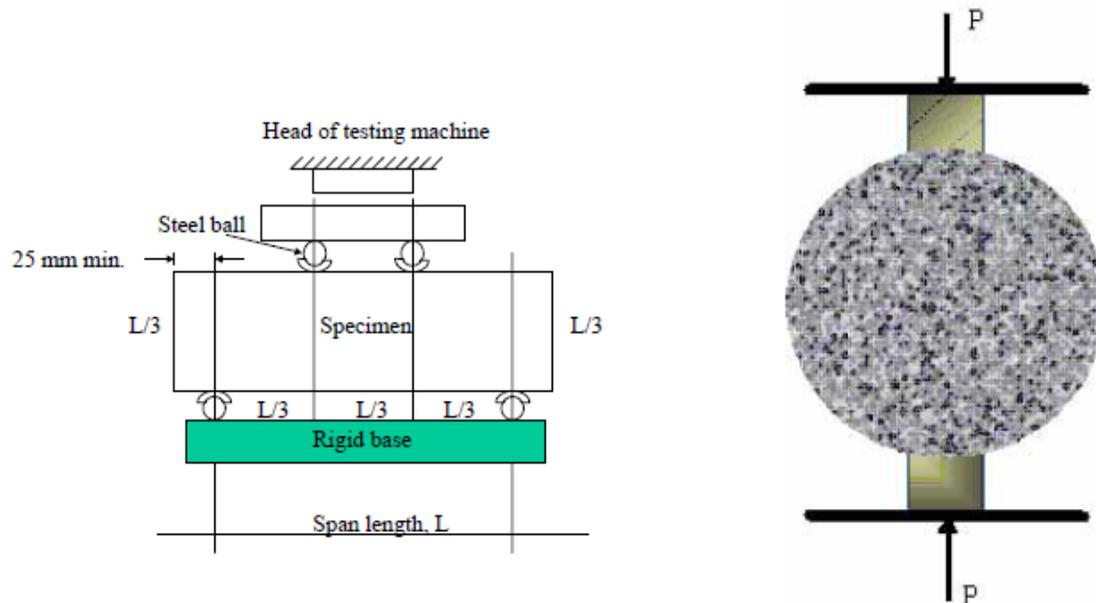


Figura 3.14 Esquema de los montajes en flexión y tensión indirecta para la determinación de la resistencia a la tensión de concretos hidráulicos y materiales estabilizados.

Fuente: Anguas. P, Correa. A., Publicación Técnica 258, Conceptos Mecanicistas en Pavimentos, Instituto Mexicano del Transporte

**ASTM C469:***Módulo de Elasticidad y de Poisson en cilindros de concreto*

Este ensayo permite determinar el módulo de elasticidad y la razón de Poisson de cilindros moldeados e campo o en laboratorio, o de núcleos extraídos, cuando se aplica un esfuerzo de compresión longitudinal. El módulo de elasticidad es la pendiente de una recta trazada entre dos puntos específicos de la parte elástica de la curva esfuerzo-deformación unitaria del concreto.

El ensayo brinda la razón entre el esfuerzo y la deformación del concreto y la razón entre la deformación lateral y longitudinal de un espécimen de concreto endurecido, cualquier edad y condiciones de curado que se designen.

El módulo de elasticidad y la razón de Poisson son aplicables dentro del rango habitual de esfuerzo de trabajo (de 0 a 40% de la resistencia última del concreto). Estos valores son utilizados para dimensionamiento de concreto reforzado y sin refuerzo y para determinar esfuerzos por medio de deformaciones observadas. Los valores de módulo de elasticidad obtenidos son usualmente menores que los módulos derivados de una aplicación rápida de carga (como cargas dinámicas o sísmicas) y usualmente son mayores que los obtenidos por aplicación lenta de carga o de duración extendida.

**ASTM C78:***Resistencia a la Flexión de vigas de concreto*

Este método de ensayo cubre la determinación del esfuerzo de flexión del concreto utilizando una viga simple con carga en los tercios medios. Este método de ensayo se utiliza para determinar el esfuerzo de flexión de

especímenes preparados y curados de acuerdo a los ensayos ASETM C42, ASTM C31 o ASTM C192. Los resultados se calculan y se reportan como el módulo de ruptura. El esfuerzo determinado puede variar cuando hay diferencias en el tamaño del espécimen, la preparación la condición de humedad, el curado o cuando la viga ha sido moldeada o cortada a un tamaño específico. Los resultados de este método de ensayo pueden ser utilizados para determinar el cumplimiento de especificaciones o como una base para las operaciones de dosificación, de mezclado y colocación. Este ensayo se utiliza en concretos para la construcción de losas y pavimentos.

#### **3.2.2.2 Suelos.**

Para suelos y materiales granulares, la propiedad de referencia es el módulo de resiliencia, que se ejecuta de acuerdo con la norma AASHTO T274. En este caso, la prueba se ejecuta por medio de un ensayo triaxial donde la presión de confinamiento es constante, y el esfuerzo desviador se aplica cíclicamente. El módulo de resiliencia se define como el cociente entre el esfuerzo desviador aplicado y la deformación unitaria elástica en cada ciclo de carga.

Los ensayos de módulo de resiliencia se deben realizar en condiciones representativas de la colocación de los materiales en obra, como son las características de peso volumétrico, contenido de agua de compactación, método de compactación, granulometría, etc. ya que el ensayo es muy sensible a esas condiciones.

### **3.2.3 Factores Climáticos.**

Las condiciones climáticas tienen gran influencia sobre la estructura del pavimento, es por ello que no se puede dejar de considerar factores como los niveles de precipitación, humedad, temperatura, viento y radiación solar de la zona en la que se va a construir o ya se encuentra construida la carretera. Todos estos factores pueden llegar a modificar gravemente la capacidad de soporte de las capas de pavimentos y por lo tanto el desempeño de la estructura. Como se menciona en el capítulo 2 el gradiente de humedad y de temperatura son los principales causantes del alabeo de las losas.

Para la consideración de un gradiente de temperatura, se toma como base la investigación realizada por el Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISCYC) en la que se buscó establecer una relación entre las condiciones climáticas como temperatura ambiente, precipitación y viento, con las diferentes temperaturas internas en los Pavimentos. El tramo de estudio fue carretera CA-01, tramo comprendido entre avenida la revolución y Las Delicias, donde se obtuvieron como resultado un gradiente máximo igual a 16 °C y un gradiente mínimo igual a 8°C.

### **3.3 Selección de software de elementos finitos**

Que el pavimento cumpla con su vida de diseño depende en gran manera de la respuesta que este tenga antes las diferentes cargas a las que es sometido. Por ejemplo, el agrietamiento transversal en los pavimentos JPCP se rige por los máximos esfuerzos de tracción (tensión) en la parte inferior de la losa de

concreto. Por lo tanto, predicciones fiables de las respuestas del pavimento son esenciales para la realización de un buen análisis o diseño de la estructura.

El modelo estructural utilizado para esas predicciones se debe cumplir los siguientes requisitos:

- El modelo debe describir adecuadamente la estructura del pavimento (capas construidas y subrasante).
- El modelo debe tener en cuenta las discontinuidades en las estructuras de pavimento (juntas).
- El modelo debe ser capaz de analizar múltiples carga de ruedas.
- El modelo debe ser capaz de analizar la carga del medio ambiente (como el alabeo debido a la temperatura y la deformación por humedad).

Utilizar un método basado en elementos finitos permite desarrollar modelos de la estructura que satisfacen todos estos requisitos. Por lo tanto es necesario considerar y evaluar los diferentes programas que trabajan bajo el método de elementos finitos. Estos programas se pueden dividir en programas de elementos finitos de propósito general y de elementos finitos de códigos desarrollados específicamente para el análisis de sistemas de pavimentos. Los programas del primer grupo, como ABAQUS, ANSYS y DYNA3D, son más potentes y capaz, ya que pueden llevar a cabo análisis dinámico no lineal en tres dimensiones. Estos programas han sido utilizados con éxito para el análisis de pavimento en varios estudios de investigación, y una diversidad de modelos fueron construidos en la actualidad con estos productos. Sin embargo, estos

programas suelen exigir considerable recursos computacionales, así como el tiempo para el desarrollo de un modelo estructural para cada problema.

Entre los programas desarrollados especialmente para el análisis de los sistemas de pavimento de concreto tenemos:

- ILLI-SLAB (Tabatabaie y Barenberg 1980)
- WESLIQID (Chou 1981)
- J-LOSA (Tayabji y Colley, 1983)
- FEACONS-IV (Choubane y Tia 1995)
- KENSLAB (Huang 1993)
- KOLA (Kok 1990)
- EVERFE (Davids, Turkiyyah y Mahoney 1998)

La mayoría de estos programas pueden analizar múltiples ruedas de carga, de una o más capas que descansa sobre una fundación Winkler (Fundación sólida elástica). Para la realización de esta investigación se usará el programa EverFE 2.24.

### **3.3.1 Descripción de EverFE 2.24.**

EVERFE es una herramienta de análisis de elementos finitos 3D para pavimentos rígidos, desarrollado en la Universidad de Washington en cooperación con el Departamento de Transporte de Washington. En la actualidad, EVERFE es el programa finito 3D más sofisticado y fácil de usar, con elementos específicamente desarrollado para el análisis de pavimento rígido. El programa cuenta con una interfaz gráfica de usuario intuitiva que

simplifica en gran medida la generación de modelos, y la interpretación de los resultados que se visualizan a través del mismo.

EVERFE incorpora una novedosa técnica para el modelado de trabazón de agregado que puede ser lineal y no lineal en la junta, así como un nuevo método para el modelado de barras para la transferencia de carga en las juntas transversales. Una estrategia de solución avanzada empleada por EVERFE que permite modelos realistas 3D que pueden ser simulados, sin la necesidad de tener computadoras de gran capacidad. Sin embargo, EVERFE tiene limitaciones significativas.

### **3.3.2 Descripción de Ap-Rigid 1.0.**

Se trata de una interfaz gráfica de análisis de pavimentos rígidos, una herramienta de cálculo que fue desarrollada dentro del Programa de Infraestructura del Transporte, del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, de la Universidad de Costa Rica; para facilitar la determinación de las respuestas mecánicas críticas requeridas en el proceso de diseño empírico mecanicista de pavimentos rígidos. El programa incorpora algoritmos de cálculo para el uso de modelos regionales calibrados mediante técnicas de regresión lineal múltiple y de redes neurales artificiales validados estadísticamente para su uso en procesos de diseño. Con esta herramienta, es posible calcular los esfuerzos y deflexiones críticas de varias estructuras de pavimento de manera simultánea, mediante la incorporación de listas de trabajo, consistentes en las unidades de los sistemas usados comúnmente –

internacionales e inglés- y, mediante avanzadas metodologías de análisis que garantizan precisión y velocidad de cálculo.

### **3.3.3 Software para retrocálculo BAKFAA.**

Este software se basa en el análisis elástico en capas y emplea un método de minimización simple multidimensional para el retrocálculo de los módulos de capa.

BAKFAA calcula deflexiones en los puntos especificados utilizando el conjunto inicial de supuestos módulos de capa, el proceso de minimización de errores implica la determinación de la suma de los cuadrados de diferencias entre las deflexiones FWD y las deflexiones calculadas por el análisis elástico en capas.

BAKFAA puede analizar un pavimento con diez capas, sin embargo no tiene en cuenta el efecto de la temperatura en el cálculo del módulo.

**CAPÍTULO 4**  
**MODELACIÓN DE**  
**PAVIMENTOS DE CONCRETO**  
**HIDRÁULICO**

#### 4.1 Descripción del tramo en estudio

La investigación se lleva a cabo en el tramo I del Boulevard Monseñor Romero (antes *Diego de Holguín*), que cuenta con una longitud de 5.05 km y un ancho con 3 carriles por sentido que varía entre 3.50 y 3.65 metros. Este tramo inicia en la rampa de incorporación desde la carretera Panamericana en el Intercambiador existente y finaliza antes de la intersección con el Boulevard Merliot, donde da inicio el Tramo II. Incluye 7 pasos a desnivel, 1 rampa de acceso, 3 cajas hidráulicas, colectores de diferentes diámetros, barreras de sonido, barreras rígidas, new yersy entre otros.



Figura 4.1 Localización del tramo vial en estudio

Fuente: Google Earth

#### 4.1.1 Características del tramo.

En este apartado se presenta el resumen de los criterios y características consideradas en el diseño original del tramo en estudio. El diseño fue desarrollado atendiendo las condiciones técnicas bajo la metodología AASHTO 93. En la tabla 4.1 se presenta un extracto de los criterios.

Tabla 4.1 *Parámetros considerados en el diseño del pavimento*

<b>Variables de diseño</b>	
Periodo de Diseño	25 años
Trafico	49.7 millones
Confiabilidad en el Diseño	90%
Desviación Estándar	0.35
Efectos Ambientales	
<b>Criterios de comportamiento</b>	
Serviciabilidad Inicial	3.64
Serviciabilidad Final	2.5
IRI	2.5
<b>Propiedades de los materiales de soporte para el diseño</b>	
Módulo resiliente efectivo	
CBR	20%
<b>Características Estructurales del pavimentos</b>	
Coeficiente de Drenaje	1.15
Transferencia de carga	2.7
Perdida de soporte	0
Modulo efectivo de reacción de la sub-rasante	1806 psi/in
<b>Características de los materiales de las capas del pavimento</b>	
Módulo de Elasticidad de la Sub-Base	700,000 psi
Módulo de ruptura del concreto	45 Kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad del concreto	4,320,000 psi

La estructura del pavimento está compuesta por tres capas: la primera, de forma ascendente es la capa de rodadura con un espesor de 25.5 cm y  $M_r = 45$  Kg/cm<sup>2</sup>, la segunda capa es la sub-base con espesor de 25 cm, es importante mencionar que la sub-base fue estabilizada con cemento al 4% y por último la sub-rasante que se considera infinita y con un CBR = 20%, se puede observar el detalle en la figura 4.2



Figura 4.2 Estructura de Pavimento Boulevard Diego de Holguín tramo I

Fuente: Creación propia

Los hombros mantienen el mismo espesor que los carriles principales con un módulo de ruptura del concreto de 28 kg/cm<sup>2</sup>.

Las dovelas serán de 1 ¼ pulg de diámetro por 46 cm de longitud a una separación de 30 cm. Y las barras de amarre se consideran de ½ pulg de diámetro y 92 cm de longitud con una separación entre ellas de 750 cm.

#### 4.2 Parámetros para la modelación en EverFE

Como se menciona en el apartado anterior, el diseño original del tramo en estudio es con base en la metodología AASSTHO 93, de donde se retoman

algunos parámetros para conseguir modelar la estructura y complementarlos con datos de investigaciones realizadas en el País, para poder aplicar de la mejor manera los conceptos empíricos-mecanicistas necesarios para modelar en el software EverFE.

#### 4.2.1 Geometría.

Para las dimensiones de la estructura del pavimento se consideran las dimensiones del diseño original del tramo. EverFE nos permite definir el ancho de losa en el eje “y”, la longitud en el eje “x” y el espesor de las capas en el eje “z”. Las dimensiones de sola y sub-base se presentan en la tabla 4.2

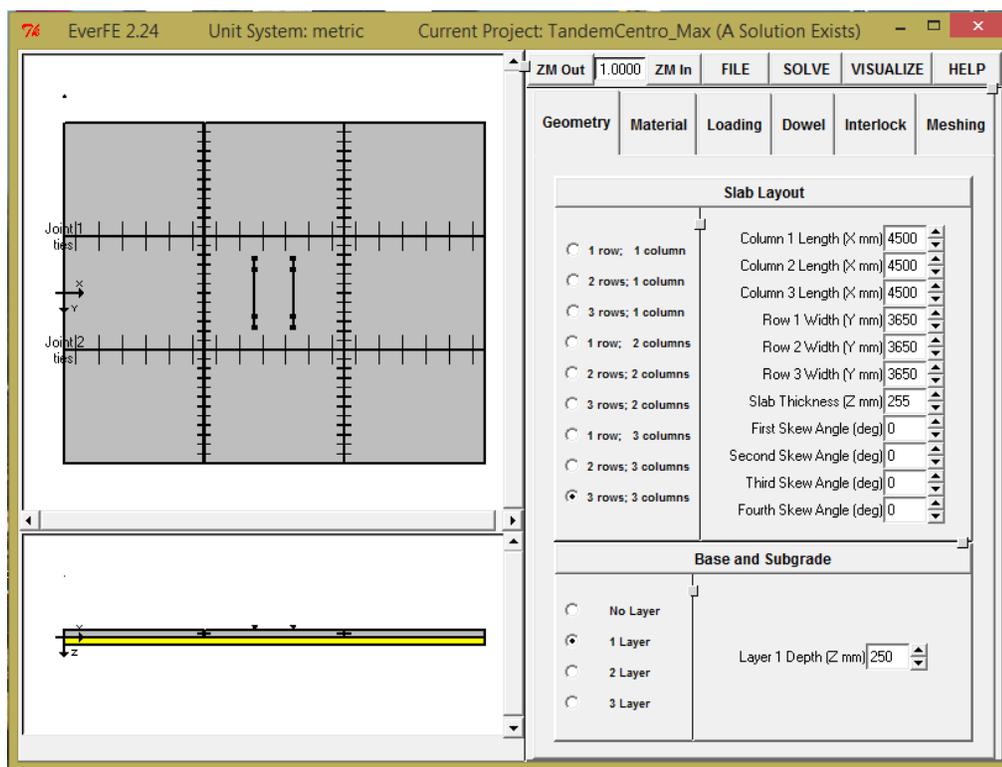


Figura 4.3 Parámetros Geométricos del tramo es estudio.

Fuente: Captura de pantalla EverFE

Tabla 4.2. Dimensiones de la estructura del pavimento.

Parámetro	Dato
<b>LOSA</b>	
Longitud	4.5 m
Ancho	3.65 m
Espesor	25.5 cm
<b>SUB-BASE</b>	
Espesor	25.0 cm

#### 4.2.2 Propiedades de los materiales.

La metodología empírico-mecanicista vuelve necesario conocer y especificar el módulo de elasticidad (E), la relación de Poisson ( $\nu$ ), el coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ) y la densidad de la losa, por lo que se hicieron las consideraciones siguientes:

##### **Losa**

Módulo Elástico: la losa es de concreto simple con dovelas y se consideró un módulo elástico igual a 29785.35 Mpa este valor es retomado del diseño original.

Coeficiente de Poisson: Huang define este coeficiente como la relación entre la tensión lateral y la deformación axial. A la vez estable un rango típico para una serie de materiales, en el caso del Concreto de cemento portland este rango se encuentra entre 0.15 y 0.20. El valor tipo en nuestro país es 0.15.

Coeficiente de expansión térmica: tras la consulta de un coeficiente aplicable a nuestro país, se aplicó el coeficiente recomendado por las ASSTHO 93. Por lo tanto para un tipo de agregado como grava. Tomaremos como referencia un valor igual a  $1.0802E-5$

***Sub-base***

Módulo de elasticidad: se considera el módulo de elasticidad usado para el diseño, ya que la determinación del mismo está basado en ensayos específicos para suelo- cemento con 4% de humedad por el ISCYC.

Módulo de Poisson: Huang define un rango de valores para suelo granular estabilizado con cemento que se encuentra entre 0.10 y 0.20 donde el valor típico es 0.15 por lo tanto fue este valor que se utiliza como referencia.

Densidad: puede variar dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado y las cantidades de agua y cemento. Para el caso en estudio se trabajó con una densidad de 2200 Kg/m<sup>3</sup>

***Sub-rasante***

Módulo de reacción: Este valor es calculado a partir de CBR de diseño, el Mr de Diseño, el espesor y módulo de elasticidad de la sub-base. Para la modelación se consideró un módulo de reacción de 0.49 Mpa/mm el mismo que se determinó para el diseño original.

***Dovelas***

Módulo Elástico: es constante para todos los grados de acero estructural, equivalente a 200000 Mpa por tanto este valor es aplicado a doveles y barras de transferencia.

Coeficiente de Poisson: para el acero estructural el módulo de Poisson es constante para los diferentes grados y se usa como referencia un valor de 0.3

Tabla 4.3 Resumen de las propiedades de los materiales.

Parámetro	Dato
Losa	
Módulo Elástico	29785.35 Mpa
Coefficiente de Poisson	0.15
Coefficiente de expansión térmica	1.0802E-05
Densidad	2200 Kg/m3
Sub-base	
Módulo de Elasticidad	4826.33 Mpa
Coefficiente de Poisson	0.3
Densidad	1802.08 Kg/m3
Subrasante	
Módulo de reacción	0.49 Mpa/mm
Dovelas	
Módulo Elástico	420 Mpa
Coefficiente de Poisson	0.3

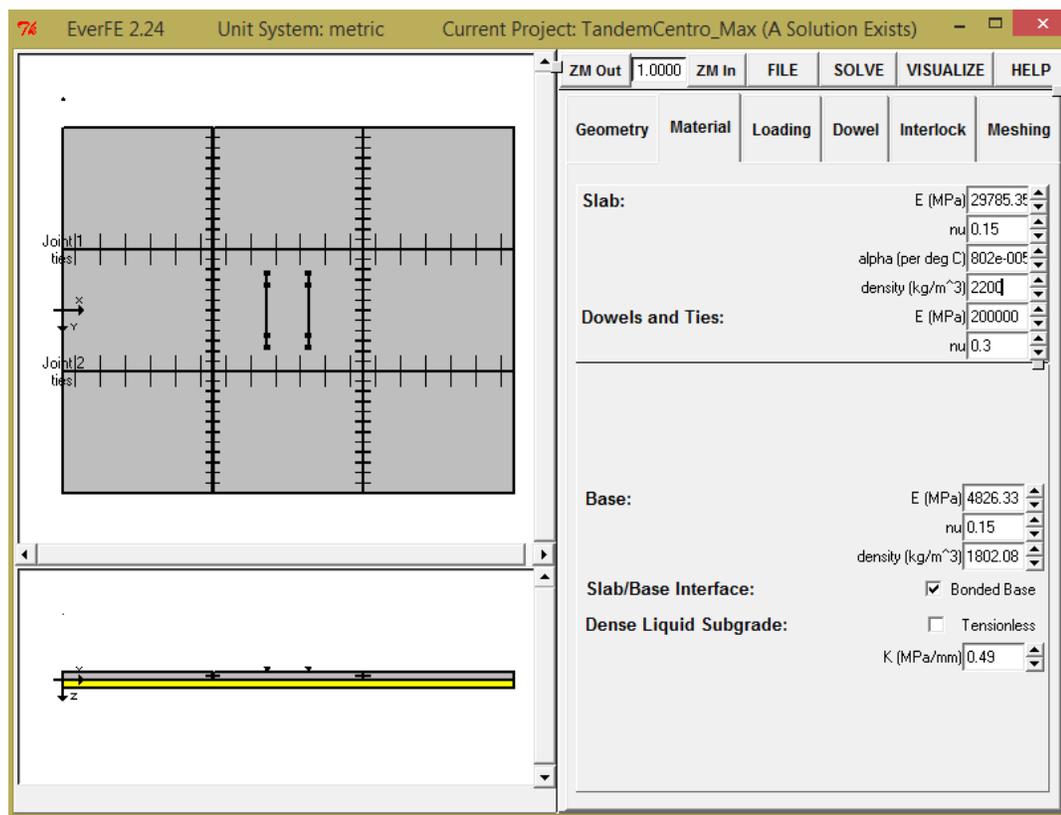


Figura 4.4 Panel de entrada de propiedades mecánicas y estructurales de los materiales de la estructura de pavimento rígido

### 4.2.3 Cargas de eje de rueda y térmicas.

En esta nueva pestaña dentro del software es posible especificar las cargas de tráfico y térmicas a las que estará expuesta el pavimento distribuciones térmicas lineales, bilineales y trilineales. Se han considerado los cuatro ejes de carga localizados en puntos críticos (centro, borde, esquina).

Distribución térmica: El esfuerzo en cualquier punto se calcula como el producto del coeficiente de expansión térmica y el cambio de temperatura en ese punto. Los cambios de temperatura se supone que es lineal a través del espesor de la losa de arriba a abajo. Debido a que los datos no han sido verificados en campo se toma como base la investigación realizada por el instituto del Cemento y Concreto (ISCYC), en la que se determinó el gradiente máximo y mínimo en el tramo comprendidos des de la avenida la Revolución y las Delicias en Santa Tecla. Donde determinaron un gradiente máximo igual a 16°C y un gradiente mínimo de -8°C.

Tabla 4.4 *Cargas por ejes y gradientes térmico.*

<b>Parámetro</b>	<b>Dato</b>
<b>Cargas</b>	
Sencillo Direccional	45 kN
Sencillo Dual	94 kN
Tandem	152 kN
Tridem	192 kN
<b>Gradiente Térmico</b>	
Gradiente máximo	16 °C
Gradiente mínimo	-8 °C

Cargas: Se han considerado los cuatro ejes de carga localizados en puntos críticos (centro, borde, esquina). Los parámetros geométricos **A**, **B**, **L**, **W** y **S** se detallan en el gráfico EverFE. Los valores **X** y **Y** son las distancias desde el modelo de origen de coordenadas hasta el centro de gravedad del eje.

Las cargas de ejes empleadas proceden de los espectros de carga presentados en el capítulo 3 de esta investigación para los picos del espectro simple, dual, tándem y tridem, y convertidos a unidades de KN.

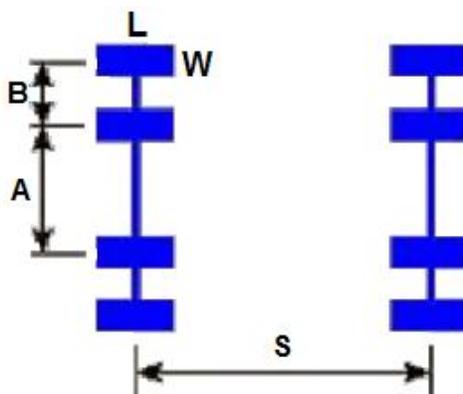


Figura 4.5 Parámetros geométricos de los ejes de rueda, eje tándem.

Los parámetros geométricos de los ejes empleados se muestran a continuación:

Tabla 4.5 Parámetros geométricos de ejes de ruedas

<b>Parámetros geométricos de ejes de rueda</b>				
	Simple	Dual	Tandem	Tridem
<b>A</b>	1500 mm	1500 mm	1500 mm	1500 mm
<b>B</b>	350 mm	350 mm	350 mm	350 mm
<b>L</b>	200 mm	200 mm	200 mm	200 mm
<b>W</b>	150 mm	150 mm	150 mm	150 mm
<b>S</b>			1250 mm	1250 mm

### **Localización de Ejes en el Sistema de losas propuesto**

En las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 se muestran la configuración de ejes en puntos críticos en la losa.

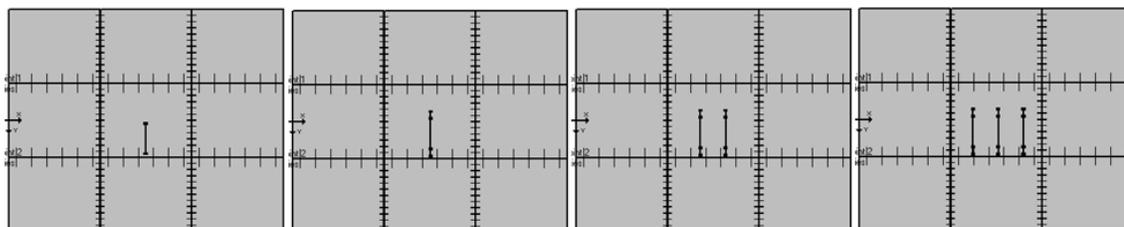


Figura 4.6 Configuración de localización de ejes en el Borde.

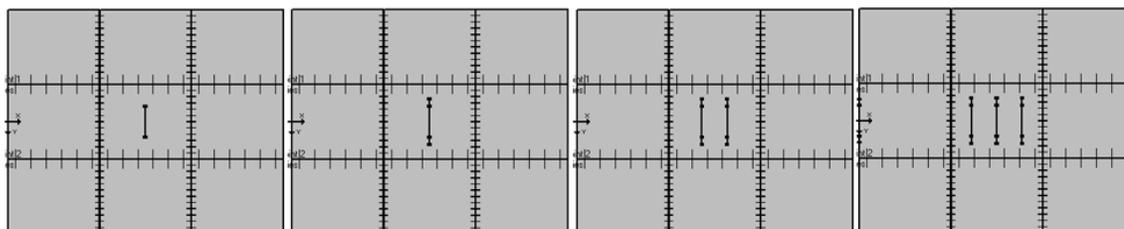


Figura 4.7 Configuración de localización de ejes en el Centro.

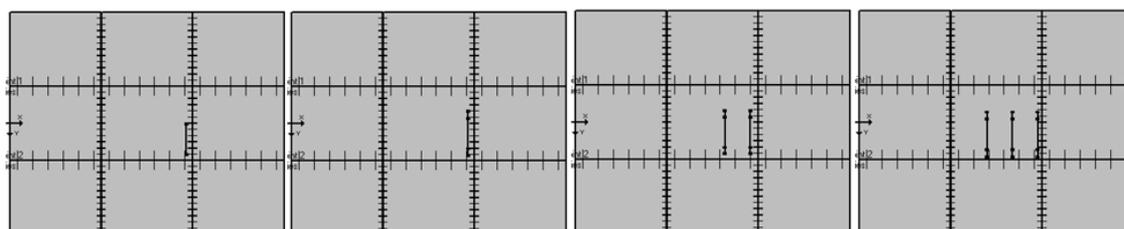


Figura 4.8 Configuración de localización de ejes en la Esquina.

#### **4.2.4 Propiedades de barras de amarre.**

La ubicación de las dovelas y barras de amarre se puede especificar de tres maneras diferentes: espaciados uniformemente a través de una unión transversal, ubicados en las trayectorias de las ruedas, o ubicados manualmente ingresando las coordenadas (x, y, z). En nuestro caso las dovelas están distribuidas en la junta a cada 30 cm por lo tanto se utiliza la opción “distribuir uniforme” (Even).

### **Propiedades de rigidez de barras de amarre**

El programa nos pide colocar el “módulo de soporte de losa-dovela”; la cual es una rigidez de resorte distribuido, y puede ser considerado como el producto de la "módulo de soporte de dovelas" comúnmente utilizado y el diámetro de la dovela, de ahí sus unidades de MPa o kips/in<sup>2</sup>. En EverFE el valor predeterminado es de 1,000 Mpa. Por lo tanto considerando que las propiedades del acero son constantes sin importar su grado, se decide trabajar con el valor predeterminado.

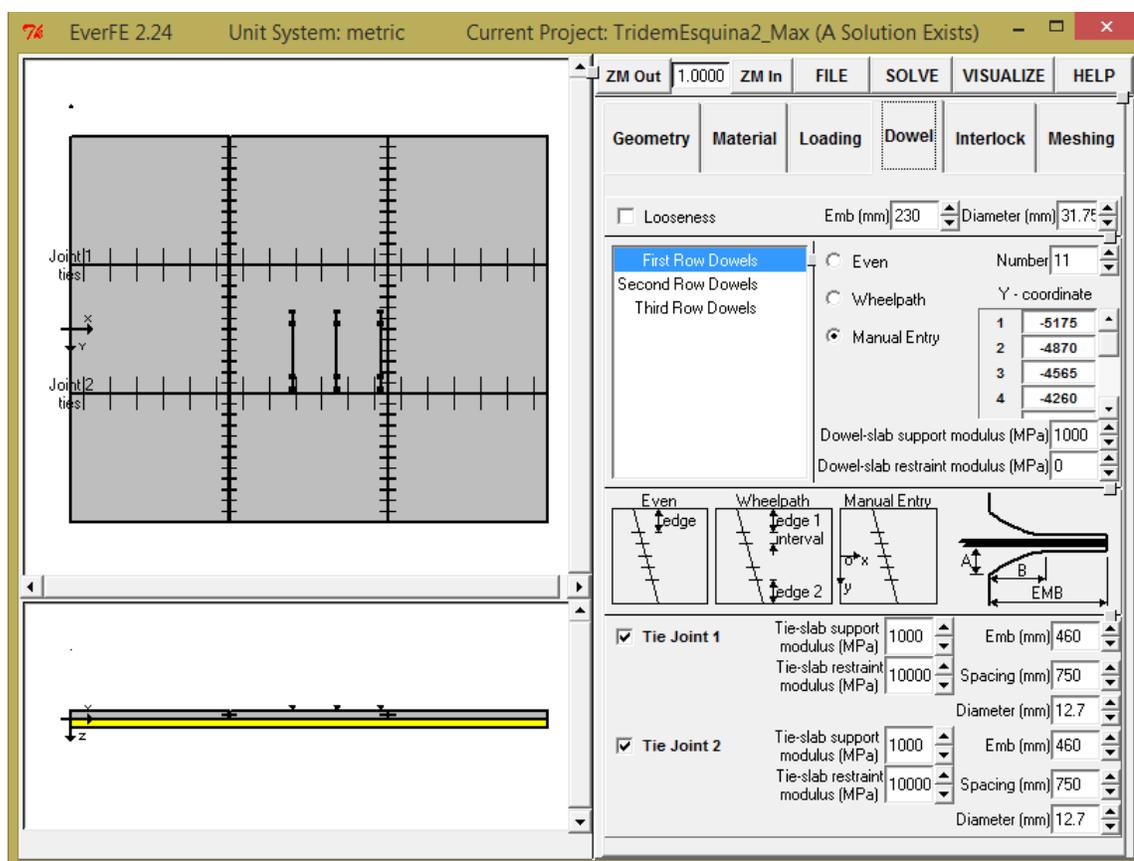


Figura 4.9 Panel de trabajo dentro del software para especificar las propiedades de dovelas y barras de amarre.

Fuente: EverFE 2.24

Mientras que el “módulo de retención del sistema módulo Losa-Dovela” es también una rigidez de resorte distribuido y controla el grado de deslizamiento horizontal relativo entre las barras y las losas. El valor predeterminado es 10,000 Mpa.

#### 4.2.5 Trabazón de agregado.

EverFE tiene dos opciones básicas para especificar el comportamiento de la trabazón de agregado en las juntas transversales: un modelo lineal y un modelo no lineal.

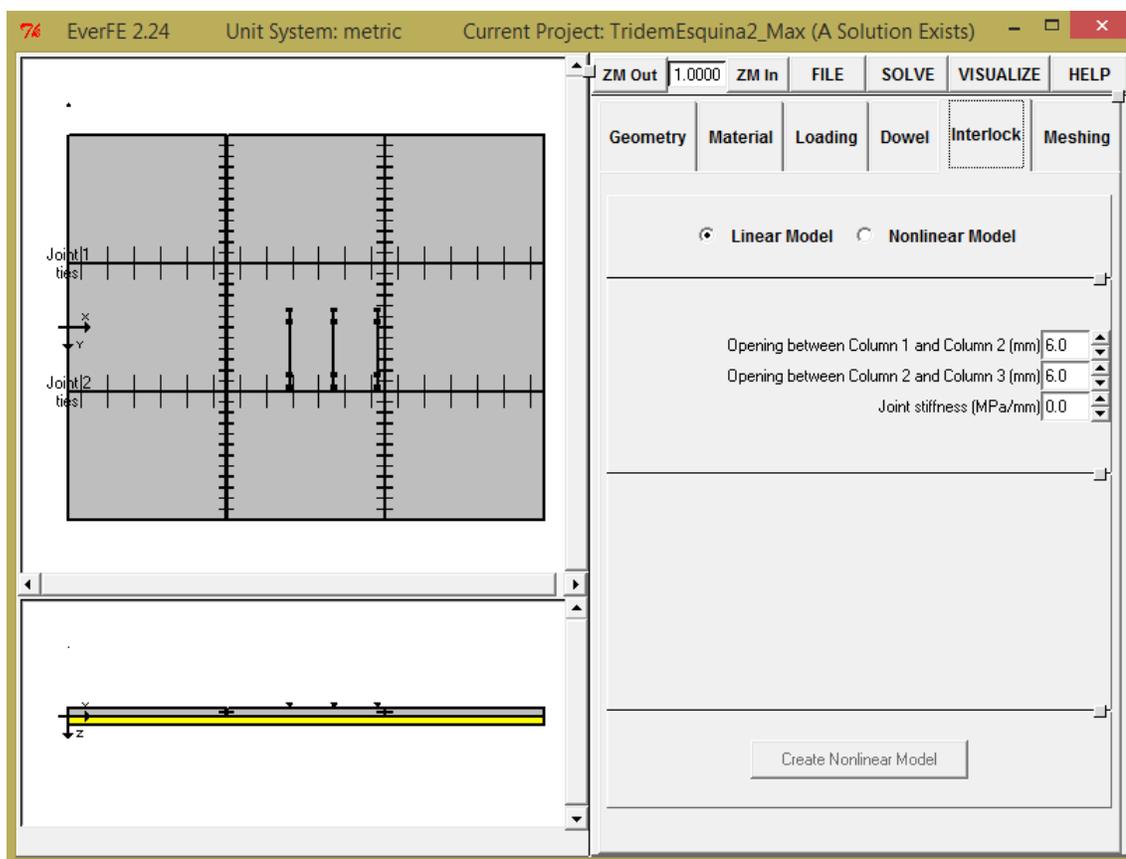


Figura 4.10 Panel de entrada para datos de trabazón de agregados.

Fuente: EverFE 2.24

### ***Modelo lineal de trabazón de agregados***

Seleccionar el modelo de trabazón de agregados lineal requiere que se especifique un valor único para la rigidez de juntas, parámetro que se aplica para cada junta transversal en el modelo de elementos finitos.

Las unidades de rigidez en las juntas son rigidez/área (MPa/mm o kips/in<sup>3</sup>) similar a una rigidez de fundación líquida (valor k). Además, se debe especificar una abertura de la junta independiente para cada junta transversal en el modelo. Los valores a utilizar para rigidez en la junta es el valor predeterminado de cero ya que la transferencia de carga se da a través de las doveles y no por trabazón de agregados y la apertura de las juntas será de 6.0 mm.

#### **4.2.6 Mallado,**

Las mallas de elementos finitos generadas por EverFE son rectilíneas. El número de elementos en la dirección x para cada columna de losas, y en la dirección y para cada fila de las losas, se especifican de forma independiente.

Además, el número de elementos a través del grosor de la losa y cada capa de base / sub-rasante elástica también pueden ser especificados. Para el caso en estudio el número de elementos a través del espesor de la losa está limitado por la simulación del gradiente térmico bilineal antes establecido.

Por lo tanto la configuración del mallado se establece en 12x12x2. Es importante destacar que mientras más detallado se requiera el análisis mayor el tiempo que tomara el mismo.

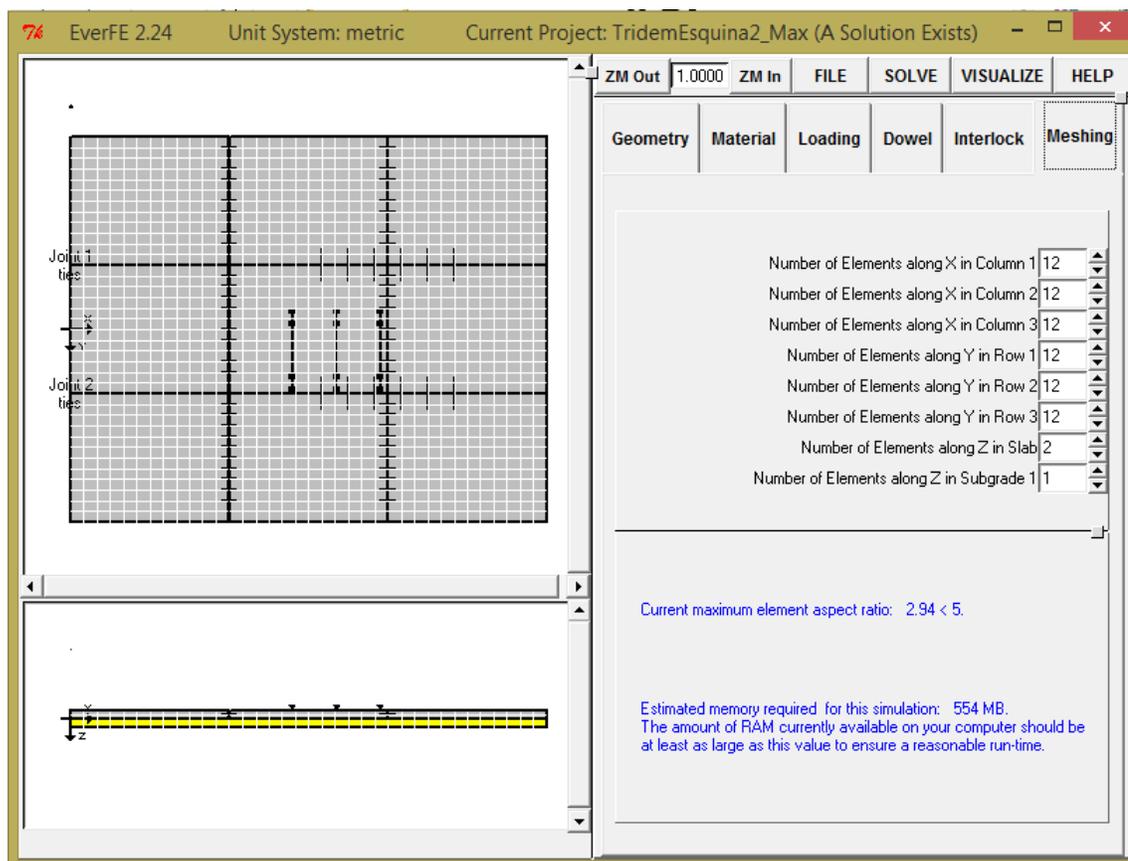


Figura 4.11 Panel para afinar el mado según la necesidad del análisis.

Fuente: EverFE 2.24

#### 4.2.7 Resolver.

##### ***Ejecute el análisis de muestra (Run the Shown Analysis)***

*Ejecutar el análisis de muestra* se selecciona a través del menú *Solver*, aparecerá un cuadro de diálogo como se muestra a continuación en la Figura 4.12. El cuadro de diálogo advierte que cualquier solución actual que existe para este proyecto se sobrescribe, además da una estimación de la cantidad de memoria que se requiere para la simulación. En este punto, la iteración se puede cancelar o iniciar haciendo clic en *Aceptar (OK)*.

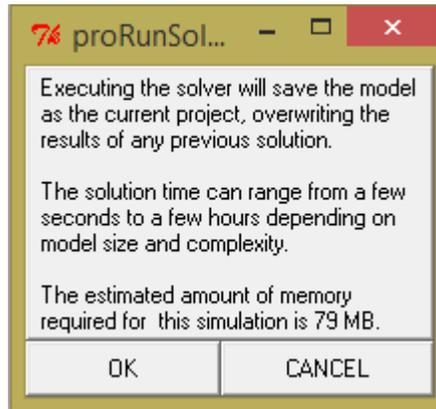


Figura 4.12 Cuadro de dialogo Ejecutar

Fuente: EverFE 2.24

Al iniciar el análisis, aparecerá una pequeña ventana como la que se observa en la figura 4.13, donde muestra información sobre el progreso de la solución; esta ventana desaparecerá una vez que se haya completado el análisis.

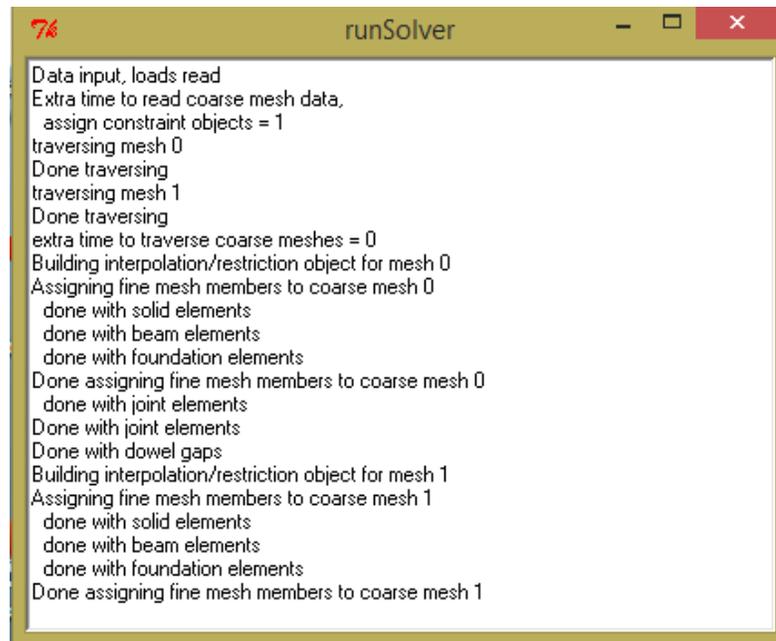


Figura 4.13 Cuadro de avance de la solución

Fuente: EverFE 2.24

#### 4.2.8 Resultados del programa.

Para visualizar de forma gráfica los esfuerzos, es necesario seleccionar la opción *stresses* en el menú *Visualizar*. Con ello se abre el panel de visualización de la tensión que se muestra a continuación en la Figura 4.14

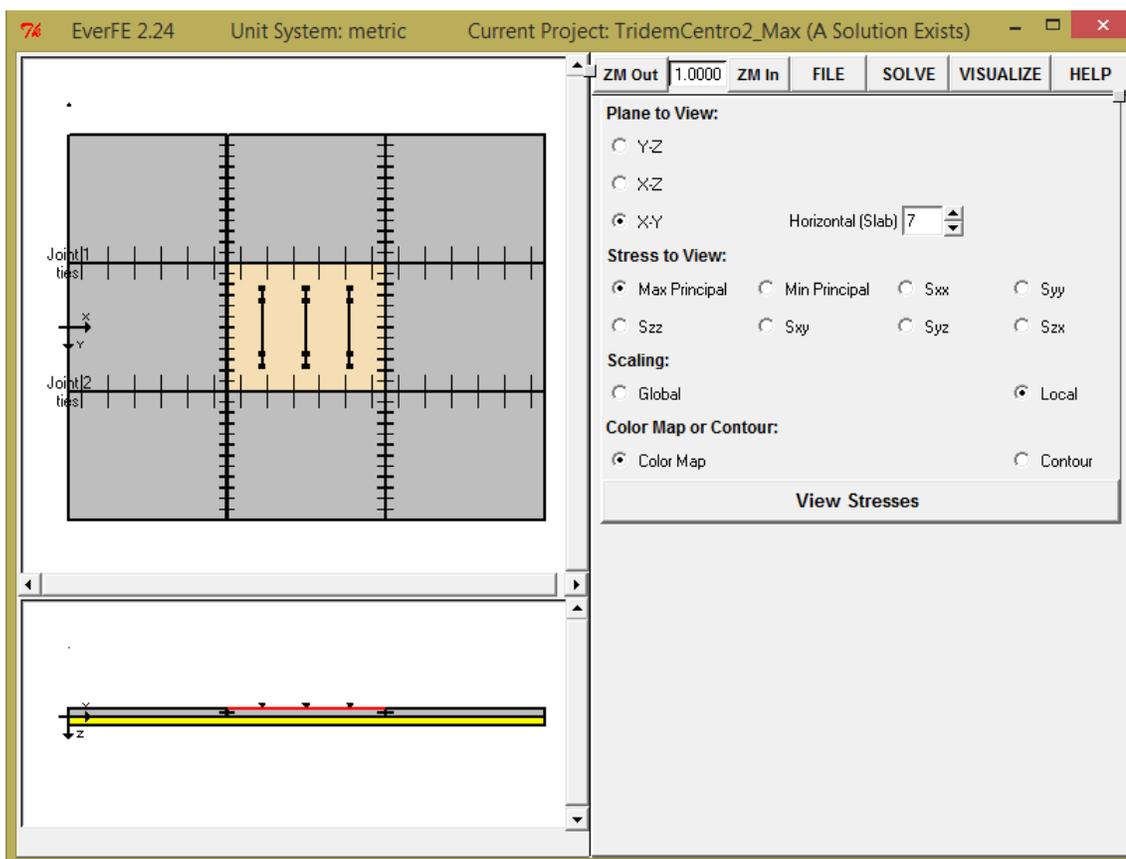


Figura 4.14 Ventana de visualización de esfuerzos

Fuente: EverFE 2.24

Para ver los esfuerzos en otros planos dentro de la losa el software permite cambiar el plano *Horizontal* modificando los valores entre 3 (parte inferior) y 7 (parte superior). Para el caso en estudio se analizarán esfuerzos en la parte superior e inferior de la losa (Figura 4.15 y 4.16 respectivamente).

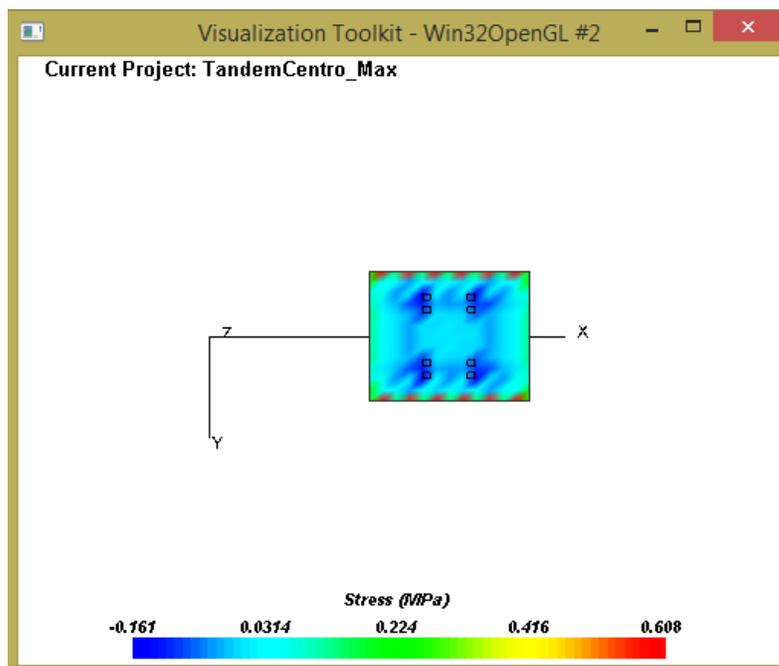


Figura 4.15 Máximos esfuerzos principales en la superficie de la losa.  
Fuente: EverFe 2.24

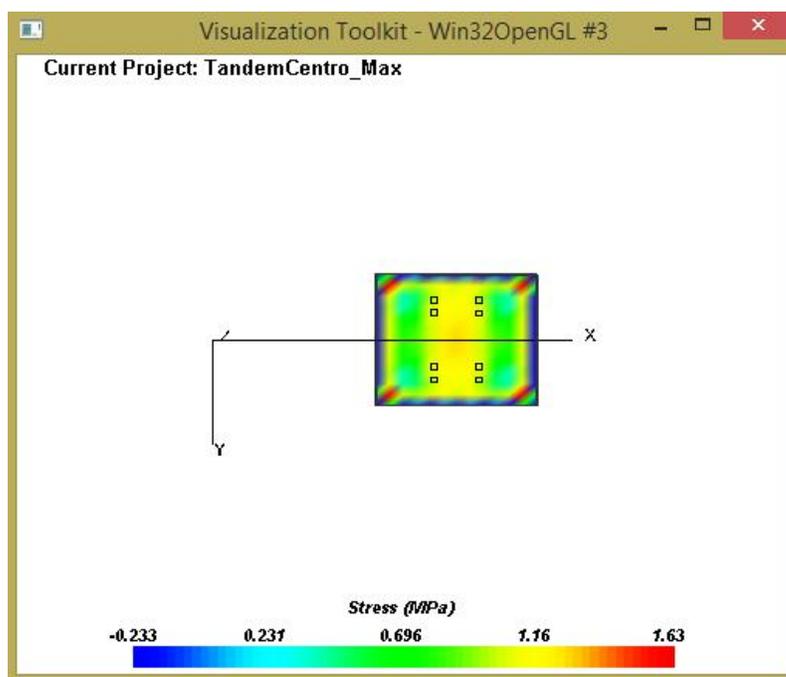


Figura 4.16 Máximos esfuerzos principales en el fondo de la losa  
Fuente: EverFE 2.24

### 4.3 Parámetros para la modelación en ApRigid 1.0

ApRigid 1.0 es un software para la determinación de la respuesta estructural de los pavimentos rígidos, pero a diferencia de EverFE 2.24 este permite la opción de trabajar bajo dos metodologías diferentes: *Regresión lineal múltiple* y *Red Neuronal Artificial*. El uso de este programa es para fines comparativos.

En la Figura 4.17 se puede observar la interfaz de ApRigid 1.0, donde se puede observar que para iniciar la modelación nos da la opción de hacer de manera individual o grupal, para este trabajo de investigación la modelación se realiza de forma individual.

Figura 4.17 Interfaz principal de ApRigid 1.0

Fuente: ApRigid 1.0

Los parámetros necesarios para modelar son los siguientes:

- Separación entre juntas (m)
- Modulo elástico del concreto (Gpa).
- Espesor de losa (cm)
- Diferencias térmico (°C)
- Coeficiente subrasante (Mpa/m)
- Modulo elástico de la base (Gpa)
- Diámetro de dovelas (cm)
- Transferencia de carga, (%)

Para cada parámetro se utilizan los mismos valores usados en la modelación en EverFE, variando las unidades en algunos casos.

El proceso sencillo, se selecciona el tipo de análisis, se introducen las características del pavimento y se selecciona *Calcular*. En la figura 4.18 se puede observar el resultado para un procedimiento de Regresión lineal múltiple.

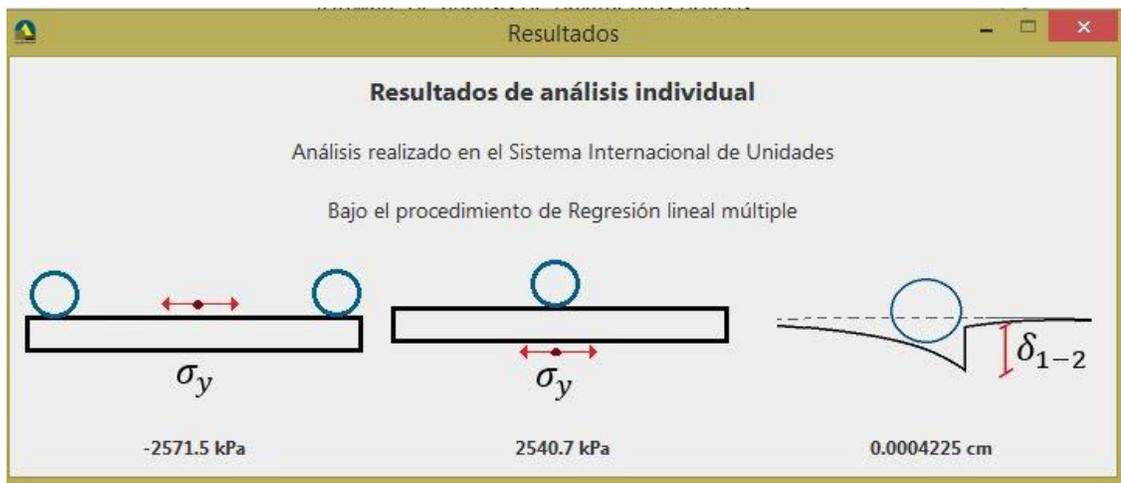


Figura 4.18 Vista de resultados de análisis individual de ApRigid.

Fuente: ApRigid 1.0

ApRigid considera solo dos tipos de ejes: eje simple y eje tándem. Como respuesta a las cargas y gradientes de temperatura determina el esfuerzo crítico para condición de carga en el centro y el borde.

#### **4.4 Metodología para la caracterización del pavimento.**

Los datos de deflectometría que se consideran para la modelación, son el resultado de una investigación realizada por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Obra Pública (DIDOP) que forma parte del Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano (MOP), el ensayo se realizó cada 250 metros en ambos sentidos dando un total de 43 puntos de muestreo en todo el tramo.

##### **4.4.1 Determinación de tramos homogéneos.**

Para la adecuada comparación entre las deflexiones obtenidas en el tramo y las deflexión como respuesta de la modelación en EverFE, es necesario seccionar la vía en tramos cuyos parámetros geomecánicos sean uniformes; para lo cual se hace uso del método de las diferencias acumuladas propuesto por AASHTO 93. Esta herramienta visual permite seccionar el proyecto vial en base a la respuesta del pavimento. En la tabla 4.6 se muestra el resumen de los cálculos necesarios para caracterizar el tramo en estudio donde:

Columna 1: se detallan las estaciones en las que se realizó el ensayo de deflectometría.

Columna 2: se introduce la distancia

Columna 3: se introduce el valor de respuesta de pavimento

Columna 4: se refiere al número de dato correspondiente a cada medida, en orden descendente

Columna 5: es la distancia entre cada medición realizada.

Columna 6: se muestra la distancia acumulada.

Columna 7: Promedio de respuesta en el intervalo.

$$\bar{r}_1 = r_1 \Rightarrow \bar{r}_1 = 0.000161$$

$$\bar{r}_2 = \frac{(r_1 + r_2)}{2} \Rightarrow \bar{r}_2 = \frac{(0.000161 + 0.000076)}{2} = 0.0001185$$

$$\bar{r}_3 = \frac{(r_2 + r_3)}{2} \Rightarrow \bar{r}_3 = \frac{(0.000076 + 0.000048)}{2} = 0.00008325$$

Columna 8: se procede a calcular el área bajo la curva, la cual se calcula multiplicando el promedio del intervalo de la columna 7 por distancia del intervalo de la columna 5.

Columna 9: Con las áreas calculadas (Columna 8) se calculan las áreas acumuladas. Después de calcular el área acumulada se calculan los valores de  $A_t$  y  $F^*$ , de la siguiente manera:

$$A_t = \sum_{i=1}^{N_t} a_i = 0.5782$$

$$F^* = \frac{A_t}{L_p} = \frac{0.5782}{5310} = 0.0001089$$

$F^*$  es el valor promedio ponderado de la respuesta de pavimento.

Columna 10: Por último se calcula el valor de las diferencia de áreas en donde se le resta al área acumulada, la distancia acumulada por el factor  $F^*$ .

Como se puede observar en la Figura 4.19, la línea roja hace referencia al promedio de los valores en cada sección homogénea de análisis. Según el método de diferencias acumuladas, un cambio de pendiente significa el inicio de una nueva unidad, por ello se escogen los tramos homogéneos según este criterio.

Obteniéndose de tal manera cuatro secciones:

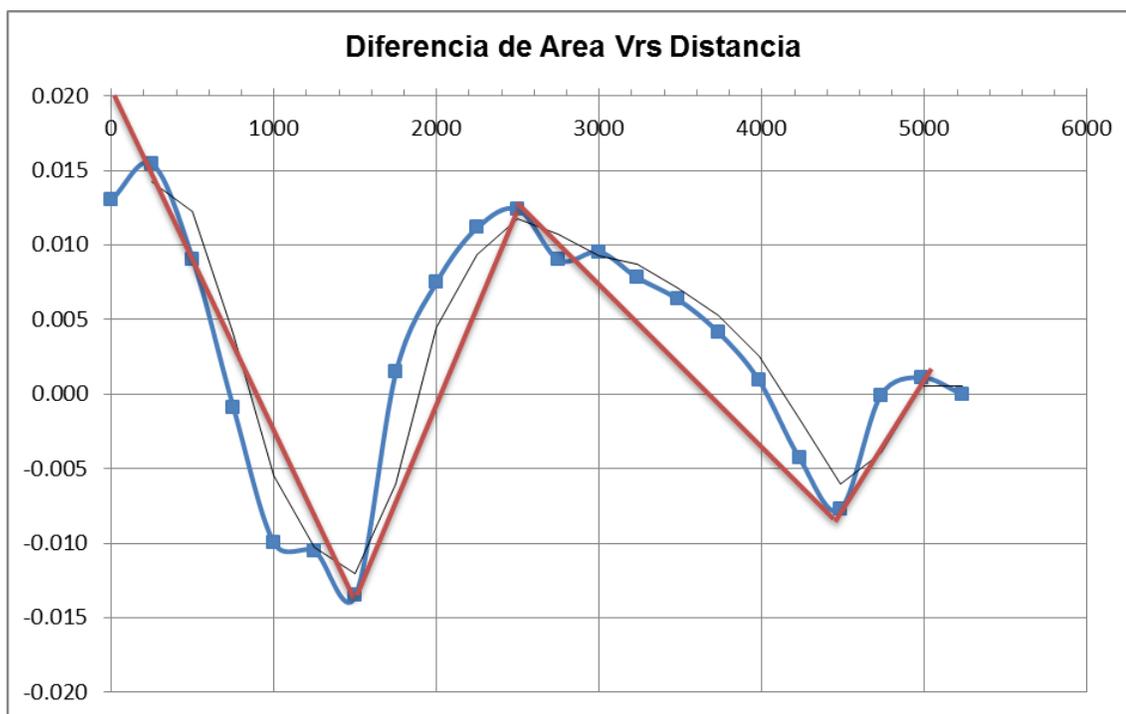


Figura 4.19 Grafico Diferencia de área vrs Distancia.

Fuente: Creación propia

Tabla 4.6. Método de las diferencias acumuladas

Estación	Distancia (m)	Deflexión (m)	Numero Intervalo	Intervalo de distancia (m)	Distancia acumulada (m)	Promedio de Intervalo (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Área Acumulada (m <sup>2</sup> )	Diferencia de Área
0+000	0	0.000161	1	250	250	1.610E-04	0.0403	0.0403	0.013
0+250	250	0.000076	2	250	500	1.185E-04	0.0296	0.0699	0.015
0+500	500	0.000048	3	250	750	8.325E-05	0.0208	0.0907	0.009
0+750	750	0.000055	4	250	1000	6.913E-05	0.0173	0.1080	-0.001
1+000	1000	0.000076	5	250	1250	7.256E-05	0.0181	0.1261	-0.010
1+250	1250	0.000141	6	250	1500	1.068E-04	0.0267	0.1528	-0.011
1+500	1500	0.000087	7	250	1750	9.689E-05	0.0242	0.1770	-0.014
1+750	1750	0.000241	8	250	2000	1.689E-04	0.0422	0.2193	0.001
2+000	2000	0.000097	9	250	2250	1.330E-04	0.0332	0.2525	0.008
2+250	2250	0.000114	10	250	2500	1.235E-04	0.0309	0.2834	0.011
2+500	2500	0.000104	11	250	2750	1.137E-04	0.0284	0.3118	0.012
2+750	2750	0.000077	12	250	3000	9.537E-05	0.0238	0.3357	0.009
3+000	3000	0.000127	13	230	3230	1.112E-04	0.0256	0.3612	0.010
3+230	3230	0.000093	14	250	3480	1.021E-04	0.0255	0.3868	0.008
3+480	3480	0.000104	15	250	3730	1.030E-04	0.0258	0.4125	0.006
3+730	3730	0.000097	16	250	3980	1.000E-04	0.0250	0.4375	0.004
3+980	3980	0.000092	17	250	4230	9.601E-05	0.0240	0.4615	0.001
4+230	4230	0.00008	18	250	4480	8.801E-05	0.0220	0.4835	-0.004
4+480	4480	0.000102	19	250	4730	9.500E-05	0.0238	0.5073	-0.008
4+730	4730	0.000184	20	250	4980	1.395E-04	0.0349	0.5422	0.000
4+980	4980	0.000088	21	250	5230	1.138E-04	0.0284	0.5706	0.001
5+230	5230	0.000076	22	80	5310	9.488E-05	0.0076	0.5782	0.000

- Sección 0+000 – 1+500, Esta sección cuenta con 7 puntos de ensayo, un valor de deflexión promedio igual a 92um
- Sección 1+500 – 2+500, Esta sección cuenta con 5 puntos de ensayo, un valor de deflexión promedio igual a 129um
- Sección 2+500 – 4+480, Esta sección cuenta con 9 puntos de ensayo, un valor de deflexión promedio igual a 97um
- Sección 4+480 – 5+230, Esta sección cuenta con 4 puntos de ensayo, un valor de deflexión promedio igual a 113um

Mediante el seccionamiento de la vía se calculan los módulos elásticos de cada una de las capas del pavimento usando el software BakFAA.

#### **4.4.2 Calculo de módulos elásticos.**

Ahora que el tramo de la vía ya está seccionado, se selecciona cuatro puntos representativos (uno de cada sección) que presenten valores de deflexión central aproximados a la media establecida por cada sección homogénea.

Después de calcular la media de deflexiones en cada sección se determinó que los puntos representativos son las estaciones: 1+500, 2+250 ,3+730 y 4+480. Con los datos de deflexiones en estos puntos, los módulos elásticos *teóricos* de las diferentes capas del pavimento y los coeficientes de poisson; se puede realizar el retro cálculo mediante el software BakFAA.

En la figura 4.20 se puede observar la sección donde se pueden definir las propiedades de la estructura del pavimento:

- El módulo de Young o Modulo Elástico (Teórico)
- El coeficiente de Poisson.
- Condición de interfaz entre capas (0: discontinuo, 1: continuo).
- Espesor.

En nuestro caso el modulo elástico de las tres capas se asumirán según el diseño original ya que el BakFAA trabaja por iteraciones hasta calcular los módulos elásticos adecuados para las deflexiones con las que se está trabajando. El coeficiente de Poisson y el espesor de las capas son igualmente considerados según el diseño original pero con la diferencia que estos no van a variar a pesar de las iteraciones que el software realice.

Layer Nbr	Young's Modulus, MPa	Poisson's Ratio	Interface Parameter (0 to 1.0)	Thickness, mm	Layer Changeable
1	33,458.48	0.15	1.00	255.0008	<input checked="" type="checkbox"/>
2	5,925.25	0.15	1.00	249.9995	<input checked="" type="checkbox"/>
3	142.67	0.40	1.00	0.0000	<input checked="" type="checkbox"/>
4	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>
5	0	0	0	0.00	<input type="checkbox"/>
6	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
7	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
8	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
9	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>
10	0.00	0.00	0.00	0.00	<input type="checkbox"/>

Figura 4.20 Sección de propiedades de la estructura del pavimento.

Luego se introducen las deflexiones obtenidas en campo sobre la posición de los sensores FWD como se puede observar en la figura 4.21. Y en la sección *Calc*, el programa muestra las deflexiones calculadas para la estructura actual.

Sensor	1	2	3	4	5	6	7
Offset, mm	0.0	200.0	300.0	450.0	600.0	900.0	1828.8
Defln, mc	87.00	79.00	76.00	70.00	66.00	58.00	0.00
Calc, mc	75.11	71.06	69.02	66.17	63.29	57.48	41.21

Figura 4.21 Sección para introducir las deflexiones obtenidas en campo.

Es necesario el radio del plato de carga y el valor de carga aplicada en cada punto evaluado, como se puede observar en la figura 4.22. Finalmente se procede a realizar el retrocálculo dando clic en el botón “Brackcalculate”

Iteration Tolerance	Evaluation Depth, mm
0.0001	635.0025
Plate Radius, mm	Plate Load, KN
150	38.2
Function RMS, mc	Iteration Number
16.7932	13 (Done)
<input type="button" value="Brackcalculate"/>	

Figura 4.22 Sección para las propiedades del equipo.

Debido a que BakFAA solo determina el módulo elástico de las sub-rasante es necesario utilizar el nomograma recomendado por la AASHTO 93 para calcular el módulo de reacción de la misma (K). En la figura 4.23 se puede observar el nomograma y la secuencia para el cálculo. En la tabla 4.7 se presenta el resumen de los resultados obtenidos.

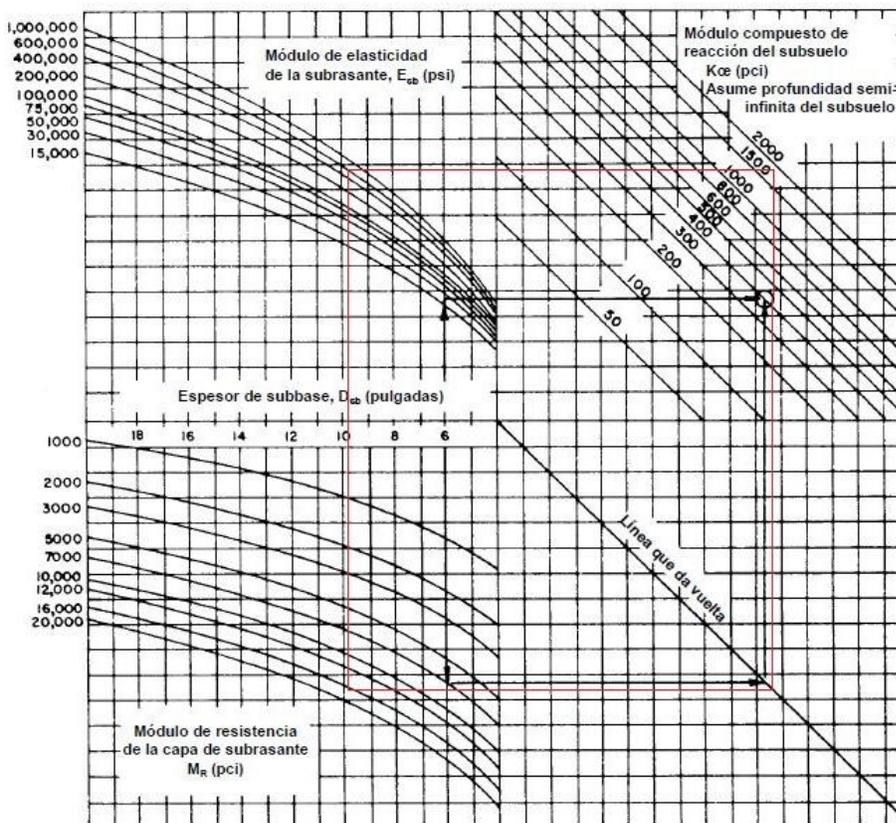


Figura 4.23 Nomograma para el cálculo del módulo de reacción de la sub-rasante

Fuente: AASHTO 93

Tabla 4.7 Resumen de resultados BakFAA

Estación	Capa	ME (Mpa)	$\mu_n$	K (Mpa/mm)
1+500	Capa de rodadura	29,785.35	0.15	-
	Sub-base	4,826.33	0.15	-
	Sub-rasante	149.65	0.40	0.62
2+250	Capa de rodadura	29,785.35	0.15	-
	Sub-base	4,826.33	0.15	-
	Sub-rasante	109.74	0.40	0.49
3+730	Capa de rodadura	29,785.35	0.15	-
	Sub-base	4,826.33	0.15	-
	Sub-rasante	138.45	0.40	0.60
4+480	Capa de rodadura	29,785.35	0.15	-
	Sub-base	4,826.33	0.15	-
	Sub-rasante	119.71	0.40	0.54

#### **4.4.3 Modelación de elementos finitos.**

Posteriormente los módulos obtenidos en BakFAA son ingresados en la modelización de elementos finitos que propone EverFE, para lo cual se procese con los cuatro puntos representativos a la comparación de los resultados obtenidos en EverFE y los valores reales del FWD.

La metodología para la modelación en EverFE es igual a la que se detalla en la sección 4.2.2 de este capítulo.

### **4.5 Resumen de Resultados**

#### **4.5.1 Análisis estructural mediante la determinación de esfuerzos.**

En la primera etapa de este trabajo de investigación se busca realizar un análisis estructural del pavimento, para lograrlo es necesario utilizar un software que trabaje bajo la metodología de elementos finitos. Para fines de comparación se trabaja con EverFe 2.24 (metodología de elementos finitos) y Ap-Rigid (Regresión lineal múltiple). El proceso a seguir puede definirse en 3 sencillos pasos:

1. Ingresar los datos requeridos por el software
2. Modelar la estructura considerando un gradiente térmico más la carga
3. Revisar que el esfuerzo máximo en la losa, no se mayor del 50% del Módulo de Rotura (MR) del concreto.

La modelación en EverFE 2.24 ya fue previamente detallada en el apartado 4.2 del presente capítulo, en donde se justifican los parámetros utilizados para la

modelación del tramo en estudio. De igual manera se detallan las características de Ap-Rigid en el apartado 4.3

En la tabla 4.8 se detallan los resultados obtenidos de la modelación con EverFE y se comparan con el criterio del 50% del módulo de ruptura del concreto.

En las tablas 4.9 y 4.10 se resumen los resultados obtenidos por la metodología de regresión múltiple y red neuronal artificial respectivamente.

Tabla 4.8 *Resumen de resultados obtenidos con EverFE 2.24*

<b>Posición</b>	<b>Módulo de Ruptura (Mpa)</b>	<b>Esfuerzo Máximo (Mpa)</b>	<b>Criterio del 50% &lt; MR</b>
Eje Simple- Borde	4.4	1.85	42.05%-Cumple
Eje Simple-Esquina	4.4	1.83	41.59%-Cumple
Eje Simple-Centro	4.4	1.84	41.82%-Cumple
Eje S. Dual-Borde	4.4	1.86	42.27%-Cumple
Eje S. Dual-Esquina	4.4	1.83	41.59%-Cumple
Eje S Dual-Centro	4.4	1.84	41.82%-Cumple
Eje Tándem-Borde	4.4	1.87	42.50%-Cumple
Eje Tándem-Esquina	4.4	1.85	42.05%-Cumple
Eje Tándem-Centro	4.4	1.84	41.82%-Cumple
Eje Tridem-Borde	4.4	1.84	41.82%-Cumple
Eje Tridem-Esquina	4.4	1.86	42.27%-Cumple
Eje Tridem-Centro	4.4	1.82	41.36%-Cumple

Tabla 4.9. Resumen de resultados obtenidos con Ap-Rigid.Regresión lineal múltiple.

<b>Eje</b>	<b>Módulo de Ruptura (Mpa)</b>	<b>Esfuerzo Critico (Mpa)</b>	<b>Criterio del 50% &lt; MR</b>
Simple	4.4	2.54	57.73%-No Cumple
Tándem	4.4	2.57	58.41%-No Cumple

Tabla 4.10 Resumen de resultados obtenidos con Ap-Rigid. Red Neuronal Artificial.

<b>Eje</b>	<b>Módulo de Ruptura (Mpa)</b>	<b>Esfuerzo Critico (Mpa)</b>	<b>Criterio del 50% &lt; MR</b>
Simple	4.4	1.88	42.73%-Cumple
Tándem	4.4	1.35	30.68%-Cumple

El resultado de cada una de las iteraciones realizadas con los diferentes software se muestra en anexos A y B

#### **4.5.2 Comparación de deflexiones.**

En esta etapa se compara las deflexiones obtenidas en campo por medio del ensayo FWD y las deflexiones resultantes de la modelación en EverFE.

El proceso para caracterizar y definir puntos representativos del tramo se detalla en el apartado 4.3 del presente capítulo. En la tabla 4.11 se presentan las deflexiones por sección.

En las figuras 4.24, 4.25, 4.26 y 4.27 se observa que los cuencos de deflexiones calculados por EverFE 2.24 y los medidos por FWD tienen similitud en la forma con un desfase aproximado de 45  $\mu$ m.

Tabla 4.11 *Deflexiones medidas por FWD y calculadas por EverFE.*

Distancia (mm)	Deflexiones ( $\mu\text{m}$ )							
	Sección 1		Sección 1		Sección 1		Sección 1	
	Estación 1+500		Estación 2+250		Estación 3+730		Estación 4+480	
	FWD	EverFE	FWD	EverFE	FWD	EverFE	FWD	EverFE
0	87	44	114	51	97	45	102	48
200	79	39	101	46	84	40	98	43
300	76	36	96	43	81	37	93	40
450	70	32	87	39	73	33	83	36
600	66	30	80	36	67	31	75	34
900	58	26	66	32	57	27	61	29

Este desfase varía entre estaciones y es aún más evidente en la estación 2+250 donde llega a ser mayor a los 50  $\mu\text{m}$ .

Para el cálculo de deflexiones en EverFE se sigue el proceso explicado en el apartado 4.2, cabe destacar que el gradiente de temperatura juega un papel muy importante en la variación de deflexiones. Ya que se desconoce el gradiente de temperatura exacto del día del ensayo de FWD y la manera en que este variaba según el desarrollo del mismo, por lo tanto se modela para un gradiente de temperatura igual a cero, considerando que la temperatura en la base y en la superficie de la losa en algún momento del día llegan a igualarse. En esta etapa de la investigación no se compara con los resultados de ApRigid debido a que el software no considera la posibilidad de variar las cargas por ejes.

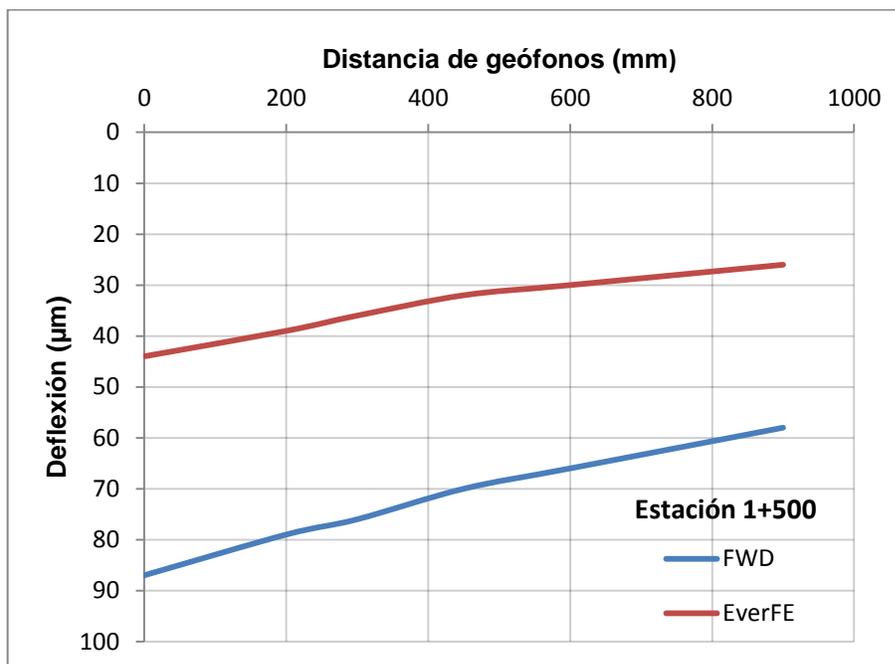


Figura 4.24 Deflexiones medidas por FWD y calculadas con EverFE de la estación 1+500.

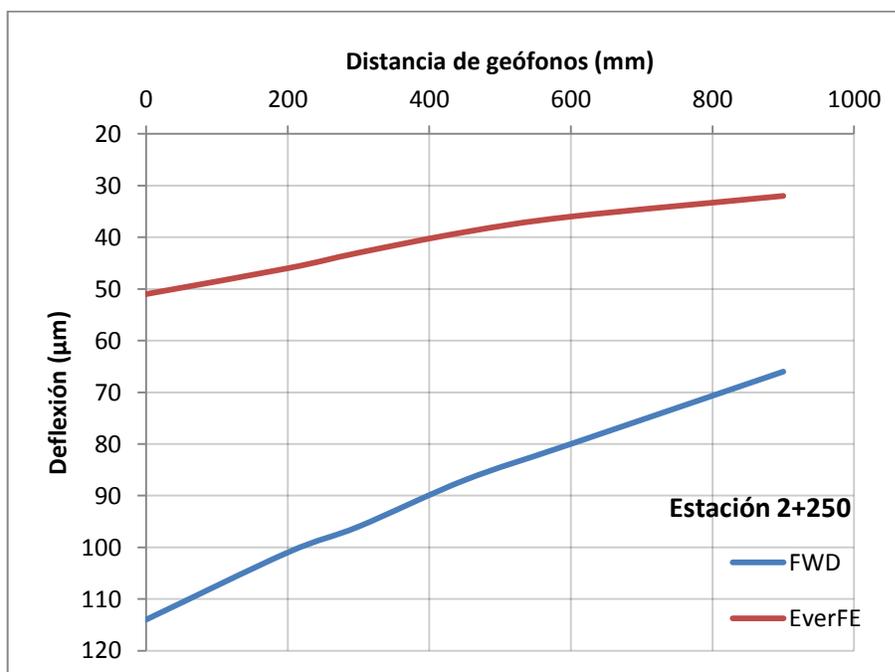


Figura 4.25 Deflexiones medidas por FWD y calculadas con EverFE de la estación 2+250

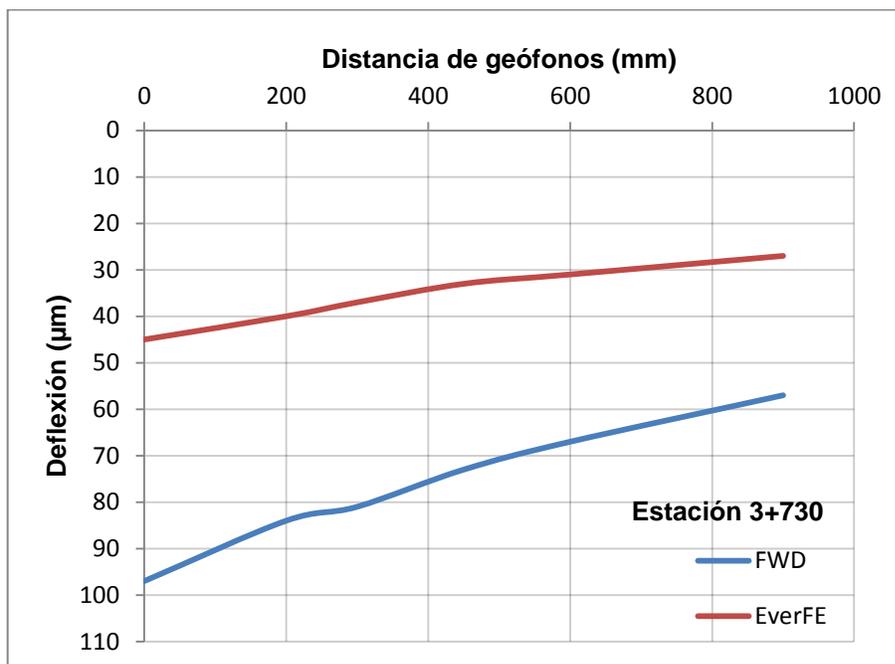


Figura 4.26 Deflexiones medidas por FWD y calculadas con EverFE de la estación 3+730

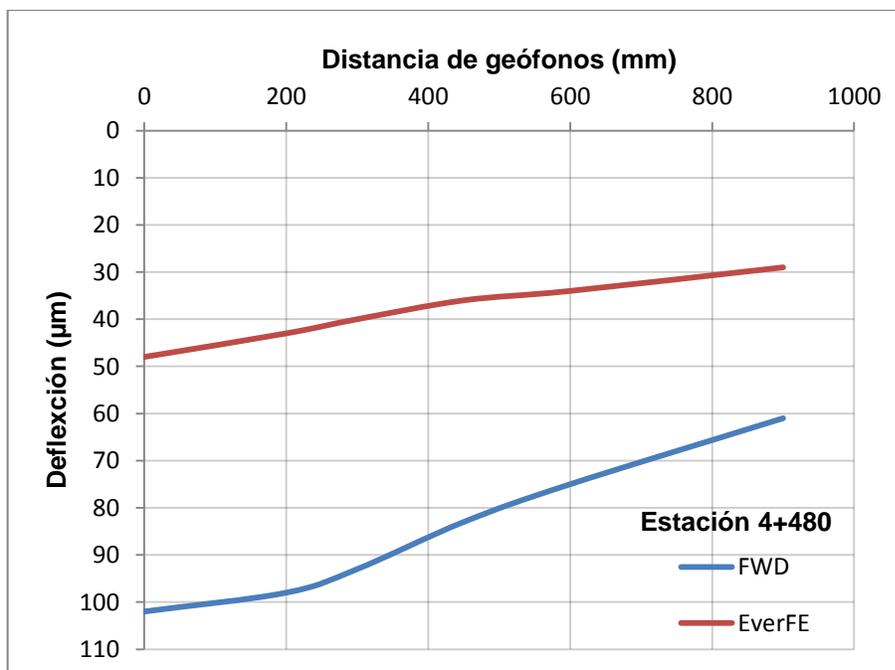


Figura 4.27 Deflexiones medidas por FWD y calculadas con EverFE de la estación 4+480

**CAPITULO V:  
CONCLUSIONES Y  
RECOMENDACIONES**

## 5.1 Conclusiones

- Los resultados obtenidos en el análisis estructura del pavimento del tramo en estudio, permiten tener una idea de la condición actual del mismo ya que los resultados de esfuerzos máximo calculados con EverFE no exceden el 50% del módulo de ruptura del concreto por lo que se puede concluir que la vía presenta condiciones aceptables. Sin embargo hay que destacar que los esfuerzos calculados con ApRigid bajo el método de regresión lineal múltiple excede el 50% del MR, la variación en ApRigid puede adjudicarse al hecho que el software ha sido diseñado considerando las características del país donde se creó y se establece que las cargas para ejes simple y eje tándem son de 58 KN y 162 KN respectivamente.
- El análisis de los datos provenientes del FWD, mediante el modulo elástico obtenido con el software BakFAA y a la vez el cálculo del módulo de reacción de la subrasante a través del nomograma recomendado por la AASHTO 93 permite concluir que existe una tendencia adecuada de los resultados por BakFAA el cual admite hacer evaluaciones individuales facilitando su uso y aplicación.
- El cálculo de deflexiones realizado con EverFE, considerando el módulo de reacción de la subrasante obtenido con el nomograma de AASHTO 93 y en cuatro puntos representativos de las propiedades geomecánicas del tramo en estudio; permite concluir que el cuenco de deflexiones

calculadas es similar a las deflexiones obtenidas en campo aunque con un desfase que varía entre  $40\mu\text{m}$  y  $50\mu\text{m}$ , pero dicha variación puede ser justificada en el hecho que programas como BakFAA han sido desarrollados para su aplicación específica en pavimentos de aeropuertos.

## **5.2 Recomendaciones**

- Trabajar en el desarrollo de programas computacionales considerando las características de los materiales y las condiciones climáticas existentes en nuestro país.
- Realizar investigación orientada a determinar el gradiente térmico en losas de concreto hidráulico de diferentes espesores para definir una base de datos que pueda ser usada en el desarrollo de software para la modelación y diseño empleando la metodología empírico-mecanicista.

## REFERENCIAS

American Concrete Institute (2002) Committee 116 Cement and Concrete Terminology .ACI Reported p 22

American Concrete Pavement Association "Design and construction of joint for concrete highways" Illinois.

Anguas. P, Correa. A., Publicación Técnica 258, Conceptos Mecanicistas en Pavimentos, Instituto Mexicano del Transporte

Cubillos Alfonso, 2007 "Introducción al método de los elementos finitos" Universidad de Ibagué.

Hernández L. Félix M. "Estado del conocimiento en la modelación de pavimentos rígidos". (2013) doi: 10.13140/2.1.3396.7685

Hernández Roberto, Garnica Paul, Solorio Ricardo "Caracterización de los espectros de carga en la red carretera mexicana"

Huang Yang (2004).Pavement Analysis and Design ,New Jersey : Prentice-Hall , USA.cap 4

Instituto Salvadoreño del cemento y el concreto (2015) Investigación de gradiente térmico en pavimentos de concreto hidráulico. Conferencia llevada a cabo en el VI Congreso Iberoamericano de pavimentos de hormigón, Puerto Iguazú, Argentina.

Ioannides, A.M., Thompson, M.R. and Barenberg, E.J. (1985), Westergaard Solutions Reconsidered, Transportation Research Record 1043, Transportation Research Board, National Research Council, p. 13-23., Washington, DC.

López, Generación de los espectros de carga vehicular de los años 2014, 2015 y 2016 para el salvador (Trabajo de grado) Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador.

Navarro Carlos, Pérez José 2009 Curso "Ingeniería Estructural", Universidad Carlos II de Madrid.

Pickett, G. and Ray, G. (1951), Influence Charts for Rigid Pavements, Transactions, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 116, p. 49

Quirós O. Ricardo (2015) "Desarrollo de modelos estáticos para la determinación de respuestas mecánicas críticas en pavimentos rígidos" Universidad Rodrigo Facio. Costa Rica.

Rico Rodríguez, Alfonso & Garnica, Paul. (2018). Espectros de Carga y Daño para Diseño de Pavimentos.

Salazar R. Aurelio "Guía para el diseño y construcción de pavimentos rígidos", 1era Edición p. 74.

Westergaard, H.M. (1948), New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 113, p. 425-444.

# **ANEXOS**

## Anexo A: Variación de esfuerzos para diferente tipo de ejes usando EverFE

Gradiente	Ubicación	Eje Simple		
		Borde	Esquina	Centro
-8	Fondo	1.230	1.220	1.230
	Superficie	1.850	1.830	1.840
0	Fondo	0.584	0.587	0.584
	Superficie	0.754	0.741	0.743
16	Fondo	1.640	1.710	1.630
	Superficie	0.680	0.776	0.609

Variación de esfuerzos para eje simple.

Gradiente	Ubicación	Eje Dual		
		Borde	Esquina	Centro
-8	Fondo	1.240	1.220	1.240
	Superficie	1.860	1.830	1.840
0	Fondo	0.584	0.584	0.584
	Superficie	0.763	0.741	0.751
16	Fondo	1.630	1.740	1.630
	Superficie	0.717	0.611	0.608

Variación de esfuerzos para eje simple dual.

Gradiente	Ubicación	Eje Tándem		
		Borde	Esquina	Centro
-8	Fondo	1.250	1.250	1.250
	Superficie	1.870	1.850	1.840
0	Fondo	0.583	0.581	0.581
	Superficie	0.770	0.753	0.750
16	Fondo	1.630	1.680	1.630
	Superficie	0.681	0.756	0.608

Variación de esfuerzos para eje Tándem

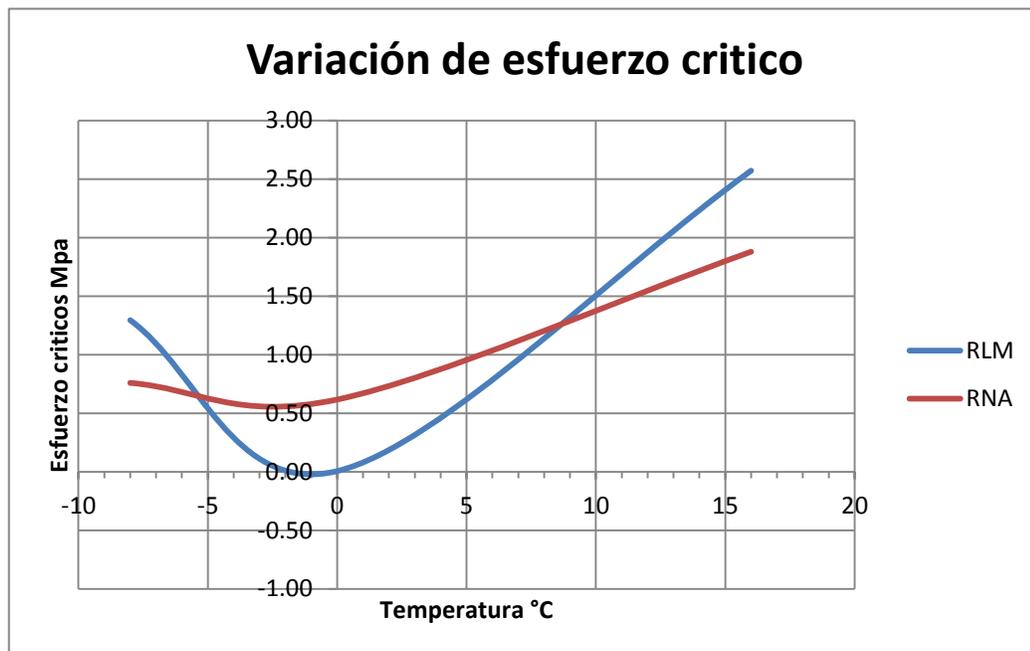
Gradiente	Ubicación	Eje Tridem		
		Borde	Esquina	Centro
-8	Fondo	1.260	1.250	1.260
	Superficie	1.840	1.860	1.820
0	Fondo	0.581	0.582	0.573
	Superficie	0.753	0.761	0.726
16	Fondo	1.630	1.730	1.620
	Superficie	0.658	0.669	0.609

Variación de esfuerzos para eje Tridem.

Anexo B. Variación de esfuerzo critico según el método de Regresión lineal múltiple y Red neuronal artificial con ApRigid 1.0

Método	Gradiente	Esfuerzo critico (Mpa)	
Regresión Lineal Múltiple	-8	0.87	1.30
	0	0.27	0.01
	16	2.54	2.57
Red Neuronal Artificial	-8	0.76	1.51
	0	0.62	0.07
	16	1.88	1.35

Variación de esfuerzo critico en ApRigid 1.0



Variación entre los métodos: Regresión lineal múltiple (RLM) y Red Neuronal Artificial (RNA)

## Anexo C. Deflexiones resultados de ensayo FWD

Tramo	KmInicio	KmFinal	Intersec.	FWD_Load	D0	D200 mm	D300 mm	D450 mm	D600 mm	D900 mm	Taire °C	Tpav °C
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	0	0.25	0	37.3	161	149	145	138	129	114	23	30
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	0.25	0.5	0	37.6	76	73	70	64	59	49	23	30
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	0.5	0.75	0	37.9	48	42	40	38	34	30	23	28
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	0.75	1	0	38.1	55	48	48	44	43	39	23	28
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	1	1.25	0	37.9	76	68	66	62	59	53	23	28
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	1.25	1.5	0	37.7	141	128	120	111	100	86	23	28
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	1.5	1.75	0	38.2	87	79	76	70	66	58	24	28
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	1.75	2	0	37.7	241	210	194	172	149	110	24	30
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	2	2.25	0	38.1	97	84	81	74	68	56	25	31
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	2.25	2.5	0	37.8	114	101	96	87	80	66	26	35
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	2.5	2.75	0	38	104	92	90	82	77	66	26	26
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	2.75	3	0	38.1	77	68	66	61	57	48	27	32
CA01W (Las Delicias) - Dv. 7° Av. Norte Santa Tecla (Trompeta)	3	3.23	0	38	127	113	107	96	87	71	26	33
Dv. 7° Av. Nte. Santa Tecla (Trompeta) - Dv. Boulevard Merliot	3.23	3.48	0	38	93	85	82	76	70	61	26	39
Dv. 7° Av. Nte. Santa Tecla (Trompeta) - Dv. Boulevard Merliot	3.48	3.73	0	38.2	104	90	87	80	74	63	25	39
Dv. 7° Av. Nte. Santa Tecla (Trompeta) - Dv. Boulevard Merliot	3.73	3.98	0	37.9	97	84	81	73	67	57	25	38
Dv. 7° Av. Nte. Santa Tecla (Trompeta) - Dv. Boulevard Merliot	3.98	4.23	0	38.1	92	81	77	70	65	53	25	35
Dv. 7° Av. Nte. Santa Tecla (Trompeta) - Dv. Boulevard Merliot	4.23	4.48	0	38.4	80	71	69	64	60	52	25	36
Dv. 7° Av. Nte. Santa Tecla (Trompeta) - Dv. Boulevard Merliot	4.48	4.73	0	37.8	102	98	93	83	75	61	25	37
Dv. 7° Av. Nte. Santa Tecla (Trompeta) - Dv. Boulevard Merliot	4.73	4.98	0	37.7	184	167	156	139	122	96	25	37
Dv. 7° Av. Nte. Santa Tecla (Trompeta) - Dv. Boulevard Merliot	4.98	5.23	0	37.8	88	77	74	67	62	53	25	37
Dv. 7° Av. Nte. Santa Tecla (Trompeta) - Dv. Boulevard Merliot	5.23	5.31	0	37.9	76	68	66	62	59	53	25	34