

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



**MÉTODO DE DISEÑO DE LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES
OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.**

PRESENTADO POR:

PABLO EMILIO SÁNCHEZ CAMPOS

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR

:

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL

:

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO

:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO

:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DIRECTOR

:

Ph.D. Ing. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título

:

**MÉTODO DE DISEÑO DE LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES OPTIMIZADAS, EN
PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.**

Presentado por

:

PABLO EMILIO SÁNCHEZ CAMPOS

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Asesores

:

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA
ING. DÍLBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES
ING. JOSÉ ROBERTO DOUGLAS LEMUS

San Salvador, Noviembre de 2014

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

ING. MAURICIO ERNESTO VALENCIA

ING. DÍLBER ANTONIO SÁNCHEZ VIDES

ING. JOSÉ ROBERTO DOUGLAS LEMUS

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso por darme la fortaleza cada día para salir adelante, a pesar de las dificultades que encontramos en nuestro caminar hacia la superación; gracias por permitirnos culminar nuestros sueños, gracias por la vida, gracias por tu amor, a ti te debemos todo, todo proviene de ti, haznos estar agradecidos y bendecidos siempre.

A mis padres agradezco por su infinito apoyo, comprensión, amor e instrucción a lo largo de nuestras vidas y a todos los que hicieron posible que este trabajo de graduación se desarrollara.

A mis asesores quiero expresar mis profundos agradecimientos, por su guía, paciencia, dedicación, esmero, amistad y comprensión en la realización satisfactoria de este trabajo de graduación.

DEDICATORIA

A DIOS TODOPODEROSO: Por darme vida, salud, fortaleza y sabiduría para afrontar los obstáculos que se me presentaron, y ahora para culminar mis estudios universitarios.

A MI MADRE: Rina Campos de Sánchez, por su apoyo, esfuerzos y sacrificios para formar una persona de bien, y por ser mi soporte durante toda mi carrera universitaria.

A MI PADRE: José Jaime Sánchez, por su apoyo incondicional y por sus deseos de que siempre salga adelante, como profesional y como persona.

A MIS HERMANOS: Rina Guadalupe Sánchez y Jaime Daniel Sánchez, por apoyarme a lo largo de la carrera.

A MIS AMIGOS: Francisco Burgos, Franklin Carranza, Felipe Gutiérrez y otros más que sería difícil recordar que me dieron por su apoyo y amistad.

A MIS ASESORES: Por ser mis mejores maestros, sus observaciones fueron recibidas con mucha estima y considerándolas como consejos para mejorar.

ÍNDICE

CAPITULO I: ANTEPROYECTO	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 ANTECEDENTES	3
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.4 OBJETIVOS	6
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	6
1.4.2 OBJETIVO ESPECIFICOS	6
1.5 ALCANCES	7
1.6 LIMITACIONES.....	8
1.7 JUSTIFICACIÓN.....	9
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO: GENERALIDADES SOBRE MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO	10
2.1 GENERALIDADES SOBRE PAVIMENTOS RÍGIDOS.....	11
2.1.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO.....	11
2.1.2 TIPOS DE PAVIMENTOS.....	12
2.1.3 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO RÍGIDO	14
2.1.3.1 Elementos que conforman la estructura de un pavimento rígido	14
2.1.3.2 Tipología de Pavimentos Rígidos	16
2.1.4 PAVIMENTOS RÍGIDOS DE CONCRETO HIDRÁULICO EN EL SALVADOR.....	19
2.1.4.1 Desarrollo de la pavimentación en nuestro país (primera etapa).....	19
2.1.4.2 Desarrollo de los pavimentos rígidos de 1960-1980 (segunda etapa)	28
2.1.4.3 Situación actual de los pavimentos rígidos (tercera etapa).....	39
2.2 MÉTODOS TRADICIONALES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS	60
2.2.1 MÉTODO AASHTO.....	60
2.2.1.1 Reseña histórica del método AASHTO	60

2.2.1.2 Factores de diseño del método AASHTO 1993	64
2.2.1.3 Flujograma de diseño AASHTO 93	71
2.2.1.4 Suplemento de la guía AASHTO 1998	73
2.2.2 MÉTODO PCA	75
2.2.2.1 Introducción de método PCA	75
2.2.2.2 Reseña histórica del método de la PCA	76
2.2.2.3 Criterios de diseño del método de la PCA	77
2.2.2.4 Factores de diseño del método de la PCA	81
2.2.2.5 Formulario y flujograma de diseño	84
2.3 FUNDAMENTO TEORICO DEL MÉTODO DE DISEÑO DE LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIES OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRAULICO.....	88
2.3.1 HISTORIA.....	88
2.3.1.1 Desarrollo en Chile.....	88
2.3.2 INVESTIGACIÓN PREVIA DEL MÉTODO DE DISEÑO DE LOSAS DE DIMENSIONES	93
SUPERFICIALES OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO	93
CAPITULO III: DISEÑO Y COMPORTAMIENTO DE LAS LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.....	95
3.1 INTRODUCCIÓN	96
3.2 ESFUERZOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS	97
3.2.1 ESFUERZOS DEBIDO AL ALABEO DE LA LOSA.....	97
3.2.1.1 Preámbulo.....	97
3.2.1.2 Flexión de una placa infinita	99
3.2.1.3 Esfuerzo por alabeo en losas finitas.....	102
3.2.2 ESFUERZOS DEBIDO A LAS CARGAS	104
3.2.2.1 Preámbulo.....	104
3.2.2.2 Fórmulas de forma cerrada.....	104

3.2.2.3 Cartas de influencia por pickett y ray (1951)	111
3.2.3 ESFUERZOS DEBIDO A LA FRICCIÓN.....	115
3.2.3.1 Introducción	115
3.2.3.2 Efecto de los cambios de volumen en el concreto hidráulico	115
3.3 DEFINICIÓN DE JUNTAS Y TRANSFERENCIA DE CARGA	117
3.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES	117
3.3.2 ESPACIAMIENTO Y TIPO DE JUNTAS	117
3.3.3 TRANSFERENCIA DE CARGA	122
3.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	124
3.4.1 PREÁMBULO	124
3.4.2 RESPUESTA DEL MODELADO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO RIGIDO	125
3.4.3 SELECCIÓN DE PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.....	126
3.4.4 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA EVERFE.....	128
3.5 DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS EN LOSAS DE PAVIMENTO RÍGIDO	128
3.5.1 CREAR UN NUEVO PROYECTO	129
3.5.2 GUARDAR UN PROYECTO	129
3.5.3 GEOMETRÍA	131
3.5.3.1 Diseño de losa	132
3.5.3.2 Geometría de la capa de Base y subrasante	133
3.5.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	133
3.5.4.1 Propiedades de los materiales de la losa de concreto	134
3.5.4.2 Propiedades del material de barras de amarre	135
3.5.4.3 Propiedades del material de la capa de Base y Subrasante elásticas.....	135
3.5.4.4 Fundación líquida (subrasante).....	136
3.5.4.5 Interfaz Base/Losa	136
3.5.5 CARGAS DE EJE DE RUEDA Y TÉRMICAS	137
3.5.5.1 Especificación de las cargas de las ruedas y los ejes	138
3.5.5.2 Los efectos térmicos	141

3.5.6 PROPIEDADES DE BARRAS DE AMARRES.....	141
3.5.6.1 Colocación manual del acero en el modelo.....	142
3.5.6.2 Propiedades de rigidez de barras de amarre.....	142
3.5.7 TRABAZÓN DE AGREGADO	143
3.5.7.1 Modelo lineal de trabazón de agregados	143
3.5.8 MALLADO.....	144
3.5.9 RESOLVER (SOLVE)	145
3.5.9.1 Ejecute el análisis de muestra (Run the Shown Analysis).....	145
3.5.9.2 Resultados del programa	147
3.5.9.3 Resultados de esfuerzos máximos absolutos	149
3.5.10 RESUMEN DE RESULTADOS	150
3.5.10.1 Resultados utilizando un eje simple	150
3.5.10.2 Resultados utilizando un Eje Tandem.....	153
3.5.10.3 Resultados utilizando un Eje Tridem.....	156
3.5.10.4 Resultados para diferentes gradientes de temperatura	159

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

4.1 CONCEPTO DE MODELO DE COMPORTAMIENTO O DETERIORO DEL PAVIMENTO	169
4.2 PROGRAMA HIPERPAV	170
4.3 CRITERIOS DE COMPORTAMIENTO	171
4.3.1 AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL.....	171
4.3.2 AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL.....	171
4.3.3 ÍNDICE DE RUGOSIDAD O REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI).....	172
4.3.4 SERVICIABILIDAD.....	173
4.3.5 ESCALONAMIENTO	174

CAPITULO V: METODOLOGÍA DE DISEÑO LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.....	179
5.1 INTRODUCCIÓN	180
5.2 METODOLOGIA DE DISEÑO DE LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRAULICO.....	182
5.2.1 ESTIMACIÓN DE LA CARGA DE DISEÑO	184
5.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN LOSAS DE PAVIMENTO RÍGIDO MEDIANTE LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS	190
5.4 COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO DE LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES OPTIMIZADAS EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO	193
5.4.1 SIMULACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO	197
5.4.2 RESULTADOS OBTENIDOS.....	199
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	200
6.1 CONCLUSIONES	201
6.2 RECOMENDACIONES	203
BIBLIOGRAFIA.....	205

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Esfuerzos máximos absolutos	150
Tabla 3.2 Esfuerzos máximos parte superior de la losa	151
Tabla 3.3 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa	152
Tabla 3.4 Esfuerzos máximos absolutos	153
Tabla 3.5 Esfuerzos máximos parte superior de la losa	154
Tabla 3.6 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa	155
Tabla 3.7 Esfuerzos máximos absolutos	156
Tabla 3.8 Esfuerzos máximos parte superior de la losa	157
Tabla 3.9 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa	158
Tabla 3.10 Gradientes en el borde Eje Simple	159
Tabla 3.11 Gradientes en el borde Eje Tandem.....	160
Tabla 3.12 Gradientes en el borde Eje Tridem	161
Tabla 3.13 Gradientes en el centro Eje Simple.....	162
Tabla 3.14 Gradientes en el centro Eje Tandem.....	163
Tabla 3.15 Gradientes en el centro Eje Tridem	164
Tabla 3.16 Gradientes en la esquina Eje Simple.....	165
Tabla 3.17 Gradientes en la esquina Eje Tandem.....	166
Tabla 3.18 Gradientes en la esquina Eje Tridem	167
Tabla 5.1 Parámetros de entrada para el diseño del pavimento	183
Tabla 5.2 Cálculo de los Esal's del primer año del periodo de diseño	185
Tabla 5.3 Calculo de los Esal's de diseño.....	186
Tabla 5.4 Resumen de resultados de EverFE 2.24	191
Tabla 5.5 Datos climáticos utilizados*	194

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Sección Transversal de una Vía.....	12
Figura 2.2 Pavimento de Tierra.....	13
Figura 2.3 Pavimento de Piedra.....	13
Figura 2.4 Pavimento de Adoquín	13
Figura 2.5 Pavimento de Concreto Asfáltico	13
Figura 2.6 Pavimento de Concreto Hidráulico	13
Figura 2.7 juntas Sin elementos de Transferencia de Carga.....	16
Figura 2.8 juntas con elementos de Transferencia de Carga o dovelas	17
Figura 2.9 Sección longitudinal de un JRCP	17
Figura 2.10 Sección longitudinal de un CRCP	18
Figura 2.11 Sección longitudinal de un CCR	18
Figura 2.12 Plano de la ciudad San Salvador	20
Figura 2.13 Pavimentación de la calle arce	22
Figura 2.14 Concretera utilizada en la pavimentación de San Salvador	25
Figura 2.15 Sexta Av. Sur (Frente al Parque Libertad) en el año de 1924 y en el 2002	28
Figura 2.16 Construcción de tramo de la carretera la Cuchilla Km.35	37
Figura 2.17 Vista aérea de la (50º av. norte)	40
Figura 2.18 vista aérea de calle Chiltiupán	41
Figura 2.19 9º calle pte. Y boulevard sur. Santa Tecla.....	42
Figura 2.20 vista aérea de calle Huizúcar–Rancho Navarra.....	43
Figura 2.21 calle 59 avenida Norte	45
Figura 2.22 Calle a la entrada de Antiguo Cuscatlán	46
Figura 2.23 Carretera Troncal del norte	47
Figura 2.24 Calle al volcán	48
Figura 2.25 Carretera Santa Tecla - San Juan los planes	49

Figura 2.26 Carretera Ilobasco - El Rosario, Cuscatlán	50
Figura 2.27 Carretera San Ignacio - rio Chiquito, Chalatenango	51
Figura 2.28 Tramo "La Montañona", Chalatenango	53
Figura 2.29 Autopista - Comalapa - Aeropuerto.....	54
Figura 2.30 Vista aérea de Autopista Comalapa - Aeropuerto.....	54
Figura 2.31 Vista aérea de Autopista San Martín-San Rafael Cedros.....	56
Figura 2.32 Interconexión Nejapa - Apopa – Troncal del Norte - Boulevard Constitución	57
Figura 2.33 La Chuchilla - Km. 35, Carretera a Santa Ana	58
Figura 2.34 BY PASS La Unión	59
Figura 2.35 Circuitos de prueba de AASHTO Road Test.	61
Figura 2.36 Esquema de la transferencia de carga entre losas vecinas. Adaptado del Instituto del cemento portland argentino ICPA.....	71
Figura 2.37 Flujograma de diseño utilizando el método AASHTO1993. "Guide for Design of Pavement Structures 1993"	72
Figura 2.38 Posiciones críticas de carga por eje. Adaptada de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements, PCA.	80
Figura 2.39 Formulario para el cálculo del espesor del pavimento. Adaptado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements, PCA 1984: p.47	85
Figura 2.40 Flujograma de diseño utilizando el método de la PCA	87
Figura 2.41 Losas de 15 [cm] de espesor, 120 [cm] de longitud, Alameda.....	89
Figura 2.42 Losas de 12[cm] de espesor, 175 [cm] de longitud, Padre Las Casas	90
Figura 2.43 Losas de 15 [cm] de espesor, 350 [cm] de longitud, Padre Las Casas	90
Figura 2.44 Losas de 10 [cm] de espesor. Fecha de examen28-ene-2007.....	90

Figura 2.45 Losas de 10 [cm] de espesor. Fecha de examen 08-mar-2009	90
Figura 2.46 Losas de 8 [cm] de espesor. Fecha de examen 26-nov-2006	91
Figura 2.47 Losas de 8 [cm] de espesor. Fecha de examen 08-mar-2009.....	91
Figura 2.48 Losas de 8 [cm] de espesor.Fecha de examen 26-nov-2006	92
Figura 2.49 Losas de 8 [cm] de espesor.Fecha de examen 08-mar-2009	92
Figura 2.50 Laboratorio del acelerador de pruebas para pavimento (Google Maps).....	94
Figura 3.1 Curvatura debido al gradiente de temperatura.	98
Figura 3.2 Diferencial de temperatura en una losa.	100
Figura 3.3 Representación de una losa finita.	102
Figura 3.4 Factor de Corrección para losas finitas.....	103
Figura 3.5 Representación de una esquina cargada.....	105
Figura 3.7 Método para convertir llantas duales en área circular.....	110
Figura 3.8 Carta de Influencia para la aplicación de determinación de momentos.....	112
Figura 3.9 Carta de Influencia para la deflexión debido al cargado en el interior	113
Figura 3.10 Cartas de Influencia debido al cargado en el borde de la losa	114
Figura 3.11 muestra el arreglo de juntas y acero en el pavimento de concreto.....	115
Figura 3.12 Elementos principales de un pavimento de concreto (adaptado de ACPA pavement construction)	118
Figura 3.13 Inicio del programa EverFE	129
Figura 3.14 Cuadro de diálogo de archivos	130
Figura 3.15 Panel de geometría para la creación de modelos	131
Figura 3.16 Panel de material durante la creación de modelos.....	134
Figura 3.17 Demostración de Capas de losa y base unidas.	137
Figura 3.18 Definición de geometría de eje de rueda	139

Figura 3.19 Especificación Bilineal del Gradiente Térmico.....	141
Figura 3.20 Panel Dowel durante modulación	142
Figura 3.21 Opción de entrada de datos de trabazón de agregados lineal.....	144
Figura 3.22 Panel de Mallado durante la creación de modelos	145
Figura 3.23 Cuadro de diálogo Ejecutar.....	146
Figura 3.24 Progreso de la solución de elementos finitos.....	146
Figura 3.25 Ventana de visualización de esfuerzo.....	147
Figura 3.26 Máximo tensiones principales en el top de la losa.....	148
Figura 3.27 tensiones principales máximas en el fondo del espesor de la losa	148
Figura 3.28 Esfuerzos principales mínimos y máximos en las losas	149
Figura 5.1 Flujograma de metodología de diseño	182

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 Esfuerzos máximos absolutos	150
Gráfico 3.2 Esfuerzos máximos parte superior de la losa	151
Gráfico 3.3 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa	152
Gráfico 3.4 Esfuerzos máximos absolutos	153
Gráfico 3.5 Esfuerzos máximos parte superior de la losa	154
Gráfico 3.6 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa	155
Gráfico 3.7 Esfuerzos máximos absolutos	156
Gráfico 3.8 Esfuerzos máximos parte superior de la losa	157
Gráfico 3.9 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa	158
Gráfico 3.10 Gradientes en el borde Eje Simple	159
Gráfico 3.11 Gradientes en el borde Eje Tandem.....	160
Gráfico 3.12 Gradientes en el borde Eje Tridem	161
Gráfico 3.13 Gradientes en el centro Eje Simple	162
Gráfico 3.14 Gradientes en el centro Eje Tandem.....	163
Gráfico 3.15 Gradientes en el centro Eje Tridem	164
Gráfico 3.16 Gradientes en la esquina Eje Simple	165
Gráfico 3.17 Gradientes en la esquina Eje Tandem.....	166
Gráfico 3.18 Gradientes en la esquina Eje Tridem	167

CAPITULO I:

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, instituciones internacionales dedicadas a la investigación de los pavimentos, han impulsado la innovación en pavimentos de concreto hidráulico con losas de dimensiones superficiales distintas a las convencionales.

Estos avances en pavimentos de concreto hidráulico han permitido aumentar sustancialmente la vida útil de estos; mediante la aplicación de un nuevo método, el cual consiste en cambiar el diseño de las losas de pavimento rígido tradicional por unas de dimensiones optimizada, capaces de distribuir mejor la carga y evitar el agrietamiento temprano, lo cual aumenta la vida útil del pavimento.

Estos avances se hacen necesarios darlos a conocer, además de su posible implementación en nuestro país, con el objetivo de tener una nueva alternativa de diseño de pavimentos más duraderos y de esta manera proporcionar un beneficio al país.

1.2 ANTECEDENTES

Con la llegada del automóvil alrededor del año 1915, y poco después del camión y del autobús a nuestro país, se realizaron las primeras mejoras significativas de las carreteras presentes en las diferentes ciudades y villas importantes del país, las cuales eran únicamente de tierra, y sólo las calles principales eran reforzadas con piedras debido a que el transporte utilizado eran los carretones y los caballos. Fue así como en 1916 se construyó la que se considera la primera carretera de nuestro país, siendo la que de San Salvador conduce al Puerto de La Libertad, posteriormente se construye el tramo de la Carretera Panamericana que atraviesa nuestro país, conocida como CA-1.

A partir de 1920 partes de las calles del centro de San Salvador se pavimentaron con asfalto y otras utilizando concreto. Luego, entre los años de 1921 y 1928 se dio un gran avance en la construcción de pavimentos, tanto del tipo asfáltico como de concreto hidráulico.

En nuestro país para el diseño de espesores de pavimentos rígidos, usualmente son utilizados dos tipos de métodos, los cuales son:

- Método de AASHTO
- Método del PCA

En estos métodos las dimensiones típicas de losas de pavimentos de concreto son de 3.60m de ancho por 4.50m de longitud (AASHTO 93) y la PCA recomienda que para pavimentos de concreto simple, el espaciamiento entre juntas no debe exceder los

4.50m, para que las losas tengan un buen comportamiento. En pavimentos con dovelas, las losas no deben ser mayores de 6.00 m y en pavimentos reforzados las losas no deben ser mayores de 12.00 m, lo cual permite un buen comportamiento, ya que espaciamentos mayores a los mencionados, produce problemas tanto en las juntas como en las fisuras transversales intermedias.

En nuestro país se han construidos pavimentos de “losas cortas” (1,3 a 2,5 m de largo), pero con un diseño no basado en metodologías estandarizadas.

Esta metodología de diseñar pavimentos de concreto hidráulico de losas de dimensiones optimizadas, ha producido muchos beneficios en el funcionamiento de estos, en países como Chile, Guatemala, Perú, entre otros.

En estos países este tipo de pavimento suscitaron mucho interés, desde hace algunos años; en nuestra región latinoamericana el Instituto del Cemento y el Hormigón (concreto) de Chile ICH, ha trabajado en el tiempo reciente, con miras a continuar aportando al conocimiento existente sobre el diseño de este tipo de pavimentos.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, en diferentes países de Latinoamérica como Chile, Perú, Guatemala, entre otros, se está aplicando un nuevo método para el diseño de pavimentos rígidos, donde el principio fundamental de este nuevo método de diseño, consiste en diseñar el tamaño de la losa para que no más de un set o eje de ruedas se encuentra en una determinada losa, minimizando así la tensión de tracción crítica en la superficie, y esto ha permitido un aumento en la durabilidad de estos. Dichos diseños se basan considerando las condiciones particulares de cada país; ya sea clima, tráfico, capas, y materiales, estos diseños aplicados a nuestras condiciones provocaría que los resultados se vuelven incoherentes con el comportamiento que en realidad tendrían los pavimentos de concreto hidráulico, se plantea la necesidad de desarrollar una metodología donde se realicen modelos de deterioro para las condiciones presentadas en nuestro país para los pavimentos rígidos y así tener una confiabilidad de utilizarlos para el diseño.

Además el país posee poca información documentada, respecto al diseño de losas de dimensiones optimizadas, en pavimentos de concreto hidráulico, por lo tanto se pretende fortalecer el conocimiento de esta tecnología, con la información de las características generales existentes de este tipo de pavimento que poseen los países que tienen varios años desarrollando esta metodología.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar un método de diseño de losas de dimensiones superficiales optimizadas, en pavimentos de concreto hidráulico.

1.4.2 OBJETIVO ESPECIFICOS

1. Brindar una base teórica sobre el método de diseño de losas de dimensiones superficiales optimizadas, en pavimentos de concreto hidráulico.
2. Determinar los esfuerzos producidos en las losas de dimensiones superficiales optimizadas, en pavimentos de concreto hidráulico, por medio de programas computacionales.
3. Desarrollar modelos de deterioro, simulados en programas computacionales, que demuestren la durabilidad de los pavimentos, diseñados por el método de losas de dimensiones superficiales optimizadas.
4. Realizar una comparación entre los pavimentos diseñados con el método de losas de dimensiones superficiales optimizadas y los diseñados con métodos tradicionales.

1.5 ALCANCES

La investigación va enfocada a elaborar un método de diseño de losas de dimensiones superficiales optimizadas, en pavimentos de concreto hidráulico, previamente a establecer el procedimiento para la realización de este método, se hará una recopilación de la información existente de este método de diseño, para dejar establecido una base teórica necesaria para la comprensión de este método. Posteriormente se establecerá un procedimiento, donde se cumpla con las especificaciones técnicas utilizadas en el país; y poder realizar una evaluación estructural de estos pavimentos, mediante la simulación de modelos, por medio de programas computacionales, que proporcionen los resultados necesarios para que se asemeje lo más posible al comportamiento real que tienen estos pavimentos.

Dar recomendaciones en cuanto a la aplicabilidad, de estos modelos para los pavimentos rígidos en El Salvador.

1.6 LIMITACIONES

- El desarrollo de la investigación estará enfocado únicamente a la elaboración del diseño del pavimento; excluyendo el proceso constructivo.
- Para la elaboración de esta investigación no se tomara en cuenta un tramo de prueba, realizando solamente modelos en programas computacionales.
- Existe en nuestro país poca o nula información documentada, sobre este método de diseño, que complica la realización de los modelos de comportamiento de las losas, requeridos para poder ser desarrolladas y evaluadas, por lo que se tratará de adaptar lo más que se pueda estos datos a las condiciones que tenemos en nuestro país.
- La información teórica y el análisis que se realizara, estarán basadas en estudios similares y experiencias en el tema de países en los que ya se tiene un buen terreno ganado en esta área; lo que deja de lado la comprobación de dichos señalamientos, debido a que ésta es producto de un levantamiento de campo, la cual está fuera de los alcances de este trabajo de investigación.

1.7 JUSTIFICACIÓN

El método de diseño de losas de dimensiones superficiales optimizadas, en pavimentos de concreto hidráulico, es efectivamente un método innovador desde el punto de vista de su aplicación, considerando que en años anteriores se han diseñado pavimentos de concreto hidráulico con losas de dimensiones superficiales optimizadas, pero con una metodología no estandarizada, restringiendo su aplicación, a calles urbanas de baja circulación o de tráfico restringido a entidades privadas; aunque recientemente se ha utilizado para rehabilitación de carreteras de alto tráfico, este no se ha realizado con un método basado en los estándares utilizados en la actualidad.

Dado lo anterior, se hace necesario realizar una investigación que nos brinde una metodología tecnicada y que tenga como base los estándares utilizados en la actualidad para el diseño de este tipo de pavimento y además de crear los instrumentos necesarios que pueda dar una evaluación del comportamiento de estos pavimentos, lo más real posible.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO: GENERALIDADES SOBRE MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

2.1 GENERALIDADES SOBRE PAVIMENTOS RÍGIDOS

2.1.1 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO

Pavimento es el conjunto de capas de material seleccionado colocado horizontalmente que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Las condiciones necesarias para un adecuado funcionamiento son las siguientes: anchura, trazo horizontal y vertical, resistencia adecuada a las cargas para evitar las fallas y los agrietamientos, además de una adherencia adecuada entre el vehículo y el pavimento aun en condiciones húmedas. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas. Puesto que los esfuerzos en un pavimento decrecen con la profundidad, se deberán colocar los materiales de mayor capacidad de carga en las capas superiores, siendo de menor calidad los que se colocan en las terracerías, además de que son los materiales que más comúnmente se encuentran en la naturaleza, y por consecuencia resultan los más económicos. La división en capas que se hace en un pavimento obedece a un factor económico, ya que cuando determinamos el espesor de una capa, el objetivo es darle el grosor mínimo que reduzca los esfuerzos sobre la capa inmediata inferior.

La resistencia de las diferentes capas no solo dependerá del material que la constituye, también resulta de gran influencia el procedimiento constructivo; siendo dos factores

importantes la compactación y la humedad, ya que cuando un material no se acomoda adecuadamente, éste se consolida por efecto de las cargas y es cuando se producen deformaciones permanentes.

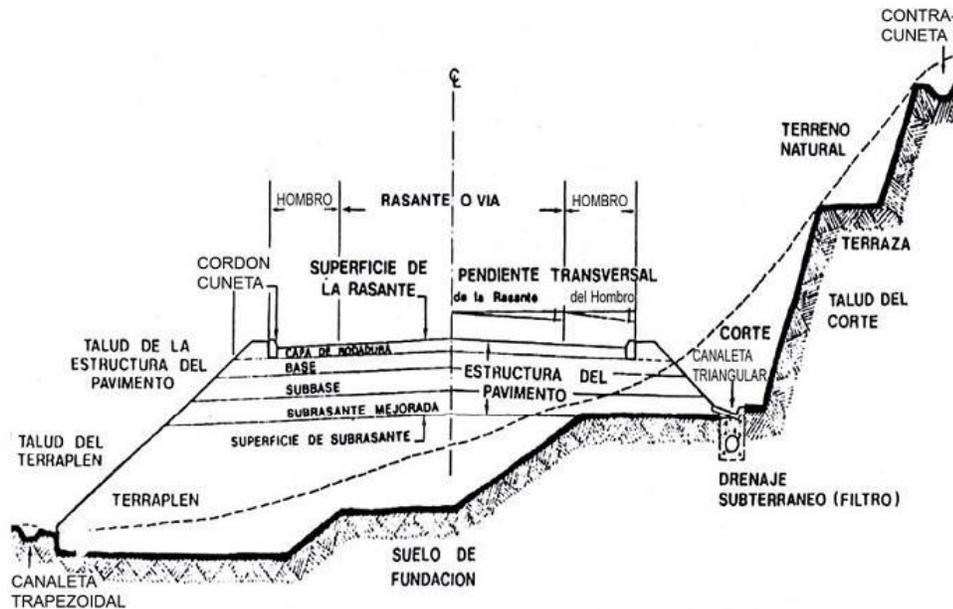


Figura 2.1 Sección Transversal de una Vía

2.1.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

Hoy en día los pavimentos pueden clasificarse de dos formas:

- a) De acuerdo al material que compone su capa de rodadura y
- b) Según la forma en que la estructura de éstos atiende y transmite las cargas aplicadas sobre su superficie.

Según el material que compone su capa de rodadura los pavimentos pueden ser:

- Pavimentos de Tierra.
- Pavimentos de Piedra.
- Pavimentos de Adoquines.

- Pavimentos de Concreto Hidráulico.
- Pavimentos de Concreto Asfáltico.



Figura 2.2 Pavimento de Tierra



Figura 2.3 Pavimento de Piedra



Figura 2.4 Pavimento de Adoquín



Figura 2.5 Pavimento de Concreto Asfáltico



Figura 2.6 Pavimento de Concreto Hidráulico

Según la forma en que la estructura del pavimento transmite las cargas aplicadas sobre él, éstos se dividen en:

Pavimentos Flexibles.

Pavimentos Rígidos.

2.1.3 DEFINICIÓN DE PAVIMENTO RÍGIDO

Comúnmente se emplea el término “pavimento rígido” para las superficies de rodamiento construidas con concreto de cemento Portland. Se supone que un pavimento construido con concreto hidráulico posee una considerable resistencia a la flexión, lo cual le permitirá trabajar como una viga tendiendo un puente sobre las pequeñas irregularidades de la subbase o terracería sobre la cual descansa.

La capa de rodadura de estos pavimentos la integran una serie de losas que trabajan en conjunto, distribuyendo las cargas de los vehículos hacia las capas inferiores. Aunque algunas irregularidades menores en las capas de cimentación no se reflejen en la superficie, estas no son deseables, ya que pueden inducir una falla en el pavimento al ser la causa de cuarteaduras, fracturas, u otros defectos similares.

2.1.3.1 Elementos que conforman la estructura de un pavimento rígido

a) Subrasante.

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez

compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño. El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente, el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante.

b) Subbase.

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la subbase. Esta debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

Se utiliza además como capa de drenaje y contralor de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares.

c) Superficie de rodadura.

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base. En general, se puede indicar que el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura de pavimento.

2.1.3.2 Tipología de Pavimentos Rígidos

a) Pavimento de Concreto hidráulico simple (JPCP).

En este pavimento el concreto asume y resiste las tensiones producidas por el tránsito y las variaciones de temperatura y humedad. Este pavimento puede llegar a contener elementos de transferencia de carga, o bien no contenerlos, cada uno con su área aplicación.

- **Sin elementos de Transferencia de Carga o simples**

Estos pavimentos han sido de aplicación común en el país tanto para tráfico ligero, como para tráfico pesado (altas solicitaciones), clima templado sugiriendo para condiciones severas de tráfico y clima un cimiento granular y/o tratado, para aumentar la capacidad soporte y mejorar la transmisión de carga, Ver Figura 2.7.

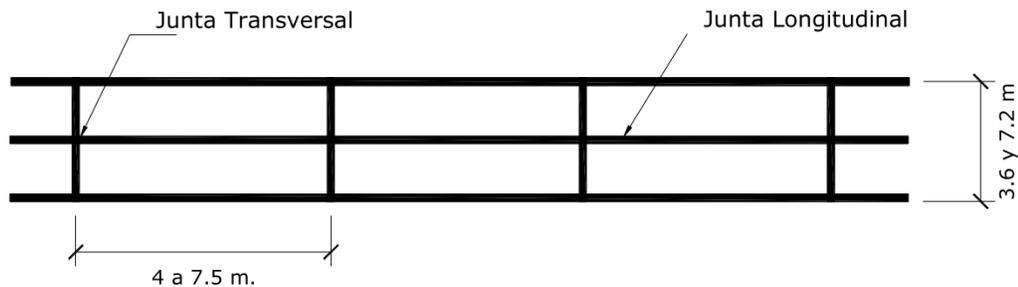


Figura 2.7 juntas Sin elementos de Transferencia de Carga

- **Con elementos de Transferencia de Carga o Dovelas**

Pequeñas barras de acero, que se colocan en la sección transversal, en las juntas de contracción. Su función estructural es transmitir las cargas de una losa a la losa contigua, mejorando las condiciones de deformación en las juntas, evitando los desplazamientos verticales diferenciales (escalonamiento).

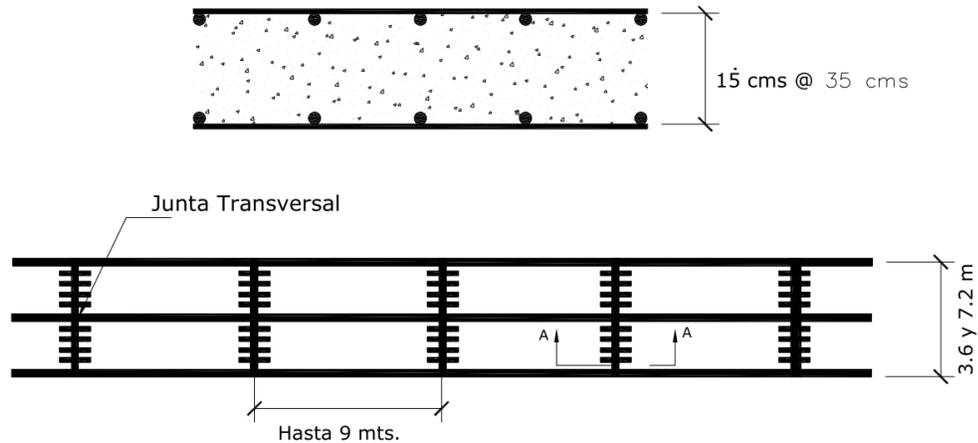


Figura 2.8 juntas con elementos de Transferencia de Carga o dovelas

Cabe mencionar que este tipo de pavimentos son los utilizados en el país.

b) Pavimento de Concreto hidráulico con refuerzo discontinuo distribuido sin función estructural (JRCP).

Tienen espaciamientos mayores entre juntas (entre 6.10 y 36.60 metros) y llevan armadura distribuida en la losa a efecto de controlar y mantener cerradas las fisuras de contracción. Como se muestra en la figura 2.9.

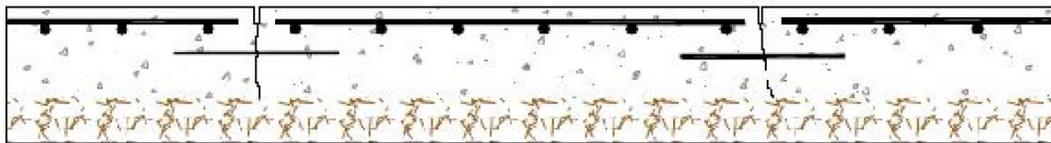


Figura 2.9 Sección longitudinal de un JRCP

c) Pavimento de Concreto hidráulico reforzado continuo sin función estructural (CRCP).

Tiene armadura continua longitudinal y no tiene juntas transversales, excepto juntas de construcción. La armadura transversal es opcional en este caso. Estos pavimentos tienen más armadura que las juntas armadas y el objetivo de esta armadura es

mantener un espaciamiento adecuado entre fisuras y que éstas permanezcan cerradas.

Como se muestra en la figura 2.10.

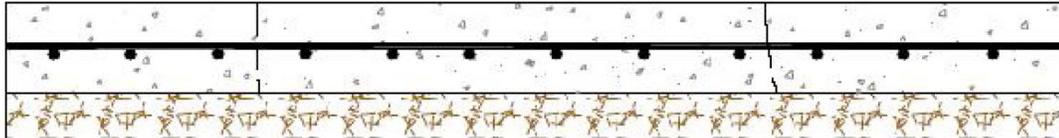


Figura 2.10 Sección longitudinal de un CRCP

d) Pavimentos de concreto hidráulico Compactado con Rodillo (CCR).

Consiste en emplear mezclas con un contenido de cemento similar al del concreto convencional vibrado ($250 - 400 \text{ kg/m}^3$), con un tamaño máximo del agregado grueso no superior a 19 mm, pero con una relación agua/cemento muy reducida que lo hace muy seco, sin revenimiento, que hace que no sea posible colocarlo en obra mediante vibración interna y tenga que efectuarse su compactación con rodillo vibratorio. No requiere formaletas, no requiere dovelas o refuerzo y no ocupa acabado o texturizado. Se utiliza en calles urbanas, vías principales y secundarias, aeropuertos, puertos, áreas de estacionamiento y patios de maniobras.

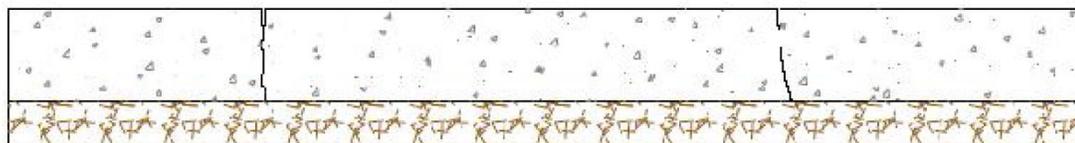


Figura 2.11 Sección longitudinal de un CCR

2.1.4 PAVIMENTOS RÍGIDOS DE CONCRETO HIDRÁULICO EN EL SALVADOR

2.1.4.1 Desarrollo de la pavimentación en nuestro país (primera etapa)

Los pavimentos rígidos en El Salvador se introdujo en el año de 1924, en el centro de la capital, el primer proyecto de pavimentos de concreto hidráulico que se construyo fue llamado **SANEAMIENTO Y PAVIMENTACIÓN DE SAN SALVADOR**; que inicio en marzo de 1924, en el campo Marte (hoy Parque Infantil), Av. Independencia y calle de la finca Modelo simultáneamente, finalizo el 30 de Junio de 1928, con un total de 15,250 m² de pavimento.

Este proyecto se documenta por varios contratos acordados, que a través del tiempo fueron modificados. El primer contrato fue acordado el 12 de Mayo de 1913 entre la Municipalidad, Junta de Fomento y los Señores S. Pearson & Sons Sucesores S.A. cuya ejecución fue interrumpida por la guerra (Primera guerra mundial) y la falta de fondos.

La suma original destinada para el contrato de saneamiento ascendió a \$1,500,000.00, pero ampliaciones subsiguientes al contrato fue necesario aumentarlo, haciendo que la totalidad del trabajo en proyecto ascienda a más de \$4.500,000.00.

Subsiguientemente, mediante arreglos con el Gobierno, se destinó como fondos definitivos para todas las obras el 10% de las entradas aduaneras recogidas por la oficina del empréstito la que pasa directamente a la cuenta de la pavimentación, controlada conjuntamente por el Gobierno y los contratistas. Con el propósito de

terminar por completo el contrato el 30 de junio de 1928 o antes, en vez de hasta el año de 1931 si se usaba solamente el 10% de las entradas aduaneras, además se llevó a cabo un empréstito supletorio para la pavimentación, entre el Gobierno, como miembro de la primera parte, y el Chatham and Phoenix National Bank and Trust Company, the International Railways of Central América, y R,W. Hehard &Co. Inc. Y René Keilhauer como miembro de la segunda parte.

El perímetro de la porción de la ciudad que se mejoro fue 8.1 kilómetros de longitud y comprende 378.5 hectáreas o 3,785,200 metros cuadrados.

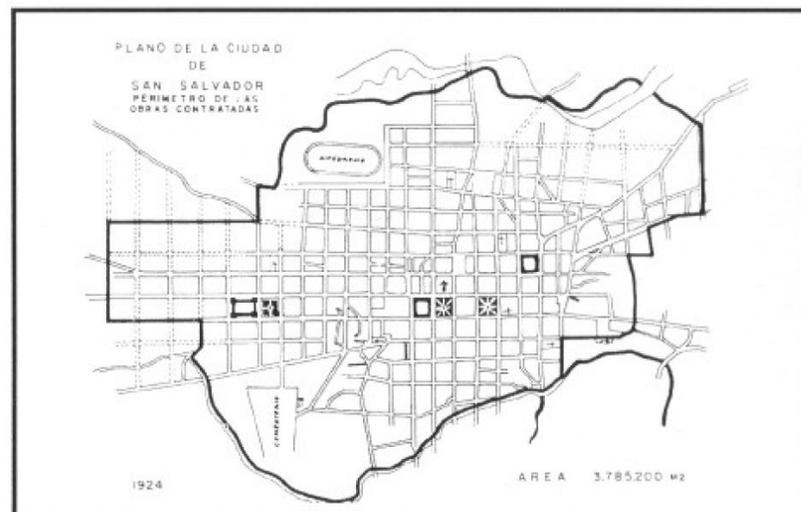


Figura 2.12 Plano de la ciudad San Salvador

La longitud total de las calles que se pavimentaron es de más de 44 kilómetros y comprende 372,400 metros cuadrados de pavimentación.

El primer contrato fue firmado en septiembre 1921, y las adiciones subsiguientes fueron hechas en septiembre 1923, marzo 1924. Abril 1925 y julio 1925.

Las diferentes, distintas y separadas fases del trabajo y el costo calculado de ellas son como sigue:

Cloacas sanitarias:	\$835,000.00
Desagües:	603,500.00
Red de distribución de Aguas:	314,920.00
Ductos eléctricos:	365,736.75
Ductos T & T:	207,878.00
Cordones y cunetas:	217,000.00
Andenes:	225,000.00
Pavimentación:	1,239.750.00
Puerto de La Libertad	
Mejoramiento general:	247,000.00
Pozo artesiano:	25,000.00
Calle Candelaria:	140,643.00
Campo de Marte:	35,219.06
Contadores de Agua:	84,000.00
Costo total	
Presupuestado:	\$4,540,646.00



Figura 2.13 Pavimentación de la calle arce

Cada una de estas varias clases de trabajo fue del estilo más moderno, apropiado a sus fines y de acuerdo con las condiciones existentes.

Las cloacas están dispuestas en tal forma que concentran en un punto para futura purificación de sus aguas; los desagües prestan servicio a cada calle para desaguar la ciudad durante lluvias fuertes y el sistema de distribución de aguas presta servicio a cada casa, habiéndose provisto cada intersección de calle con un hidrante de incendio, y las válvulas están distribuidas de tal manera que puede tenerse un aislamiento completo por cada tres o cuatro cuadras sin afectar el resto de la ciudad. Todos los cables telegráficos y telefónicos y alambres serán colocados subterráneamente lo mismo que todo el servicio eléctrico como en la mitad de la ciudad, incluyendo todo el distrito comercial y la mayoría de las calles de más importancia.

La pavimentación consistió de cuatro clases:

Clase A. - Asfalto sobre una base de 6"

Clase B. - Asfalto sobre una base de 4"

Clase C. - Capa superficial de asfalto de desgaste sobre una base asfáltica de 3"

Clase D. – Concreto hidráulico de 6" de espesor en varias calles destinadas al servicio de carretas.

Los materiales y la mano de obra fueron de la mejor calidad, todo el concreto hidráulico teniendo una mezcla de 1:2:4 ó 1:3:6, y el asfalto de los mejores materiales, cuidadosamente preparados y colocados.

Además se construyeron cordones, cunetas y andenes de primera clase, para que cuando esté terminada toda la ciudad estaría pavimentada de borde a borde de los edificios prestando, así protección perfecta a los desprendimientos sucios de las calles y acumulación de basuras.

Los trabajos adicionales en la calle de Candelaria, el Campo de Marte y el Puerto de La Libertad son de la misma clase superior, y los trabajos de La Libertad serán tan completos en todo respecto, como los de la ciudad.

ADMINISTRACION GENERAL

LOS MATERIALES

Estos se adquirieron tan solo por medio de pedidos, cuya aprobación es del Gerente General y del Sr. Ministro de Fomento. Las importaciones de materiales destinados a la

Pavimentación tienen libre entrada en el país, y por este motivo se hacen compras locales solamente en casos de urgencia.

Inmediatamente a su recibo, se depositan los materiales en el Plantel de la Empresa, a cargo de un Superintendente de Bodegas, auxiliado por distintos empleados, donde se calcula su costo y se distribuyen los materiales a las distintas obras contra pedidos interiores debidamente firmados por los Jefes responsables de las Obras. Mensualmente se segregan todos los pedidos de cada departamento y se carga su importe al costo de la obra correspondiente.

PLANTA Y EQUIPO

Todo el equipo que se emplea en las obras, tanto rodante como el permanente en el plantel, es de lo más moderno e igual al que se usa en obras de pavimentación de las ciudades más importantes de América.

Los equipos de mayor importancia que se emplean en las obras son:

- 8 camiones "Mack" de 3 1/2 toneladas de capacidad
- 1 Grúa Universal de 10 toneladas de capacidad
- 2 Camiones "Moreland" de 5 toneladas de capacidad.
- 1 máquina de fabricar tubería de cemento McCracken"
- 1 Concretadora- pavimentadora "Multifoote" de 150 metros cúbicos de capacidad diaria.

- 1 Concretadora – pavimentadora “Austin” de 50 metros cúbicos diarios de capacidad.
- 1 Planta de asfalto “Cummer” de 150 toneladas de capacidad diarias.
- 1 Trituradora Giratoria de piedra “Kennedy -Van –Saun” de 200 metros cúbicos de capacidad diaria.
- 2 Aplanadoras de 12 toneladas, Austin.
- 2 Aplanadoras de 12 toneladas, Monarch.
- 1 Aplanadora de 6 toneladas, Austin
- 1 Aplanadora de 6 toneladas, Buffalo Springfield
- 1 Aplanadora de 3 1/2 toneladas Springfield.
- Y varias camionetas, carros de inspección, motocicletas y otros equipos pequeños.

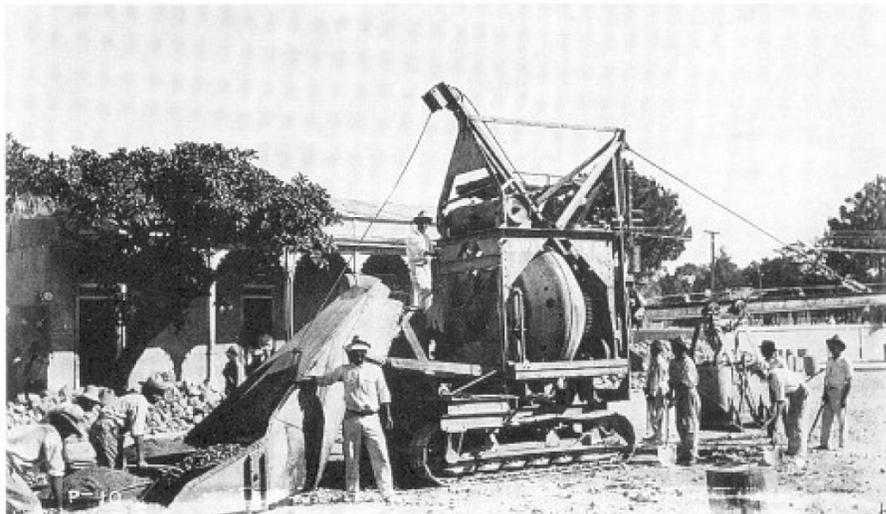


Figura 2.14 Concretera utilizada en la pavimentación de San Salvador

Para que este Equipo. Cuyo costo asciende a cientos de miles de pesos. Estuviera siempre en buen estado de servicio, la empresa tenía en su plantel un taller mecánico dotado de todas las máquinas de último modelo, y se realizaban las reparaciones a un costo mínimo, no tan sólo del equipo de la empresa, sino también de varios equipos del gobierno.

PERSONAL TECNICO

Desde el principio el deseo de la empresa era emplear el talento nacional hasta donde fuera posible, se ha visto precisada, en vista de la magnitud de la obra y de su índole especial, importar expertos y técnicos del extranjero; pero, desde luego, en la selección de éstos se ha limitado a aceptar solamente aquellos que han tenido años de experiencia en obras de saneamiento Y pavimentación, precisamente en países trópicos bajo más o menos idénticas condiciones que las existentes en esta capital.

Incluidos en el personal de expertos traídos del extranjero están: Ingeniero en Jefe. Superintendente General. Oficial Mayor, y Superintendentes de Bodega, Pavimento de Asfalto, Cañerías, Cloacas y Desagües.

Sin embargo, entre sus técnicos se encontraba ocho ingenieros salvadoreños, y los, Jefes de Planta de Asfalto de la Fábrica de Tubos de Cemento, del Taller Mecánico; y en Oficina Central - el Contador, el Pagador y el Jefe Apuntador, todos puestos de mayor importancia.

Por otro lado, fueron preparados e instruyendo constantemente, y se les dan todas las facilidades a aquellos que muestren aptitudes especiales, para ocupar otros puestos de importancia ya sea en esta Empresa o en otras empresas de semejante índole.

Alrededor de estos años (1924-1930), el 5% del total de las vías construidas fueron realizadas con concreto hidráulico.

Tomando en cuenta los beneficios que la red vial traería al desarrollo del país, la Asamblea Nacional Legislativa en la sesión del 5 de Julio de 1940 aprobó el decreto # 19 mediante el cual se crea la Dirección General de Carreteras como dependencia del Ministerio de Fomento. Esta Dirección General tuvo a su cargo la dirección y supervisión de los trabajos en carreteras.

El 11 de Julio de 1940, durante la administración del General Maximiliano Hernández Martínez, se creó el reglamento para la construcción, mantenimiento y mejoramiento de las carreteras de la república. En este reglamento se deja fuera lo relativo al pavimento de concreto hidráulico, debido a la construcción generalizada de pavimentos flexibles y el poco conocimiento respecto a la conservación del concreto hidráulico.

En la actualidad aún existen tramos como los antes mencionados que están brindando servicio, en los cuales se han incrementado considerablemente el tráfico en volumen como en carga, comparados con los parámetros iniciales de diseño. Como ejemplo de

lo antes mencionado se muestra en la figura 2.15, una fotografía de la Sexta Av. Sur en la época de su construcción, con una fotografía del año 2002.



Figura 2.15 Sexta Av. Sur (Frente al Parque Libertad) en el año de 1924 y en el 2002

A pesar de la especialización y mejora tecnológica que tuvieron los ingenieros salvadoreños, en el pavimento de concreto hidráulico, se registró un estancamiento en la construcción de nuevos tramos. Fue hasta el año de 1960 que se continúa con esta técnica.

2.1.4.2 Desarrollo de los pavimentos rígidos de 1960-1980 (segunda etapa)

En 1960 se construyeron importantes vías algunas de ellas son: la 3ª calle poniente (costado norte de la Lotería Nacional), 24 avenida norte (frente al mercado La Tiendona); luego en 1967 también se construyeron la 49 Av. Sur en las cercanías del estadio Jorge “Mágico” Gonzales, el redondel de la plaza José Martí, entre otras, todas en San Salvador y que actualmente ofrecen un servicio aceptable.

Entre 1970 y 1971 se construyó el tramo de la carretera Panamericana ubicado entre la cuchilla y el kilómetro 35 también conocido como el desvío a Ciudad Arce, en el

departamento de La Libertad, el cual forma parte de una vía centroamericana con alta exigencia de tráfico.

- **Construcción del tramo de la Carretera CA-1, entre la Cuchilla (Km. 22) y el Río Agua Caliente (Km. 34)**

Historia del Proyecto

Todo el tramo fue geométricamente diseñado y construido para tránsito de alta velocidad, v.g., excelente visibilidad, curvas y pendientes suaves, hombros anchos y una isla medianera de nueve metros. La principal intersección en La Chuchilla es a dos niveles y con suficiente terreno para expansiones si se necesitaren en el futuro.

Esta obra constituye la primera carretera construida en El Salvador con pavimento de concreto de cemento Portland, la construcción se llevó a cabo durante los años 1970 y 1971.

Pavimento de concreto, especificaciones técnicas

Como base se tomó el documento FP-64, del Departamento de Transportación de los Estados Unidos de Norteamérica, Administración de Carreteras Federales.

En resumen, el concreto debía de tener las siguientes características:

- Máximo Revenimiento: 1 ½" (AASHTO T-119)
- Resistencia a la Flexión: 560 PSI = 38.5 Kg/cm² a 14 días.
- Aire incluido: 2-5% (AASHTO T-152).

- Contenido de Cemento: 7 sacos/m³
- Agua 5.5 galones/saco de cemento incluido humedad libre de agregados pero no la humedad absorbida.

Aspectos Constructivos

A continuación se da un breve resumen del aspecto físico de la construcción, las secciones típicas muestran lo que se construyó a lo largo del Proyecto. Únicamente varían las transiciones en los puentes y la unión en el km. 22 con la carretera pavimentada con concreto asfáltico.

A. Terracería y Drenaje

1. La terracería

Consistió en el movimiento de aproximadamente 360,000 metros cúbicos de tierra, El material varió de lugar a lugar, pero básicamente consistió de limos moderadamente plásticos, arenisca parcialmente cementada (talpetate) con áreas ocasionales de arcillas limosas y arenosas.

La compactación llenó las especificaciones pedidas, las cuales eran:

- a) Todas las densidades serian basadas en "AASHTO T-180 Método "D".
- b) Densidad del 95 treinta centímetros abajo del nivel de la sub-rasante.
- c) En los terraplene, 90% abajo del literal a).
- d) En cortes, 95% treinta centímetros abajo del nivel de sub-rasante.

El alto nivel de la tabla freática, además de numerosas bolsas suaves en el valle, dieron como resultado una cantidad substancial de sobre-excavación de los materiales muy plásticos y orgánicos que se encontraron y que fueron reemplazados con piedra y/o material menos cohesivo.

2. Drenaje

Todas las estructuras para drenaje que se construyeron fueron básicamente estándar, cajas, tubos de concreto reforzado y cunetas revestidas y sin revestir. Toda cuneta con pendiente mayor del 3% fue revestida para evitar la erosión de la carretera. Debido a lo plano del valle, en varios lugares hubo necesidad de construir las cunetas de un ancho mayor de lo normal, esto para poder acomodar los flujos de agua.

B. Sub-Base

La base puesta bajo el concreto de cemento Portland consistió de lo siguiente:

1. Lava

Espesor = 15 centímetros. Este material se obtuvo de viejos depósitos de lava procedentes del volcán de San Salvador. Estos depósitos están situados en las cercanías de la Ciudad de Quezaltepeque. El material se mezcló con arenisca parcialmente cementada (talpetate) por medio de motoniveladoras sobre la sub-rasante compactada. Esta mezcla se formaba, compactada y se llevaba casi a nivel final. Las formaletas se colocaban y nivelaban, los cinco centímetros superiores se mezclaban con cemento, se recompactaba y llevaba a nivel final.

2. Macadam (Carretera Antigua)

El pavimento de la carretera antigua consistía de macadam ligado con asfalto de unos 23 centímetros de grueso y seis metros de ancho. Este material se utilizó en ciertos tramos para preparar la base bajo el pavimento de concreto, sin embargo, este macadam se complementaba con por lo menos, un centímetro de lava, y los cinco centímetros superiores se estabilizaron con cemento, como descrito arriba.

C. Pavimento de concreto de cemento Portland

Los siguientes factores de diseño fueron usados:

- Módulo de Reacción de Sub-Rasante “K” = 300
- Carga en llantas dobles = 12,000 lb.
- Carga por eje en llantas dobles 24,000 lb
- Resistencia del concreto a la Flexión = 550 psi.
- Factor de Seguridad 2: 1
- Resistencia del Concreto a la Flexión = 275 psi.

Basados en el “Diseño de Pavimentos de concreto” de la Asociación de Cemento Portland y usando los datos anteriores se obtuvo como resultado un espesor de pavimento de pulgadas 20 centímetros.

El pavimento de concreto de Cemento Portland de 20 centímetros 8 pulgadas de espesor se elaboró y colocó de la siguiente manera:

1. Los agregados gruesos y el agregado fino arena se transportaban en camiones de la planta trituradora en el rio Talnique a la planta dosificadora del contratista.
2. La planta dosificadora estaba situada dentro del derecho de vía de la intersección en la Chuchilla.

Ambos tamaños de agregados gruesos y la arena se almacenaban en tolvas diferentes. El contratista también tenía dos silos para recibir y almacenar cemento a granel. Los diferentes componentes se pesaban y descargaban en seco en camiones de volteo en revolturas de 1.15 m³. Las revolturas por metro cubico con pequeñas variaciones de tiempo en tiempo, debido al contenido de humedad y cambios de graduación, consistían de lo siguiente:

1100 Kg. (2,424 lb.) agregado grueso, 773 Kg. (1.704 lb), agregada fino (arena) 7 Bolsas de cemento Portland.

Los camiones que variaban mucho en marcas, modelo y capacidad, transportaban las revolturas en seco a la pavimentadora.

3. Maquina Mezcladora y Colocadora.

El Contratista tenía a mano dos mezcladoras de doble tambor marca Koehring 34-E montadas sobre orugas. Las revolturas en seco se descargaban en la tolva de la mezcladora y el agua se añadía al momento de transferencia al tambor de mezcla, La cantidad de agua variaba en proporción al contenido de humedad de los agregados. Un

aditivo incluso de aire se incorporaba en estos momentos, para mejorar la manejabilidad del hormigón. El aire incluido era del 2 al 5 por ciento.

El Concreto colocado por la mezcladora tenía, normalmente, un revenimiento menor de 1 ½ pulgadas, con excepción de lugares donde se requería una mejor manejabilidad, tales como estructuras de puentes, cruce de ferrocarril, etc., en estos casos, para compensar el agua adicional, se aumentaba la cantidad de cemento. Una relación máxima agua cemento de 5.5 gals: 1 saco se mantuvo en todo el proyecto. Después de colocado el concreto sobre la rasante se procesaba por medio de un tren de pavimentación.

4. Tren de Pavimentación

Esta maquinaria consistía de un espaciador, vibrador y una serie de emparejadores y llanas, tanto transversales como longitudinales. Después de que esta maquinaria había esparcido, vibrado, emparejado y allanado el pavimento, este recibía el acabado final.

5. Acabado Final

Esto consistía en acabar la superficie con escantillones, lo cual servía, a la vez, como comprobación de las tolerancias de la superficie. Después del acabado con escantillones y cepillos, cuando el concreto había perdido el lustre de la humedad se aplicaba sobre la superficie, a máquina, un curador de membrana. En los lugares inaccesibles a la máquina se aplicaba el curador con bombas de mano.

Cuando el concreto había fraguado lo suficiente se aserraban las juntas transversales de contracción. Este se efectuaba antes de que ocurrieran las rajaduras incontroladas y que el concreto había fraguado lo suficiente para no desmoronarse. Las juntas longitudinales se aserraban después. Las juntas aserradas recibían una aplicación de curador de membrana.

Días después las juntas se limpiaban con una sierra usada y aire comprimido y se sellaban con un compuesto bituminoso, elástico, aplicado en caliente.

6. Resumen

El concreto de Cemento Portland colocado fue de la resistencia especificada y en general cumplió con todo lo requerido en las especificaciones. La principal razón para la poca producción de pavimento terminado, (un promedio de 175 a 200 metros lineales por día de colado puede atribuirse a la poca producción de sub-rasante terminada, si a esto le agregamos la falta de camiones para transportar los colados de la planta dosificadora al tren de pavimentación, tenemos que aunque éste, el tren de pavimentación, tenía capacidad de pavimentar 500 metros lineales por día, Únicamente se obtenían lo indicado anteriormente. Con una capacidad diaria mayor se hubiera eliminado el 60 por ciento de las juntas de construcción, además de haber aumentado la eficiencia del tren de pavimentación.

Además de las pruebas de diseño de mezclas previas a la construcción se efectuaron las siguientes de control de construcción:

- 1480 vigas de prueba para resistencia a la flexión.
- 4000 + prueba de revenimiento.
- 300 Graduaciones de agregados
- 98 pruebas de compresión en núcleos del pavimento

El espesor del pavimento se comprobó por medio de núcleos sacados del pavimento. El promedio de los núcleos perforados mostró que el espesor requerido de 20 centímetros había sido obtenido.

Los primeros 2 1/2 kilómetros que se pavimentaron, pista izquierda entre las estaciones 31+500 y 34+000, fueron construidos usando agregados gruesos de una fuente comercial y de la planta trituradora del contratista en el río Talnique. El agregado fino era arena del río Las Cañas, arena que virtualmente se usa para todas las construcciones de concreto en los alrededores de San Salvador. Las vigas de ensayo demostraron que se cumplía con la resistencia a la flexión requerida, sin embargo, a medida que progresaba el trabajo aumentó el contenido pumítico de la arena, por lo que fue necesario aumentar la proporción de cemento para obtener las resistencias a la flexión.

Además la propiedad del pómez de flotar estaba dando como resultado una mala calidad de superficie de rodamiento. En este punto el contratista fue persuadido de usar arena proveniente del río Tomayate, la cual tenía un bajo porcentaje de material pumítico. La mejora en calidad de la superficie de rodamiento fue evidente.

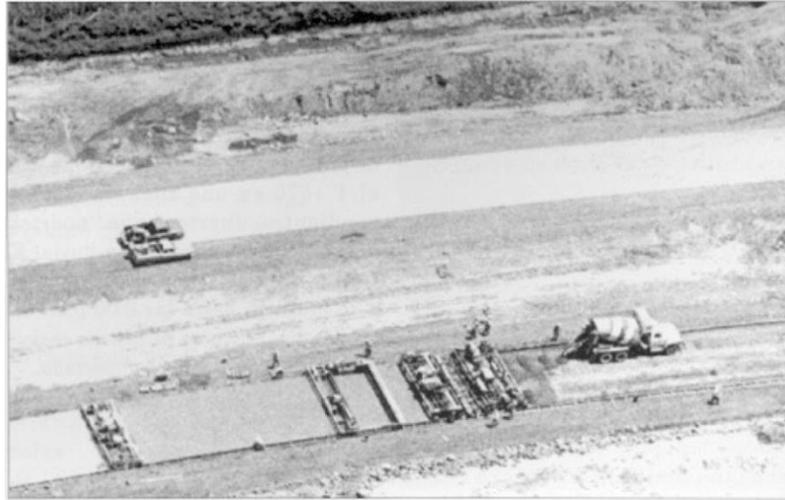


Figura 2.16 Construcción de tramo de la carretera la Cuchilla Km.35

Debido a su durabilidad este tramo fue tomado como referencia en el comportamiento de los pavimentos de concreto hidráulico en nuestro país

- **Proyectos importantes desarrollados en los años de 1960-1970**

- **2° Calle Oriente Santa Tecla**

Datos:

Espesor: 15 cm

Base: Suelo cemento

Longitud: 1 km

Módulo de Ruptura: 56.66 kg/m²

Ancho: 7.3 m

(*) TPDA: 19,101

* Transito promedio anual de 1999

➤ **49° Av. Sur (Frente al Estadio Flor Blanca)**

Datos:

Espesor: 15 cm **Base:** Granular

Longitud: 0.3 km **Módulo de Ruptura:** 59.01 kg/m²

Ancho: 15 m **(*) TPDA:** 22,471

* Transito promedio anual de 1999

➤ **Redondel Reloj de Flores, San Salvador**

Datos:

Espesor: 20 cm **Base:** Suelo cemento

Longitud: 0.2 km **Módulo de Ruptura:** 55.89 kg/m²

Ancho: 16 m **(*) TPDA:** 25,872

* Transito promedio anual de 1999

➤ **Redondel Fuente Luminosa**

Datos:

Espesor: 20 cm **Base:** Suelo cemento

Longitud: 0.16 km **Módulo de Ruptura:** 62.65 kg/m²

Ancho: 14 m **(*) TPDA:** 22,471

* Transito promedio anual de 1999

➤ **Otros proyectos**

	Espesor (cm)	Longitud (km)	Ancho (m)
• 3° Calle Poniente Costado Norte de Lotería Nacional	15	0.5	7.0
• 4° Calle Poniente Costado Sur del Palacio Nacional	12.5	1	7.3
• Tramo en Av. España	15	0.2	12
• 24° Av. Norte (Frente e Mercado La Tiendona)	15	1	12
• Calle a Tonacatepeque (Tramo)	17	1	7.3
• Redondel de la Plaza José Martí	15	0.1	12
• Redondel Ex cine Variedades	15	0.16	14

2.1.4.3 Situación actual de los pavimentos rígidos (tercera etapa)

Durante los últimos años, la red vial del país se ha ido modernizando, como consecuencia de ello, se utilizan cada vez más los pavimentos de concreto hidráulico.

En 1990 los pavimentos rígidos de concreto hidráulico representaban el 1% del total de la red vial pavimentada, para el año 2006 el 12% aproximadamente de la red administrada por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), porcentaje que se incrementó sustancialmente con la finalización muchos proyectos construidos hasta la actualidad. Algunos ejemplos de estos proyectos realizados se muestran a continuación.

- Ejemplos de carreteras construidas con pavimentos rígidos en El Salvador (1999 – actualidad).
- Boulevard del ejército – calle antigua a Soyapango (50º av. norte)



Figura 2.17 Vista aérea de la (50º av. norte)

Datos geométricos y Estructurales

- Ubicación: Dpto. San Salvador
- Velocidad de Proyecto: 80 Km/h
- Longitud: 2 Km. pista
- Espesor de rodadura: 18 cm. Concreto hidráulico, $M_r = 40 \text{ Kg/cm}^2$
- Tipo y espesor de base: Suelo Cemento 20 cm.
- Dispositivos de transferencia: sin dovelas.
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio: $29 \text{ }^\circ\text{C}$
- Humedad Relativa: 75% promedio.
- Precipitación: 1800 mm/año promedio

Características Generales

- TPDA máximo Año 2003: 12,205
- Tasa de crecimiento vehicular promedio: 3.8%
- Fecha de inicio de construcción: Abril 1998
- Fecha de finalización: Diciembre 1998
- Constructora: PROTERSA S.A. de C.V.
- Financiamiento: GOES
- Beneficiarios: 600,000 habitantes.

➤ **PROLONGACION CALLE CHILTIUPÁN**



Figura 2.18 vista aérea de calle Chiltiupán

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Dpto. San Salvador
- Velocidad de Proyecto: 75 Km/h
- Longitud: 4 Km. pista
- Espesor de rodadura: 20 cm. concreto hidráulico, $M_r = 40 \text{ Kg/cm}^2$

- Tipo y espesor de base: Suelo Cemento, 20 cm.
- Confinamiento lateral: Cordón - Cuneta
- Dispositivos de transferencia: dovelas en juntas transversales
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = 28 °C
- Humedad Relativa = 80% Promedio, Precipitación = 1900 mm/año promedio

Características Generales

- TPDA máximo Año 2003: 45,467
- Tasa de Crecimiento Vehicular promedio: 4.2%
- Fecha de inicio de construcción: Marzo 1999
- Fecha de finalización: Noviembre 1999
- Constructora: PROTERSA S.A. de C.V.
- Financiamiento: GOES
- Beneficiarios: 500,000 Habitantes

➤ **9º CALLE PTE. Y BOULEVARD SUR. SANTA TECLA**



Figura 2.19 9º calle pte. Y boulevard sur. Santa Tecla

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Dpto. La Libertad
- Velocidad de Proyecto: 80 Km./h
- Longitud: 4 Km. pista
- Espesor de rodadura: 21 cm. concreto hidráulico, $M_r = 40 \text{ kg/cm}^2$
- Tipo y espesor de base: Suelo Cemento, 22 cm.
- Confinamiento lateral: Cordón - Cuneta.
- Dispositivos de transferencia: dovelas en juntas transversales.
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = $27 \text{ }^\circ\text{C}$, Humedad Relativa = 85% promedio, Precipitación = 2000 mm/año promedio

Características Generales

- TPDA máximo Año 2003: 15,707
- Tasa de crecimiento vehicular promedio: 3.8%

➤ HUIZÚCAR - RANCHO NAVARRA



Figura 2.20 vista aérea de calle Huizúcar-Rancho Navarra

Características Generales

- TPDA máximo Año 2003
- Tasa de Crecimiento vehicular promedio: 4%
- Fecha de inicio de construcción: Mayo 2004.
- Constructora: CONASA S.A. de C.V.
- Financiamiento: GOES -BID
- Beneficiarios: 650,000 habitantes

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Dpto. San Salvador – La Libertad
- Longitud: 4 Km. pista
- Espesor de rodadura: 23 cm. Concreto hidráulico, $M_r = 40 \text{ Kg/cm}^2$
- Tipo y espesor de base: Suelo Cemento, 22 cm.
- Confinamiento lateral: hombro de concreto hidráulico
- Dispositivos de transferencia: dovelas en juntas transversales
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = $28 \text{ }^\circ\text{C}$ Humedad Relativa = 80%
Promedio, Precipitación = 2000 mm/año promedio

➤ **59 AVENIDA NORTE SAN SALVADOR**



Figura 2.21 calle 59 avenida Norte

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: San Salvador
- Longitud: 2 km.
- Espesor de rodadura: 21 cm
- $M_r = 45 \text{ Kg/cm}^2$ Whitetopping
- Confinamiento lateral: Cordón - Cuneta
- Dispositivos de transferencia: Dovelas
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = $29 \text{ }^\circ\text{C}$ Humedad Relativa = 70 %
Promedio, Precipitación = 2,100 mm/año promedio

Características Generales

- TPDA máximo Año 2006: 10,000
- Tasa de Crecimiento vehicular promedio: 3%
- Fecha de inicio de construcción: mayo 2006
- Constructora: ECON S.A. de C.V.

➤ **ANTIGUO CUSCATLAN, LA LIBERTAD**



Figura 2.22 Calle a la entrada de Antigua Cuscatlán

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Antigua Cuscatlán, La Libertad.
- Longitud: 1.8 Km.
- Espesor de rodadura: 15 cm.
- $M_r = 40 \text{ Kg/cm}^2$ Whitetopping
- Confinamiento lateral: Cordón - Cuneta
- Dispositivos de transferencia: Sin dovelas
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = $24 \text{ }^\circ\text{C}$ Humedad Relativa = 85 %
Promedio, Precipitación = 2,300 mm/año promedio

Características Generales

- TPDA máximo Año 2006: 6,000
- Tasa de Crecimiento vehicular promedio: 3%
- Fecha de inicio de construcción: abril de 2006
- Constructora: ECON S.A. de C.V.
- Financiamiento: Fondos Municipales

➤ **TRONCAL DEL NORTE SAN SALVADOR – APOPA**



Figura 2.23 Carretera Troncal del norte

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: San Salvador - Apopa
- Longitud: 8 Km.
- Espesor de rodadura: 21 cm.
- $M_r = 45 \text{ Kg./cm}^2$ Whitetopping
- Confinamiento lateral: hombro de concreto
- Dispositivos de transferencia: dovelas
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = 29°C Humedad Relativa = 65%
Promedio, Precipitación = 1,900 mm/año promedio

Características Generales

- TPDA máximo Año 2006: 11,500
- Tasa de Crecimiento vehicular promedio: 3.5%
- Fecha de inicio de construcción: febrero de 2005
- Constructora: Protorsa de C.V – Constructora Linares

➤ **PROLONGACION DE 75 AVENIDA NORTE Y CALLE AL VOLCAN**



Figura 2.24 Calle al volcán

Características Generales

- Ubicación: San Salvador - Mejicanos
- Longitud: 2 Km.
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = 29 °C, Humedad Relativa = 65% Promedio
- Precipitación = 1,900 mm/año promedio
- Fecha de inicio de construcción: enero 2006
- Fecha de finalización: mayo 2006
- Constructora: ASTALDI
- Supervisión: Consultora Técnica S.A. de C.V.
- Financiamiento: BCIE

➤ **SANTA TECLA - SAN JUAN LOS PLANES**



Figura 2.25 Carretera Santa Tecla - San Juan los planes

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Dpto. San Salvador
- Velocidad de Proyecto: 45 km/h. Tramo de montaña
- Longitud: 13 Km. pista
- Espesor de rodadura: 15 cm. $M_r = 40 \text{ Kg/cm}^2$
- Tipo y espesor de base: Empedrado existente en algunos tramos y suelo cemento de 18 cm. De espesor en otros.
- Confinamiento lateral: sin confinamiento
- Dispositivos de transferencia: sin dovelas, por trabazón de agregados
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = 25°C Humedad Relativa = 90% promedio, Precipitación = 2100 mm/año promedio

Características generales

- TPDA máximo Año 2003: 537
- Tasa de Crecimiento Vehicular promedio: 3%
- Fecha de inicio de construcción: Abril 2001
- Fecha de finalización: Agosto 2001
- Constructora: Linares S.A. de C.V.
- Financiamiento: GOES
- Beneficiarios: 75,000 habitantes

➤ ILOBASCO - EL ROSARIO, CUSCATLAN



Figura 2.26 Carretera Ilobasco - El Rosario, Cuscatlán

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Departamento de Cuscatlán
- Velocidad de Proyecto: 65 Km/h
- Longitud: 5.5 Km
- Espesor de rodadura: 12 cm. concreto hidráulico, $M_r = 37 \text{ Kg/cm}^2$

- Tipo y espesor de base: Suelo Cemento, 18 cm
- Confinamiento lateral: sin confinamiento
- Dispositivos de transferencia: sin dovelas, trabazón de agregados
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = 26 °C Humedad Relativa = 60% promedio,
Precipitación = 1900 mm/año promedio

Características Generales

- TPDA máximo Año 2003: 518
- Tasa de crecimiento vehicular promedio: 3.53%
- Fecha de inicio de construcción: febrero 2002
- Fecha de finalización: octubre 2002
- Constructora: MERCALOSAL S.A. de C.V.
- Financiamiento: GOES - BID
- Beneficiarios: 300,000 habitantes

➤ **SAN IGNACIO - RIO CHIQUITO, CHALATENANGO**



Figura 2.27 Carretera San Ignacio - rio Chiquito, Chalatenango

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Departamento de Chalatenango
- Velocidad de Proyecto: 45 Km/h
- Longitud: 6 Km
- Espesor de rodadura: 15 cm. concreto hidráulico
- Tipo y espesor de base: concreto de baja resistencia como nivelante de empedrado existente.
- Confinamiento lateral: sin confinamiento.
- Dispositivos de transferencia: sin dovelas, trabazón de agregados
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = 17 °C Humedad Relativa = 95% Promedio, Precipitación = 2500 mm/año promedio

Características generales

- TPDA máximo Año 2003:
- Tasa de crecimiento vehicular promedio: 2.5%
- Fecha de inicio de construcción: febrero 2002
- Fecha de finalización: septiembre 2002.
- Constructora: PROTERSA S.A. de C.V.
- Financiamiento: GOES - BID
- Beneficiarios: 80,000 habitantes

TRAMO "LA MONTAÑONA", CHALATENANGO



Figura 2.28 Tramo "La Montañona", Chalatenango

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Departamento Chalatenango
- Velocidad de Proyecto: 65 Km/h
- Longitud: 7 Km
- Espesor de rodadura: 12 cm. concreto hidráulico, $M_r = 38 \text{ Kg/cm}^2$
- Tipo y espesor de base: Suelo cemento, 20 cm.
- Confinamiento lateral: sin confinamiento lateral
- Dispositivos de transferencia: sin dovelas
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = $22 \text{ }^\circ\text{C}$ Humedad Relativa = 90% promedio, Precipitación = 1800 mm/año promedio

Características Generales

- TPDA máximo Año 2003: 237
- Tasa de crecimiento vehicular promedio: 3%

- Fecha de inicio de construcción: Enero 2002
- Fecha de finalización: Julio de 2002
- Constructora: ASTALDI Spa.
- Financiamiento: Fondo de Inversión Social para el Desarrollo Local
- Beneficiarios: 70,000 habitantes

➤ **Autopista San Salvador-Comalapa-Aeropuerto**



Figura 2.29 Autopista - Comalapa - Aeropuerto



Figura 2.30 Vista aérea de Autopista Comalapa - Aeropuerto

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Depto. San Salvador y La Paz
- Velocidad de Proyecto: 90 Km/h
- Longitud: 84 Km Pista
- Espesor de rodadura promedio: 22 cm (Whitetopping)
- Mr: 45 Kg/cm²
- Tipo y espesor de base: Pavimento Asfáltico Existente
- Confinamiento lateral: hombro de Concreto Hidráulico
- Dispositivos de transferencia: Dovelas en Juntas Transversales
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio = 29°C
- Humedad Relativa=80% promedio
- Precipitación = 2000mm/año promedio

Características Generales

- TPDA máximo Año 2003: 42,079
- Tasa de Crecimiento Vehicular: 4.3%
- Fecha de inicio de construcción: 12 septiembre 2001
- Fecha de finalización: 11 noviembre 2002
- Constructora: Pavimentos de Concreto S.A. de C.V.
- Financiamiento: BCIE
- Beneficiarios: más de 1,000,000 de habitantes.

➤ **San Martín-San Rafael Cedros**



Figura 2.31 Vista aérea de Autopista San Martín-San Rafael Cedros

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Departamento de San Salvador y Cuscatlán
- Velocidad de Proyecto: 90 Km/h
- Longitud: 43 Km. Pista
- Espesor de rodadura: 7.5 cm Concreto
- Tipo y espesor de base: 25 cm. Concreto Compactado con Rodillo, $M_r = 45 \text{ Kg/cm}^2$
- Confinamiento lateral: Sin confinamiento, hombro flexible.
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio: $26 \text{ }^\circ\text{C}$, Humedad Relativa=85% promedio, Precipitación = 1900 mm/año promedio.

Características Generales

- TPDA máximo Año 2003: 12,684
- Tasa de Crecimiento Vehicular promedio: 4%
- Fecha de inicio de construcción: 24 octubre 2001
- Fecha de finalización: Abril - 2004

- Constructora: Solel Boneh International
- Financiamiento: Japan Bank for International Corporation (JBIC)
- Beneficiarios: 500,000 habitantes.

➤ **Interconexión Nejapa - Apopa – Troncal del Norte - Boulevard Constitución**



Figura 2.32 Interconexión Nejapa - Apopa – Troncal del Norte - Boulevard Constitución

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Departamento: San Salvador
- Velocidad de Proyecto: 90 Km./h
- Longitud: 30 Km Pista
- Espesor de rodadura: 23 cm. Módulo de Ruptura = 45 Kg/cm²
- Tipo y espesor de base: Suelo cemento, 20 cm.
- Confinamiento lateral: hombros de concreto hidráulico.
- Dispositivos de transferencia: dovelas en juntas transversales
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio: 27 °C
- Humedad Relativa=70% promedio Precipitación = 1900 mm/año promedio.

➤ **La Chuchilla - Km. 35, Carretera a Santa Ana**



Figura 2.33 La Chuchilla - Km. 35, Carretera a Santa Ana

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Departamento San Salvador y Santa Ana
- Velocidad de Proyecto: 90 Km./h
- Longitud: 14 Km Pista
- Espesor de rodadura: 13 cm. Capa no adherida de concreto
- Tipo y espesor de base: Concreto hidráulico existente de 22 cm. de espesor
- Confinamiento lateral: hombro de concreto hidráulico.
- Dispositivos de transferencia: dovelas en juntas transversales
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio: 27 °C
- Humedad Relativa = 80% promedio
- Precipitación = 2000 mm/año promedio

Características Generales

- TPDA máximo Año 2003: 21,309
- Tasa de Crecimiento Vehicular promedio: 4%
- Fecha de inicio de construcción: septiembre de 2003
- Fecha de finalización: Marzo de 2004
- Constructora: M & S
- Financiamiento: Fovial
- Beneficiarios: 700,000 habitantes.

➤ **BY PASS La Unión**



Figuran 2.34 BY PASS La Unión

Datos Geométricos y Estructurales

- Ubicación: Departamento de La Unión
- Longitud: 12 Km
- Espesor de rodadura: 23 cm
- Confinamiento lateral: hombros de concreto hidráulico.

- Dispositivo de transferencia: dovelas
- Clima: Temperatura Ambiente Promedio: 33 °C
- Humedad Relativa = 35% promedio
- Precipitación = 1,800 mm/año promedio

Características Generales

- TPDA máximo Año 2006: 8,000
- Tasa de Crecimiento Vehicular promedio: 5.0%
- Fecha de inicio de construcción: 6 enero 2003
- Fechas de finalización: Mayo de 2004
- Constructora: Asocio temporal Conasa-Padegua
- Financiamiento: BCIE
- Beneficiarios: 82,273 habitantes

2.2 MÉTODOS TRADICIONALES DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

2.2.1 MÉTODO AASHTO

2.2.1.1 Reseña histórica del método AASHTO

El método de diseño para estructuras de pavimento que propone la AASHTO en la edición de 1993, se basa principalmente en la información y en los datos empíricos obtenidos de la prueba AASHO Road Test, llevada a cabo durante el periodo de 1958 a 1960 en Ottawa Illinois. “El objetivo principal de esta prueba fue determinar relaciones significativas entre el comportamiento de varias secciones de pavimento y las cargas

aplicadas sobre ellas que pudiesen ser usadas en el desarrollo de criterios y procedimientos de diseño de pavimentos”.

En la prueba AASHO Road Test se realizaron 6 circuitos de prueba de dos carriles cada uno, los cuales contaban con la mitad del tramo construido con pavimento rígido y la otra con pavimento flexible, se experimentaron 836 secciones con cerca de 200 combinaciones diferentes de superficies, bases y sub-bases.

La planeación empezó en 1951, la construcción del proyecto en 1956 y el tráfico controlado se aplicó de octubre de 1958 a noviembre de 1960. Cada circuito consistía de dos carreteras paralelas conectadas en sus extremos por retornos, como se muestra en la figura 36, cabe mencionar que las secciones de prueba solamente estaban localizadas en los tramos en tangente del circuito.

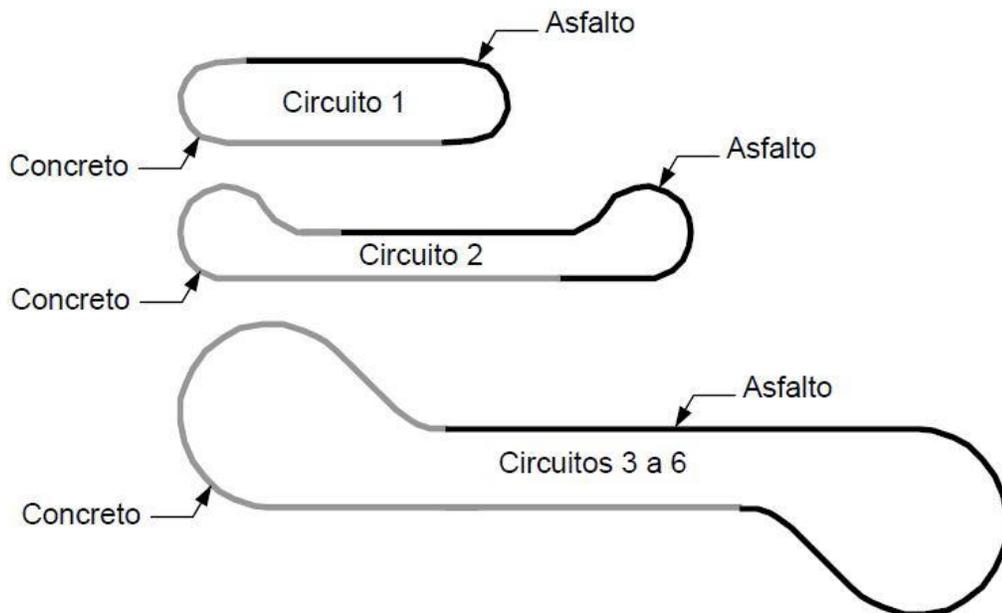


Figura 2.35 Circuitos de prueba de AASHO Road Test.

Las pruebas de tráfico consistían en la circulación de vehículos con diferentes configuraciones de ejes simples y tándem, los cuales eran conducidos por las pistas de pruebas. Diez combinaciones de diferentes cargas y ejes fueron utilizados, con cargas de ejes simple que variaban de las 2,000 lb a las 30,000 lb y con cargas de ejes tándem que variaban de las 24,000 lb a las 48,000 lb. Luego se recopiló la información relacionada con la condición del pavimento con respecto a la presencia de grietas y la cantidad de recarpeteos necesarios para mantener la sección de pavimento en servicio. Los perfiles longitudinales y transversales también fueron obtenidos para determinar la extensión de baches, deformación de la superficie causada por la carga de los vehículos circulando a velocidades muy bajas, esfuerzos impuestos en la subrasante y la distribución de temperatura en las capas del pavimento. Toda esta información fue minuciosamente analizada, y los resultados formaron la base para la publicación de la guía interina para el diseño de estructuras de pavimento de la AASHO de 1961.

La primer guía de diseño de pavimentos de la AASHO fue editada en 1961 y 1962, la cual a su vez fue evaluada y revisada por el Comité de Diseño AASHTO en 1972, publicando la “AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures” la cual incorporó experiencias que fueron acumuladas desde la primera edición de la Guía de 1962, y en 1981 se revisó parte de la guía correspondiente al diseño de pavimentos rígidos, (capítulo III). [AASHTO, 1993, P: II-3]. Entre 1984 y 1985, el Subcomité en prácticas de Diseño de Pavimentos y consultores revisaron la guía en vigencia, dando como resultado la “AASHTO Guide for the Design of Pavements Structures” (1986).

En 1993 se publicó una nueva versión de la guía AASHTO, la cual incorpora la revisión del diseño de sobrecapas, diseño de subbases delgadas, erosión de la subbase y confinamiento lateral, así como también se extendieron las extrapolaciones de las cargas de tráfico de ejes simples hasta 50,000 lb y en ejes tándem y tridem hasta 90,000 lb, también a la ecuación general de diseño de la guía se le agregaron algunos factores tales como: el error estándar combinado, la diferencia de serviciabilidad y el coeficiente de drenaje.

La publicación de la AASHTO edición 1998 es una guía suplementaria de la guía para diseño de pavimentos proporcionado por la AASHTO de la edición 1993, contiene un procedimiento alternativo para diseño de pavimentos rígidos y diseño de juntas, correspondientes a las secciones 3.2 y 3.3 de la parte II de la edición 1993, en esta edición de la guía se incorporan factores como la relación de Poisson, características de la subbase, condiciones climáticas de la zona y cambios en la determinación del módulo de reacción de la subrasante, (K), así como también un procedimiento para verificar la aparición de fallas en las juntas, como el escalonamiento de las losas del pavimento.

En el año 2004 la AASHTO publicó la guía Mecánica-Empírica edición 2002, la cual incorpora entre otros las propiedades significativas del comportamiento de los materiales en el procedimiento de diseño, esta guía supera algunas de las deficiencias que tenían las anteriores publicaciones de la guía AASHTO con lo que respecta a: El incremento del tráfico y su caracterización (configuración de ejes, tipo y presión de neumáticos); Deficiencias climáticas; Deficiencias de construcción; Deficiencias de

desempeño (falla de juntas, grietas por temperatura, etc.); Deficiencias de confiabilidad, en la actualidad se diseña para cantidades de tráfico mucho mayores a los de décadas anteriores, por lo que al multiplicarlos por valores grandes, como los que resultan de los procedimientos de ediciones previas, los espesores de los pavimentos resultarían sobre diseñados.

Esta guía también incluye tecnología que considera directamente el comportamiento de los materiales a usar durante la vida útil y una relación directa entre construcción y especificaciones de los materiales y estructura de pavimento.

No obstante a que la guía AASHTO cuenta con estos documentos recientes para el diseño, mencionados anteriormente, (Guía suplementaria 1998 y guía Mecánica-Empírica edición 2002), en esta investigación se utilizará principalmente la guía 1993, en vista de que es la metodología actualmente más utilizada a nivel nacional y regional.

2.2.1.2 Factores de diseño del método AASHTO 1993

Las variables que intervienen para el diseño de pavimentos rígidos son tomadas en base a un conocimiento empírico, por lo que es importante conocer y entender las consideraciones que tienen que ver con cada una de ellas. La fórmula que propone la guía AASHTO 93 para el diseño del espesor de la losa de pavimento rígido se muestra en la siguiente ecuación.

La ecuación fundamental AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos es:

EC. 2.1:

$$\log_{10} W_{82} = Z_r S_o + 7.35 \log_{10}(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log_{10}(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5})}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D+25.4)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_t) \log_{10} \left(\frac{M_r C_{dx} (0.09 D^{0.75} - 1.132)}{1.51 x J \left(0.09 D^{0.75} - \frac{7.38}{(E_C/K)^{0.25}} \right)} \right)$$

W_{82} = Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 toneladas métricas, a lo largo del período de diseño.

Z_r = Desviación normal estándar

S_o = Error estándar combinado en la predicción del tránsito y en la variación del comportamiento esperado del pavimento

D = Espesor de pavimento de concreto, en milímetros

ΔPSI = Diferencia entre los índices de servicio inicial y final

P_t = Índice de serviciabilidad o servicio final

M_r = Resistencia media del concreto (en Mpa) a flexotracción a los 28 días (método de carga en los tercios de la luz)

C_d = Coeficiente de drenaje

J = Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas

E_C = Módulo de elasticidad del concreto, en Mpa

K = Módulo de reacción, dado en Mpa/m de la superficie (base, subbase o subrasante) en la que se apoya el pavimento de concreto

La guía AASHTO 93 propone la solución de la ecuación anterior por medio de un nomograma, con el cual se obtiene directamente el espesor de la capa de rodadura de la estructura de pavimento rígido. También se puede utilizar programas

computacionales para el diseño de pavimentos, tal como el WinPAS, desarrollado por la ACPA exclusivamente para el método AASHTO edición 1993 y el DARwin desarrollado por la AASHTO.

A continuación se describen de manera general las variables involucradas en el diseño de espesores de losa de pavimentos rígidos:

a) Espesor. (D)

Es la variable que se pretende determinar al realizar un diseño de una estructura de pavimento, el espesor se refiere solamente a la capa de concreto hidráulico que se coloca sobre la subbase y/o subrasante.

b) Tráfico

Los resultados de la AASHO Road Test mostraron que el efecto dañino del paso de un eje de cualquier peso puede ser representado por un número de repeticiones de carga, equivalentes a 8.2 toneladas ó 18 Kips (ESAL's), aplicadas en el carril de diseño durante el periodo de diseño del pavimento. Esta simplificación se realizó debido a que en la época en que se desarrolló la AASHO Road Test, a principios de 1960, era mucho más sencillo utilizar un solo número para representar toda la carga por tráfico en las ecuaciones usadas para predecir la vida del pavimento.

El tráfico es una de las variables más significativas del diseño de pavimentos, y una de las que más incertidumbre presenta al momento de estimarse; su determinación usualmente se basa en tasas de crecimiento vehicular, las cuales no son muy precisas.

La mayoría de los métodos de diseño consideran esta incerteza, y la guía AASHTO 1993

propone el uso de niveles de confiabilidad, los cuales toman en cuenta estas incertezas en la predicción de las cargas del tráfico y su comportamiento.

El tráfico se debe de convertir a ESAL's por medio de la multiplicación de varios factores, tal como lo define la guía AASHTO en el apéndice D, lo cual se presenta en la siguiente ecuación.

Ec. 2.2 $ESAL's = \sum (N^\circ \text{ de vehículos por categoría} * F_{\text{sentido}} * F_{\text{carril}} * F_{\text{crecimiento}} * F_{\text{eje equivalente}})$

Los factores involucrados en la ecuación anterior se obtienen por medio de recomendaciones, ecuaciones o tablas que se encuentra en guía AASHTO 1993. El factor de eje equivalente convierte los pesos según cada eje de los vehículos a pesos normalizados de 18 kips, considerando el daño que puede causar cada eje en relación al daño que causa el paso de un eje estándar.

c) Coeficiente de confiabilidad. (R)

Es la probabilidad que la serviciabilidad o desempeño de la vía se mantenga en niveles adecuados para las cargas del tráfico y condiciones ambientales, así como también se mantenga en niveles adecuados desde el punto de vista del usuario durante todo el periodo de diseño. Lo anterior no obstante a que los pavimentos pueden sufrir daños en su estructura debido a las cargas impuestas del tráfico y condiciones ambientales, por lo que deben llevarse a cabo intervenciones que permitan que la vía se comporte en un nivel de operación óptimo.

La confiabilidad depende de diversas circunstancias que intervienen en su selección, como lo es la incertidumbre del volumen del tráfico en los incrementos que pudiesen surgir en el periodo para el cual se diseñe una vía. La confiabilidad es la variable en la cual se introduce un grado de certidumbre en el diseño y un nivel de seguridad o factor de seguridad (FR) para que el pavimento resista las cargas del tráfico en el periodo de diseño. El factor de seguridad (FR) depende del nivel de confiabilidad (R) y del error estándar combinado (So).

La desviación normal estándar representa el rango de variación en la predicción del tráfico en el periodo de diseño y depende del nivel de confiabilidad requerido.

El error estándar combinado (So) depende de las condiciones locales y de los demás factores que afectan el comportamiento de un pavimento; entre dichos factores podemos mencionar:

Incertidumbre en el modelo, tránsito, medio ambiente, materiales de construcción, entre otros. Se debe emplear un valor del error estándar de 0.30 a 0.40 para pavimentos rígidos, según recomendaciones de la sección 4.3 de la guía AASHTO edición 1993. Se recomienda también valores de 0.35 para construcción nueva y 0.39 para sobrecapas. El factor de seguridad es representado por FR y viene dado por la siguiente ecuación: **EC. 2.3** $FR = 10^{-ZR \cdot So}$ (Ec. 2.4)

d) Módulo de reacción de la subrasante–subbase. (k)

El módulo de reacción de la subrasante-subbase, es una constante elástica que define la rigidez del material o resistencia a la deformación. Es la relación entre carga por

unidad de área de superficie horizontal del suelo con el asentamiento correspondiente de la superficie; este parámetro representa la capacidad portante que posee un suelo en estado natural o con la combinación de una subbase, siendo éste el que servirá para colocar la estructura de pavimento.

Lo anterior lo propuso Westergard en 1926 al suponer que la subrasante-subbase no admite esfuerzos de corte y la reacción de la subrasante sobre la losa es igual a la deflexión de la subrasante multiplicada por una constante (K), la cual es el módulo de reacción de la subrasantesubbase.

e) Pérdida de serviciabilidad. ($\Delta PSI = P_0 - P_t$)

La serviciabilidad se define como la capacidad del pavimento de desempeñarse adecuadamente ante todo tipo de tráfico que circula en la vía, se mide en una escala del 0 al 5, en donde 0 (cero) significa pavimento intransitable y 5 significa pavimento en excelentes condiciones. Este factor es una medida subjetiva de la calificación del pavimento; sin embargo, la tendencia es definirla usando parámetros como el índice de regularidad internacional (IRI).

La serviciabilidad inicial (P_0) es la condición de un pavimento inmediatamente después de la construcción de éste. La guía AASHTO recomienda para pavimentos rígidos un $P_0 = 4.5$, mediante el uso de adecuadas técnicas de construcción. La serviciabilidad final (P_t) es la capacidad funcional que se espera tenga un pavimento al final del periodo de diseño. La AASHTO sugiere que para carreteras principales se utilice un valor de $P_t = 2.5$

ó 3.0 y para carreteras de bajo nivel un valor de serviciabilidad final de 2.0. [AASHTO, 1993, p: II-10]. El cambio total en el índice de serviciabilidad (ΔPSI) viene dado por:

$$\text{Ec. 2.4 } \Delta PSI = P_0 - P_t.$$

f) Propiedades del concreto. (Módulo de elasticidad y módulo de ruptura)

Las propiedades del concreto que influyen en el diseño de una estructura de pavimento se detallan a continuación:

El módulo de elasticidad del concreto (E_c), es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico, es la pendiente de la línea definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación, dentro de esta zona elástica. El valor del módulo de elasticidad del concreto de peso normal se puede obtener según ASTM C39 ó AASHTO T22, T140; o en función del esfuerzo a compresión (f'_c) a una edad de 28 días, según el American Concrete Institute, (ACI).

$$\text{Ec. 2.5 } E_c = 57\,000 (f'_c)^{0.5} (\text{psi})$$

g) Coeficiente de transferencia de carga. (J)

El coeficiente J representa la eficiencia de transferencia de carga que tiene una losa del pavimento al transmitir fuerzas cortantes a las losas adyacentes, esto tiene por objeto minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento. La guía AASHTO edición 1993 explica este factor en su sección 2.4.2.

La transferencia de carga comúnmente se da por medio de barras de acero lisas incrustadas en las losas en las juntas transversales, (aunque puede haber otros tipos de mecanismos de transferencia de carga, como la transferencia a partir de la trabazón de agregados), tal como lo muestra la figura 2.36.

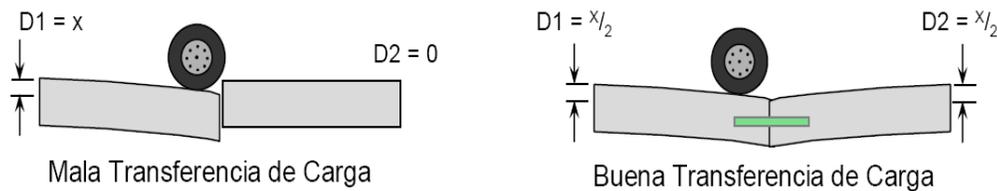


Figura 2.36 Esquema de la transferencia de carga entre losas vecinas. Adaptado del Instituto del cemento portland argentino ICPA.

h) Coeficiente de drenaje. (Cd)

El coeficiente de drenaje fue incorporado en la guía AASHTO para diseño de pavimentos rígidos a raíz de los efectos del drenaje en el desempeño de la estructura de pavimento, tales como el efecto de la humedad en la resistencia de la subrasante y en la erosionabilidad de la subbase.

2.2.1.3 Flujograma de diseño AASHTO 93

En la figura 2.37 se presenta un flujograma que describe y resume los pasos del procedimiento de diseño de la guía de diseño AASHTO edición 1993.

Flujograma de diseño AASHTO 1993

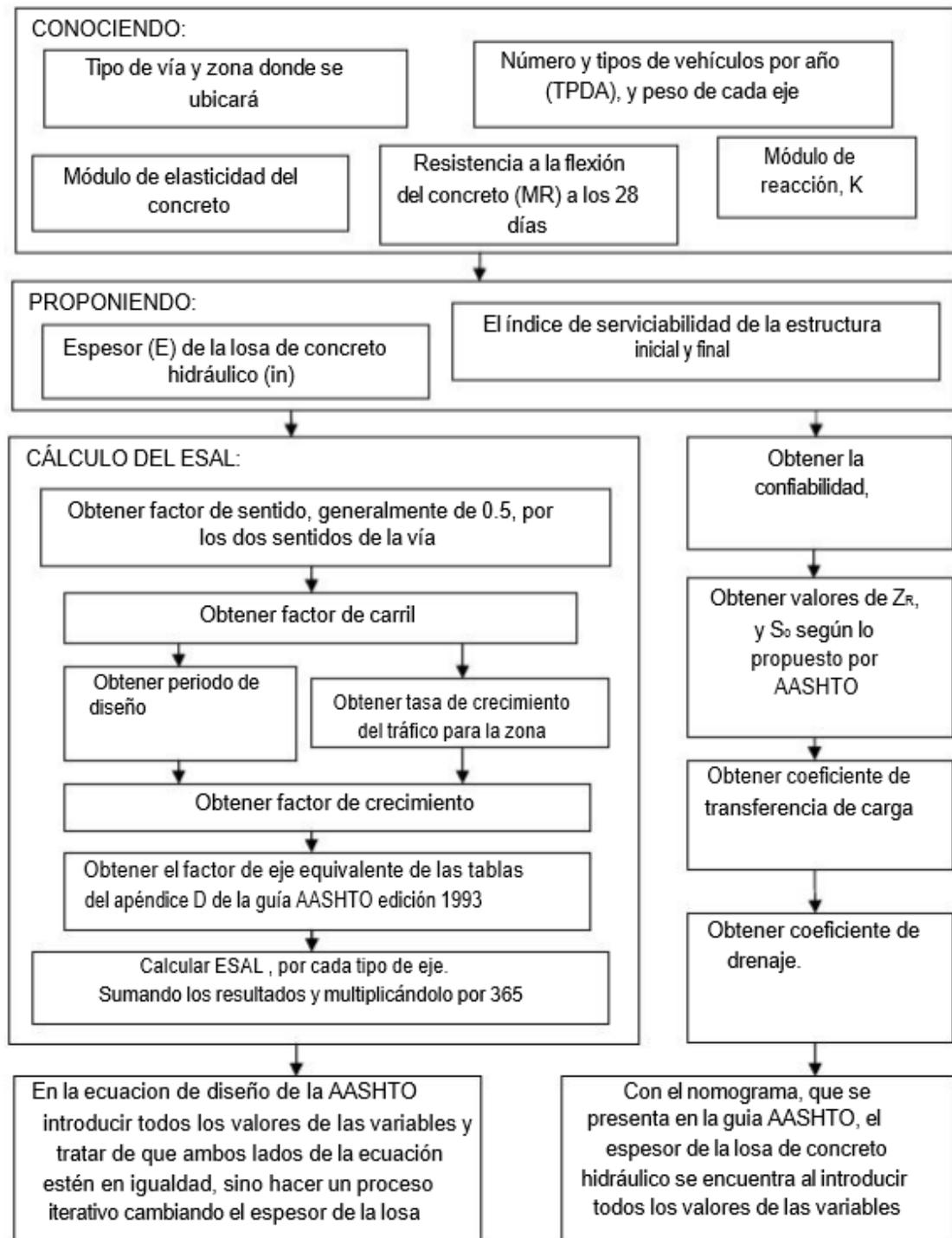


Figura 2.37 Flujograma de diseño utilizando el método AASHTO1993. "Guide for Design of Pavement Structures 1993".

2.2.1.4 Suplemento de la guía AASHTO 1998

El modelo de diseño AASHTO revisado para pavimentos de concreto que se presentan en el Suplemento a la Guía AASHTO 1998 fue desarrollado bajo el proyecto NCHRP Proyecto 1-30 y validado en campo por el análisis de los Estudios generales de Pavimentos conocido por sus siglas en inglés como GPS- 3 (JPCP), GPS -4 (JRCP) y GPS- 5 (CRCP) en el programa de estudio del comportamiento del pavimento a largo plazo (LTPP).

El propósito del estudio del proyecto NCHRP 1-30 fue evaluar y mejorar la caracterización de la Guía AASHTO sobre la subrasante y de la base de apoyo. El modelo empírico original de AASHO fue calibrado para el valor bruto de k en un periodo de primavera, donde se midió las pruebas de carga de placa sobre una base granular, mientras que el método de la Guía de 1986 para determinar el valor de diseño de k se basó en un valor de k medio anual ajustada estacionalmente, llamado "valor compuesto de k " (Base más subrasante). Una recomendación clave del estudio 1-30 fue que, por efectos de diseño de pavimentos de concreto en la metodología AASHTO mecanicista empírica existente, tanto la subrasante y la sub-base del proyecto AASHO Road Test en la fase de diseño se debe caracterizar el promedio anual ajustada estacionalmente por el valor de k estático elástico. El Suplemento AASHTO 1998 presenta las directrices para la determinación de un valor- k de diseño apropiado sobre

la base de rodamientos de pruebas de placa, las correlaciones con los tipos y propiedades de suelo, CBR o deflexiones medidos en los pavimentos en servicio .

Se recomienda en el Suplemento AASHTO 1998 que tanto el beneficioso y efectos perjudiciales de una base granulada o tratada en el rendimiento del pavimento de concreto sean considerados, no en el valor k , pero en el cálculo de la tensión de la losa en respuesta a la carga, así como los gradientes de temperatura y humedad. Usando el mismo proceso por el cual el modelo empírico original AASHTO Road Test se amplió en 1961, un nuevo modelo de diseño AASHTO fue derivado a ser compatibles con la caracterización recomendada del valor de diseño de K y considerar los efectos sobre el esfuerzo en la base del módulo de la losa, espesor de la base, fricción en la losa y en la base, espaciamiento de las juntas, soporte del borde, la temperatura y los gradientes de humedad, y carga de tráfico. Los análisis del esfuerzo se realizaron utilizando un modelo de elemento finito tridimensional, el cual fue validado por comparación con esfuerzos (calculados a partir de las deformaciones medidas) en pavimentos en la AASHTO Road Test, el examen práctico de Arlington, y deflexiones de losas medido en las pruebas realizadas por PCA . Las ecuaciones de regresión se desarrollaron para relacionar los esfuerzos calculados a los factores de diseño. El modelo de elementos finitos tridimensional también se utilizó para elaborar una comprobación de diseño para la carga de esquina para pavimentos con juntas sin dovelas.

Al igual que en las versiones anteriores del procedimiento de diseño de pavimento rígidos de la AASHTO, el espesor de la losa calculado es lo que se requiere para apoyar a los ESALs previstos para un seleccionado el nivel de estado terminal, en el supuesto de que la pérdida de capacidad de servicio se debe únicamente al agrietamiento de la losa. Si fallas se desarrollaron sobre un pavimento a un grado tal que contribuyó significativamente a la pérdida de capacidad de servicio, el pavimento se habría mal diseñado, es decir, habría llegado al final del servicio antes de lo previsto. La forma apropiada de prevenir esto no es aumentar el espesor de la losa, sino más bien diseñar el sistema de transferencia de carga de la junta de manera que las fallas no se desarrollará en la medida en que contribuye significativamente a la pérdida de capacidad de servicio.

2.2.2 MÉTODO PCA

2.2.2.1 Introducción de método PCA

Método de diseño de espesores de pavimento rígido de la PCA.

El método de diseño de la Portland Cement Association, es exclusivamente un método de diseño desarrollado para pavimentos de concreto hidráulico. Los aspectos indicados en éste apartado se basan principalmente en lo indicado en el manual de diseño de la PCA (Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements) edición 1984.

2.2.2.2 Reseña histórica del método de la PCA

La reseña histórica que se indica a continuación, está basada en los aspectos indicados en la Transportation Research Circular número E-C118 publicada por la Transportation Research Board of the National Academies, donde se indica, entre otros, que en 1966 la PCA introdujo el primer procedimiento mecanístico-empírico para el diseño de espesores de pavimentos de concreto. El método fue desarrollado por P. Fordyce y R. Packard para pavimentos de concreto simple, con juntas y sin dovelas, basados en los análisis desarrollados por Westergaard y presentándolos en cartas de influencia realizadas por Pickett y Ray; los resultados permitían seleccionar un espesor basado en consideraciones de daño acumulado en fatiga. Posteriormente los resultados de la AASHO Road Test permitieron calibrar la metodología para el diseño. Posteriormente la metodología de diseño fue mejorada a través de recomendaciones de investigadores como E. J. Yoder, G. Ray, R. Packard y B. Colley de la PCA, con la llegada de las computadoras y el desarrollo de la metodología de elemento finito, los procedimientos de diseño incluyeron la influencia de barras de dovela y del confinamiento lateral. En 1977 Darter y Barenberg desarrollaron un procedimiento de diseño para la Federal Highway Administration (FHWA) y Tayabji, Colley y Packard para la PCA en 1984, considerando además de la fatiga, los efectos de bombeo o “pumping”; con este procedimiento la PCA introdujo una nueva metodología de diseño en 1984 (la versión vigente del método), basado en un análisis de elemento finito, no solamente considerando fatiga sino que también considerando el criterio de erosión. Así mismo, la

metodología permitió considerar el uso de dovelas en juntas y de elementos para dar apoyo lateral a la losa de concreto.

En general, el método de diseño de la PCA está basado en:

1. Análisis comprensivo de esfuerzos en el concreto y deflexiones en las juntas del pavimento, esquinas, y bordes, por un programa de computadora de elemento finito.
2. Modelos y pruebas a escala verdadera como la Arlington Test y varios proyectos de investigación dirigidos por la PCA y otras agencias acerca de sub-bases, juntas y hombros de concreto.
3. Pavimentos experimentales sujetos a pruebas de tráfico controlado, tales como la Bates Test Road, the Pittsburg Test Highway, the Maryland Road Test, the AASHO Road Test, y estudios de pavimentos de autopistas en servicio realizado por varios departamentos de estado de transporte.
4. El desempeño de pavimentos construidos normalmente sujetos a tráfico normal.

2.2.2.3 Criterios de diseño del método de la PCA

El método de diseño de la PCA considera dos criterios de falla: el criterio de erosión de la sub-base por debajo de las losas y el criterio del esfuerzo de fatiga.

- a) El criterio de erosión de la sub-base por debajo de las losas, el cual reconoce que el pavimento puede fallar por un excesivo bombeo (erosión del terreno de soporte de la losa de concreto) y diferencias de elevaciones en las juntas.

b) El criterio del esfuerzo de fatiga, el cual reconoce que el pavimento pueda fallar debido a excesivas repeticiones de carga.

A continuación se indican los principales aspectos relacionados con cada uno de los criterios de falla antes referidos.

- **Erosión.**

El criterio de erosión es utilizado para limitar la deflexión que se produce en los bordes de las losas de concreto, juntas y esquinas del pavimento por efecto del bombeo. El bombeo es definido por la University of Washington of Civil and Environmental Engineering, (WSDOT Pavement Design), como “el movimiento de material por debajo de la losa de concreto o eyección de material desde abajo de la losa, como resultado de la presión del agua. El agua acumulada por debajo de la losa será presurizada cuando la losa flexione debido a carga”.

El bombeo ocurre debido a muchas repeticiones de cargas de ejes pesados en las esquinas de la losa de concreto y bordes, erosión de subrasante, subbase, y materiales del hombro; lo cual genera huecos bajo y junto a la losa.

La erosión se cuantifica en términos de porcentaje del daño total por erosión, se recomienda optimizar el diseño obteniendo un valor cercano al 100%, ya que si se tienen valores menores a dicho porcentaje, se estaría determinando una estructura sobre diseñada.

- **Fatiga**

El análisis del criterio de fatiga es utilizado para evaluar los esfuerzos producidos en las losas del pavimento, ante la aplicación de cargas sobre las losas, lo cual puede producir esfuerzos excesivos, que generan agrietamientos. El objetivo es mantener los esfuerzos en el concreto, que constituye la losa, dentro de los límites de seguridad, basándose en el factor de relación de esfuerzos, el cual corresponde al esfuerzo de flexión dividido entre el módulo de ruptura del concreto a los 28 días.

La fatiga se cuantifica en términos de porcentaje de absorción de la fatiga, se recomienda optimizar el diseño obteniendo un valor cercano al 100%, ya que si se tienen valores menores a dicho porcentaje, se estaría determinando una estructura sobre diseñada.

Asimismo, algunos aspectos de diseño, adicionales a la determinación del espesor, tomados en cuenta por el método de diseño de la PCA, para asegurar el funcionamiento y la vida de los pavimentos de concreto, se mencionan a continuación:

- Soporte razonablemente uniforme.
- Prevención de bombeo en subbase relativamente delgada no tratada o tratada con cemento, en proyectos donde el tráfico pesado esperado sea lo suficientemente grande, causando bombeo.
- Uso de un diseño de junta que proporcionará adecuada transferencia de carga; que permita el uso de selladores en las juntas de ser requeridos para la efectividad de las mismas.

- Uso de un diseño de mezcla de concreto y agregados que proveerán concreto de calidad con la resistencia y durabilidad necesaria para una larga vida bajo, las condiciones de exposición actuales.

Para los pavimentos con juntas, la PCA determinó las posiciones críticas de las cargas por eje, las cuales se muestran en la figura 2.38.

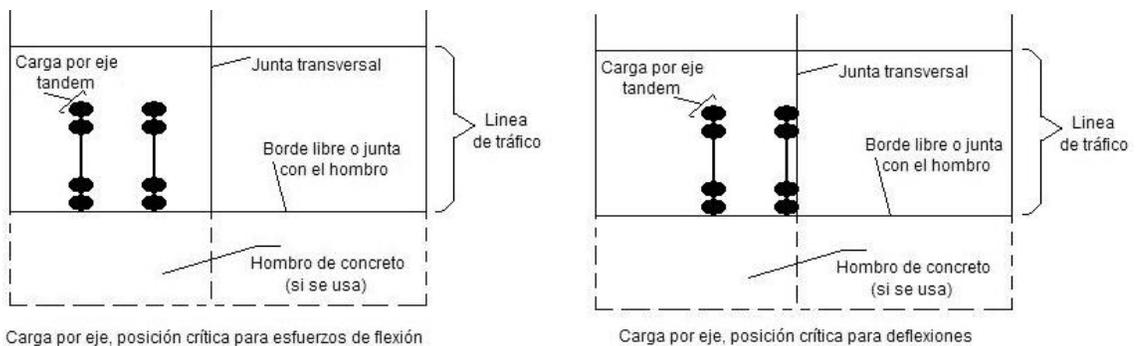


Figura 2.38 Posiciones críticas de carga por eje. Adaptada de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements, PCA.

De acuerdo a lo indicado en el manual de diseño de la PCA, las deflexiones críticas en el pavimento ocurren en la esquina de la losa de concreto, donde la carga del eje está posicionada en la junta, con las llantas en o muy cerca de la esquina. Cabe indicar que al proporcionar apoyo lateral al pavimento (hombro), se reducen considerablemente las deflexiones en la esquina. La ubicación de las cargas de las llantas del tráfico pesado en la parte externa del borde del pavimento crea condiciones más severas que cualquier otra posición de carga; al mover hacia dentro la posición de las llantas, unas pocas pulgadas desde el borde, los efectos decrecen substancialmente.

Para el análisis por esfuerzo de fatiga, la PCA toma la condición más severa: 6% de tráfico pesado; para el análisis por erosión, el cual involucra deflexión en la esquina de

la losa, la PCA asume el caso más severo, otra vez 6% de tráfico pesado en el borde. Donde no hay apoyo lateral, las cargas en las esquinas son las críticas (6% del tráfico pesado); y donde hay apoyo lateral, el mayor número de cargas hacia el interior desde la esquina del pavimento son las críticas (94% del tráfico pesado). Lo anterior resulta de estudios realizados por Taragin en 1958, los cuales mostraron que muy poco del tráfico pesado circula justo en el borde del pavimento, para carriles de 12 pies con hombros sin pavimentar, la mayoría del tráfico pesado circula con sus llantas exteriores ubicadas aproximadamente a dos pies del borde.

2.2.2.4 Factores de diseño del método de la PCA

El diseño de espesores se realiza basándose principalmente en cinco factores:

1. Resistencia a la flexión del concreto, (Módulo de ruptura, MR).
2. Soporte de la subrasante, o de la combinación de subbase y subrasante, (K).
3. Periodo de diseño.
4. Los pesos, frecuencias, y tipo de tráfico pesado que el pavimento soportará.
5. Factor de seguridad para las cargas, (FS).

Los siguientes aspectos están basados principalmente en el manual de diseño de la PCA, “Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements”, entre otros.

1. Resistencia a la flexión del concreto

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Se obtiene mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 6 in x 6 in (150 mm x

150 mm) de sección transversal y un claro de al menos tres veces el espesor; la resistencia a la flexión se expresa como el módulo de ruptura y es determinada mediante el método de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios).

La consideración de la resistencia a la flexión del concreto se aplica en el procedimiento de diseño para el criterio de fatiga, la cual controla el agrietamiento del pavimento sujeto a cargas repetitivas de tráfico pesado.

2. Soporte de la subbase y de la subrasante

El soporte de la subbase y de la subrasante se define en términos del módulo de reacción de la subrasante (K), el cual corresponde a la carga aplicada (libras) en un área (in^2) cargada (un plato de 30 in de diámetro) dividida entre la deflexión producida ante dicha carga (in).

Cuando se utiliza una subbase se tiene un incremento en el valor k, el cual debe ser usado en el diseño del espesor.

3. Periodo de diseño

En la publicación de la PCA, el término periodo de diseño es usado en lugar del término vida del pavimento. El término periodo de diseño es algunas veces considerado como sinónimo del término periodo de análisis de tráfico. El periodo de diseño seleccionado interviene en el diseño del espesor, ya que determina la cantidad de años que el pavimento debe funcionar desempeñándose adecuadamente, y por lo tanto determina también, la cantidad de tráfico pesado que debe soportar el pavimento.

4. Tráfico

El número y pesos de cargas por ejes pesados esperados durante el periodo de diseño, son factores importantes en el diseño de espesores de pavimentos de concreto. Estos se derivan de estimados de las siguientes cargas de tráfico: ADT (tráfico promedio diario en ambas direcciones, todos los vehículos, “Average Daily Traffic”); ADTT (tráfico pesado promedio diario en ambas direcciones, “Average Daily Truck Traffic”) y de cargas por ejes de tráfico pesado.

La información referente al tráfico es empleada para determinar el número de repeticiones esperadas de cada tipo de eje durante todo el periodo de diseño. Para poder conocer estos valores tendremos que conocer varios factores referentes al tránsito, como lo son el tránsito promedio diario anual (TPDA), el porcentaje que representa cada tipo de eje en el TPDA, el factor de crecimiento del tráfico, el factor de sentido, el factor de carril y el período de diseño, los cuales se muestran en la siguiente ecuación.

$$Re = TPDA \times \% \text{Tipo de eje} \times F_{\text{Sentido}} \times F_{\text{Carril}} \times P_{\text{diseño}} \times F_{\text{Crecimiento Anual}} \times 365$$

El método de diseño de la PCA recomienda considerar únicamente el tráfico pesado, es decir que se desprece todo el tráfico ligero como automóviles, paneles y pick-ups.

5. Factores de seguridad para las cargas

El método de diseño exige que las cargas reales esperadas se multipliquen por factores de seguridad de carga (FSC o LSF por sus siglas en inglés, Load Security Factor), la PCA recomienda los siguientes:

- Para vías interestatales y otros proyectos multicarril, donde se espera un flujo de tránsito ininterrumpido, con un alto volumen de tránsito pesado, utilizar un LSF de 1.2.
- Para autopistas y arterias principales donde se espera un volumen moderado de tránsito pesado, utilizar un LSF de 1.1.
- Para caminos, calles residenciales, y otras vías que soportarán bajos volúmenes de tránsito pesado, utilizar un LSF de 1.0.

En casos especiales, podría justificarse el uso de un factor de seguridad de carga tan alto como 1.3, para mantener un nivel de serviciabilidad mayor que el normal a través del periodo de diseño.

2.2.2.5 Formulario y flujograma de diseño

En el manual de diseño: “Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements” se presenta un formulario para el cálculo del espesor del pavimento, con la finalidad de ayudar al usuario en su procedimiento de diseño.

También existen software como el PCAPAV, desarrollado por la PCA en 1990; BS-PCA, desarrollado por los ingenieros colombianos Efraín Solano y Carlos Benavides en el 2003; y el PCAWin, desarrollado en la Universidad de Illinois en el 2000, los tres basados en el método de la PCA publicado en 1984.

El formulario para el cálculo de espesores, contenido en el manual de diseño, es el siguiente:

Cálculo del espesor del pavimento

Proyecto: _____

Espesor de prueba: _____ in Dovelas en las juntas: si _____ no _____

Subbase-Subrasante, k: _____ pci Hombro de concreto: si _____ no _____

Módulo de ruptura, MR: _____ psi Periodo de diseño: _____ años

Factor de seguridad de carga, LSF _____

Carga por eje, kips	Multiplicada por LSF	Repeticiones esperadas	Análisis de fatiga		Análisis de erosión	
			Repeticiones permisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones permisibles	Porcentaje de daño
1	2	3	4	5	6	7

8. Esfuerzo equivalente _____ 10. Factor de erosión _____

9. Factor de relación de esfuerzo _____

Ejes Sencillos

11. Esfuerzo equivalente _____ 13. Factor de erosión _____

12. Factor de relación de esfuerzo _____

Ejes Tándem

14. Esfuerzo equivalente _____ 16. Factor de erosión _____

15. Factor de relación de esfuerzo _____

Ejes Tridem

Total				Total		

Figura 2.39 Formulario para el cálculo del espesor del pavimento. Adaptado de Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements, PCA [1984: p.47

Cabe señalar que el espesor de losa se considerará no adecuado si cualquiera de los totales del factor de fatiga y de erosión son mayores al 100%; por lo que habrá que utilizar un espesor mayor para hacer otra iteración; si la absorción total de fatiga y el daño total de erosión fueran mucho menores que 100%, será necesario utilizar un espesor menor para hacer una nueva iteración; seguir iterando hasta obtener un espesor de losa de concreto óptimo con ambos totales del factor de fatiga y del factor de erosión cercanos al 100%.

En la figura 2.40 se presenta un flujograma para realizar el cálculo del espesor de una losa de concreto para pavimento rígido, apoyándose en el formulario de diseño de la figura 2.39.

Flujograma de diseño método PCA

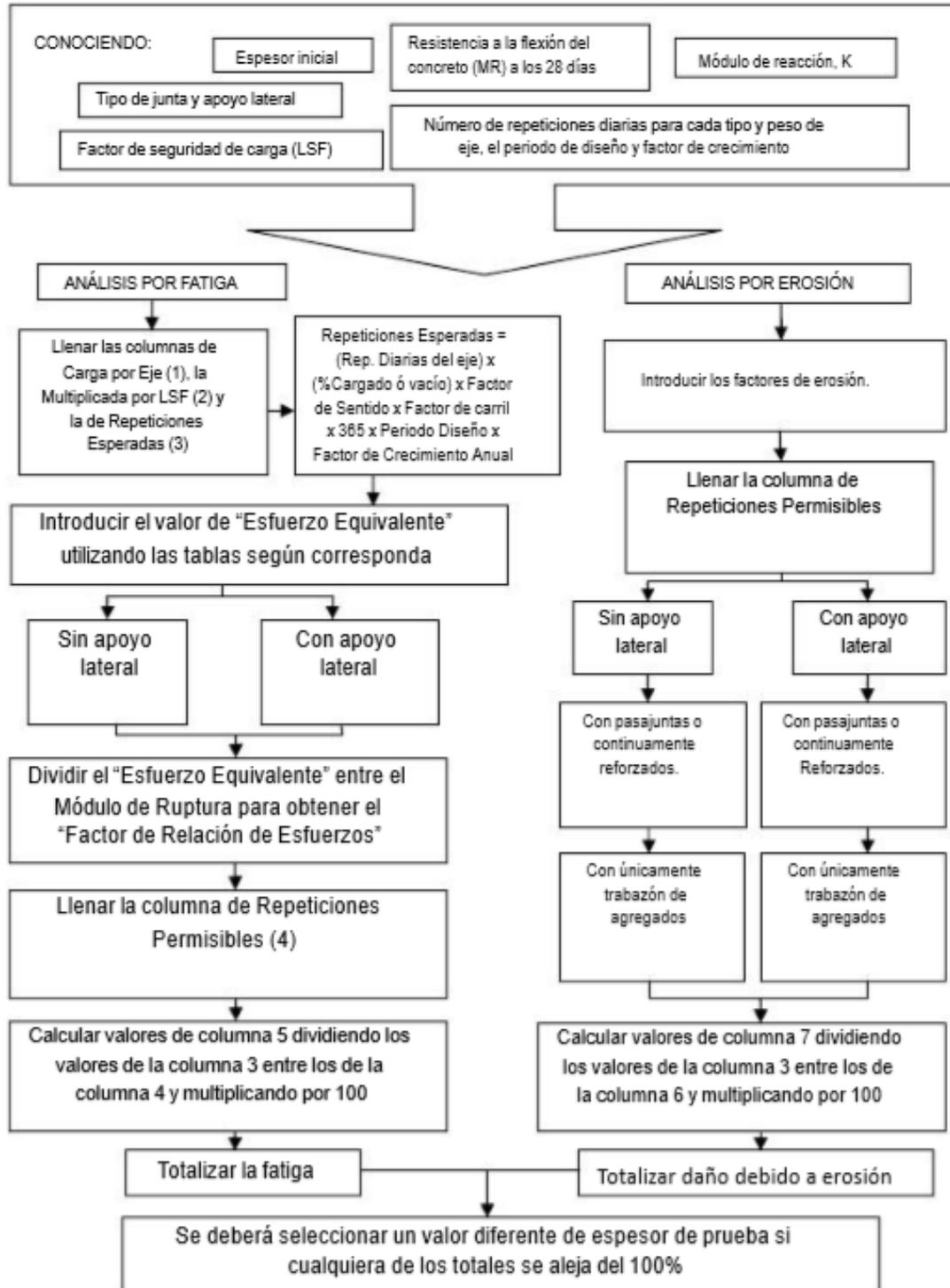


Figura 2.40 Flujograma de diseño utilizando el método de la PCA

2.3 FUNDAMENTO TEORICO DEL MÉTODO DE DISEÑO DE LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIES OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRAULICO.

2.3.1 HISTORIA

2.3.1.1 Desarrollo en Chile

Durante la última década, el Instituto del Cemento y del Hormigón (concreto) de Chile (ICH) ha impulsado la innovación en pavimentos de concreto con losas de dimensiones distintas a las convencionales. Los análisis preliminares indicaron que utilizando losas de dimensiones menores era posible reducir los esfuerzos sobre la losa.

La primera experiencia chilena en terreno se materializó en enero de 2004 en la Av. Libertador Bernardo O'Higgins (Santiago), donde se construyó un pavimento de concreto de losas cuadradas de 120 centímetros con espesores entre 15 y 20 cm y una longitud total del tramo es de 650 metros y se ubica en la calzada norte de la avenida Ecuador y la intersección Ruiz Tagle.

Este pavimento ha tenido un buen comportamiento, considerando 7 años de vida de servicio (2004-2011) han transitado cerca de 15 millones de Ejes Equivalentes. Los deterioros que se contabilizaron, no superaron el 10% de losas agrietadas, siendo la condición predominante el agrietamiento longitudinal en aquellas losas que presentaron algún tipo de grietas. Una representación del deterioro observado en este pavimento se muestra en la Figura 2.41.

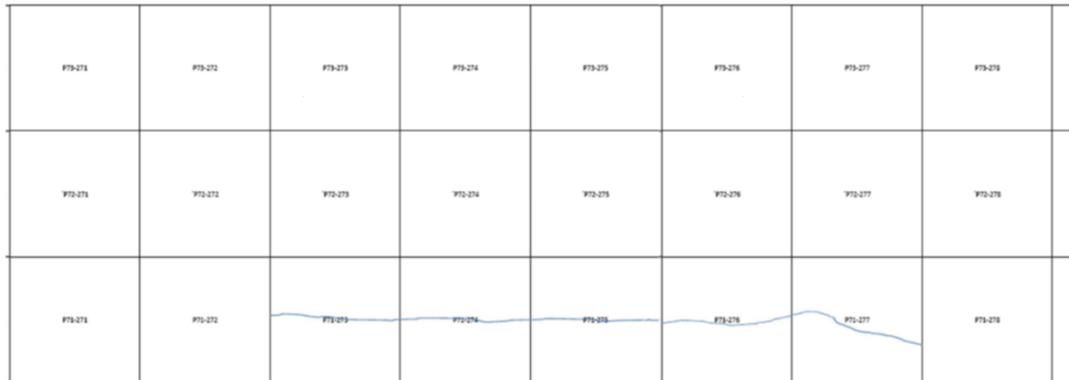


Figura 2.41 Losas de 15 [cm] de espesor, 120 [cm] de longitud, Alameda.

Posteriormente se construyó dos tramos de prueba adicionales, uno en la localidad de Chinquihue (Puerto Montt) y otro en Padre Las Casas (Temuco). Las fechas de construcción fueron enero de 2005 y enero de 2006, respectivamente. Se consideró losas de longitudes entre 88 cm y 350 cm, con espesores entre 8 y 15 cm, construidas sobre subbase granular.

Las losas con espesores de 12 y 15 centímetros, con 175 y 350 centímetros de longitud respectivamente, presentan un bajo nivel de deterioro en comparación con las losas de menores espesores, presentando un comportamiento mucho mejor de lo esperado. En las Figuras 2.42 y 2.43 se muestran las losas del tramo de prueba Padre Las Casas a los 374.000 Ejes Equivalentes, donde comienza a presentarse con mayor frecuencia el agrietamiento transversal, longitudinal y esquina, este último se presenta con mayor claridad en losas de mayor longitud.

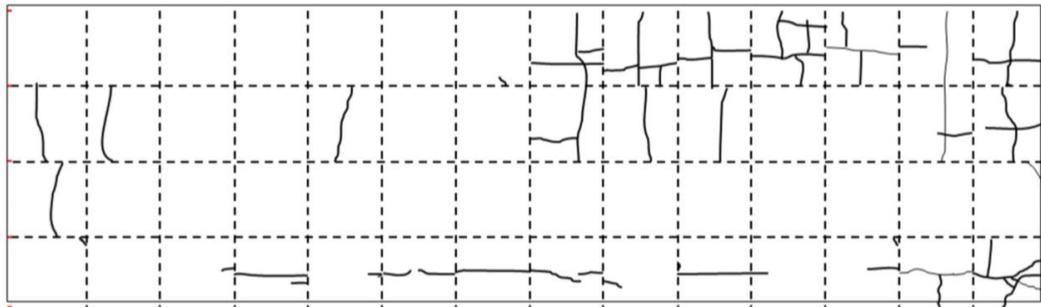


Figura 2.42 Losas de 12[cm] de espesor, 175 [cm] de longitud, Padre Las Casas

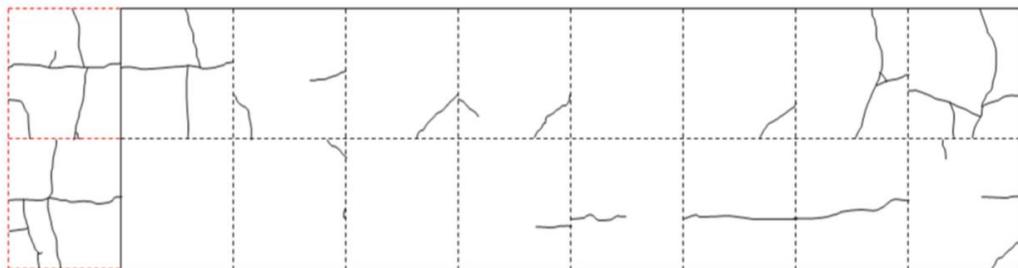
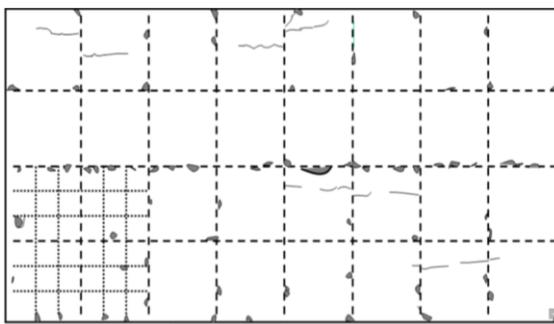


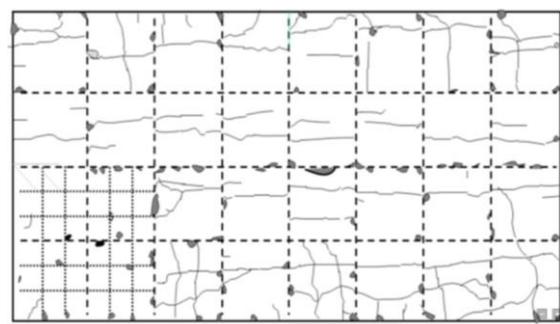
Figura 2.43 Losas de 15 [cm] de espesor, 350 [cm] de longitud, Padre Las Casas

Para el caso de losas con menores espesores, el deterioro comienza a generarse a los 100.000 Ejes Equivalentes aproximadamente en el caso del tramo de prueba Chiquihue, y 220.000 en Padre Las Casas. El principal agrietamiento experimentado es de tipo longitudinal, ver Figuras 2.44 y 2.45.

Tramo de Prueba Chiquihue



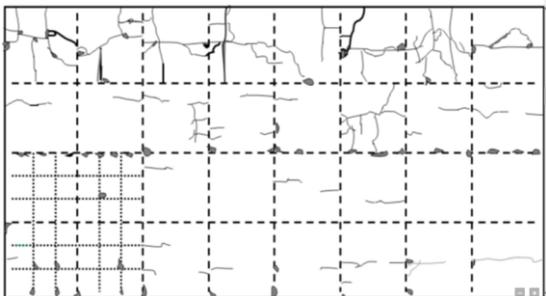
**Figura 2.44 Losas de 10 [cm] de espesor.
Fecha de examen 28-ene-2007/
106.000 Ejes Equivalentes**



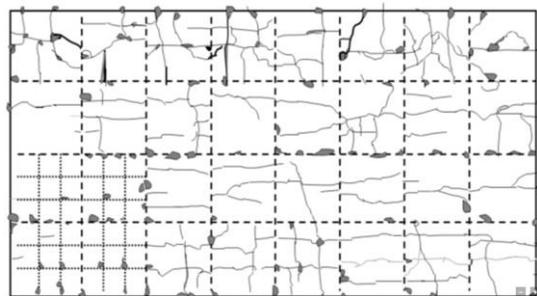
**Figura 2.45 Losas de 10 [cm] de espesor.
Fecha de examen 08-mar-2009/
219.000 Ejes Equivalente**

Los pavimentos de losas con espesores de 8 centímetros en los tramos de prueba, mostraron un temprano agrietamiento en la primera pista construida en la línea de losas que se encuentra al lado de la berma, situación que es atribuible al efecto que el tránsito obligado a pasar lo más cerca posible de la berma mientras se construía la segunda pista, además las primeras pistas construidas fueron abiertas al tránsito prematuramente (11 y 8 días de construcción en Chiquihue y Padre Las Casas respectivamente), lo cual puede explicar el alto nivel de deterioro. Sin embargo la segunda pista presenta un alto nivel de agrietamiento de tipo longitudinal al alcanzar los 100.000 Ejes Equivalentes y más aún cuando sobrepasa los 200.000 Ejes Equivalentes tal como muestran las Figuras 2.46, 2.47, 2.48, 2.49.

Tramo de Prueba Chiquihue

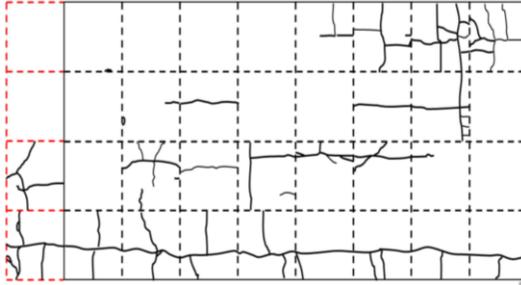


**Figura 2.46 Losas de 8 [cm] de espesor.
Fecha de examen 26-nov-2006/
99.000 Ejes Equivalentes.**

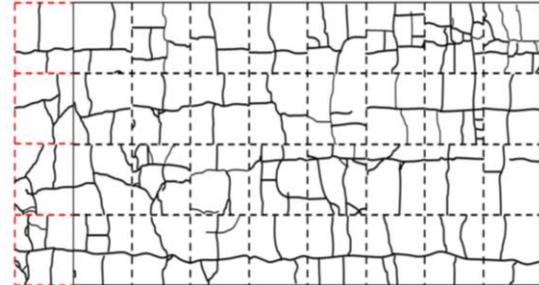


**Figura 2.47 Losas de 8 [cm] de espesor.
Fecha de examen 08-mar-2009/
219.000 Ejes Equivalentes**

Tramo de Prueba Padre Las Casas



**Figura 2.48 Losas de 8 [cm] de espesor.
Fecha de examen 26-nov-2006/
99.000 Ejes Equivalentes**



**Figura 2.49 Losas de 8 [cm] de espesor.
Fecha de examen 08-mar-2009/
219.000 Ejes Equivalentes**

Los seguimientos y exámenes realizados en el tiempo a estos pavimentos permitieron comprobar que se trataba de un método muy prometedor. El comportamiento mostrado por las losas fue en la mayoría de los casos bastante satisfactorio. Esto generó la necesidad de desarrollar una metodología de diseño para predecir el comportamiento de los pavimentos de losas de dimensiones superficiales optimizadas. Los métodos tradicionales de diseño de pavimentos de concreto han sido validados para pavimentos con losas de longitudes mayores o iguales al ancho de un carril. Los tipos de falla observados en pavimentos tradicionales no son necesariamente los mismos de los pavimentos de losas de dimensiones superficiales optimizadas. En los primeros, los deterioros más importantes son el agrietamiento transversal y el escalonamiento. En los últimos, el modo de falla dominante en un gran número de casos es el agrietamiento longitudinal, observándose además agrietamientos transversales y de esquina.

2.3.2 INVESTIGACIÓN PREVIA DEL MÉTODO DE DISEÑO DE LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO

Para el método de diseño de losas de dimensiones superficiales optimizadas, en pavimentos de concreto hidráulico, tomaremos como fundamento teórico las investigaciones realizadas por instituciones especializadas en el área de pavimentos. Estas instituciones se le conocen a estos pavimentos de concreto hidráulico como “losas cortas”.

La investigación que describimos a continuación fue financiada por la empresa TCPavements® de Chile y ejecutada por la Universidad de Illinois, Estados Unidos, entidad líder en la investigación de pavimentos, cuyo informe final fue emitido en agosto de 2009, con el código de: Reporte de Investigación No. ICT-09-953.

Informe de la investigación de la Universidad de Illinois

- **El laboratorio y pista de la investigación**

En la Universidad de Illinois, existe un laboratorio avanzado de ingeniería e investigación en transporte, que cumple con todos los requerimientos AASHTO:

La figura 2.50 muestra las Instalaciones para la investigación de Illinois. Fue allí donde se llevó a cabo la investigación del pavimento.

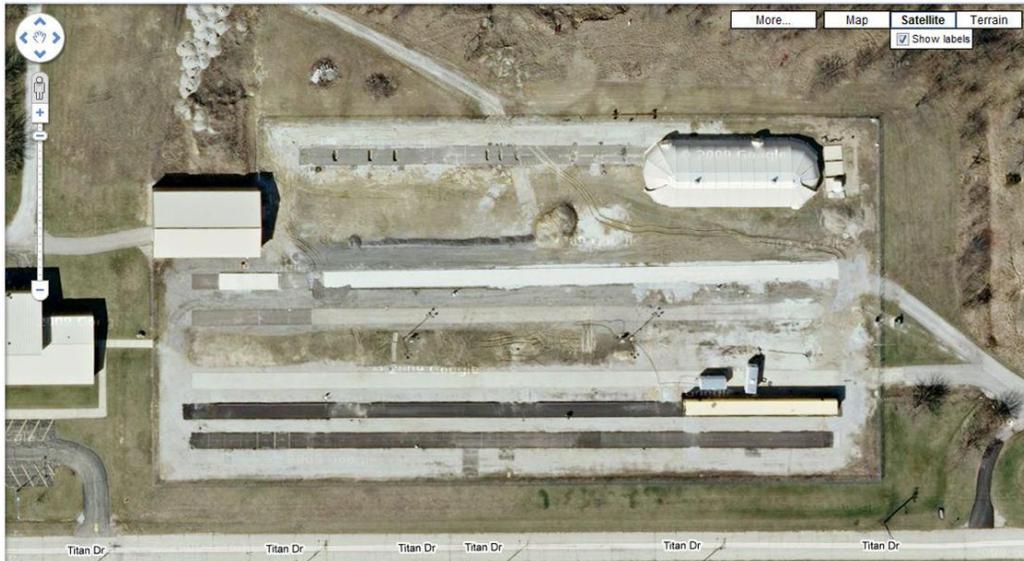


Figura 2.50 Laboratorio del acelerador de pruebas para pavimento (Google Maps).

El objetivo de la investigación de la universidad de Illinois, fue demostrar que al reducir las dimensiones superficiales de las losas, los esfuerzos en el pavimento se ven reducidos. Los esfuerzos en la losas de concreto son una función de las condiciones ambientales y de carga. En la investigación de la Universidad de Illinois los esfuerzos disminuyeron modificando el tamaño de las losas, desde el más común 3.60 metros por cada lado, hasta aproximadamente 1.80 metros por cada lado de las losas.

CAPITULO III:

**DISEÑO Y COMPORTAMIENTO DE LAS
LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES
OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE
CONCRETO HIDRÁULICO**

3.1 INTRODUCCIÓN

Los pavimentos de concreto, también denominados como Pavimentos Rígidos, utilizan una capa de concreto, simple o armado, como superficie de rodadura para la circulación vehicular, la que se encuentra apoyada directamente sobre una base o subbase.

Debido a que el concreto presenta deformaciones de acortamiento durante su operación, las que se producen desde el fraguado, debe ser dimensionado en secciones de un largo máximo para configurar lo que se denomina una “losa de concreto”, y que da lugar a las denominadas juntas del pavimento, este dimensionamiento permite controlar el agrietamiento, las deformaciones y los esfuerzos asociados por alabeo y cargas.

El efecto de estas deformaciones es generalmente el levantamiento de los bordes en las juntas, lo que produce y se denomina “alabeo de la losa”, y que tiene como consecuencia una disminución de las zonas de apoyo sobre la base. Debido al peso de la zona levantada, este alabeo le induce esfuerzos de tracción al concreto, las cuales aumentan más al ser dicha zona cargada por el tránsito, lo cual constituye el principal criterio que busca controlar el diseño del pavimento de concreto.

Debido a que la rigidez del concreto es mucho mayor que la rigidez del material de apoyo de la base granular que la soporta, la capacidad de carga está principalmente determinada por la capacidad de la losa a deformarse y soportar estas deformaciones

repetitivas al paso de los vehículos, efecto que le genera esfuerzos durante su uso, y que la llevan a fallar principalmente por fatiga (acciones repetitivas de carga del tránsito).

La losa tiene un gran efecto repartidor de cargas, las cuales provienen de su peso propio y de las cargas que sobre ella circulan, por lo que la presión de contacto entre la losa y la base es sólo una pequeña fracción de la carga superficial, efecto que se denomina usualmente como “acción de viga” de los pavimentos rígidos y que le permiten no exigir tanta capacidad a la base de apoyo, comparándolo con otros tipos de pavimentos, como en el caso del pavimento flexible.

En el presente capítulo presentaremos una descripción teórica de los esfuerzos en el pavimento rígido, sobre las juntas realizadas en las losas y la definición sobre que es el análisis por el método de elementos finitos así como la realización de diversas pruebas utilizando este método.

3.2 ESFUERZOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

3.2.1 ESFUERZOS DEBIDO AL ALABEO DE LA LOSA

3.2.1.1 Preámbulo

Durante el día cuando la temperatura en la parte más alta de las losas es mayor que en el fondo, la parte de encima tiende a expandirse con respecto al eje neutro durante el cual el fondo tiende a contraerse. Sin embargo, el peso de la losa restringe la expansión y la contracción de la misma, de esta manera, el esfuerzo de compresión son inducidos

en lo alto de la losa cuando el esfuerzo de tensión ocurre en el fondo. En la noche cuando la temperatura en la parte superior de la losa es inferior que en el fondo, la parte superior tiende a contraerse con respecto al fondo, así, el esfuerzo de tensión son inducidos en la parte superior y los esfuerzos de compresión en la parte inferior.

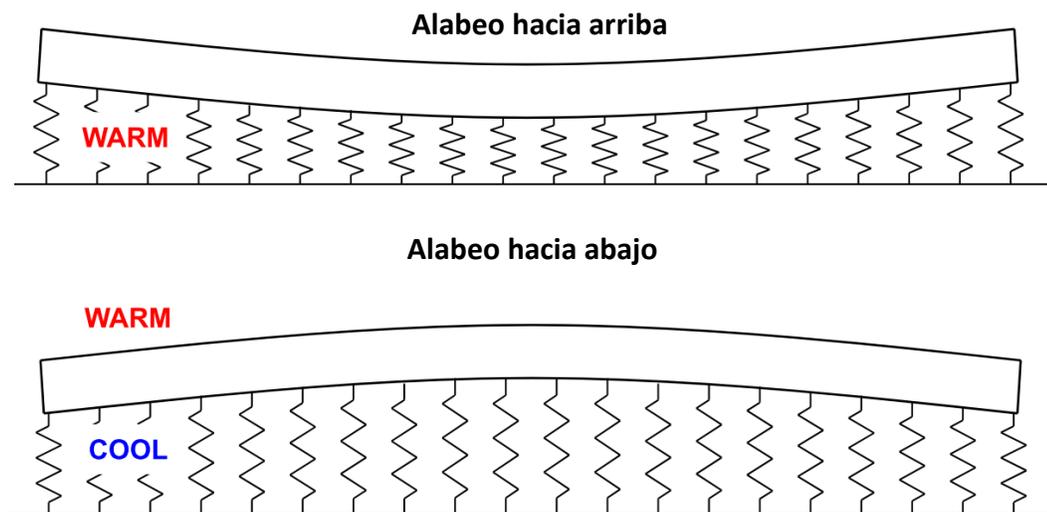


Figura 3.1 Curvatura debido al gradiente de temperatura.

Otra explicación de los esfuerzos debido al alabeo puede ser hecha por la teoría de placa sobre una fundación líquida (Winkler). Una fundación líquida se caracteriza por una serie de resortes anexos a las placas. Cuando la temperatura en la parte alta de la losa es mucho mayor que en el fondo, la parte alta es más larga que el fondo y la losa se curva hacia abajo. Los resortes de los bordes de afuera están en compresión y empujan la losa hacia arriba donde los resortes en el interior están en tensión y halan la losa hacia abajo. Como resultado, en lo alto de la losa se encuentra en compresión y el fondo está en tensión.

Cuando la temperatura en lo alto es más bajo que en el fondo, la losa se curva hacia arriba. Los resortes exteriores halan la losa abajo y donde los resortes interiores empujan la losa hacia arriba, así resulta en tensión en lo alto y compresión en el fondo.

Westergaard (1926) desarrollo ecuaciones para la determinación de los esfuerzos debido a la curvatura en pavimentos de concreto basados en la teoría de la placa.

3.2.1.2 Flexión de una placa infinita

La diferencia entre una viga y una placa es que la viga esta esforzada en una dirección solamente, el cual la placa esta esforzada en dos direcciones. Para esfuerzos en dos direcciones, el esfuerzo ϵ_x en la dirección x puede ser determinado por la Ley de Hooke generalizada:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \text{ Ec. 3.1}$$

En donde E es el módulo elástico del concreto. El primer término de la derecha de la ecuación anterior indica el esfuerzo en la dirección x causado por una tensión en esa dirección, y el segundo término indica el esfuerzo causado por tensión en la dirección y. Similarmente:

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} \text{ Ec. 3.2}$$

Cuando la placa ha flexionado en la dirección x, ϵ_y debería ser igual a cero debido a que la placa es tan ancha y muy confinada que no deberían ocurrir esfuerzos a menos que muy cerca del borde igualando la ecuación anterior a cero se obtiene:

$$\sigma_y = \nu \sigma_x \quad \text{Ec. 3.3}$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación de ϵ_x y resolviendo para σ_x se obtiene:

$$\sigma_x = \frac{E \epsilon_x}{1 - \nu^2} \quad \text{Ec. 3.4}$$

La ecuación anterior indica el esfuerzo en la dirección de flexión, y la ecuación de σ_y indica el esfuerzo en la dirección perpendicular a la de flexión.

Cuando la flexión ocurre en las direcciones x y y como en el caso de curvatura por temperatura, los esfuerzos en ambas direcciones deben ser sobrepuesto para obtener el esfuerzo total. El máximo esfuerzo en una losa infinita debido a curvatura por temperatura pueda ser obtenida asumiendo que la losa está completamente confinada en las direcciones x y y .

Sea Δt el diferenciable de temperatura entre la parte alta y baja de la losa y α_t el coeficiente de expansión térmica del concreto.

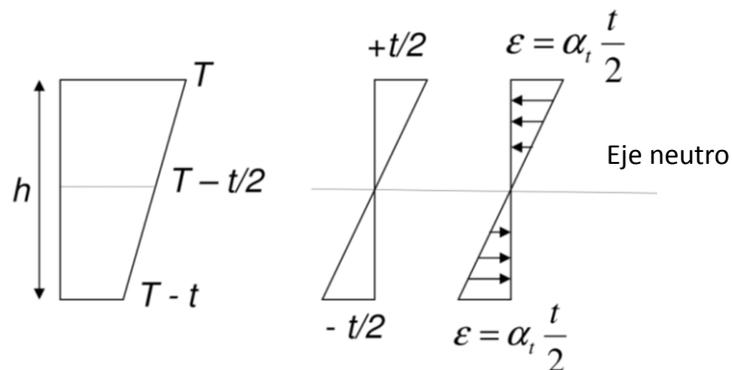


Figura 3.2 Diferencial de temperatura en una losa.

Si la losa es libre de moverse y la temperatura en lo alto de la losa es más mayor que en el fondo, en la cima de la losa se expandirá por un esfuerzo de $\alpha_t \Delta t/2$ y en el fondo se contraerá con el mismo esfuerzo. Si la losa está completamente restringida al movimiento, resultará un esfuerzo de compresión en la cima y un esfuerzo de tensión en el fondo. El máximo esfuerzo es:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\alpha_t \Delta t}{2} \quad \text{Ec. 3.5}$$

De la ecuación 3.4, el esfuerzo en la dirección x debido a la flexión es:

$$\sigma_x = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1-\nu^2)} \quad \text{Ec. 3.6}$$

La ecuación anterior es debida a esfuerzo en la dirección y causada por la flexión en la dirección y, de la ecuación 3.3 el esfuerzo en la dirección x causado por la flexión en la dirección y es:

$$\sigma_x = \frac{\nu E \alpha_t \Delta t}{2(1-\nu^2)} \quad \text{Ec. 3.7}$$

El total de esfuerzos es la sumatoria de la ecuación 3.6 y 3.7 es:

$$\sigma_x = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1-\nu^2)} (1 + \nu) = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1-\nu)} \quad \text{Ec. 3.8}$$

Para el análisis de arriba está basado en asumir que la distribución de la temperatura es lineal a través de la profundidad de la losa. Esta es una aproximación a la realidad porque la distribución de temperatura real es altamente no lineal.

3.2.1.3 Esfuerzo por alabeo en losas finitas

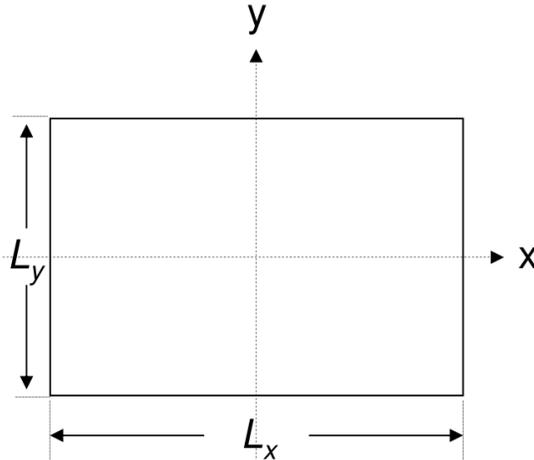


Figura 3.3 Representación de una losa finita.

Sea una losa finita con longitud L_x en la dirección x y L_y en la dirección y . El total del esfuerzo en la dirección x puede ser expresada como:

$$\sigma_x = \frac{C_x E \alpha_t \Delta t}{2(1-\nu^2)} + \frac{C_y E \alpha_t \Delta t}{2(1-\nu^2)} = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1-\nu^2)} (C_x + \nu C_y) \text{ Ec. 3.9}$$

En donde C_x y C_y son los factores de corrección para una losa finita. El primer término de la ecuación anterior es el esfuerzo debido a la flexión en la dirección x y el segundo término es el esfuerzo debido a la flexión en la dirección y . En forma similar, el esfuerzo en la dirección y es:

$$\sigma_y = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1-\nu^2)} (C_y + \nu C_x) \text{ Ec. 3.10}$$

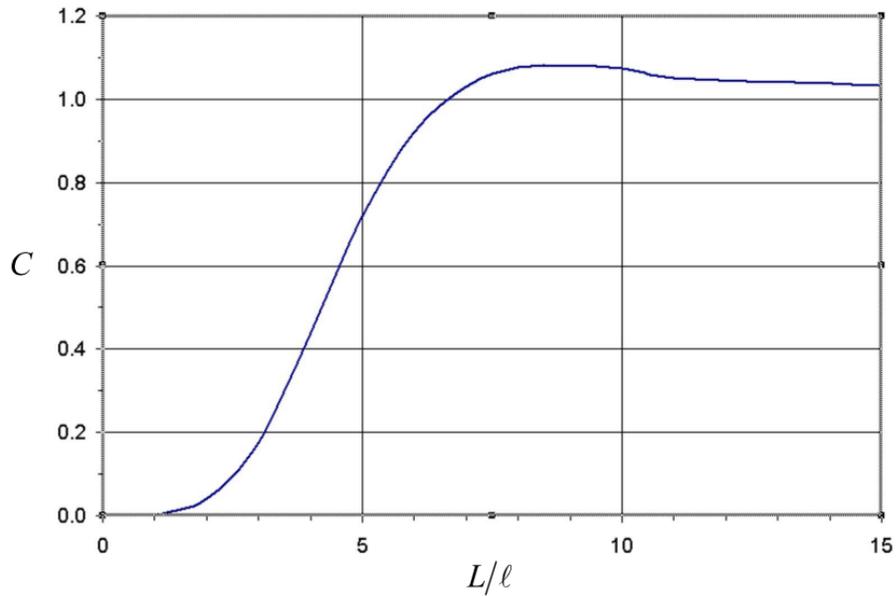


Figura 3.4 Factor de Corrección para losas finitas.

Bradbury (1938) basado en el análisis de Westergaard, desarrolló una carta simple para determinar C_x y C_y mostrada en la figura anterior. El factor de corrección C_x depende de L_x/ℓ y el factor de corrección C_y depende de L_y/ℓ , donde ℓ es el radio de relación de rigidez (stiffness) definido como:

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)K}} \quad \text{Ec. 3.11}$$

En donde E es el módulo de elasticidad del concreto, h es el espesor de la losa, ν es la relación de Poisson del concreto y k es el módulo de reacción de la subrasante. Las ecuaciones anteriores de σ_x y σ_y dan el esfuerzo máximo interior en el centro de la losa. Los esfuerzos de borde en el semi-espacio de la losa puede ser determinado por:

$$\sigma = \frac{E\alpha_t\Delta t}{2} \quad \text{Ec. 3.12}$$

3.2.2 ESFUERZOS DEBIDO A LAS CARGAS

3.2.2.1 Preámbulo

Pueden ser utilizados tres métodos para determinar los esfuerzos y también las deflexiones en pavimentos de concreto hidráulicos:

- Fórmulas de forma cerrada.
- Cartas de Influencia-Pickett and Ray (1951).
- Programas de Computadora utilizando el Método de Elementos Finitos.

Las fórmulas originalmente desarrolladas por Westergaard pueden ser aplicadas solamente por una carga de una llanta simple con un área de influencia circular, semicircular, elíptica ó semi-elíptica. Las cartas de influencia desarrolladas por Pickett y Ray (1951) pueden ser aplicadas para cargas llantas múltiples y de cualquier configuración. Ambos métodos son aplicables solamente para una losa larga y con una fundación líquida, la base líquida asume la función de la subrasante y esta pasa ser un conjunto de resortes. Si las cargas son aplicadas para losas múltiples sobre una fundación líquida, sólida o fundación de capas con transferencias de carga a través de juntas, podría ser usado el método de elementos finitos.

3.2.2.2 Fórmulas de forma cerrada

Estas fórmulas son aplicadas solamente para losas muy largas con carga de llanta simple aplicada cerca de la esquina, en el interior de una losa a la distancia considerable de cada borde y cerca del borde lejos de cualquier esquina.

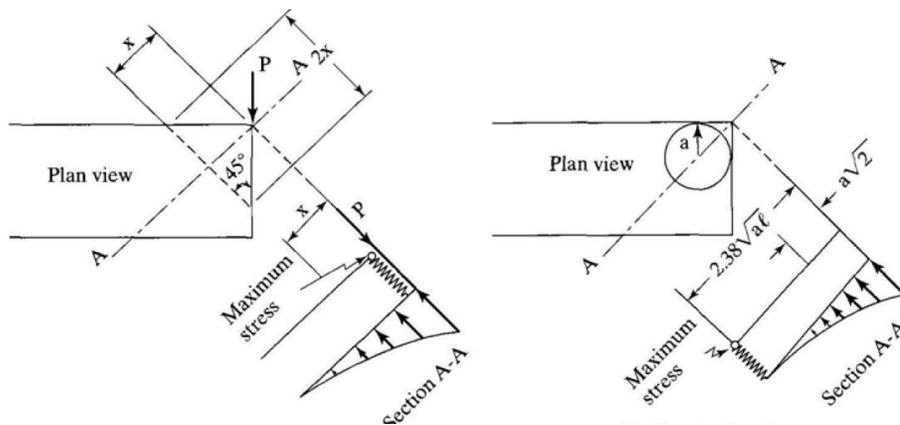


Figura 3.5 Representación de una esquina cargada

- **Esquinas Cargadas.**

La fórmula de Glodbeck (1919) y Older (1924) es una de las más antiguas para el uso en el diseño de pavimentos de concreto. La fórmula está basada sobre una concentración de carga P aplicada en la esquina de la losa mostrada en la figura 3.6. Cuando la carga es aplicada en la esquina, el esfuerzo en la losa es simétrico con respecto a la diagonal. Para una sección que atraviesa a la distancia x desde la esquina, el momento de flexión es Px y el ancho de la sección es 2x. Cuando el soporte de la subrasante es negligente y la losa es considerada como una viga cantilever, el esfuerzo de tensión en lo alto de la losa es:

$$\sigma_c = \frac{Px}{\frac{1}{6}(2x)h^2} = \frac{3P}{h^2} \quad \text{Ec. 3.13}$$

En donde σ_c es el esfuerzo debido a la carga en la esquina, P es la carga concentrada y h es el espesor de losa. Observar que σ_c es independiente de x, es decir, cada sección cruzada no importando que tan lejos de la esquina esté, tendrá el mismo esfuerzo. Si la carga es realmente una carga concentrada aplicada justo en la esquina, la ecuación

anterior es una solución exacta porque en la sección cruzada cerca a la carga con x aproximándose a 0, la reacción de la subrasante es muy pequeña y puede ser ignorada.

La Figura muestra una carga circular aplicada cerca de la esquina de una losa. Debido a que el esfuerzo máximo de la sección no es cerca de la esquina, la fuerza de reacción total de la subrasante es absolutamente grande y no puede ser ignorada. Westergaard (1926) aplicó un método de aproximaciones sucesivas y obtuvo las siguientes dos ecuaciones:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right)^{0.6} \right] \text{ Ec. 3.14}$$

$$\Delta_c = \frac{P}{k\ell^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right) \right] \text{ Ec. 3.15}$$

En donde Δ_c es la deflexión de la esquina, ℓ es el radio relativo de rigidez (stiffness), a es el radio de contacto y k es el módulo de reacción de la subrasante. Westergaard encontró también que el momento máximo ocurre a la distancia de $2.38 \sqrt{a\ell}$ desde la esquina. Para una carga concentrada con $a=0$ las dos ecuaciones anteriores son idénticas. Ioannides (1985) aplicó el método de elementos finitos para evaluar la solución de Westergaard. Sugirieron el uso de las siguientes dos ecuaciones:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{c}{\ell} \right)^{0.6} \right] \text{ Ec. 3.16}$$

$$\Delta_c = \frac{P}{k\ell^2} \left[1.205 - 0.69 \left(\frac{c}{\ell} \right) \right] \text{ Ec. 3.17}$$

Donde c es la longitud lateral de un área de contacto cuadrada. Encontraron que el momento máximo ocurre a una distancia de $1.80c^{0.30}\ell^{0.59}$ desde la esquina. Si la carga es aplicada a través de un área circular, el valor de c debe ser seleccionada tal que el cuadrado y el círculo tengan la misma área de contacto: $c = 1.772a$

- **Cargado en el interior de la losa.**

La antigua fórmula desarrolla por Westergaard (1926) por el esfuerzo en el interior de una losa bajo un área circular cargada de radio a es:

$$\sigma_i = \frac{3(1+\nu)P}{2\pi h^2} \left(\ln \frac{\ell}{b} + 0.6159 \right) \text{ Ec. 3.18}$$

Donde ℓ es el radio relativo de rigidez (stiffness) y

$b=a$ cuando $a \geq 1.724h$

$b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h$ cuando $a < 1.724h$

Para una relación de Poisson de 0.15 y en términos de base 10 logarítmica la ecuación de σ_i puede ser escrita como:

$$\sigma_i = \frac{0.316P}{h^2} \left[4 \log\left(\frac{\ell}{b}\right) + 1.069 \right] \text{ Ec. 3.19}$$

La ecuación de deflexión debida al cargado en el interior de la losa (Westergaard, 1939) es:

$$\Delta_i = \frac{P}{8k\ell^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{a}{2\ell}\right) - 0.673 \right] \left(\frac{a}{\ell}\right)^2 \right\} \text{ Ec. 3.20}$$

- **Cargado en los bordes.**

El esfuerzo debido al cargado en los bordes fue presentado por Westergaard (1926, 1933, 1948) en diferentes documentos. En los documentos de 1948, presentó la solución generalizada para esfuerzos y deflexiones máximos producidos por áreas elípticas y semielípticas colocadas en los bordes de la losa. Ajustando la longitud mayor y menor de los semi-ejes de la elipse al radio de contacto “a”, conducen a la correspondiente solución para un área circular ó semi-circular cargada. En el caso del semi-circulo, su borde recto está en línea con el borde de la losa. Los resultados obtenidos de estas nuevas fórmulas difieren significativamente de las fórmulas del apartado anterior.

De acuerdo a Ioannides (1985) las siguientes 8 ecuaciones son las mejores para su utilización:

$$\sigma_{e(circulo)} = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 1.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1.18(1+2\nu)a}{\ell} \right] \text{ Ec. 3.21}$$

$$\sigma_{e(semi-circulo)} = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 3.84 - \frac{3\nu}{3} + \frac{(1+2\nu)a}{2\ell} \right] \text{ Ec. 3.22}$$

$$\Delta_{e(circulo)} = \frac{\sqrt{2+1.2\nu\rho}}{\sqrt{Eh^3K}} \left[1 - \frac{(0.76+0.4\nu)a}{\ell} \right] \text{ Ec. 3.23}$$

$$\Delta_{e(circulo)} = \frac{\sqrt{2+1.2\nu\rho}}{\sqrt{Eh^3K}} \left[1 - \frac{(0.323+0.17\nu)a}{\ell} \right] \text{ Ec. 3.24}$$

Para $\nu=0.15$, las cuatro ecuaciones anteriores pueden ser escritas como:

$$\sigma_{e(circulo)} = \frac{0.803P}{h^2} \left[4 \log\left(\frac{\ell}{a}\right) + 0.666\left(\frac{a}{\ell}\right) - 0.034 \right] \text{ Ec. 3.25}$$

$$\sigma_{e(semi-circulo)} = \frac{0.803P}{h^2} \left[4 \log\left(\frac{\ell}{a}\right) + 0.282\left(\frac{a}{\ell}\right) - 0.650 \right] \text{ Ec. 3.26}$$

$$\Delta_{e(circulo)} = \frac{0.431P}{k\ell^2} \left[1 - 0.82\left(\frac{a}{\ell}\right) \right] \text{ Ec. 3.27}$$

$$\Delta_{e(semi-circulo)} = \frac{0.431P}{k\ell^2} \left[1 - 0.349\left(\frac{a}{\ell}\right) \right] \text{ Ec. 3.28}$$

- **LLANTAS DUALES**

La mayoría de fórmulas presentadas hasta este momento están basadas sobre un área cargada circular. Cuando una carga está aplicada sobre un sistema de llantas duales, es necesario convertirlas en un área circular. Si el total de cargas es el mismo pero el área de contacto del círculo es igual a las de llantas duales, los resultados de esfuerzos y deflexiones serán muy largos. Por lo tanto, para un cargado total dado, un área circular más larga debería ser usada para pavimentos rígidos.

La figura 3.7 muestra un sistema de llantas duales. Se ha encontrado que los resultados satisfactorios pueden ser obtenidos si el círculo tiene un área igual al área de contacto de las llantas duales más el área entre ellas, como es indicado por el área tachada mostrada en la siguiente figura. Si P_d es la carga sobre una llanta y q es la presión de contacto, el área de cada llanta es:

$$\frac{P_d}{q} = \pi(0.3L)^2 + (0.4L)(0.6L) = 0.5227L^2 \text{ Ec. 3.29}$$

$$L = \sqrt{\frac{P_d}{0.5257q}} \text{ Ec. 3.30}$$

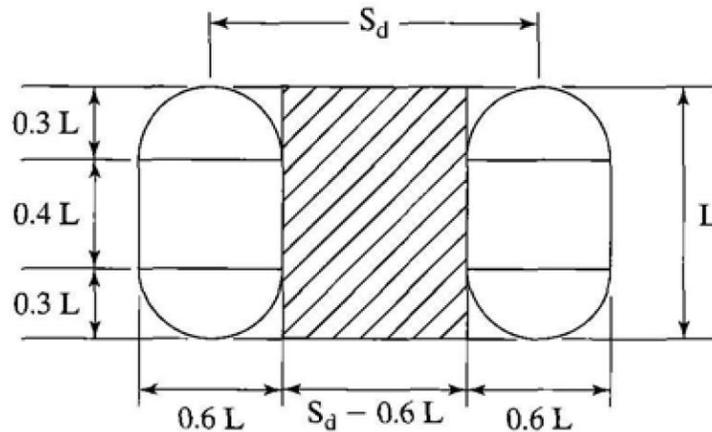


Figura 3.7 Método para convertir llantas duales en área circular.

El área de un círculo equivalente es:

$$\pi a^2 = 2 \times 0.5227L^2 + (S_d - 0.6L)L = 0.4454L^2 + S_d L \text{ Ec. 3.31}$$

Sustituyendo el valor de $L = \sqrt{\frac{P_d}{0.5257q}}$ en la ecuación 3.31 se obtiene:

$$\pi a^2 = \frac{0.8521P_d}{q} + S_d \sqrt{\frac{P_d}{0.5257q}} \text{ Ec. 3.32}$$

Así, el área de contacto es:

$$a = \sqrt{\frac{0.8521P_d}{q\pi} + \frac{S_d}{\pi} \left(\frac{P_d}{0.5227q}\right)^{1/2}} \text{ Ec. 3.33}$$

Limitaciones de las conversiones

- Aplicable sólo a carga de rueda individual con zona de contacto circular.
- Ubicaciones de cargas son fijas (es decir, interior, borde y esquina).
- Aplicable sólo a grandes losas.
- Asume soporte de la subrasante completo.
- No se tiene en cuenta la transferencia de carga a través de las juntas.

3.2.2.3 Cartas de influencia por Pickett y Ray (1951)

Las cartas de influencia están basadas en fundaciones líquidas (Pickett y Ray, 1951) y fueron usadas previamente por la Asociación del Cemento Pórtland para el diseño de pavimentos rígidos. Las cartas están basadas en la teoría de Westergaard con una relación de Poisson de 0.15 para las losas de concreto. Solamente están disponibles las cartas para el cargado en el interior y el cargado en los bordes. El cargado en el interior ha sido usado para el diseño de pavimentos de aeropuertos (PCA, 1955) y las de cargado en los bordes para el diseño de pavimentos de alto tráfico (PCA, 1966).

- **Cargado en el interior de la losa.**

La figura 3.8 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. Para usar las cartas, es necesario determinar los radios de relación de rigidez ℓ de acuerdo a

la ecuación
$$\ell = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)K}}$$

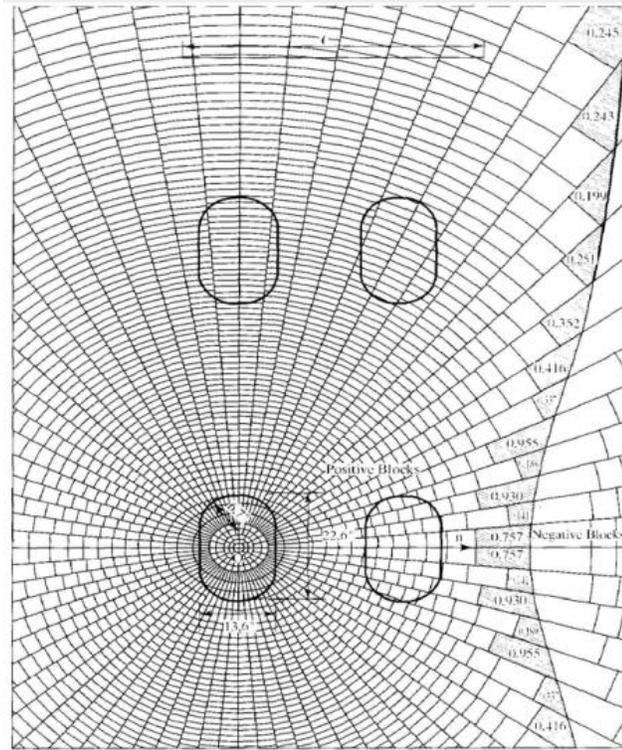


Figura 3.8 Carta de Influencia para la aplicación de determinación de momentos

Por ejemplo, si ℓ es 57.1 pulg. (1.45m), la escala en lo alto de la figura es 57.1 pulg. (1.45m). Esta escala debería 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. Para continuar el número de bloques N cubierta por la impresión de la llanta, el momento M en la dirección n puede ser determinada por:

$$M = \frac{q\ell^2 N}{10000} \text{ Ec. 3.34}$$

En donde q es la presión de contacto. El esfuerzo es determinado dividiendo el momento por la sección del módulo:

$$\sigma_i = \frac{6M}{h^2} \text{ Ec. 3.35}$$

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° 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.

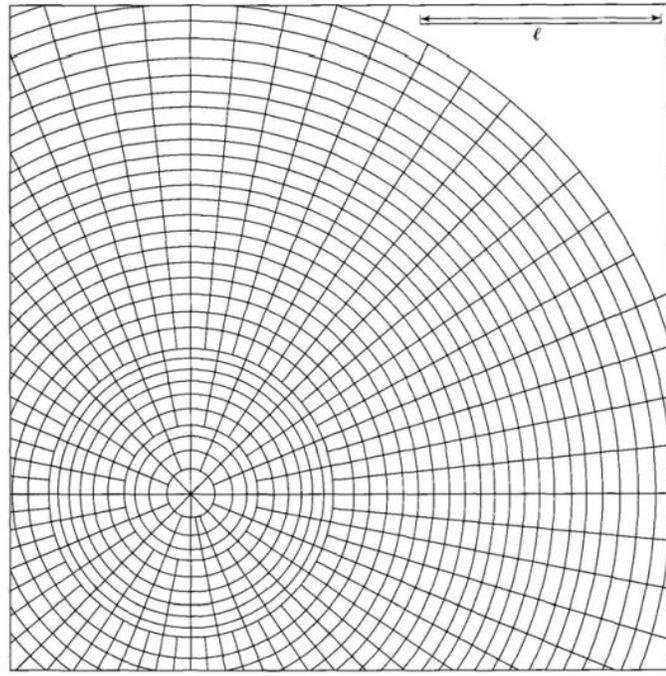


Figura 3.9 Carta de Influencia para la deflexión debido al cargado en el interior

La Figura 3.9 muestra la deflexión en las cartas de influencia debido al cargado 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 3.8.

Después que el número de bloques cubiertos por la llanta son contabilizados, la deflexión puede ser determinada por:

$$\Delta_i = \frac{0.0005q \sum N}{D} \text{ Ec. 3.36}$$

En donde D es el módulo de rigidez:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \text{ Ec. 3.37}$$

- **Cargado en los bordes.**

Las figuras muestran las cartas de influencia para momentos y deflexiones en el punto O en los bordes de la losa. El uso de las cartas es similar al caso del cargado del interior de la losa y se utilizan también las mismas fórmulas.

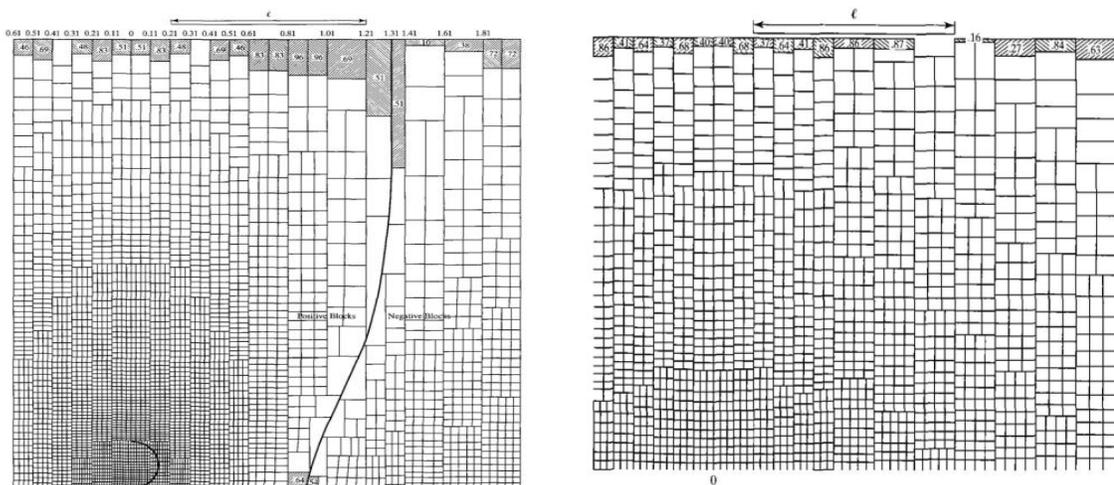


Figura 3.10 Cartas de Influencia debido al cargado en el borde de la losa

3.2.3 ESFUERZOS DEBIDO A LA FRICCIÓN

3.2.3.1 Introducción

La fricción entre una losa de concreto y su fundación causa esfuerzos de tensión en el concreto, en el acero de refuerzo y a veces en las barras de amarre. Para el diseño del pavimento de concreto, el espaciamiento entre las juntas de contracción debe ser escogido de tal forma que los esfuerzos debido a la fricción no causen fracturas al concreto. Para espaciamientos de juntas más largos, el acero de refuerzo se debe ser suministrado para evitar los esfuerzos causados por la fricción. El número de barras ligadas requeridas es controlado por la fricción.

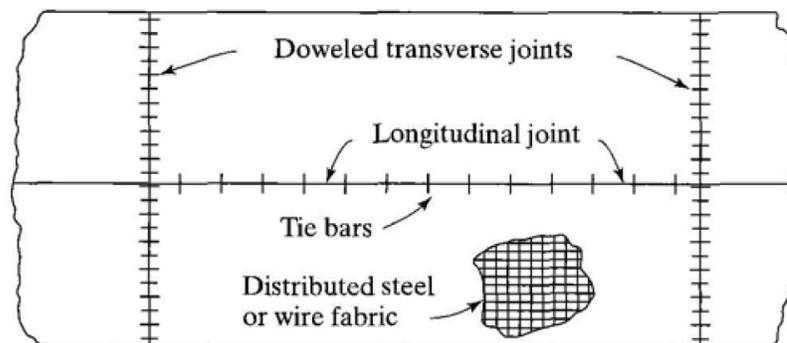


Figura 3.11 muestra el arreglo de juntas y acero en el pavimento de concreto.

3.2.3.2 Efecto de los cambios de volumen en el concreto hidráulico

El cambio de volumen causado por la variación de temperatura y humedad tiene dos aspectos importantes en el concreto hidráulico. Primero, esto induce a los esfuerzos de tensión y causa las grietas al concreto. Segundo, esto causa la abertura en la junta y deficiencia en la transferencia de carga.

- **Esfuerzo en el concreto hidráulico.**

Debido a la simetría, la losa tiende a moverse de uno de sus extremos al centro, pero la subrasante previene que ésta se mueva; así, los esfuerzos friccionantes son desarrollados entre la losa y la subrasante. La cantidad de fricción depende del movimiento relativo siendo cero en el centro donde no hay movimiento y máximo a cualquier distancia desde el centro donde el movimiento es completo. Para propósitos prácticos, el coeficiente de fricción promedio f_a puede ser asumido. El esfuerzo de tensión en el concreto es mucho mayor en el centro y puede ser determinado por la ecuación de la fuerza friccionante por unidad de ancho de la losa $\gamma_c h L f_a / 2$, a la fuerza de tensión $\sigma_c h$, así:

$$\sigma_c = \frac{\gamma_c L f_a}{2} \text{ Ec. 3.38}$$

En donde σ_c es el esfuerzo en el concreto, γ_c es la unidad de peso del concreto, L es la longitud de la losa y f_a es el coeficiente de fricción promedio entre la losa y la subrasante (usualmente se toma el valor de 1.5).

- **Abertura de Juntas.**

El espaciamiento de juntas en pavimentos de concreto depende de las características de contracción del concreto más que el esfuerzo en el mismo. El espaciamiento en juntas más largas causa que éstas se abran completamente y disminuya la eficiencia en la transferencia de cargas. La abertura de una junta puede ser calculada aproximadamente por (Darter y Barenberg, 1977):

En donde ΔL es la abertura de la junta causada por el cambio de temperatura y contracción por el secado del concreto; αt es el coeficiente de expansión térmica del concreto, generalmente de 9 a $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; ϵ es el coeficiente de contracción de secado del concreto, aproximadamente de 0.5 a 2.5×10^{-4} ; L es el espaciamiento de la junta ó la longitud de la losa; ΔT es el rango de temperatura; y C es el factor de ajuste debido a la fricción de la losa-subbase, su valor es de 0.65 para base estabilizada y 0.8 para subbase granular.

3.3 DEFINICIÓN DE JUNTAS Y TRANSFERENCIA DE CARGA

3.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Para realizar el diseño de un pavimento rígido, se debe contar con conocimiento de los métodos disponibles y del comportamiento del concreto, así con información mínima confiable que permita realizar la mejor aproximación de variables de entrada que lleven a un diseño de calidad que asegure la vida útil del pavimento.

En este artículo se indican los parámetros que se debe considerar para la realización del diseño de un pavimento de concreto.

3.3.2 ESPACIAMIENTO Y TIPO DE JUNTAS

El diseño de las juntas, que deben realizarse en el concreto, forma parte integrante del sistema estructural de los pavimentos de concreto, ya que sus características (espaciamiento, tipo, dimensiones, barras, sellos, etc.) Son un factor importante a considerar con relación a los esfuerzos de la losa y la durabilidad del pavimento y por lo

tanto condicionan importantemente su diseño y comportamiento en servicio. Se distinguen los siguientes tipos de juntas:

- Juntas longitudinales.
- Juntas transversales de dilatación.
- Juntas transversales de contracción.
- Juntas transversales de construcción.

En la Figura 3.12 se presentan los elementos principales que componen un pavimento de concreto, de manera de identificar en ella los tipos de juntas y barras, las que serán descritas en los contenidos siguientes.

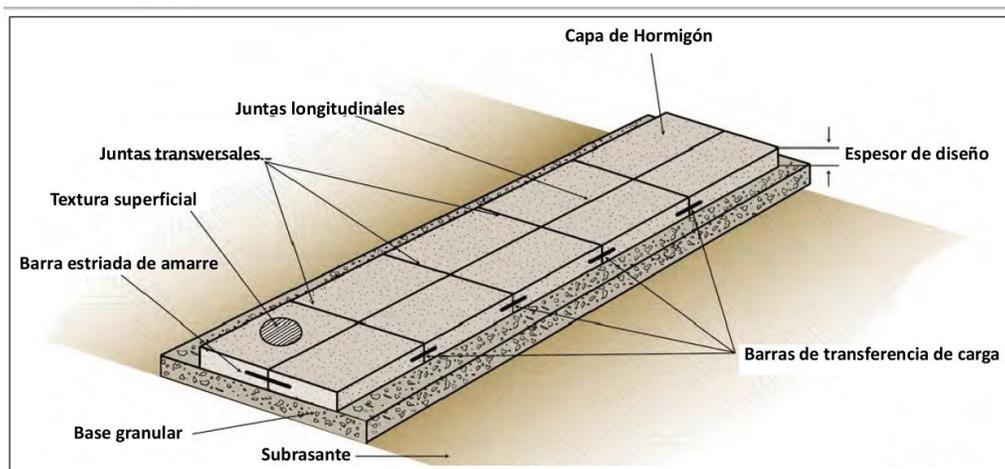


Figura 3.12 Elementos principales de un pavimento de concreto (adaptado de ACPA pavement construction)

a) Juntas transversales de construcción

Para los constructores estas son las juntas principales, porque no es fácil definir donde se parara la obra. Si la junta transversal de construcción se va a realizar en el tercio medio, de una losa de un carril adyacente es necesario que la junta de construcción

este dotada de hierros para cocerla evitando con ellos los movimientos relativos y eliminando la posibilidad de que se desarrolle una fisura en la losa adyacente.

El método más común para finalizar las labores de construcción es rematando la obra contra una formaleta de madera que genera una cara lisa, por lo cual es necesario dotar esta junta de pasadores de carga, así en el resto del pavimento la transferencia de cargas se está haciendo a través de la trabazón de agregados, y por ende la formaleta tiene que estar dotada de agujeros que permitan insertar las dovelas.

La formaleta se deja en su sitio hasta el momento de reiniciar las obras cuando se remueve. También se puede hacer una junta de construcción cortando el concreto, en cuyo caso se extiende el concreto pasando por el sitio en que debe quedar la junta, y luego con la ayuda de sierras se corta y se remueve el concreto que este más allá del sitio de la junta de construcción.

Para alcanzar un buen resultado con el corte del concreto es necesario que las últimas tandas de concreto desarrollen más rápido la resistencia inicial. Al igual que con las juntas de construcción formaleteadas, es necesario poner dovelas, por lo que en este caso se necesita perforar agujeros para instalarlas.

Las juntas transversales de construcción no necesitan el corte inicial para debilitar la sección, solo es necesario hacer el corte secundario para conformar la caja en la que se aloja el material de sello.

b) Juntas transversales de expansión

b.1) Juntas con dovelas

En las juntas transversales de expansión a uno de los extremos de las dovelas se les monta una cápsula de 50 mm de longitud, que permita absorber los movimientos de expansión de las losas, dicha cápsula se debe dotar con sistema que impida que se caiga, o se salga de la dovela durante la colocación.

Las condiciones que se le piden a las dovelas en las juntas de expansión, en cuanto al alineamiento y a la lubricación, son las mismas que las pedidas en las juntas transversales de contracción.

Dado que las juntas de expansión son más anchas que las de contracción a la canastilla en la que se van a fijar las dovelas de estas juntas, se le dota de un material de sello preformado y compresible con una altura idéntica a la losa de concreto.

b.2) Junta sin dovelas

La característica de las juntas de expansión sin dovelas en el diseño del pavimento por métodos tradicionales es que el espesor de la losa se incrementa para reducir los esfuerzos de borde. El incremento del espesor es del orden de un 20% y la transición se desarrolla suavemente en una longitud de 6 a 10 veces el espesor de la losa.

c) Junta Transversal de contracción

Son las juntas que se generan al final del día o cuando se suspende la colocación del concreto. Estas juntas se deben localizar y construir en el lugar planeado siempre que

sea necesario. Si es posible se hará coincidir las juntas de construcción con una de contracción, si no, se hará en el tercio medio de la placa. Siempre se deben construir perpendicularmente al centro de la vía aun cuando las de contracción tengan esviaje.

d) Junta longitudinal de contracción

Las juntas longitudinales, cuando el pavimento se construye con un ancho de dos o más carriles, se cortan de manera similar a las juntas transversales de contracción, solo que el momento del corte no es tan crítico, pero se deben cortar rápidamente si la subbase es estabilizada, apenas se corten las juntas transversales. En cuanto a las barras de anclaje, los equipos de formaletas deslizantes tienen dispositivos para insertarlas.

Por el poco movimiento que tienen estas juntas no necesita de una caja para el sello, basta hacer un corte de 3 a 6 mm de ancho, con una profundidad igual a la tercera parte del espesor de la losa. Sin embargo, si se pide la caja para el sello, esta se puede hacer con un equipo multidisco que corta a la profundidad y anchos deseados.

Con el fin de optimizar el costo de los selladores de las juntas, en las longitudinales se puede utilizar un sellador diferente como consecuencia de los menores movimientos de estas juntas.

e) Junta longitudinal de construcción

En estas juntas hay dos aspectos para tener en cuenta, la inserción de las barras de anclaje y el sellado de las juntas. Respecto a la inserción de las barras de anclaje esto se puede hacer introduciendo, en el concreto fresco, las barras dobladas en un ángulo de

90°, perforando agujeros en las losas y luego meter las barras en ellos y asegurarlas con un mortero epóxico para que puedan cumplir con su función, que es anclar las losas.

Cuando se opta por insertar las barras dobladas en un ángulo de 90° se debe preferir el acero de 40,000 psi al de 60,000 psi ya que toleran mejor las deformaciones.

Las juntas longitudinales de construcción necesitan una caja para el sello, muy ancha para poder acomodar las variaciones longitudinales, en el borde de las losas, generadas por el proceso constructivo, pero el corte y el sellado son similares al de las juntas longitudinales de contracción.

3.3.3 TRANSFERENCIA DE CARGA

La transferencia de carga en la junta es de vital importancia para el caso de los pavimento de concreto sin barras de traspaso de carga, ya que a mayor capacidad de transferencia, la carga en una losa se distribuye en una mayor área con el apoyo de las losas vecinas. La transferencia de carga del pavimento proviene de la trabazón mecánica entre los agregados bajo la junta aserrada, y en el caso de que el pavimento tenga barras de transferencia de carga estas aportan adicionalmente a generar traspaso de carga.

Para considerar estos efectos en el análisis mecanicista de losas de geometría definida, se sugiere modelar las siguientes condiciones para la transferencia de carga:

- En el Borde: Considerar tres supuestos de transferencia de carga distintas según el tipo de borde:
 - 0% (Borde Libre, Vereda)
 - 10% (Berma Granular/ Asfáltica)
 - 50% (Berma de Concreto amarrada)

- **En la Junta Transversal:**

La transferencia de carga en la junta transversal se analiza por medio del modelo de transferencia de carga adoptado. Debido a que la transferencia de carga varía según las condiciones climáticas en que se encuentre la losa, en el caso de no tener suficiente información se recomienda usar un valor de 50%. En el caso de usar barras de transferencia de carga en las juntas se recomienda usar un valor de 85%.

- **En la Junta Longitudinal:**

Considerar una transferencia de carga de 50% en la junta longitudinal, ya que su efecto en la transferencia de carga es bajo en la magnitud de las tensiones que son generadas a las losas.

Se podrán evaluar otras condiciones o posiciones de cargas distintas a las sugeridas, en el caso de realizar análisis de pavimentos con otras configuraciones.

3.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

3.4.1 PREÁMBULO

El método de los elementos finitos es un método numérico utilizado frecuentemente para obtener la solución aproximada de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales, permitiendo encontrar soluciones apropiadas para diversos campos de la ingeniería, uno de los tópicos en el que se utiliza más comúnmente es en los problemas físicos que poseen geometrías muy complicadas lo que hace necesario el uso de un computador para llevar a cabo la implementación del método.

El método es altamente utilizado ya que permite obtener una solución numérica aproximada sobre el comportamiento de una estructura, sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que se encargan de definir el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios no intersectantes entre sí, esto se denomina elementos finitos.

Dentro de cada elemento se encuentran una serie de puntos que permiten el movimiento de cada elemento, estos puntos son denominados nodos y son adyacentes entre ellos si pertenecen al mismo elemento, también un nodo sobre la frontera puede pertenecer a varios elementos, el conjunto de nodos y las relaciones que existen entre ellos constituyen una malla, esta malla es de gran importancia ya que a partir de esta se realiza la discretización del dominio en elementos finitos, y a su vez permite realizar

los cálculos sobre cada uno de los nodos. La construcción de la malla generalmente se realiza a partir de programas especializados.

El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable y los nodos se puede expresar como un sistema de ecuaciones donde el número de ecuaciones es proporcional al número de nodos, este sistema también puede ser escrito como una matriz llamada matriz de rigidez global.

Generalmente el método de elementos finitos se programa computacionalmente para calcular los desplazamientos, las deformaciones y tensiones cuando se trata de un problema de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. Dada la dificultad de encontrar la solución a estos problemas de manera analítica, con frecuencia en la práctica los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en una herramienta alternativa para encontrar estas soluciones, ya que la convergencia de esta metodologías puede decirse es buena.

3.4.2 RESPUESTA DEL MODELADO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO RIGIDO

Para la realización de la metodología de diseño debemos tomar en cuenta lo siguiente:

- La selección del programa de elementos finitos para el desarrollo de la estructura del modelo.
- El desarrollo de modelos de elementos finitos para determinar los esfuerzos críticos en las losas del pavimento.

3.4.3 SELECCIÓN DE PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

El rendimiento de los pavimentos rígidos depende de los esfuerzos y deformaciones impuestas por repeticiones de cargas de tráfico y ambientales. 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 diseño adecuado. 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).

La utilización de métodos de elementos finitos permite el desarrollo de modelos estructurales que satisfagan todos estos requisitos. En la actualidad existen una variedad de programas de elementos finitos, para la utilización en el modulado de los pavimentos.

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.

Los programas desarrollados especialmente para el análisis de los sistemas de pavimentación de concreto incluyen:

- 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 (Fundacion sólida elástica). Para la realización de nuestra investigación ocuparemos el programa **EverFE 2.24**.

3.4.4 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA EVERFE

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 de.

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.

3.5 DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS EN LOSAS DE PAVIMENTO RÍGIDO

A continuación se presentará la creación de los modelos de prueba, en estos se realizó una configuración de 9 losas (3X3) que están en una sola capa de base y que se somete a una combinación de carga de eje de rueda y térmica, generando la solución e interpretando los resultados de la simulación.

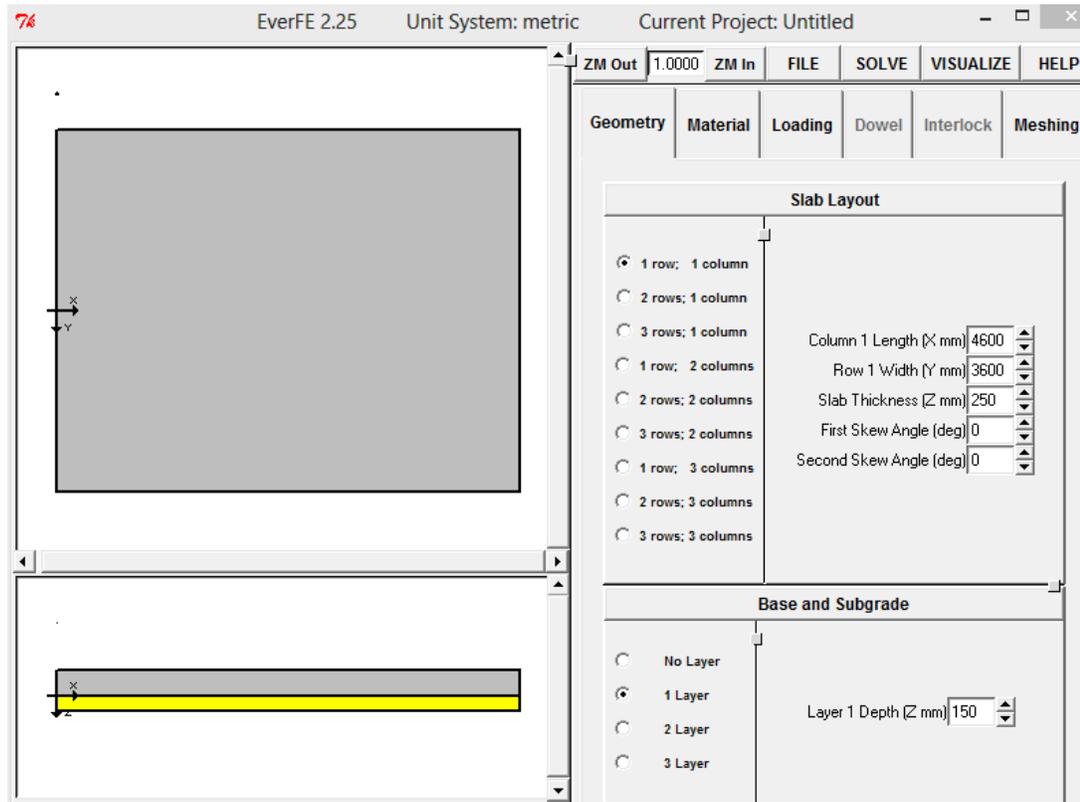


Figura 3.13 Inicio del programa EverFE

3.5.1 CREAR UN NUEVO PROYECTO

Para crear un nuevo proyecto, seleccione **Nuevo (New)** en el menú **Archivo (File)**. Esto abrirá un submenú que contiene las opciones de **Métricas** e **Inglés**. Al seleccionar cualquiera de estas opciones se iniciará un nuevo proyecto sin título en el sistema de la unidad apropiada.

3.5.2 GUARDAR UN PROYECTO

Hay dos opciones para guardar un proyecto: **Guardar (Save)** y **Guardar como (Save as)**. La opción **Guardar como** debe utilizarse al guardar un proyecto sin título que se inició con el comando de menú **Nuevo (New)**, y también se puede utilizar para guardar el

proyecto actual con un nuevo nombre. Cuando se selecciona en el menú **Guardar como**, aparecerá el cuadro de diálogo de archivos que se muestra a continuación en la Figura 3.14. En la parte izquierda del panel de diálogo de Files (archivos) muestra los archivos con la extensión prj que corresponden a cada proyecto guardado. La lista de directorios en el centro del cuadro de diálogo muestra que los resultados de todos los análisis se escriben en un sub-directorio separado con el mismo nombre que el proyecto; nunca hay necesidad de utilizar la lista de directorios.

Para guardar el proyecto con un nuevo nombre, se escribe el nombre del proyecto (con o sin la extensión prj.) En el cuadro **Files** en la parte superior izquierda del cuadro de diálogo y se da clic en **Aceptar (OK)**.

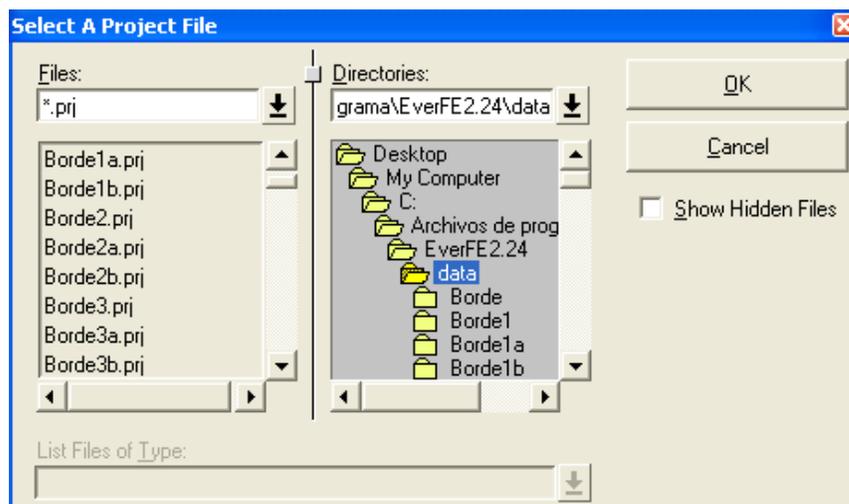


Figura 3.14 Cuadro de diálogo de archivos

En estas pruebas nombraremos a los archivos según sea la posición crítica a evaluar, Borde, Centro y Esquina.

La segunda opción en el menú de Archivo es **Guardar (Save)**, que le permite guardar rápidamente el proyecto actual con su nombre actual. Si no existe una solución para el proyecto actual, seleccione **Guardar** y se guardará los parámetros del proyecto actual, tal como aparecen en los paneles entrada. Sin embargo, si la opción **Guardar** se utiliza cuando existe una solución, aparecerá un pequeño cuadro de diálogo que le advierte al salvar el modelo actual se eliminará la solución actual. Esto es necesario para asegurar que la solución siempre corresponde a los parámetros del modelo guardados.

3.5.3 GEOMETRÍA

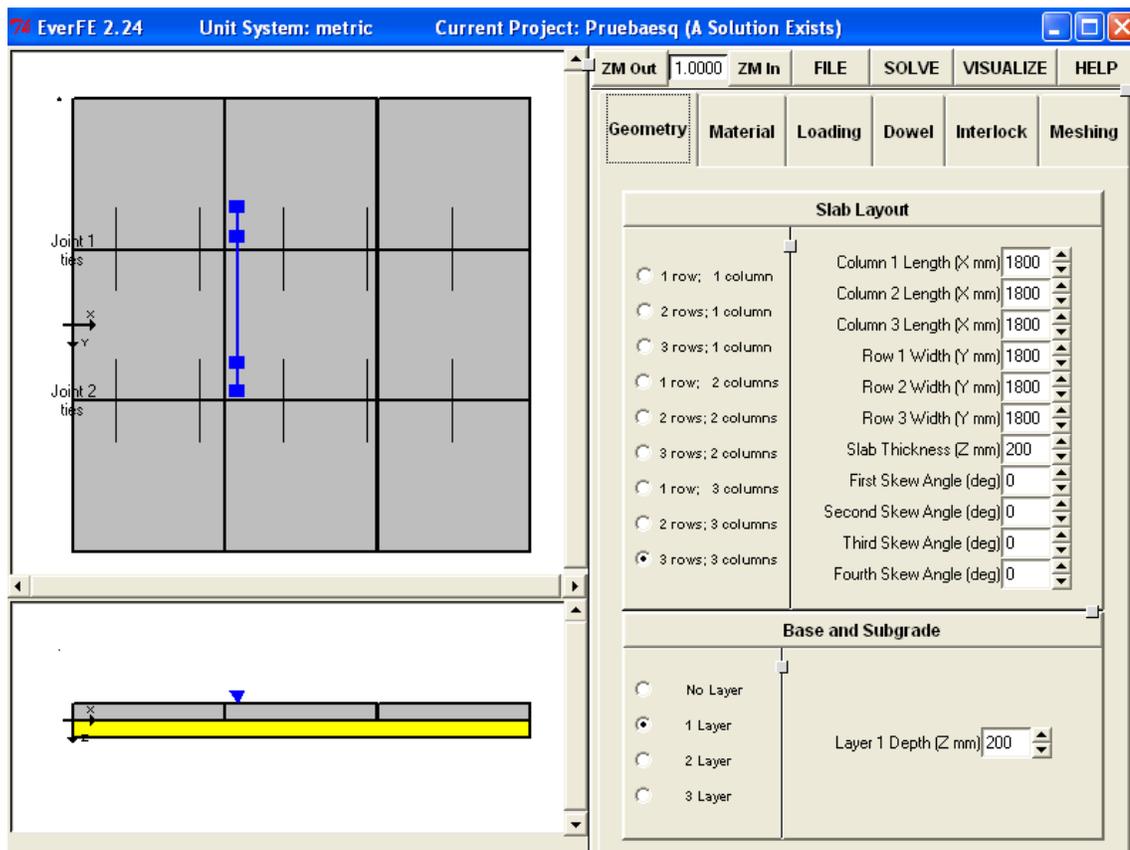


Figura 3.15 Panel de geometría para la creación de modelos

El panel de la geometría permite la especificación de la dimensión básica del sistema de pavimento rígido, y se divide en dos sub-paneles: en las Losas de diseño y en las capas de base/subrasante.

Cualquier cambio en la geometría del sistema se refleja inmediatamente en la planta y en elevación que se muestra en la parte izquierda del panel de entrada de EverFE. Las vistas en planta y elevación se pueden ampliar haciendo clic en los botones **ZM Out** y **ZM In** que están en la parte superior central del panel de entrada, o la introducción manual de un factor de escala. El factor de escala por defecto es 1,00.

3.5.3.1 Diseño de losa

Las casillas de control a la izquierda del cuadro secundario (**Slab Layout**) se utilizan para seleccionar el número de filas y columnas en cada modelo. Los cuadros de entrada a la derecha del sub-panel permiten la especificación detallada de la dimensiones de las losas (longitud, ancho, espesor y ángulo de inclinación). La anchura (dimensión y) de cada fila de losas se supone constante, como es la longitud (dimensión x) de cada columna de las losas.

El origen del sistema de coordenadas empleado por EverFE siempre se muestra en la vista en planta y elevación, y está situado en el borde izquierdo de la losa y en la parte inferior de la losa. En el eje y es positivo hacia abajo, y en las coordenada del eje z la parte superior del espesor de las losas es negativo.

Realizaremos pruebas para distintas dimensiones de losas, las que tendrá una superficie geométrica cuadrada y tendrán una **longitud de 120 cm, 150 cm, 180 cm, 220 cm, 250 cm, 300 cm, 350cm y con un espesor constante de 20 cm.**

3.5.3.2 Geometría de la capa de Base y subrasante

En el sub-panel de base/subrasante, el usuario especifica el número de capas para ser consideradas (0-3) a través de casillas de control a la izquierda, y el espesor de cada capa de la derecha. La mayor parte de la capa superior se considera la capa de base, y las segunda y tercera capas se designan subrasante 1 y 2. Siempre hay una fundación líquida (winkler) por debajo de la capa más inferior, y si no se especifican capas sólidas, las losas serán compatibles directamente con la fundación líquida. Para la realización de estas pruebas ocuparemos **una base de 20 cm de espesor.**

3.5.4 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Para visualizar el **panel de material** se hace clic en la pestaña **Material**. La ventana EverFE ahora aparecerá como se muestra en la Figura 3.16.

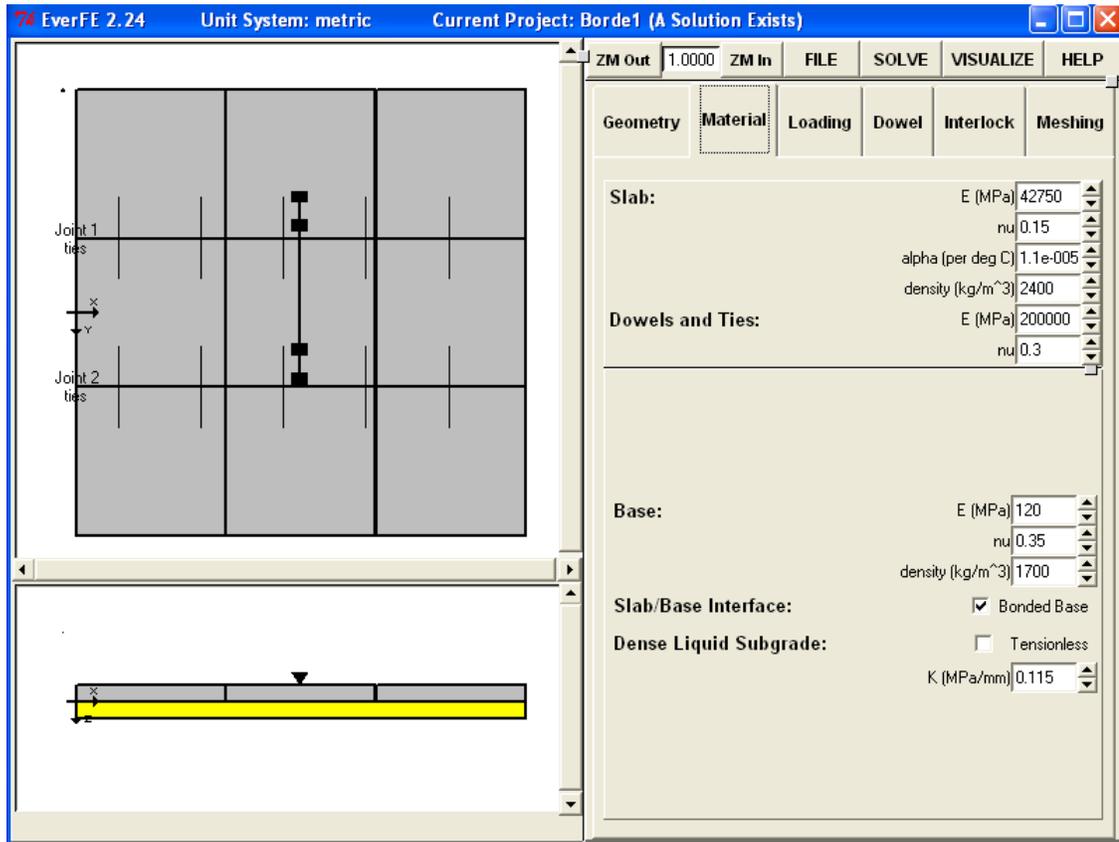


Figura 3.16 Panel de material durante la creación de modelos

El panel material controla la especificación de las propiedades de los materiales para las losas de concreto, dovelas, las capas de base, la fundación líquida densa, y la interfaz de losa-base.

3.5.4.1 Propiedades de los materiales de la losa de concreto

El programa trata a las losas como sólidos linealmente elásticos, en él se debe especificar el módulo de elasticidad (E), la relación de Poisson (ν), el coeficiente de expansión térmica (α), y la densidad de la losa.

Parámetros utilizados

Módulo de elasticidad (E)*:	42750 MPa
Coefficiente de poisson (ν):	0.15
Coefficiente de expansión térmica (α):	1.1×10^{-5}
Densidad de la losa:	2400 kg/m ³

*En el programa no se puede introducir directamente el módulo de ruptura; el programa realiza la siguiente relación entre el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura. **Se utilizará un módulo de ruptura de 4.5 MPa.**

$$E = 9500 * MR$$

3.5.4.2 Propiedades del material de barras de amarre

Las barras de amarre son tratadas como vigas redondas, linealmente elásticas, y donde se debe especificar el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν). Las barras no se someten a expansión o contracción térmica, y por lo tanto su coeficiente de expansión térmica se supone que es cero; usaremos los parámetros que el programa asigna por defecto presentado a continuación:

Módulo de elasticidad (E): 200,000 MPa

Coefficiente de Poisson (ν): 0.3

3.5.4.3 Propiedades del material de la capa de Base y Subrasante elásticas

Cada capa de base y sub-base se trata como un sólido elástico lineal. Cada capa tiene su propio módulo de elasticidad (E), relación de Poisson (ν) y densidad. La expansión y

contracción térmica de cada capa base y sub-base se supone que es cero. Por defecto, la densidad de cada capa se supone que es cero, aunque el usuario tiene la opción de especificar una densidad distinta de cero. Cada capa individual se supone que es perfectamente unida a la capa adyacente. Los parámetros que a continuación presentaremos pertenecen a una **Base Granular**.

Parámetros utilizados

Módulo de elasticidad (E)	120 MPa
Coefficiente de poisson (ν)	0.35
Densidad de la losa*	1700 kg/m ³

*La densidad de cada capa el programa establece de forma predeterminada que es cero por no tener influencia en el resultado.

3.5.4.4 Fundación líquida (subrasante)

Esta capa se utiliza el usual “valor k” usado en el diseño de pavimento rígido, y tiene unidades de MPa/mm o kips/in³. **Utilizaremos un valor de 115 Mpa/m.**

3.5.4.5 Interfaz Base/Losa

Si se incluyen una o más capas de base por debajo de la losa, el programa permite definir la interacción entre la losa y la base, lo que puede afectar en gran medida los resultados del modelo. Por defecto, la interfaz está unida, es decir, un contacto

perfecto se mantiene en la interfaz entre la parte inferior de la losa y la parte superior de la base y es lo que utilizaremos en nuestro diseño.

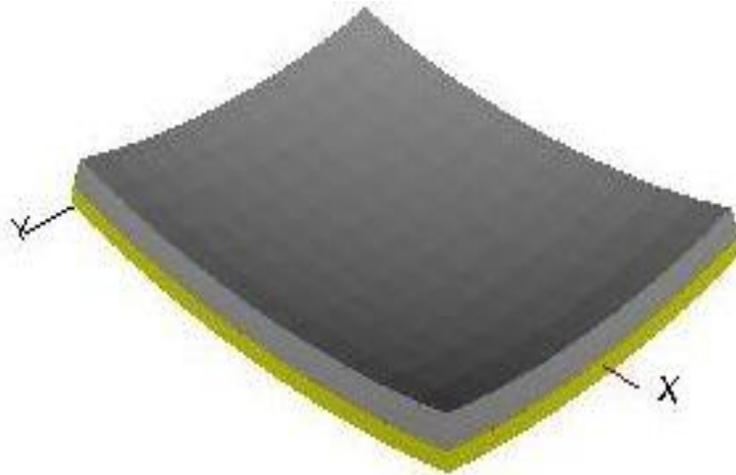


Figura 3.17 Demostración de Capas de losa y base unidas.

3.5.5 CARGAS DE EJE DE RUEDA Y TÉRMICAS

Se debe hacer clic en la pestaña **Loading** para que aparezca el **panel de carga**. En EverFE, ambas cargas de eje de rueda y por efectos térmicos pueden ser especificados similarmente a la **propiedad de los materiales**, la carga debido al peso propio de la losa se incluye por la especificación de una densidad de la losa diferente de cero. Las cargas de ejes de ruedas incluyen una sola rueda, eje de una sola rueda, eje de doble rueda, en tándem de una sola rueda, tándem de doble rueda y eje genérico de varias ruedas. Todas las áreas de contacto de los neumáticos se tratan como rectangulares. En tanto el gradiente térmicos puede ser simuladas Lineal, bilineal y trilineal.

3.5.5.1 Especificación de las cargas de las ruedas y los ejes

La cargas de eje de rueda se crean haciendo clic en cualquiera de los seis botones en la parte superior del panel de carga. La carga aparecerá automáticamente en azul en $(x, y) = (0,0)$ en la vista en planta del sistema, y ahora se puede mover a cualquier posición deseada con el mouse. Cualquier rueda o eje de carga existente se puede destacar haciendo clic en él, lo que cambia su color de negro a azul. Para eliminar una carga existente, primero selecciónelo con un clic izquierdo del ratón y a continuación, haga clic de eliminar. Cuando se crea una carga, un gráfico aparece en el panel de carga que muestra la magnitud de la carga y de la geometría del eje de rueda, como se ilustra en la Figura 3.18. Aquí se da las opciones de introducir los valores deseados para todos los parámetros geométricos en las unidades apropiadas. Los parámetros geométricos **A**, **B**, **L**, **W** y **S** se detallan en el gráfico EverFE. Los **X** y **Y**. Los valores son las distancias desde el modelo de origen de coordenadas hasta el centro de gravedad del eje.

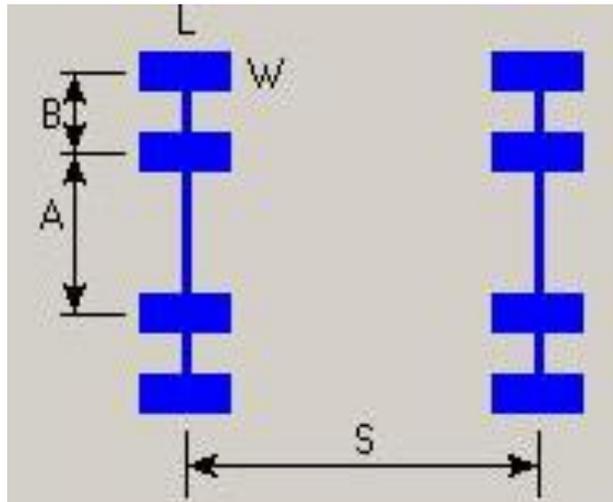


Figura 3.18 Definición de geometría de eje de rueda

En estas pruebas se analizará la repuesta del pavimento para ejes simple, tándem y tridem; los parámetros geométricos y se muestra a continuación:

Eje Simple

A	1500 mm
B	350 mm
L	200
W	150
Carga total	100 KN

Eje Tandem

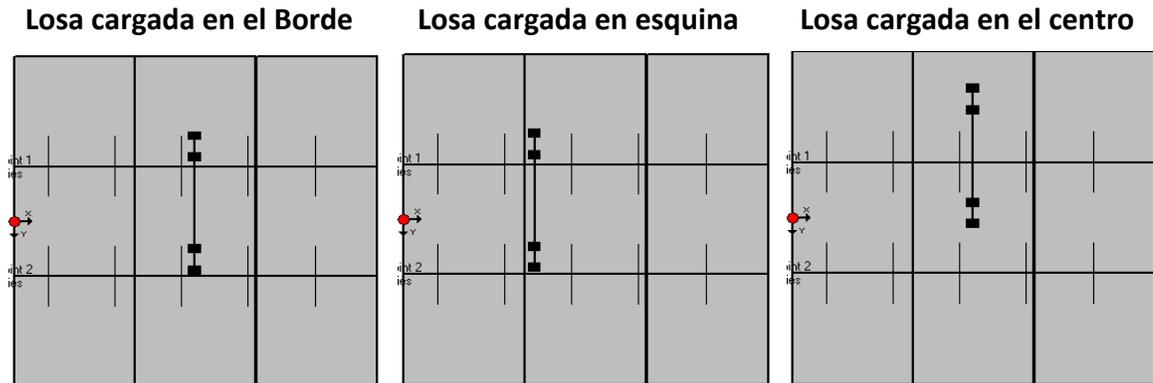
A	1500 mm
B	350 mm
L	200
W	150
S	1250
Carga total	160 KN

Eje Tridem

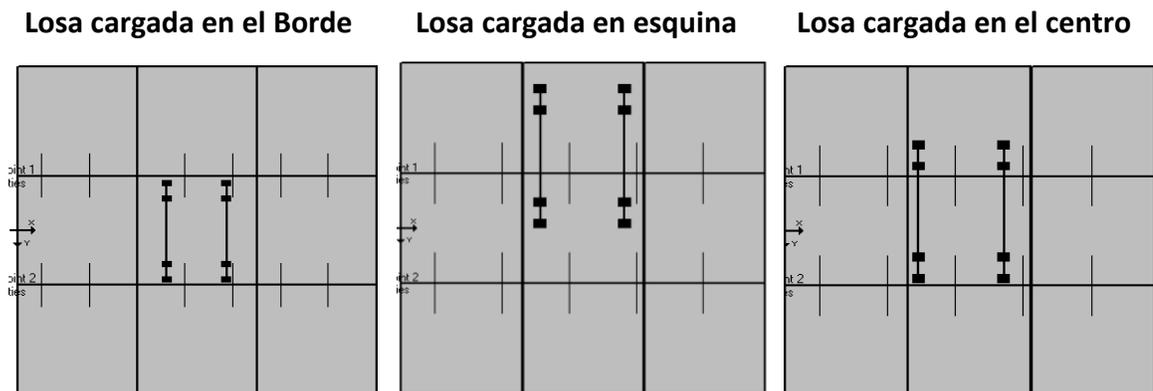
A	1500 mm
B	350 mm
L	200
W	150
S	1250
Carga total	200 KN

Las posiciones de los ejes se ilustran a continuación:

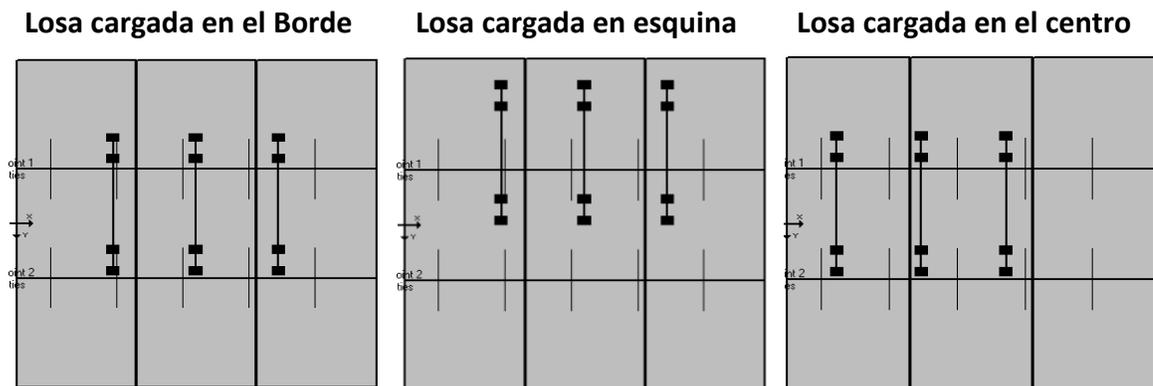
Eje Simple



Eje Tandem



Eje Tridem



3.5.5.2 Los efectos térmicos

Lineal, bilineal y trilineal son las distribuciones térmicas que se pueden especificar en EverFE. Esto se logra al dar el número de cambios de temperatura (2, 3 o 4), y especificando su valor. 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. Para la realización de estas pruebas ocuparemos un $\Delta T = 14^\circ\text{C}$.

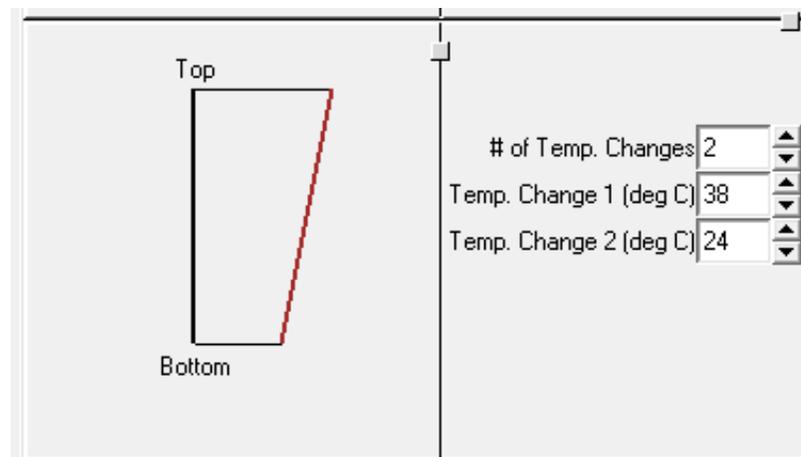


Figura 3.19 Especificación Bilineal del Gradiente Térmico

3.5.6 PROPIEDADES DE BARRAS DE AMARRES

Para Introducir los parámetros de Barras de amarre se debe hacer clic en la pestaña **Dowel**. Para este modelo ocuparemos los valores que por defecto ocupa el programa, en estas pruebas no ocuparemos dovelas, solamente las barras de amarre.

3.5.6.1 Colocación manual del acero en el modelo

La ubicación del acero se puede especificar mediante la selección de la casilla de verificación **Entrada Manual (Manual Entry)**, en esta casilla quitaremos las dovelas de todas las filas del modelo.

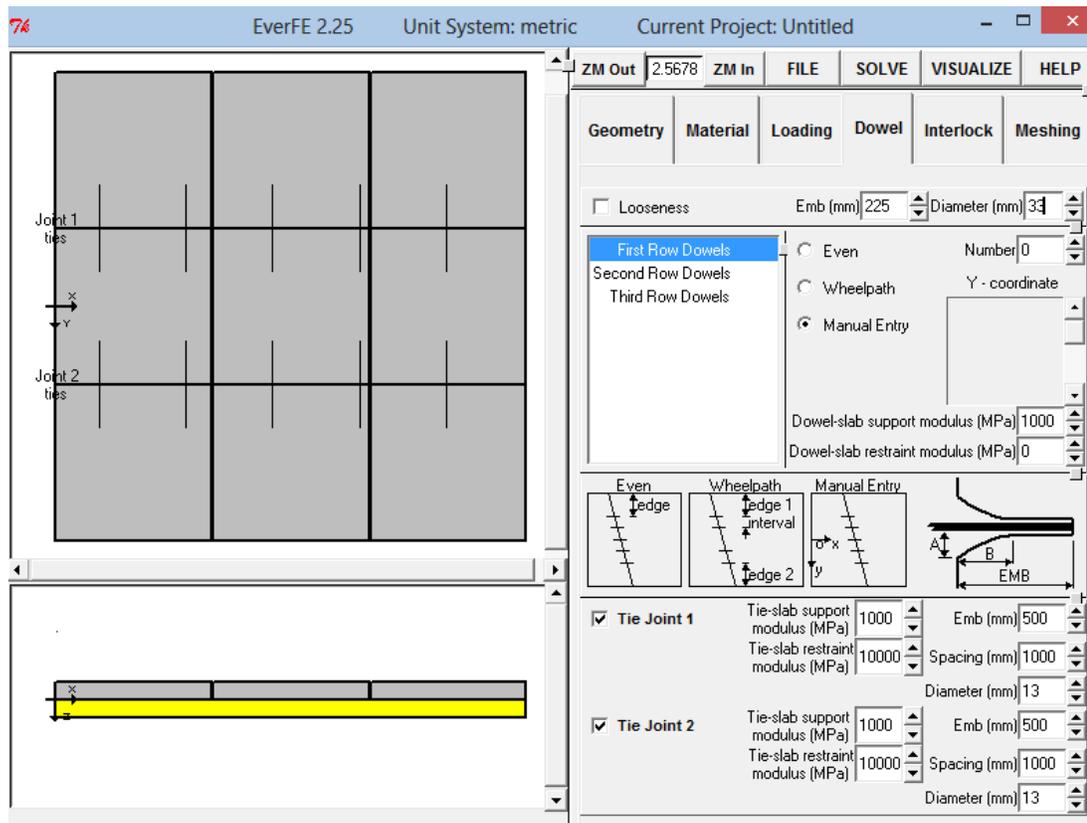


Figura 3.20 Panel Dowel durante modulación

3.5.6.2 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/in². En EverFE el valor predeterminado es de 1,000 Mpa.

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.

3.5.7 TRABAZÓN DE AGREGADO

EverFE tiene dos opciones básicas para especificar el comportamiento de trabazón de agregado en las juntas transversales: un modelo lineal, y un modelo no lineal. Cualquiera de estas opciones se selecciona con la casilla correspondiente en la parte superior del panel; el modelo por defecto es lineal.

3.5.7.1 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/in³) 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 (**apertura entre la Columna 1 y Columna 2; Apertura entre la Columna 2 y columna 3**). Los valores que ocuparemos para rigidez en la junta es el valor predeterminado de cero y la abertura de las juntas será de 0.5 mm.

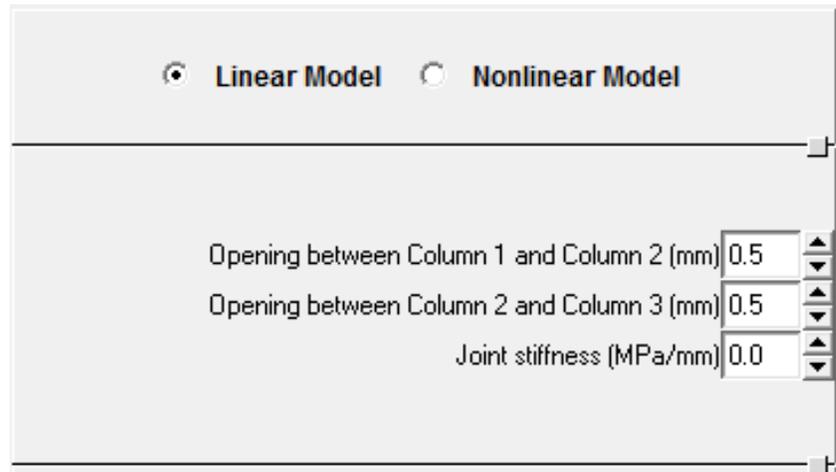


Figura 3.21 Opción de entrada de datos de trabazón de agregados lineal

3.5.8 MALLADO

La capacidad de especificar de forma independiente el número de divisiones de elementos en cada fila y columna puede ser muy útil cuando se modelan losas que no sean de interés primordial, ya que con menos elementos para estas partes del modelo pueden ahorrar tiempo de cálculo significativo. El mallado estará en función de que tan detallado se requiere el análisis.

También se proporciona una estimación de la cantidad de memoria necesaria para una simulación dada, y debe ser menor que la memoria RAM disponible de su equipo durante toda la simulación.

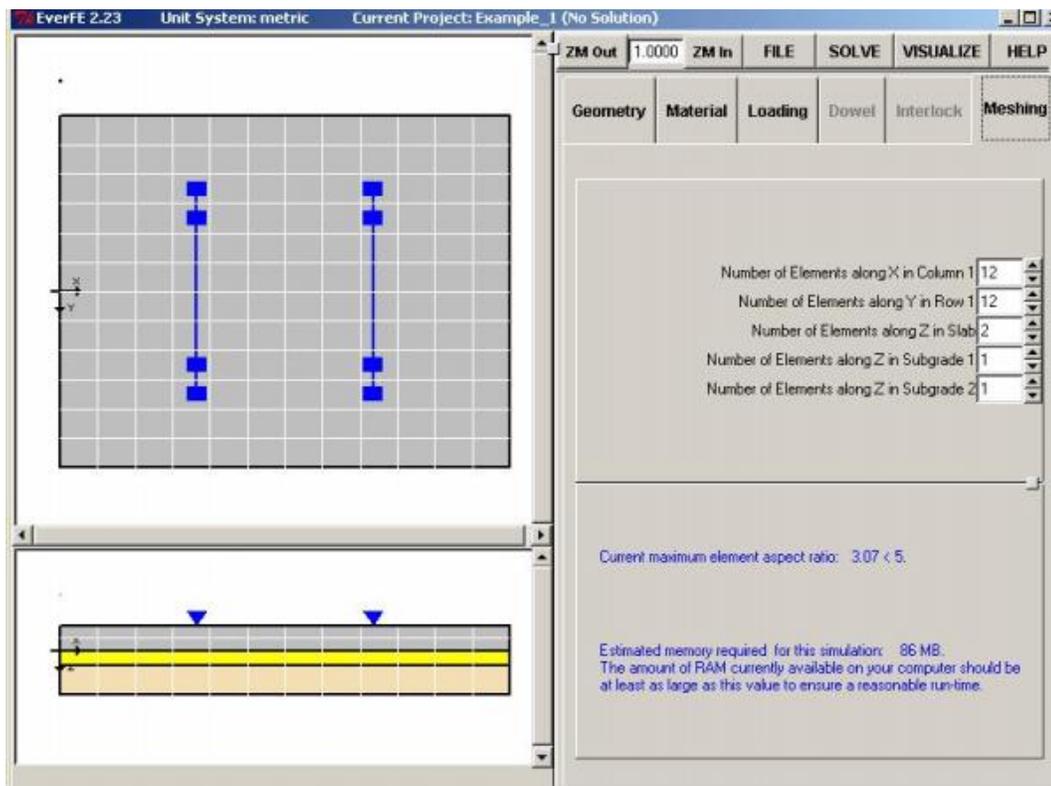


Figura 3.22 Panel de Mallado durante la creación de modelos

3.5.9 RESOLVER (SOLVE)

3.5.9.1 Ejecute el análisis de muestra (Run the Shown Analysis)

Esta opción permite ejecutar el solucionador de EverFE para el modelo que se muestra en la configuración actual. Al **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 3.23. El cuadro de diálogo advierte que cualquier solución actual que existe para este proyecto se sobrescribe, y también 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)**.

Al iniciar el análisis, aparecerá un pequeño cuadro con un fondo blanco (ver Figura 3.24) que muestra información sobre el progreso del programa de solución de elementos finitos; este marco va a desaparecer una vez que se haya completado el análisis.

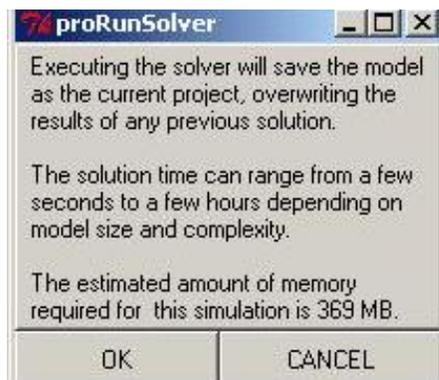


Figura 3.23 Cuadro de diálogo Ejecutar

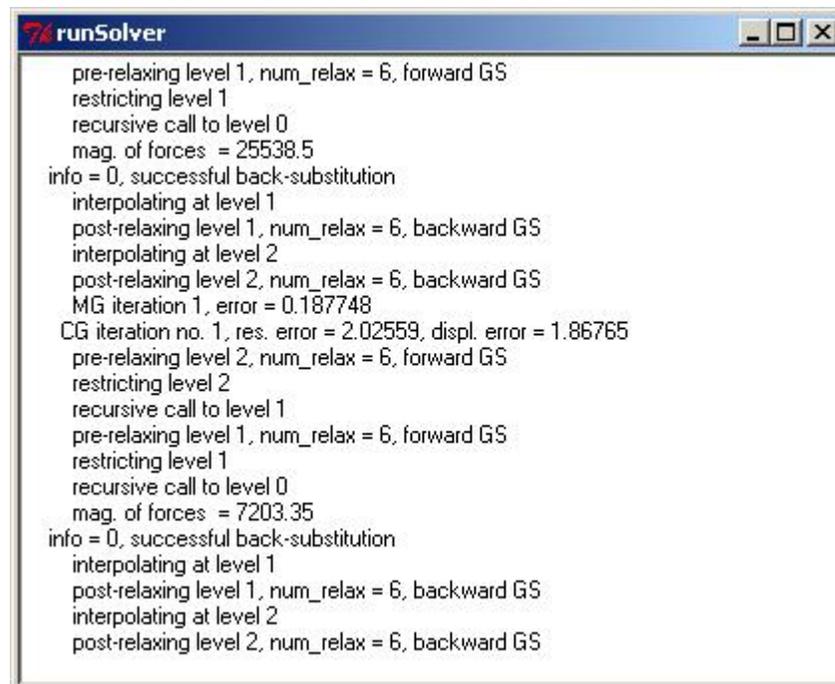


Figura 3.24 Progreso de la solución de elementos finitos

3.5.9.2 Resultados del programa

Para visualizar de forma gráfica las tensiones, seleccione **stresses** en el menú **Visualizar** . Con ello se abre el panel de visualización de la tensión que se muestra a continuación en la Figura 3.25.

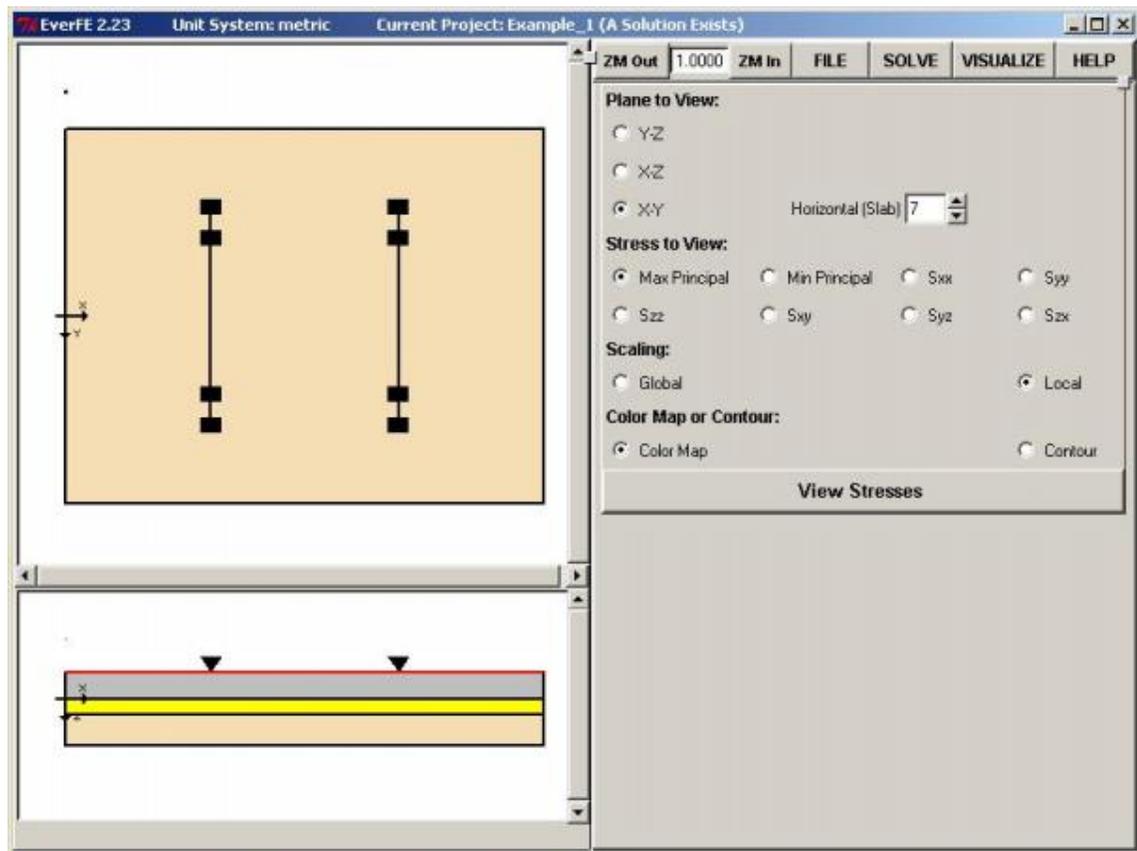


Figura 3.25 Ventana de visualización de esfuerzo

Para ver las tensiones en otros planos dentro de la losa, el programa brinda la opción de cambiar el plano **horizontal** a cualquier valor entre 3 (la parte inferior) y 7 (la parte superior), ya sea escribiendo un número en el cuadro de entrada o haciendo clic en las flechas.

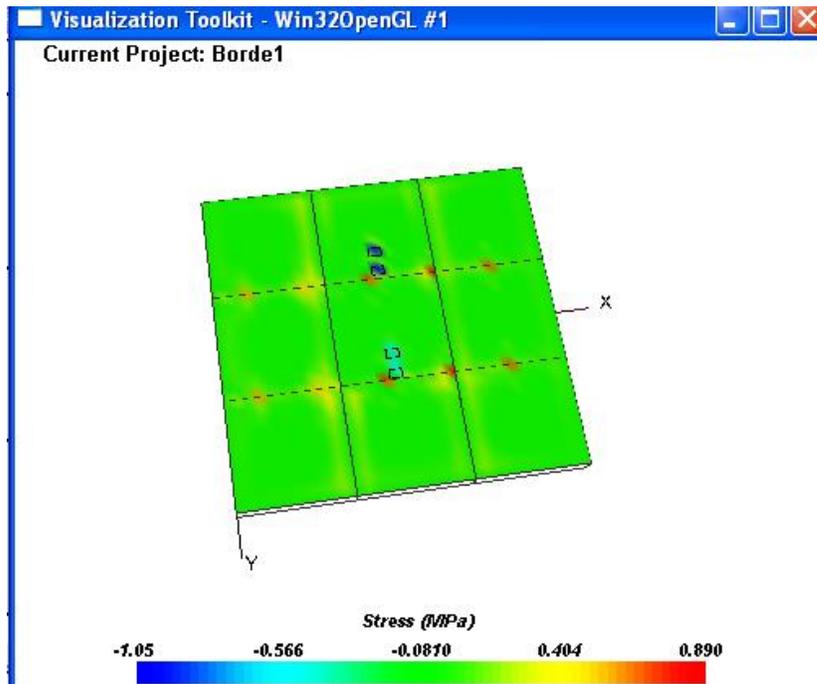


Figura 3.26 Máximo tensiones principales en el top de la losa

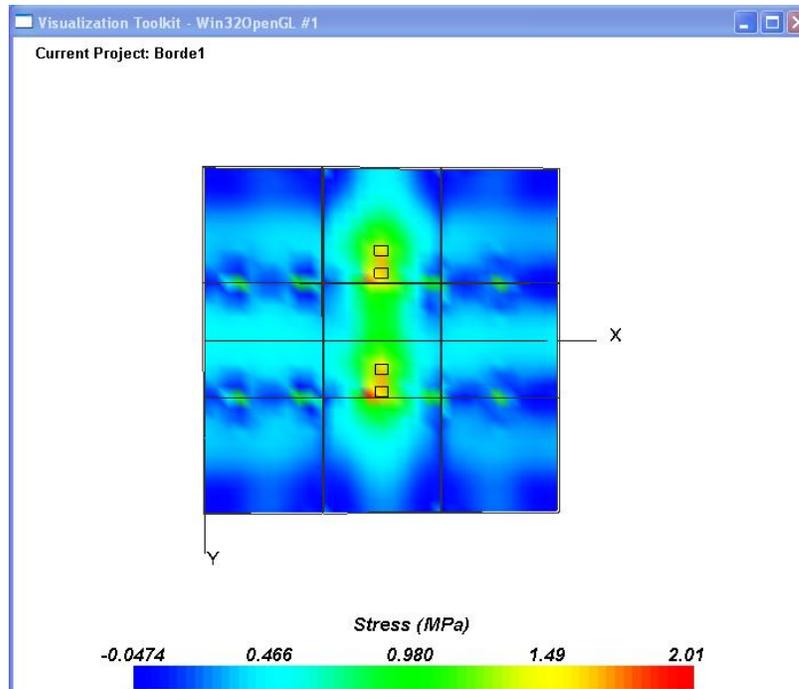


Figura 3.27 tensiones principales máximas en el fondo del espesor de la losa

3.5.9.3 Resultados de esfuerzos máximos absolutos

EverFE permite la obtención de tensiones previstos en cualquier punto de las losas y la base, por medio de **resultados para los puntos (Results for Points)** del menú **Visualización**. Esto muestra el panel que se muestra a continuación en la Figura 3.28. El texto en cada rectángulo muestra los esfuerzos principales máximos y mínimos y su ubicación en la losa correspondiente; para la losa con la tensión principal máxima el texto está en rojo.

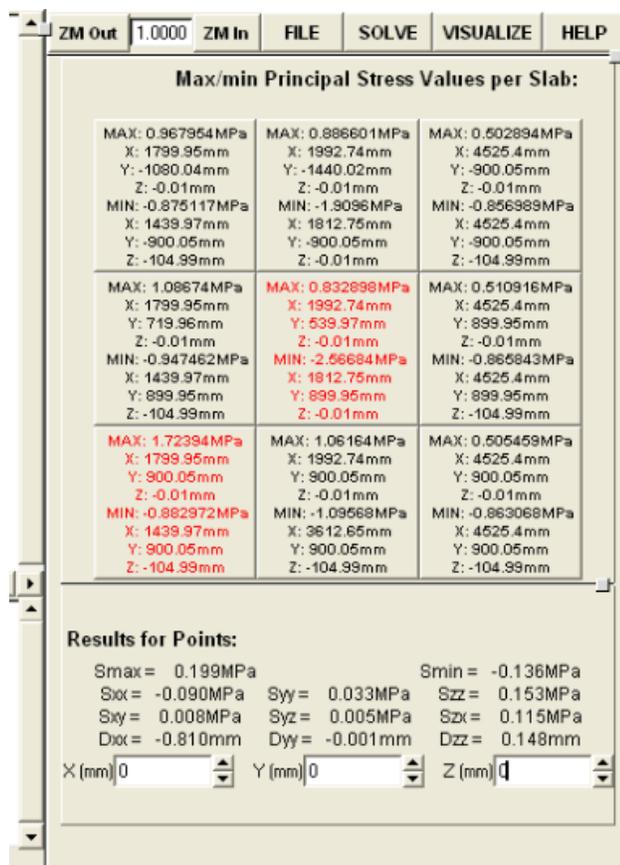


Figura 3.28 Esfuerzos principales mínimos y máximos en las losas

3.5.10 RESUMEN DE RESULTADOS

3.5.10.1 Resultados utilizando un eje simple

Tabla 3.1 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Esfuerzos máximos Absoluto (MPa)		
	Borde	Esquina	Centro
120	2.27	3.02	1.50
150	1.55	2.05	1.43
180	2.01	1.86	1.65
220	2.20	2.38	2.07
250	2.30	3.27	2.40
300	3.13	2.26	3.07
350	3.77	3.08	3.74

Grafico 3.1 Esfuerzos máximos absolutos

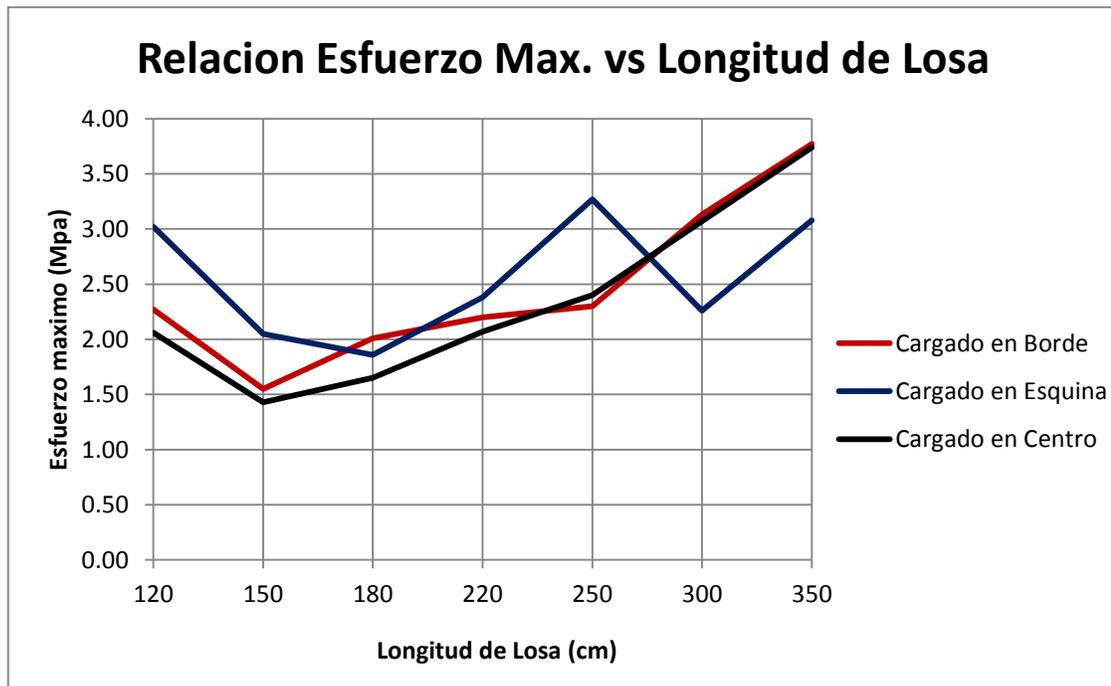


Tabla 3.2 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

Longitud (cm)	Esfuerzos máximos parte superior (MPa)		
	Borde	Esquina	Centro
120	1.87	1.99	0.55
150	0.54	1.31	0.35
180	0.89	0.85	0.82
220	0.52	0.88	0.88
250	1.17	1.16	1.12
300	0.60	0.5	0.54
350	0.77	0.76	0.77

Grafico 3.2 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

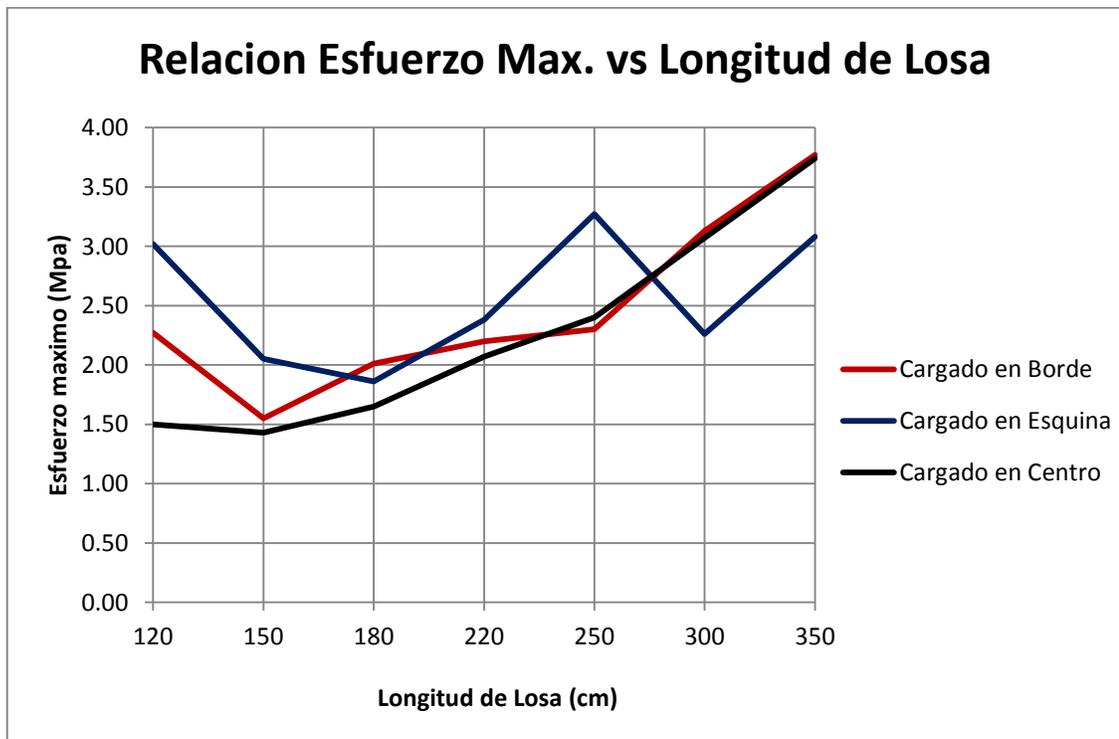
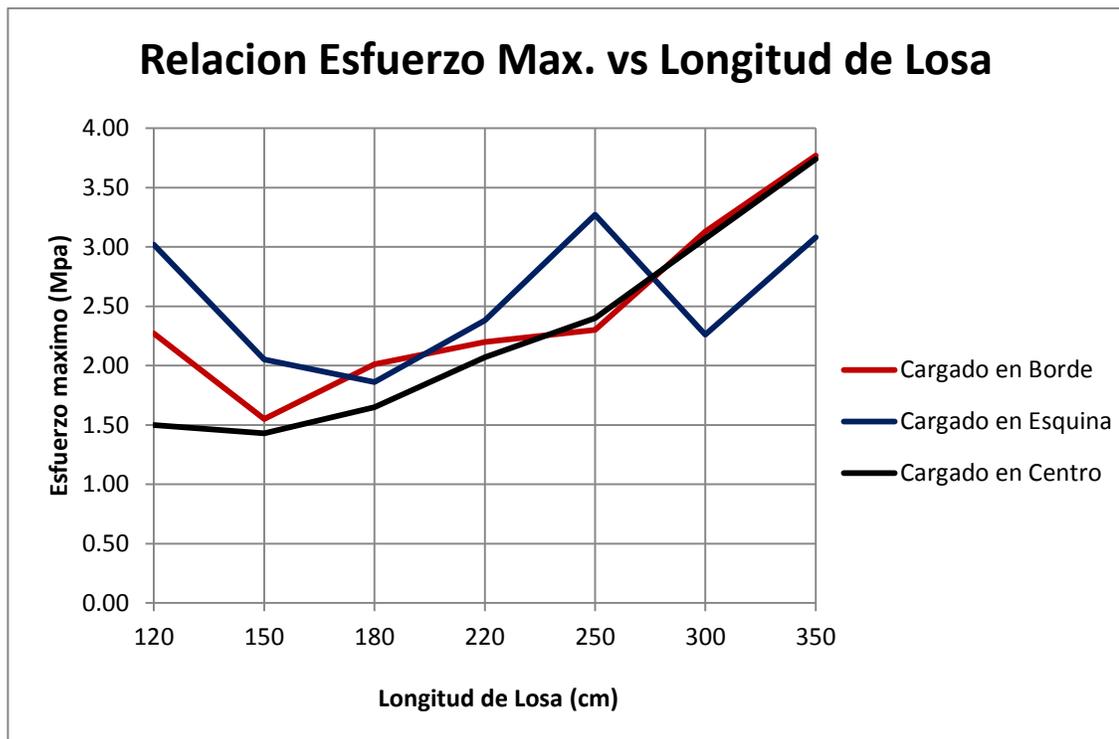


Tabla 3.3 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Esfuerzos máximos parte inferior (MPa)		
	Borde	Esquina	Centro
120	2.03	3.02	1.50
150	1.55	2.05	1.88
180	2.01	1.86	1.65
220	2.20	2.38	2.07
250	2.30	3.27	2.40
300	3.13	2.26	3.07
350	3.77	3.08	3.74

Grafico 3.3 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa



3.5.10.2 Resultados utilizando un Eje Tandem

Tabla 3.4 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Esfuerzos máximos Absoluto (MPa)		
	Borde	Esquina	Centro
120	3.09	2.45	2.51
150	1.86	2.29	1.08
180	1.63	1.72	1.36
220	1.64	2.1	1.7
250	2.39	2.83	2.32
300	2.27	2.49	2.55
350	3.12	3.21	3.07

Gráfico 3.4 Esfuerzos máximos absolutos

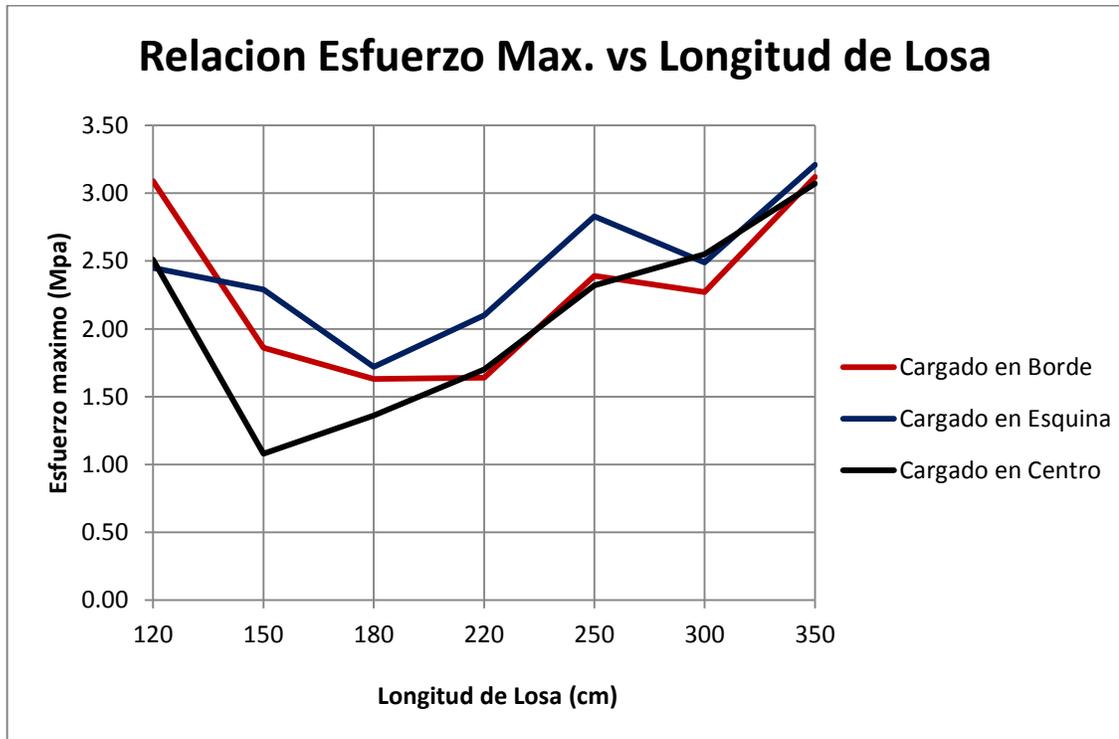


Tabla 3.5 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

Longitud (cm)	Esfuerzos máximos parte superior (MPa)		
	Borde	Esquina	Centro
120	2.1	2.13	1.66
150	0.6	1.29	0.6
180	0.99	0.94	0.8
220	0.68	0.89	0.88
250	1.19	1.18	1.11
300	0.52	0.54	0.51
350	0.8	0.76	0.79

Grafico 3.5 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

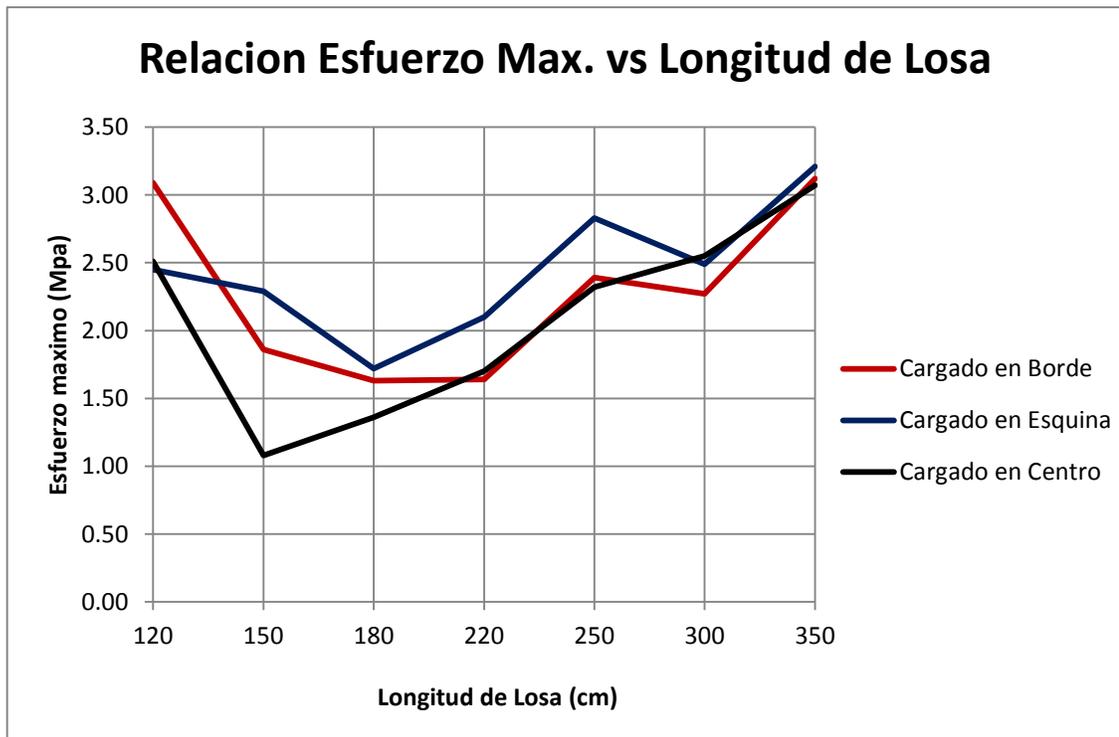
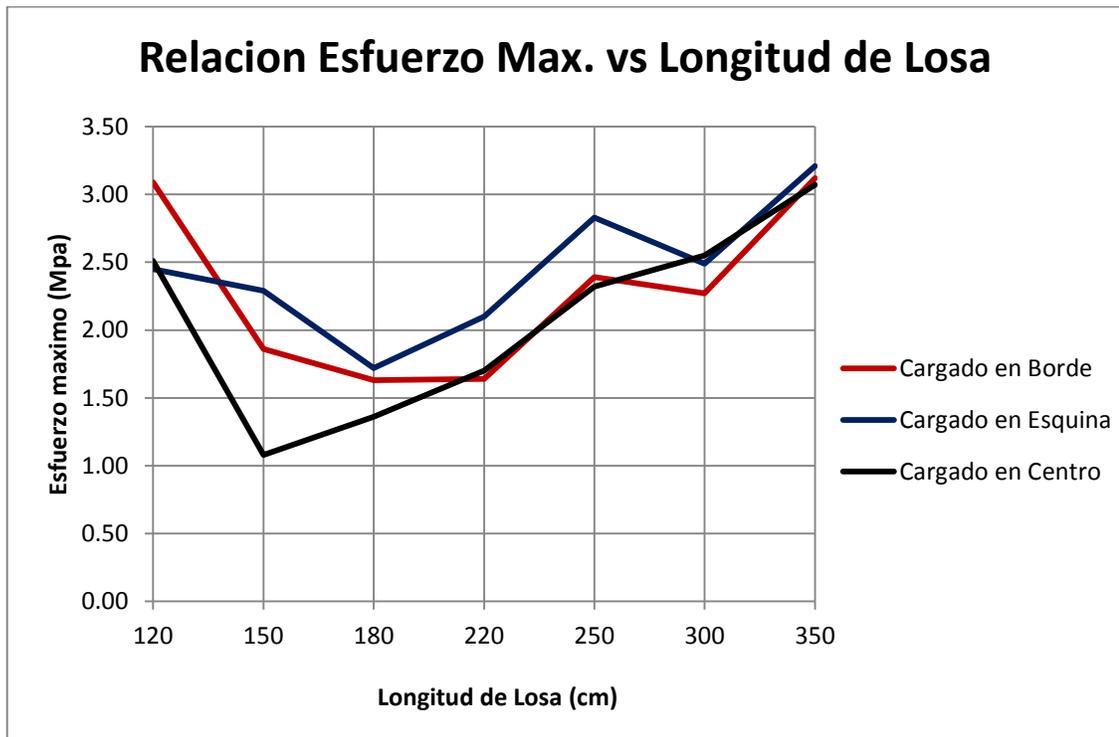


Tabla 3.6 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Esfuerzos máximos parte inferior (MPa)		
	Borde	Esquina	Centro
120	3.09	2.45	2.51
150	1.86	2.29	0.93
180	1.63	1.72	1.36
220	1.64	2.1	1.7
250	2.39	2.83	2.32
300	2.27	2.49	2.55
350	3.12	3.21	3.07

Grafico 3.6 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa



3.5.10.3 Resultados utilizando un Eje Tridem

Tabla 3.7 Esfuerzos máximos absolutos

Longitud (cm)	Esfuerzos máximos Absoluto (MPa)		
	Borde	Esquina	Centro
120	2.86	2.84	1.26
150	1.24	2.08	1.17
180	1.69	1.5	1.31
220	1.33	1.91	1.65
250	2.88	2.85	2.25
300	2.3	2.3	2.52
350	3.16	3.08	3.09

Grafico 3.7 Esfuerzos máximos absolutos

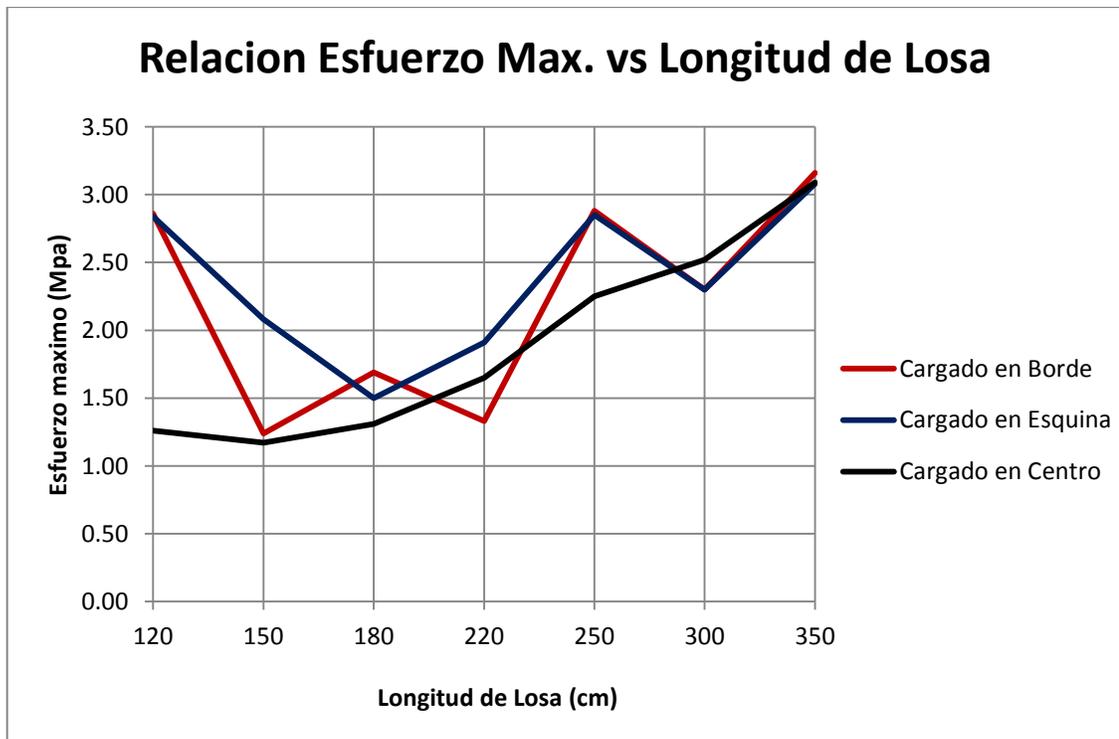


Tabla 3.8 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

Longitud (cm)	Esfuerzos máximos parte superior (Mpa)		
	Borde	Esquina	Centro
120	2.28	2.36	1.09
150	0.58	1.26	0.48
180	0.94	0.93	0.8
220	0.45	0.88	0.88
250	1.15	1.19	1.08
300	0.56	0.56	0.52
350	0.87	0.78	0.87

Grafico 3.8 Esfuerzos máximos parte superior de la losa

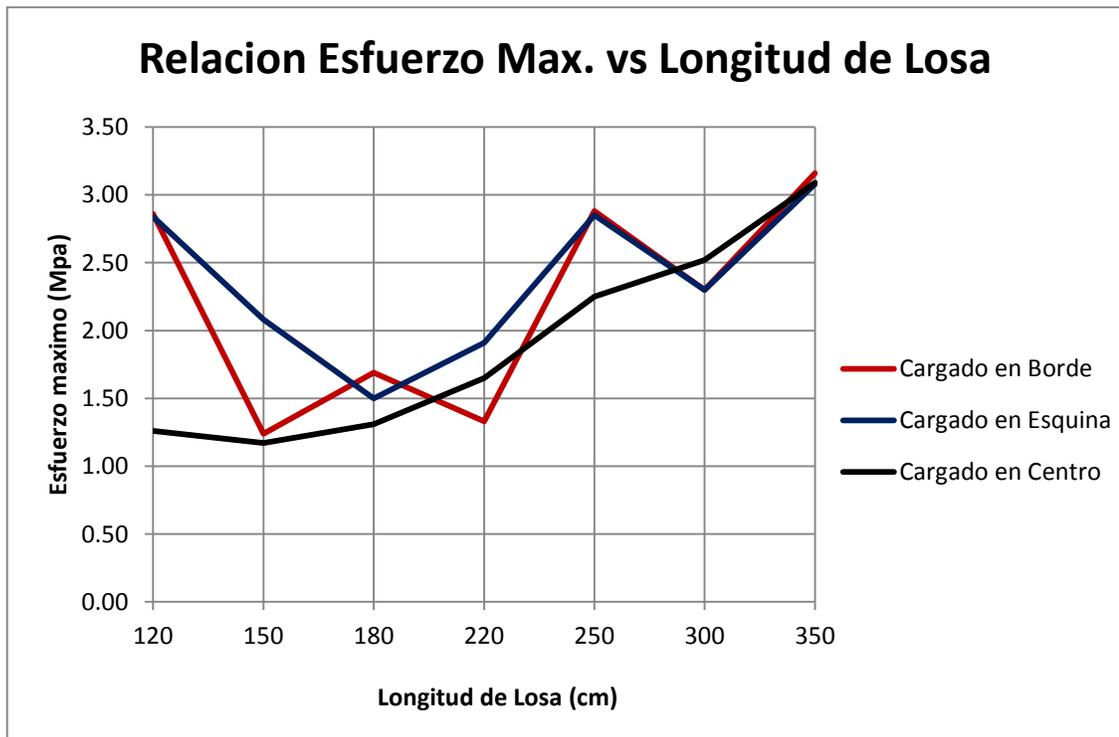
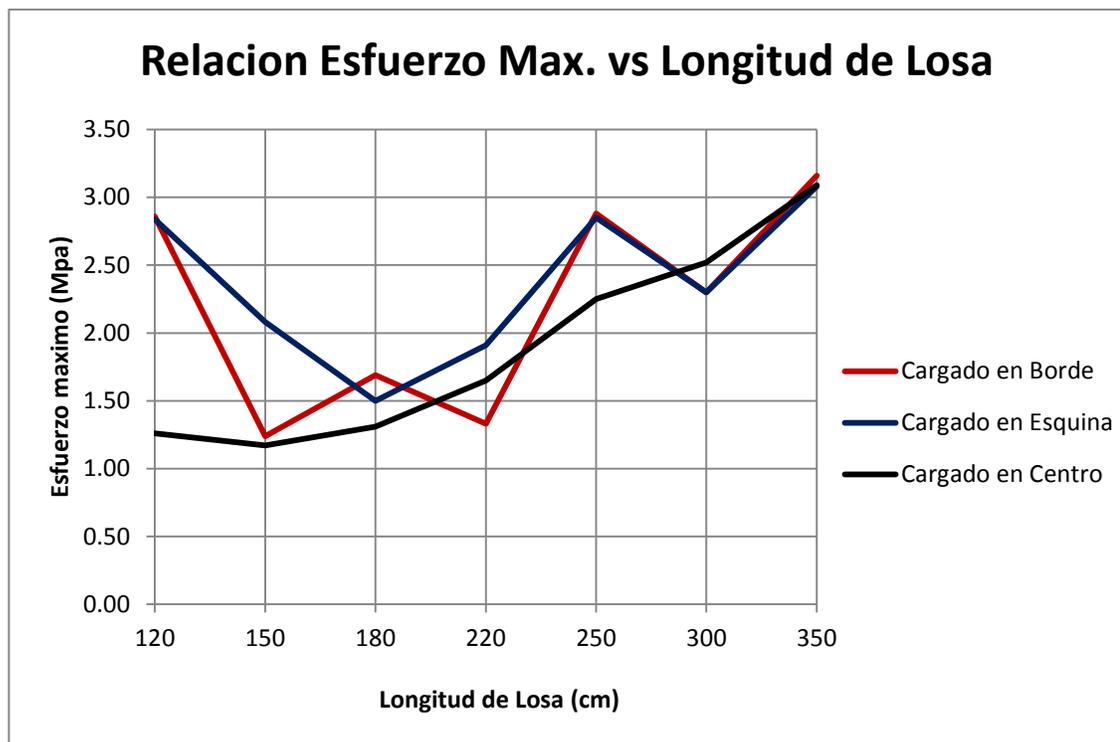


Tabla 3.9 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa

Longitud (cm)	Esfuerzos máximos parte inferior (MPa)		
	Borde	Esquina	Centro
120	2.31	2.78	1.26
150	1.24	2.08	1.17
180	1.69	1.5	1.31
220	1.33	1.91	1.65
250	2.88	2.85	2.25
300	2.3	2.3	2.52
350	3.16	3.08	3.09

Grafico 3.9 Esfuerzos máximos parte inferior de la losa



3.5.10.4 Resultados para diferentes gradientes de temperatura

Tabla 3.10 Gradientes en el borde Eje Simple

Gradiente ΔT	Esfuerzos máximos Eje Simple (Mpa)			
	1.5x1.5	1.8x1.8	3.0x3.0	3.5x3.5
-5	1.14	1.23	1.01	1.14
0	1.24	1.32	1.40	1.34
10	1.47	1.57	2.63	3.06
14	1.55	2.01	3.13	3.77

Grafico 3.10 Gradientes en el borde Eje Tandem

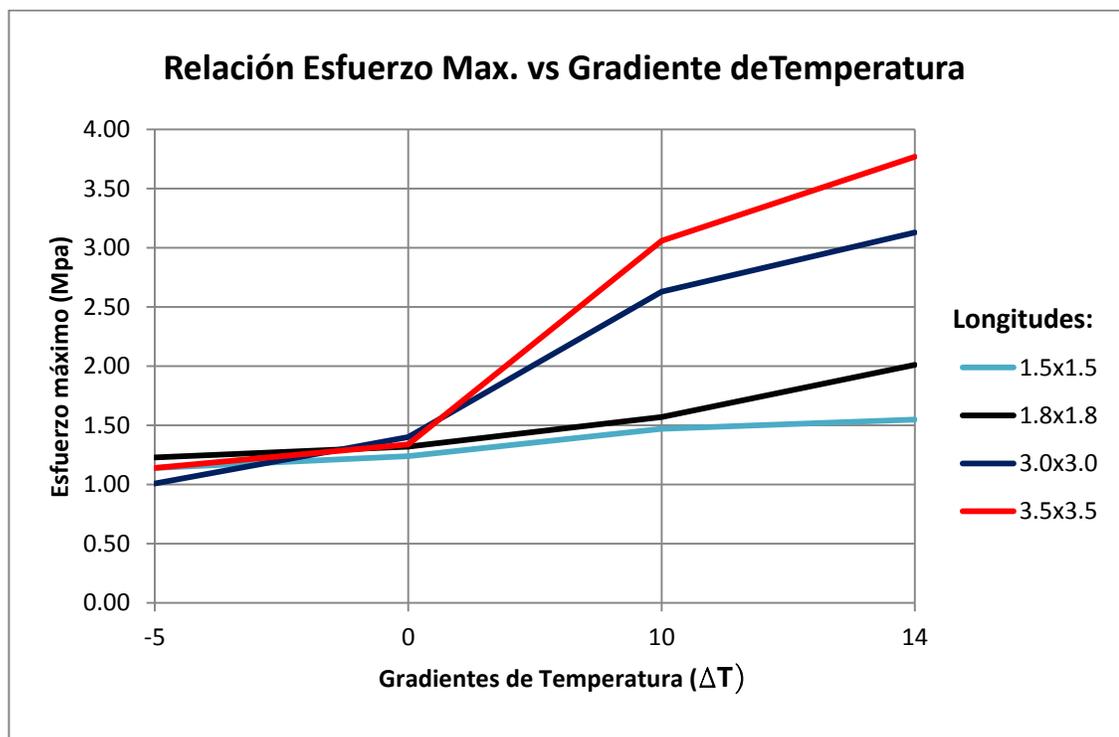


Tabla 3.11 Gradientes en el borde Eje Tandem

Gradiente ΔT	Esfuerzos máximos Eje Tandem (Mpa)			
	1.5x1.5	1.8x1.8	3.0x3.0	3.5x3.5
-5	1.89	1.56	1.05	1.21
0	1.85	1.34	0.93	0.88
10	1.83	1.41	1.84	2.43
14	1.86	1.63	2.27	3.12

Grafico 3.11 Gradientes en el borde Eje Tandem

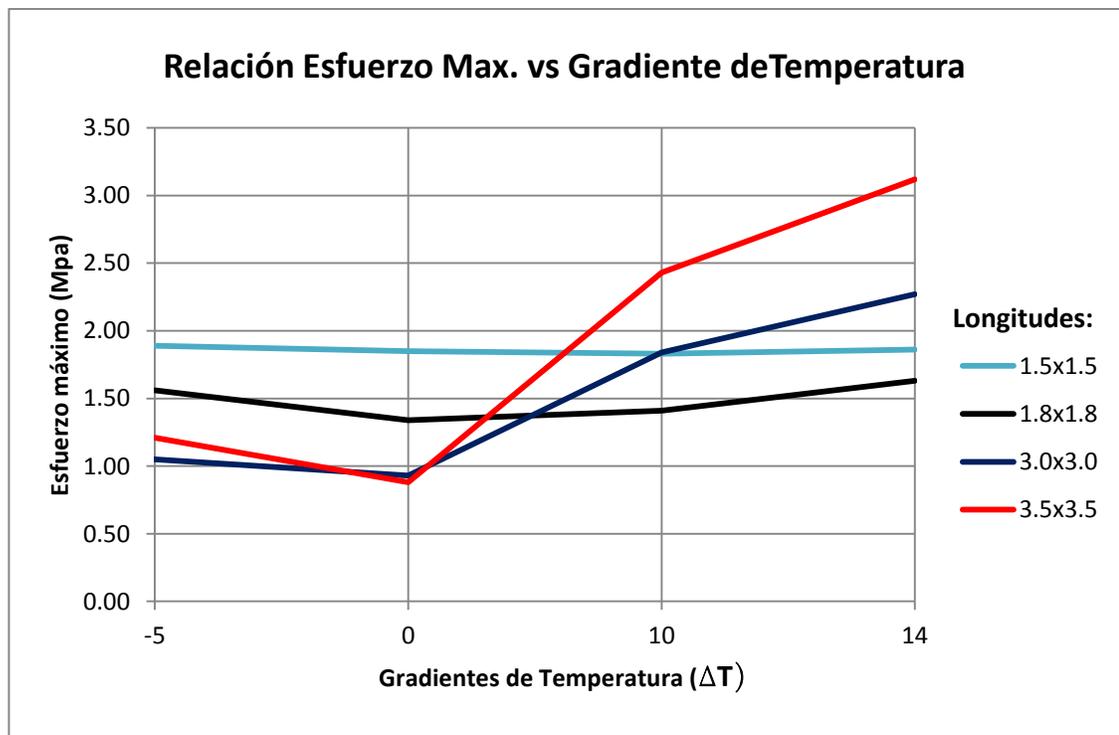


Tabla 3.12 Gradientes en el borde Eje Tridem

Gradiente ΔT	Esfuerzos máximos Eje Tridem (Mpa)			
	1.5x1.5	1.8x.18	3.0x3.0	3.5x3.5
-5	0.75	0.84	1.05	1.21
0	0.6	0.58	0.69	0.62
10	1.09	1.23	1.81	2.44
14	1.24	1.69	2.3	3.16

Grafico 3.12 Gradientes en el borde Eje Tridem

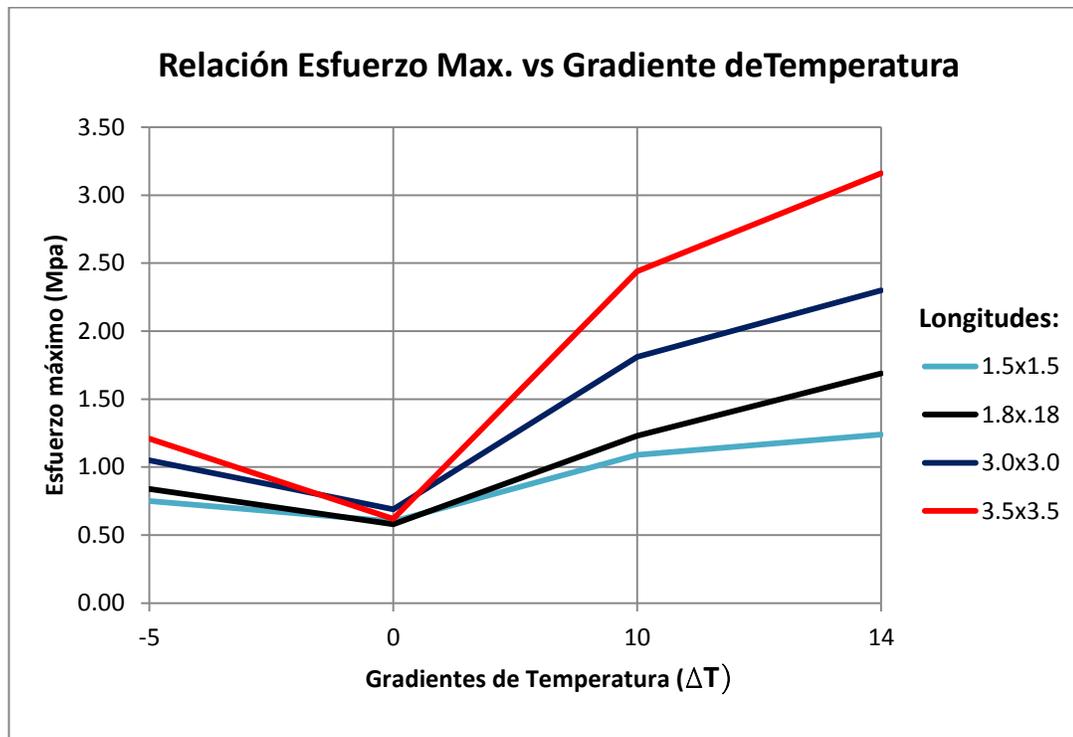


Tabla 3.13 Gradientes en el centro Eje Simple

Gradiente ΔT	Esfuerzos máximos Eje Simple (Mpa)			
	1.5x1.5	1.8x1.8	3.0x3.0	3.5x3.5
-5	1.03	1.07	0.80	0.96
0	1.12	1.22	1.31	1.28
10	1.35	1.27	2.57	3.03
14	1.43	1.65	3.07	3.74

Grafico 3.13 Gradientes en el centro Eje Simple

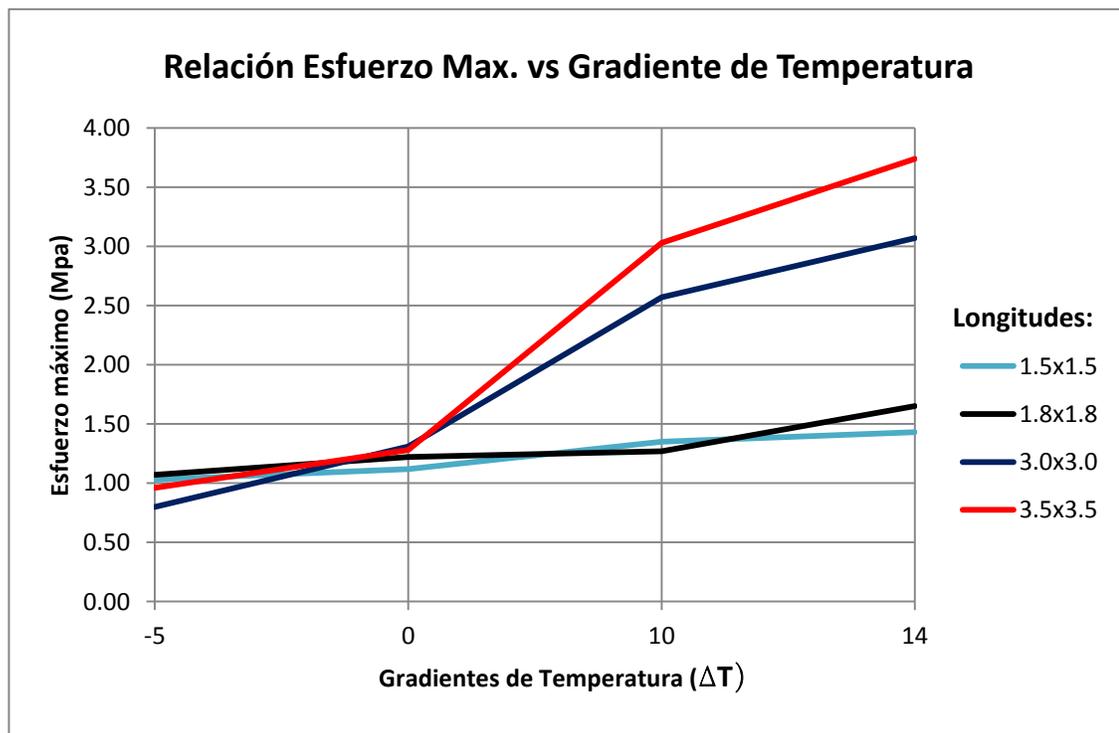


Tabla 3.14 Gradientes en el centro Eje Tandem

Gradiente ΔT	Esfuerzos máximos Eje Tandem (Mpa)			
	1.5x1.5	1.8x1.8	3.0x3.0	3.5x3.5
-5	0.61	0.70	0.84	1.19
0	0.60	0.65	0.90	0.90
10	0.83	1.14	2.01	2.36
14	1.08	1.36	2.55	3.07

Gráfico 3.14 Gradientes en el centro Eje Tandem

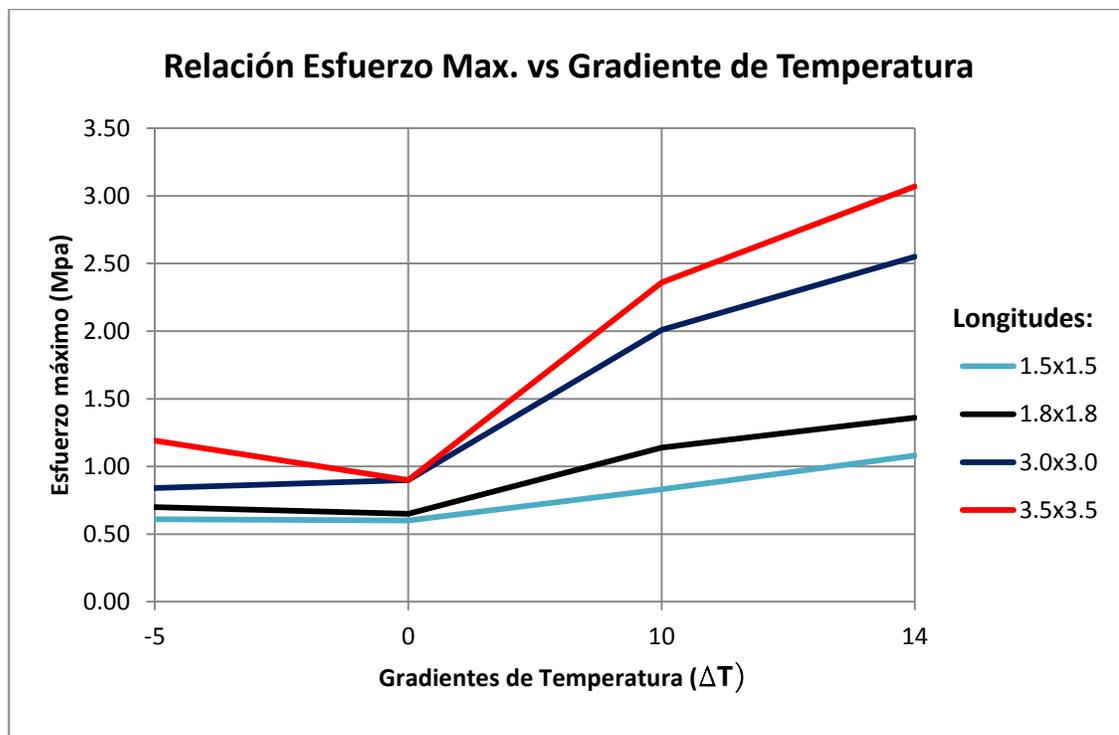


Tabla 3.15 Gradientes en el centro Eje Tridem

Gradiente ΔT	Esfuerzos máximos Eje Tridem (Mpa)			
	1.5x1.5	1.8x1.8	3.0x3.0	3.5x3.5
-5	0.39	0.70	0.91	0.97
0	0.41	0.48	0.57	0.59
10	0.67	1.08	1.97	2.35
14	1.17	1.31	2.52	3.09

Grafico 3.15 Gradientes en el centro Eje Tridem

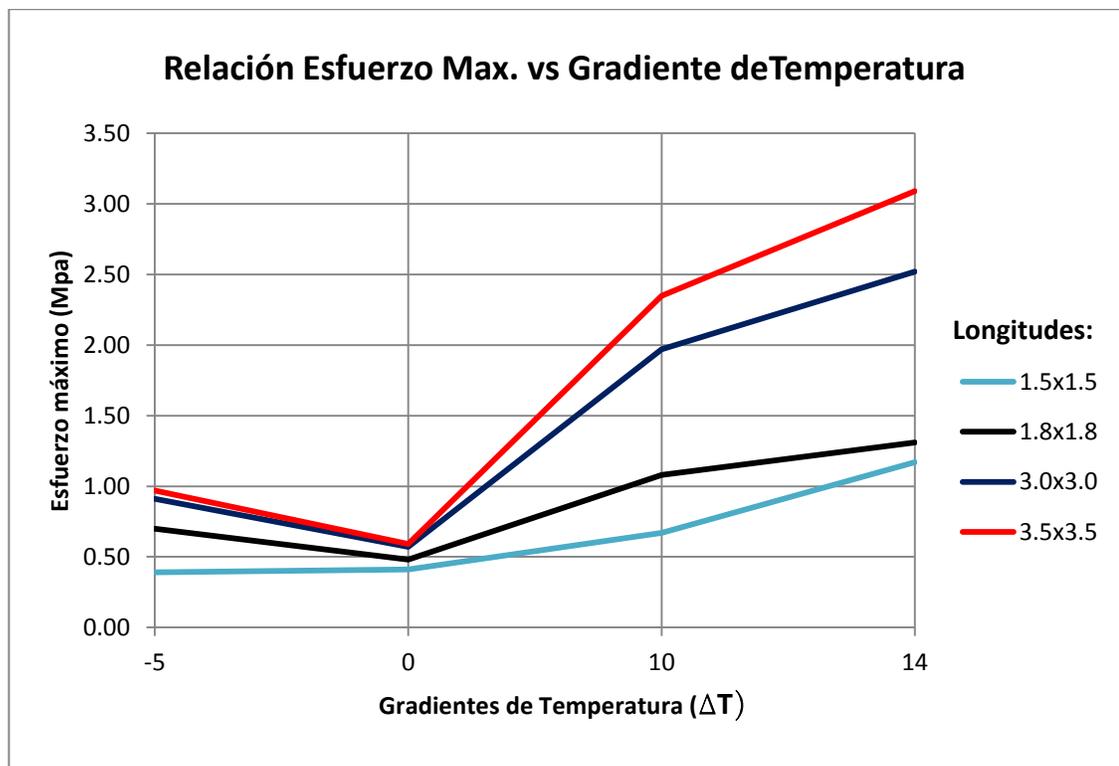


Tabla 3.16 Gradientes en la esquina Eje Simple

Gradiente ΔT	Esfuerzos máximos Eje Simple (Mpa)			
	1.5x1.5	1.8x1.8	3.0x3.0	3.5x3.5
-5	2.06	1.70	1.16	1.24
0	2.03	1.70	1.17	0.97
10	2.05	1.82	1.86	2.48
14	2.05	1.86	2.26	3.08

Grafico 3.16 Gradientes en la esquina Eje Simple

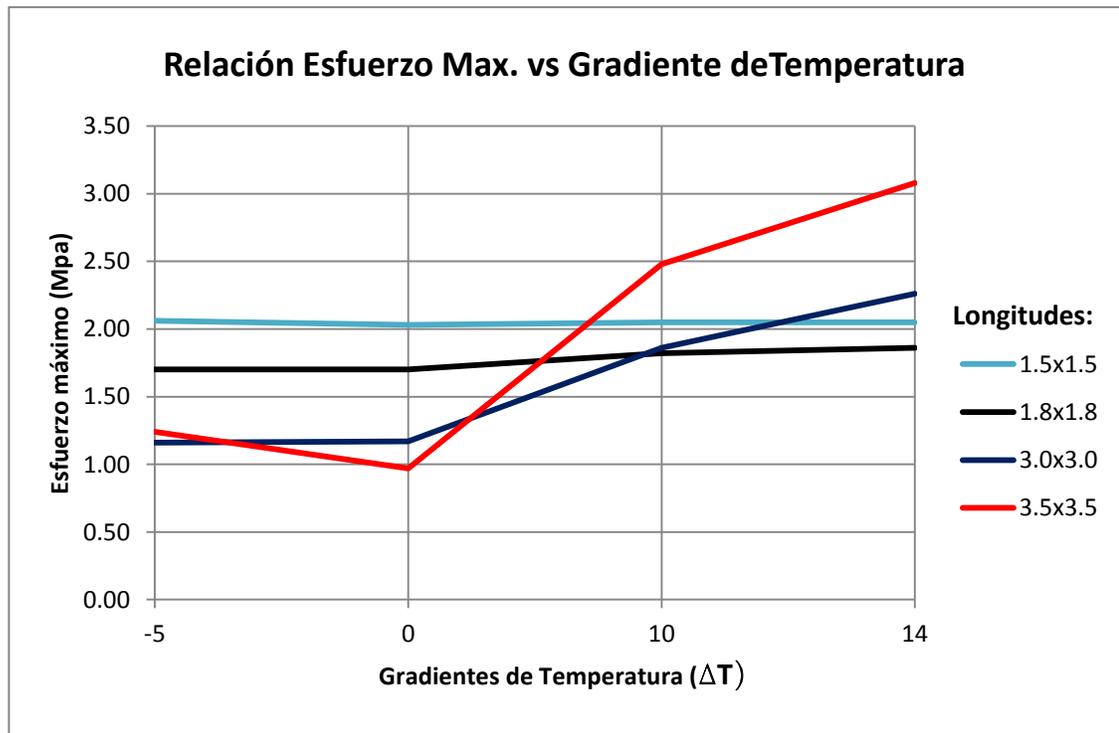


Tabla 3.17 Gradientes en la esquina Eje Tandem

Gradiente ΔT	Esfuerzos máximos Eje Tandem (Mpa)			
	1.5x1.5	1.8x1.8	3.0x3.0	3.5x3.5
-5	1.90	1.53	1.05	1.19
0	1.93	1.56	1.17	0.81
10	1.92	1.66	2.00	2.50
14	2.29	1.72	2.49	3.21

Grafico 3.17 Gradientes en la esquina Eje Tandem

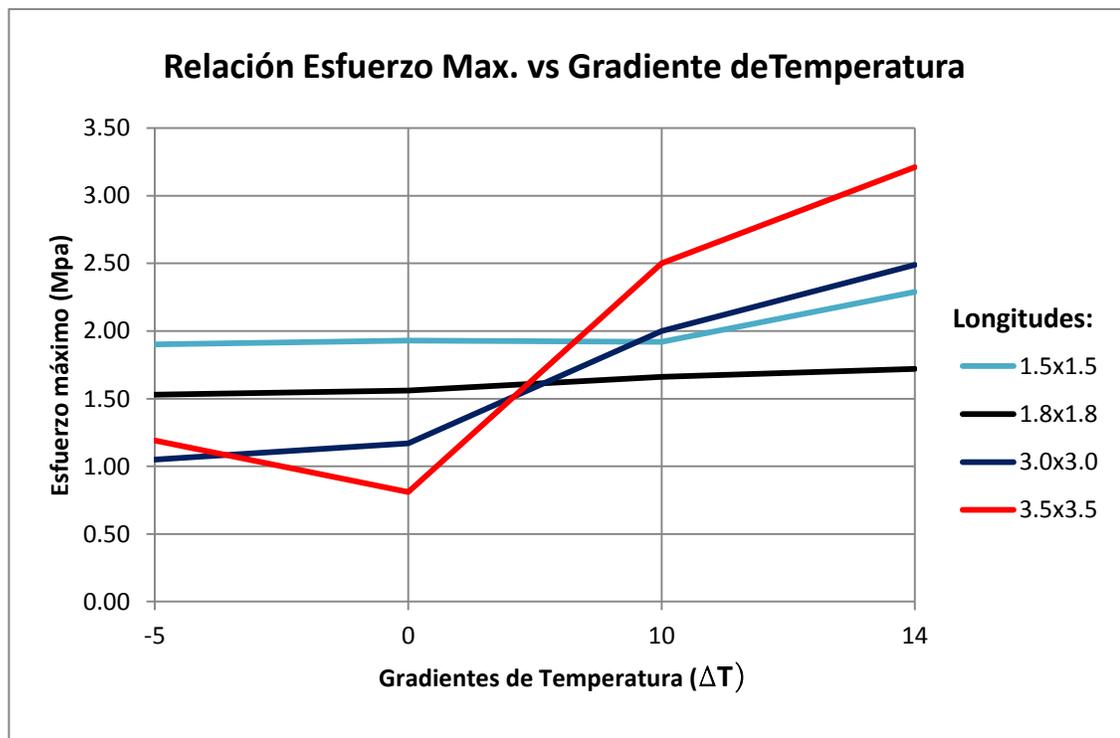
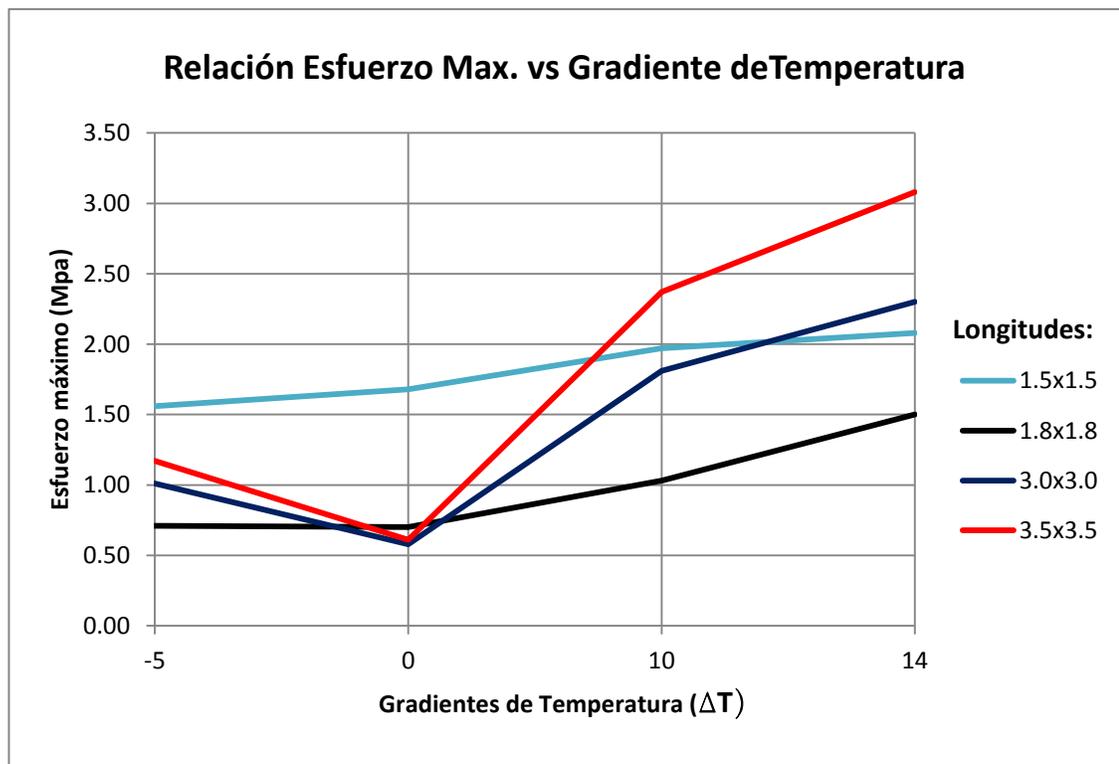


Tabla 3.18 Gradientes en la esquina Eje Tridem

Gradiente ΔT	Esfuerzos máximos Eje Tridem (Mpa)			
	1.5x1.5	1.8x1.8	3.0x3.0	3.5x3.5
-5	1.56	0.71	1.01	1.17
0	1.68	0.70	0.58	0.61
10	1.97	1.03	1.81	2.37
14	2.08	1.50	2.30	3.08

Grafico 3.18 Gradientes en la esquina Eje Tridem



CAPITULO IV:

ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DEL

COMPORTAMIENTO DE LAS LOSAS DE

DIMENSIONES SUPERFICIALES

OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE

CONCRETO HIDRÁULICO

4.1 CONCEPTO DE MODELO DE COMPORTAMIENTO O DETERIORO DEL PAVIMENTO

El comportamiento estructural de los pavimentos rígidos está asociado a la capacidad estructural que tiene para soportar o resistir las solicitaciones de carga al que estará sometido durante su período de vida útil; estas solicitaciones de carga son causadas principalmente por factores que tienen que ver con las cargas producto del tráfico, las condiciones ambientales y además de otros aspectos.

En el marco de conocer el desempeño que tienen estos pavimentos a lo largo de su vida útil; se utilizan distintos tipos de modelos de comportamiento (o deterioro). Estos modelos por lo general corresponden a expresiones matemáticas que permiten predecir la posible evolución del estado del pavimento en el tiempo, en base al conocimiento de las condiciones del mismo al momento de su puesta en servicio y al momento de la realización del análisis.

Los modelos de deterioro pueden surgir a partir de desarrollos empíricos y/o mecanicistas. Los desarrollos empíricos tienen su origen en bases de datos reales conformadas a partir de pavimentos existentes, en dichas bases de datos se ha registrado gran cantidad de información referida a diversos aspectos entre los que se cuentan: información general de los pavimentos, datos de diseño (materiales, diseño estructural, diseño de juntas, etc.), datos de tránsito, condiciones climáticas y de deterioros a lo largo de su vida útil. Luego de determinar las variables más relevantes en la formación de cada deterioro, se realiza con ellas un análisis estadístico que da

origen al modelo que predice el comportamiento futuro del pavimento, en base a una ecuación que relaciona las variables seleccionadas.

Por otra parte, el desarrollo de modelos mecanicistas se basa no solo en datos de pavimento existentes, sino que particularmente en características del comportamiento de las diversas capas y materiales que conforman los pavimentos específicamente en las propiedades físicas y mecánicas de la sub base y el pavimento rígido. Por ejemplo: un modelo de agrietamiento se basa en la determinación del nivel de fatiga acumulado en las losas, el que para ser calculado requiere la utilización de conceptos mecanicistas que permitan conocer los esfuerzos y deformaciones críticos generados en función de las cargas de tránsito y del alabeo térmico. Este último método mencionado es el que utilizaremos para la realización de las pruebas de deterioro y que nos permitirá conocer el comportamiento de los pavimentos rígidos diseñados con losas de dimensiones superficiales optimizadas. Para estas pruebas utilizaremos programa HIPERPAV.

4.2 PROGRAMA HIPERPAV

HIPERPAV, es una herramienta de simulación del comportamiento del pavimento de concreto a edad temprana y a largo plazo. Este programa fue financiado por la Administración Federal de Carreteras (FHWA) de los Estados Unidos y desarrollado por la empresa Transtec Group, Inc. Con HIPERPAV se puede simular las características de diseño de pavimentos, resistencia de materiales, el clima, desarrollo de esfuerzos, y

predecir el agrietamiento en las losas, además de conocer los criterios de comportamiento estructural del pavimento.

4.3 CRITERIOS DE COMPORTAMIENTO

4.3.1 AGRIETAMIENTO LONGITUDINAL

Es el fracturamiento en las losas, que ocurre aproximadamente en el eje paralelo de la carretera, dividiendo la misma en dos planos. Las causas son por lo general, repetición de cargas pesadas, pérdida de soporte de la fundación, esfuerzos debido a los cambios de temperatura y humedad, o por las deficiencias en la ejecución de éstas en sus juntas longitudinales. Con frecuencia el mal diseño de juntas longitudinales en las losas, además de ocupar criterios erróneos de las juntas longitudinales conducen también al desarrollo de fisuras longitudinales.

4.3.2 AGRIETAMIENTO TRANSVERSAL

Agrietamiento transversal en los pavimentos rígidos en general, puede aparecer a edades tempranas inmediatamente después de la construcción o se puede formar en el transcurso de los años debido a la fatiga. Sin embargo, las causas que generan estas grietas son diferentes con respecto al tiempo. A edades tempranas, grietas transversales se forman debido a los cambios restringidos en el volumen del concreto, que tiende a expandirse y contraerse debido a las cambiantes condiciones climáticas. Cuando las deformaciones internas están limitadas debido a la restricción de la interface de la losa-subbase y el peso mismo del pavimento, el agrietamiento

transversal a edad temprana es posible; además que el concreto aún no ha alcanzado su resistencia completa, es más susceptible a daños a los esfuerzos a tracción.

Cuando el agrietamiento transversal se forma después de años de uso del pavimento, la causa más común del agrietamiento es la fatiga. Con el tiempo, el número acumulado de las cargas de tráfico aumenta, al igual que la fatiga generada por los esfuerzos debido a las condiciones climáticas.

4.3.3 ÍNDICE DE RUGOSIDAD O REGULARIDAD INTERNACIONAL (IRI)

Este índice como su propio nombre lo indica evalúa el estado de la superficie del pavimento, en qué condiciones se encuentra, por lo tanto al igual que el PSI (índice de serviciabilidad) está relacionado con el confort del usuario al transitar en el pavimento.

El IRI es el número de irregularidades (desplazamientos verticales) obtenido, por medio de una simulación matemática, con un "cuarto de coche" que circula a 80 km/h, dividido por la longitud del intervalo (m/km). En la actualidad hay diversos instrumentos que permiten obtener el IRI de una manera rápida y precisa, como el perfilómetro pivotante, el SCRIM, etc.

El PSI y el IRI están relacionados con el estado de la superficie del pavimento y con la perspectiva de confort que el usuario tendrá del mismo. Esto ha llevado a los investigadores a establecer relaciones entre ambos indicadores.

4.3.4 SERVICIABILIDAD

La serviciabilidad se usa como una medida del comportamiento del pavimento, la misma que se relaciona con la seguridad y comodidad que puede brindar al usuario (comportamiento funcional), cuando éste circula por la vialidad. También se relaciona con las características físicas que puede presentar el pavimento como grietas, fallas, peladuras, etc, que podrían afectar la capacidad de soporte de la estructura (comportamiento estructural).

El concepto de serviciabilidad consiste en que el conductor circula por primera vez o en repetidas ocasiones sobre una vialidad, experimenta la sensación de seguridad o inseguridad dependiendo de lo que ve y del grado de dificultad para controlar el vehículo. El principal factor asociado a la seguridad y comodidad del usuario es la calidad de rodamiento que depende de la regularidad o rugosidad superficial del pavimento.

El diseño estructural basado en la serviciabilidad, considera necesario determinar el índice de serviciabilidad inicial (P_0) y el índice de serviciabilidad final (P_t), para la vida útil o de diseño del pavimento.

a) Índice de serviciabilidad inicial (P_0)

El índice de serviciabilidad inicial (P_0) se establece como la condición original del pavimento inmediatamente después de su construcción o rehabilitación. AASHTO

estableció para pavimentos rígidos un valor inicial deseable de 4.5, si es que no se tiene información disponible para el diseño.

b) Índice de serviciabilidad final (P_t)

El índice de serviciabilidad final (P_t), ocurre cuando la superficie del pavimento ya no cumple con las expectativas de comodidad y seguridad exigidas por el usuario.

La pérdida de serviciabilidad se define como la diferencia entre el índice de servicio inicial y terminal.

$$\Delta PSI = P_0 - P_t$$

Los factores que influyen mayormente en la pérdida de serviciabilidad de un pavimento son: tráfico, medio ambiente y edad del pavimento. Los efectos que causan éstos factores en el comportamiento del pavimento han sido considerados en este método. El factor edad (tiempo) no está claramente definido. Sin embargo, en la mayoría de los casos es un factor negativo neto que contribuye a la reducción de la serviciabilidad.

4.3.5 ESCALONAMIENTO

Los métodos de diseño utilizados para el análisis de los pavimentos rígidos suelen suponer que las losas se hallan apoyadas en toda su extensión sobre una superficie continua y uniforme. Este apoyo se traduce en un reparto muy grande de las cargas

que circulan sobre el pavimento, de forma que los esfuerzos que originan dichas cargas son muy reducidas en comparación con las que se obtendrían si se considerara un soporte parcial de las losas.

Sin embargo, en la práctica estas condiciones de soporte continuo de la cara inferior de las losas se dan en pocas ocasiones. Debido al fenómeno de alabeo¹ originado por los gradientes térmicos y de humedad.

En el caso de que las superficies de apoyo se encuentren en buen estado, el paso de una carga de tránsito produce una variación de las condiciones de apoyo de la losa, de forma que, al menos en las proximidades del punto de aplicación de dichas cargas, se restablece la sustentación continua de la losa.

Si, por el contrario, la superficie de apoyo de las losas se encuentra en mal estado, donde están presente abolladuras de cierta importancia, las condiciones de sustentación continua de las losas no se podrán restablecer, y los esfuerzos y deflexiones que se producen aumentan notablemente, pudiendo llegar a superar ampliamente a las previstas para el diseño del pavimento con la hipótesis de apoyo continuo.

Una combinación de los factores distorsionantes del comportamiento estructural del pavimento anteriormente mencionado, la falta de apoyo de las losas y la deficiente transferencia de cargas, es la que origina el escalonamiento de las losas. Supóngase un

¹ Definido en el capítulo III

pavimento en el que por una serie de causas el agua se haya acumulado debajo de las losas, y que debido a la existencia de gradientes térmicos o de humedad, las losas se hallen en posición convexa, al avanzar hacia una junta, harán deflechar la losa cargada, desplazando el agua acumulada hacia la otra losa, con una velocidad relativamente lenta que no permite el arrastre de los finos que puedan encontrarse debajo del pavimento. Si la transferencia de cargas entre las dos losas no es muy eficiente, al pasar la rueda a la losa siguiente se producirá un descenso brusco de esta última, desplazando el agua hacia la losa anterior a una velocidad que, dependiendo de la magnitud de la carga y de la brusquedad del choque, puede ser suficiente para provocar el arrastre de los finos. Esta acción se ve incrementada por el levantamiento y la succión de la losa anterior al dejar de ser pisada por la rueda. Los finos desplazados no pueden retornar después a su posición primitiva por la poca velocidad del agua en sentido contrario, según se ha indicado, y por ello se termina creando debajo de la primera losa un cordón de finos que es el causante del escalonamiento o desnivelación permanente.

Por tanto, para que se produzca el escalonamiento hace falta la presencia simultánea de los siguientes factores:

- Agua bajo de las losas, que en general procede de las juntas no selladas o mal selladas, de los bordes longitudinales del pavimento o de las bermas.

- Finos debajo de las losas, procedentes de la erosión de la base o de la berma o que han ascendido de las capas inferiores por bombeo.
- Elevado tránsito pesado, que provoque deflexiones de intensidad y frecuencia suficientes para originar una eventual erosión, en las condiciones de transferencia de carga en las juntas sin pasadores. De hecho el escalonamiento es un fenómeno exclusivo de los pavimentos sometidos a tránsitos medios –altos.

Las principales fuentes de finos bajo las losas son la base y la berma sobre todo cuando se utilizan en los mismos materiales granulares sin tratar, o con un insuficiente contenido de conglomerantes si están estabilizados. Se ha comprobado que en lo que se refiere a la resistencia a la erosión de los materiales estabilizados, existe un umbral crítico de dicho contenido, por debajo del cual la erosionabilidad aumenta muy notablemente, mientras que por encima del mismo las diferencias son poco apreciables.

De todo lo anterior se deduce que el escalonamiento de las losas se traduce, no sólo en una disminución de la comodidad de la rodadura sino también en una distorsión de las condiciones de apoyo de dichas losas:

- En la losa anterior, el cordón de finos origina una sustentación discontinua.
- En la losa posterior, se forma una cavidad bajo la losa por erosión y arrastre de finos.

Un pavimento de este tipo con un escalonamiento severo suele presentar de forma generalizada fisuras y baches en la berma, en una banda longitudinal próxima al borde exterior del pavimento. Por otra parte, los impactos producidos en las losas por los vehiculos suelen traducirse en la aparición de una grieta transversal. La falta de apoyo uniforme de las losas puede originar además un agrietamiento adicional progresivo.

CAPITULO V:

**METODOLOGÍA DE DISEÑO LOSAS DE
DIMENSIONES SUPERFICIALES
OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTOS DE
CONCRETO HIDRÁULICO**

5.1 INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente en El Salvador, el método utilizado para diseñar pavimentos rígidos es el basado en la metodología AASHTO. Desde la primera Guía de Diseño AASHTO que se emitió en 1961, esta ha sido revisada y actualizada durante el transcurso del tiempo. En esta metodología se utilizan relaciones entre los parámetros que por iteración permiten determinar un espesor de losa de concreto hidráulico como diseño.

En 1993 apareció la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO con el concepto del proceso de diseño de sobrecapas y fue en el año de 1998 donde se presentó un suplemento para la Guía de Diseño de Estructuras de Pavimentos AASHTO de 1993 que estaba enfocado al diseño de pavimentos rígidos. En esta etapa de la Guía de Diseño AASHTO se comenzó con los principios del método mecanicista. Este fue el comienzo del uso del método Mecánico-Empírico y el comienzo de una nueva era del diseño de pavimentos.

En forma resumida la metodología de desarrollará los siguientes tres pasos:

- 1) Obtener los valores de los parámetros utilizados para el desarrollo de la metodología, ya sea de una forma calculada o como valores hipotéticos y realizar un predimensionamiento del espesor del pavimento con la hoja de cálculo de AASHTO 1998.

- 2) Análisis estructural de las losas en el programa de elementos Finitos EverFE 2.24 para corroborar que los esfuerzos máximos no sobrepasen el 50% del módulo de ruptura del concreto.
- 3) Determinar el comportamiento estructural a largo plazo por medio del programa HIPERPAV III.

El procedimiento de diseño empleado, se desglosa a continuación a través del siguiente diagrama de flujo:

5.2 METODOLOGIA DE DISEÑO DE LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES OPTIMIZADAS, EN PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRAULICO.

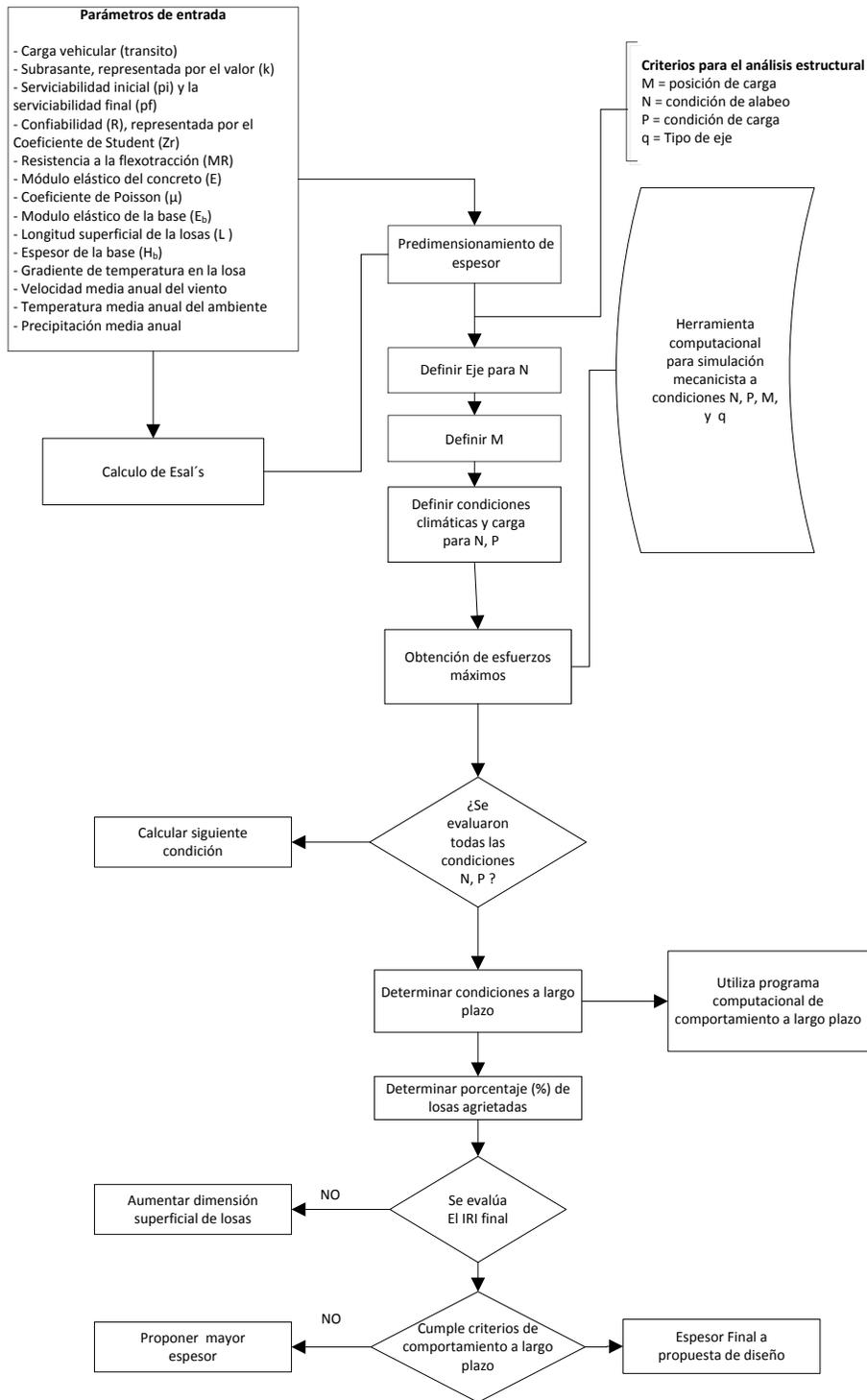


Figura 5.1 Flujograma de metodología de diseño

TABLA 5.1 Parámetros de entrada para el diseño del pavimento

PARAMETROS	NOMENCLATURA	VALORES	UTILIZACIÓN
➤ PROPIEDADES DE LA LOSA			
Módulo De Elasticidad Del Concreto De La Losa (Psi/Mpa)	E_c	4,351,200/ 30,000	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 1 • Etapa 2
Coeficiente Poisson Para Concreto	μ	0.15	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 1 • Etapa 2
Coeficiente de expansión térmica	α	1.1×10^{-5}	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 2
Módulo de Ruptura (Psi/Mpa)	MR	725/4.8	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 1 • Etapa 3
Coeficiente De Fricción Entre La Losa Y La Base *	f	34	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 1
Espaciamiento De Juntas (ft/m)	L	6/ 1.8	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 1 • Etapa 2 • Etapa 3
Densidad de la losa (kg/m³)	ρ	2,400	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 2
Gradiente de temperatura (°C)	ΔT	14	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 2
➤ PROPIEDADES DE LA BASE			
Módulo De Elasticidad De La Base (Psi/MPa)	E_b	800,000/ 5,516	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 1 • Etapa 2
Espesor De Base (Plg)	H_b	10	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 1 • Etapa 2
Modulo Elástico Efectivo De Soporte De La Subbase (Psi/Pulg)/(MPa/m)	k	50/ 13.6	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 1 • Etapa 2
Coeficiente de Poisson de base	ν	0.35	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 2
Coeficiente de expansión térmica	α	1.1×10^{-5}	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa 2

➤ PROPIEDADES DE BARRAS DE AMARRE			
Módulo de elasticidad del acero (MPa)	E_{AC}	200,000	• Etapa 2
Coefficiente de Poisson del acero	ν	0.3	• Etapa 2
➤ CONDICIONES CLIMATICAS			
Velocidad Anual Del Viento (Mph)	WIND	5	• Etapa 1
Temperatura Anual (°F)	TEMP	80	• Etapa 1
Precipitación Anual (Plg)	PRECIP	75	• Etapa 1 • Etapa 3
➤ CRITERIOS DEL COMPORTAMIENTO			
Índice De Serviciabilidad Inicial	P_1	4.5	• Etapa 1
Índice De Serviciabilidad Final	P_2	2	• Etapa 1 • Etapa 3
Confiabilidad (R)	R	80%	• Etapa 1 • Etapa 3
Desviación Estándar Del Sistema	S_o	0.35	• Etapa 1
IRI inicial (m/km)		2	• Etapa 3

* Este valor se obtuvo de la tabla 14 del suplemento de la guía AASHTO 1998 para diseño de pavimento rígido.

- **Estimación de la carga de diseño**

En esta metodología la carga de tráfico a utilizar será en ESAL's (Equivalent Single Axis Loads); que es el número de repeticiones de carga equivalentes a 8.2 ton o 18 Kips, en el carril de diseño durante la vida útil del pavimento.

ESAL's = (Numero de Veh. por Categoría en el periodo de diseño x Factor de Sentido x Factor de Carril x Factor de Eje Equivalente x Factor de losas*).

*Introduciremos este factor de ajuste de carga por dimensión superficial de losa, basándonos en las configuraciones realizadas en el capítulo III; donde se demostró que al disminuir las dimensiones superficiales de las losas, solamente un set o eje de rueda cargan a esta, es decir solamente el 50% de la carga se apoya en una losa y por consecuencia se obtiene una reducción de esfuerzos con respecto a los obtenidos en losas de dimensiones superficiales tradicionales (mayores a 2.5 m). Tomaremos un valor arbitrario de 0.6 para el factor de losa, siempre teniendo en cuenta estar del lado de la seguridad.

Para el cálculo de los Esal's de diseño nos basaremos en un tránsito hipotético.

- Calculo de los Esal's del primer año del periodo de diseño.

PROYECTO:		TRABAJO DE GRADUACION		PERIODO DE DISEÑO:		20 AÑOS		SERVICIABILIDAD FINAL (PT):		2.0
CONFIGURACIÓN VEHICULAR										
TIPO DE VEHÍCULO	TIPO DE EJE DEL TRACTOR			TIPO DE EJE DEL SEMIRREMOLQUE		CANTIDAD DE VEHÍCULOS DIARIOS	FACTOR DE LOSA*	TRANSITO DE DISEÑO (365 DIAS)	ESAL'S FACTOR	ESAL DE DISEÑO
	DIRECCIONAL (Tn/Kip)	TRACCIÓN		REMOLQUE						
		SIMPLE (Tn/Kip)	DOBLE (Tn/Kip)	DOBLE (Tn/Kip)	TRIPLE (Tn/Kip)					
AUTOS	1.0/2.2	1.0/2.2				4,989	0.6	1,092,591	0.00076	830
PICK-UPS	1.0/2.2	2.5/5.5				1,479	0.6	323,901	0.00838	2,714
MICROBUSES	2.5/5.5	5.0/11.0				1,249	0.6	273,531	0.1325	36,243
BUSES	5.0/11.0	9.0/19.8				1,647	0.6	360,693	1.6275	587,028
C2	5.0/11.0	10.0/22.0				934	0.6	204,546	2.4125	493,467
C3	5.0/11.0		16.5/36.3			704	0.6	154,176	1.6845	259,709
T2-S2	5.0/11.0	9.0/19.8		16.0/35.2		689	0.6	150,891	2.158	325,623
T3-S2	5.0/11.0		16.0/35.2	16.0/35.2		541	0.6	118,479	2.158	255,678
T3-S3	5.0/11.0		16.0/35.2		20.0/44.0	502	0.6	109,938	3.9905	438,708
					TPDA	12,734			Σ	2,400,000
							FACTOR DE DIRECCIÓN		0.5	
							FACTOR DE CARRIL		1	
							ESAL'S POR CARRIL DE TRANSITO		1,200,000	

El procedimiento para el cálculo de los Esal's es tomado del manual Centroamericano para diseño de pavimentos, con la variante de la introducción del factor de losa y en la anterior es realizado solamente para el primer año del periodo de diseño. En el cálculo anterior se realizó sobre una carretera hipotética de doble sentido y un solo carril por sentido. Se obtuvo un total de 1.2×10^6 Esal's para el primer año y se toma una tasa de crecimiento lineal del 4%, el programa HIPERPAV III utiliza la siguiente fórmula para calcular las cargas para cada año:

$$ADT_t = ADT_1[1 + r(t - 1)]$$

ADT_t: Carga del año a calcular

ADT₁: Carga del primer año

r: Tasa de crecimiento

t: Año

Se muestra la siguiente tabla donde se calculó los Esal's por año y acumulados.

Tabla 5.20 calculó los Esal's

Años	Esal's por año	Esal's acumulados
1	1,200,000	1,200,000
2	1,248,000	2,448,000
3	1,296,000	3,744,000
4	1,344,000	5,088,000
5	1,392,000	6,480,000
6	1,440,000	7,920,000
7	1,488,000	9,408,000
8	1,536,000	10,944,000

Años	Esal's por año	Esal's acumulados
9	1,584,000	12,528,000
10	1,632,000	14,160,000
11	1,680,000	15,840,000
12	1,728,000	17,568,000
13	1,776,000	19,344,000
14	1,824,000	21,168,000
15	1,872,000	23,040,000
16	1,920,000	24,960,000
17	1,968,000	26,928,000
18	2,016,000	28,944,000
19	2,064,000	31,008,000
20	2,112,000	33,120,000

Se realizara el presente análisis para 20 años y un total de Esal's de 33,120,000.

Se utilizara la hoja de cálculo de AASHTO 1998 para el cálculo del espesor de la losa y posteriormente será evaluado con los programas EVERFE 2.24 e HIPERPAV III para determinar si cumple con los criterios estructurales.

Rigid Pavement Design - Based on AASHTO Supplemental Guide

Reference: *LTPP DATA ANALYSIS - Phase I: Validation of Guidelines for k-Value Selection and Concrete Pavement Performance Prediction*

II. Design

Serviceability

Initial Serviceability, P1:
 Terminal Serviceability, P2:

PCC Properties

28-day Mean Modulus of Rupture, (S'_c): psi
 Elastic Modulus of Slab, E_c : psi
 Poisson's Ratio for Concrete, m:

Table 14

Base Properties

Elastic Modulus of Base, E_b : psi
 Design Thickness of Base, H_b : in
 Slab-Base Friction Factor, f:

Reliability and Standard Deviation

Reliability Level (R): %
 Overall Standard Deviation, S_0 :

Table 15

Climatic Properties

Mean Annual Wind Speed, WIND: mph
 Mean Annual Air Temperature, TEMP: °F
 Mean Annual Precipitation, PRECIP: in

Subgrade k-Value

Calculate Seasonal k-Value psi/in

Design ESALs

Calculate Traffic million

Pavement Type, Joint Spacing (L)

- JPCP
 JRCP
 CRCP

Joint Spacing:

ft

JPCP

Effective Joint Spacing: in

Edge Support

- Conventional 12-ft wide traffic lane
 Conventional 12-ft wide traffic lane + tied PCC
 2-ft widened slab w/conventional 12-ft traffic lane

Edge Support Factor:

Sensitivity Analysis

Slab Thickness used for

Sensitivity Analysis: in

Slab
Thickness
Sensitivity

- Modulus of Rupture Elastic Modulus (Slab)
 Elastic Modulus (Base) Base Thickness
 k-Value Joint Spacing
 Reliability Standard Deviation

Calculated Slab Thickness for Above Inputs:

7.93 in

Calculate

Faulting Check

5.3 ANALISIS ESTRUCTURAL EN LOSAS DE PAVIMENTO RÍGIDO MEDIANTE LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS.

En la etapa anterior la hoja de Excel nos proporciona un espesor de 7.93 in, **que aproximaremos a 20 cm** y será el espesor que utilizaremos para el análisis estructural con el programa EverFE 2.24 y en la siguiente etapa al análisis del comportamiento a largo plazo con HIPERPAV III.

Las soluciones de análisis estructural han tenido gran desarrollo tecnológico en las últimas décadas, han pasado de sencilla fórmulas y derivaciones complejas a programas computacionales de modelación de losa con graficas en tres dimensiones. Una de las últimas metodologías es el análisis estructural por el Método de Elemento finitos que se detalló en el capítulo III del presente trabajo de graduación. Este método considera que los esfuerzos en un pavimento de concreto son el resultado de la interacción de diversos factores, en esta etapa del análisis estructural se hará lo siguiente:

- Se ingresa todos los datos requeridos en el programa de elementos finitos.
- Se modela una estructura de pavimento con un gradiente térmico más la carga.
- Se revisa que el esfuerzo máximo en la losa que no se mayor del 50% del Módulo de Rotura (MR) del concreto.

Tabla de Resumen de resultados de EVerFE 2.24

Posición	Módulo de Ruptura (MPa)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Criterio del 50% < MR
Eje Simple - Borde	4.8	2.01	41.88% -Cumple
Eje Simple - Esquina	4.8	1.86	38.75% -Cumple
Eje Simple - Centro	4.8	1.65	34.38% -Cumple
Eje Tandem- Borde	4.8	1.63	33.96% -Cumple
Eje Tandem - Esquina	4.8	1.72	35.83% -Cumple
Eje Tandem - Centro	4.8	1.36	28.33% -Cumple
Eje Tridem- Borde	4.8	1.69	35.21% -Cumple
Eje Tridem - Esquina	4.8	1.50	31.25% -Cumple
Eje Tridem - Centro	4.8	1.31	27.29% -Cumple

Los resultados resumidos en la tabla anterior muestran que cumple con el criterio que el esfuerzo máximo del concreto no es mayor del 50% MR.

Se procederá a realizar el análisis del comportamiento estructural del pavimento a largo plazo.

Se toma el 50% del Módulo de rotura basados en el experimento de Bate (Clemmer, 1923) que un esfuerzo de flexión inducida podría ser repetida indefinidamente sin causar ruptura, siempre que la intensidad de esfuerzo en las fibras no exceda aproximadamente 50% del módulo de rotura del concreto. Análisis y Diseño de Pavimento, Yang H. Huang, Segunda Edición, pagina 7, párrafo 5.

La modulación en programa EverFE ya fue definida en el capítulo III del presente trabajo de graduación, se utilizaran los parámetros a utilizar serán los que previamente han sido definidos en el presente capitulo; por lo que se procederá a mostrar los resultados a continuación:

5.4 COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO DE LOSAS DE DIMENSIONES SUPERFICIALES OPTIMIZADAS EN PAVIMENTOS DE CONCRETO HIDRÁULICO.

Para conocer el comportamiento de estos pavimentos a largo plazo realizaremos simulaciones en el programa HIPERPAV III, utilizando parámetros ya definidos en la tabla 5.1 y complementado con los siguientes datos.

- **Diseño de mezcla de concreto**

Tipo de cemento: Tipo I

Tipo de agregado: Basalto

Aditivos: Tipo D - reductores y retardantes

Clase de ceniza volátil: ninguno

Componente	Masa (lb/yd³)
Agregado grueso	2,075
Agregado fino	905
Agua	312
Cemento (Tipo I)	632
Total	3,924
Relación de agua/cemento:	0.49
Relación de agua/base de cemento:	0.49
Resistencia a la flexión:	4.8 MPa

Tabla 5.5 Datos climáticos utilizados*.

Hora	Tiempo	Temperatura (°C)	Humedad (%)	V. Viento (KPH)
0	03:00 p.m.	28	66	3
1	04:00 p.m.	28	70	8
2	05:00 p.m.	28	74	0
3	06:00 p.m.	26	78	0
4	07:00 p.m.	24	89	0
5	08:00 p.m.	23	94	0
6	09:00 p.m.	23	94	0
7	10:00 p.m.	23	94	8
8	11:00 p.m.	22	94	0
9	12:00 a.m.	23	94	5
10	01:00 a.m.	23	90	6
11	02:00 a.m.	22	88	5
12	03:00 a.m.	22	86	5
13	04:00 a.m.	22	86	5
14	05:00 a.m.	22	87	6
15	06:00 a.m.	22	92	6
16	07:00 a.m.	22	90	8
17	08:00 a.m.	24	84	10
18	09:00 a.m.	26	79	11
19	10:00 a.m.	28	71	10
20	11:00 a.m.	29	68	10
21	12:00 p.m.	30	66	10
22	01:00 p.m.	30	65	8
23	02:00 p.m.	30	68	10
24	03:00 p.m.	30	69	10

Hora	Tiempo	Temperatura (°C)	Humedad (%)	V. Viento (KPH)
25	04:00 p.m.	29	71	11
26	05:00 p.m.	28	76	10
27	06:00 p.m.	27	80	5
28	07:00 p.m.	26	86	6
29	08:00 p.m.	24	92	5
30	09:00 p.m.	23	93	5
31	10:00 p.m.	23	94	5
32	11:00 p.m.	23	94	8
33	12:00 a.m.	23	93	6
34	01:00 a.m.	23	89	6
35	02:00 a.m.	22	88	6
36	03:00 a.m.	22	88	6
37	04:00 a.m.	22	91	6
38	05:00 a.m.	22	93	6
39	06:00 a.m.	21	96	6
40	07:00 a.m.	22	89	6
41	08:00 a.m.	24	83	8
42	09:00 a.m.	26	77	8
43	10:00 a.m.	28	68	8
44	11:00 a.m.	29	63	8
45	12:00 p.m.	31	58	8
46	01:00 p.m.	31	57	10
47	02:00 p.m.	31	60	10
48	03:00 p.m.	31	62	10
49	04:00 p.m.	30	64	10
50	05:00 p.m.	29	71	11

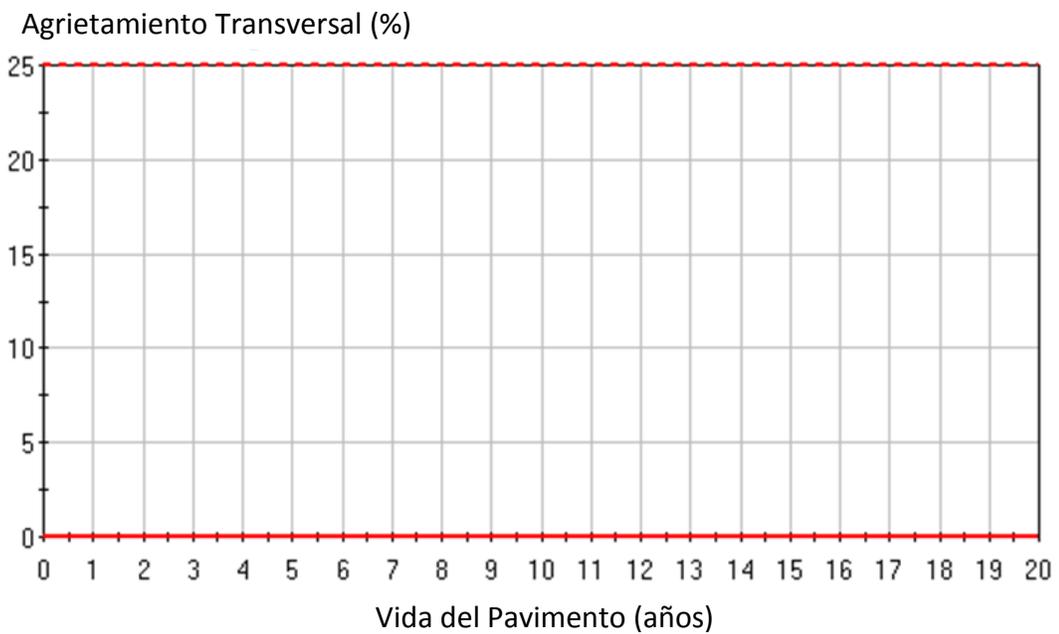
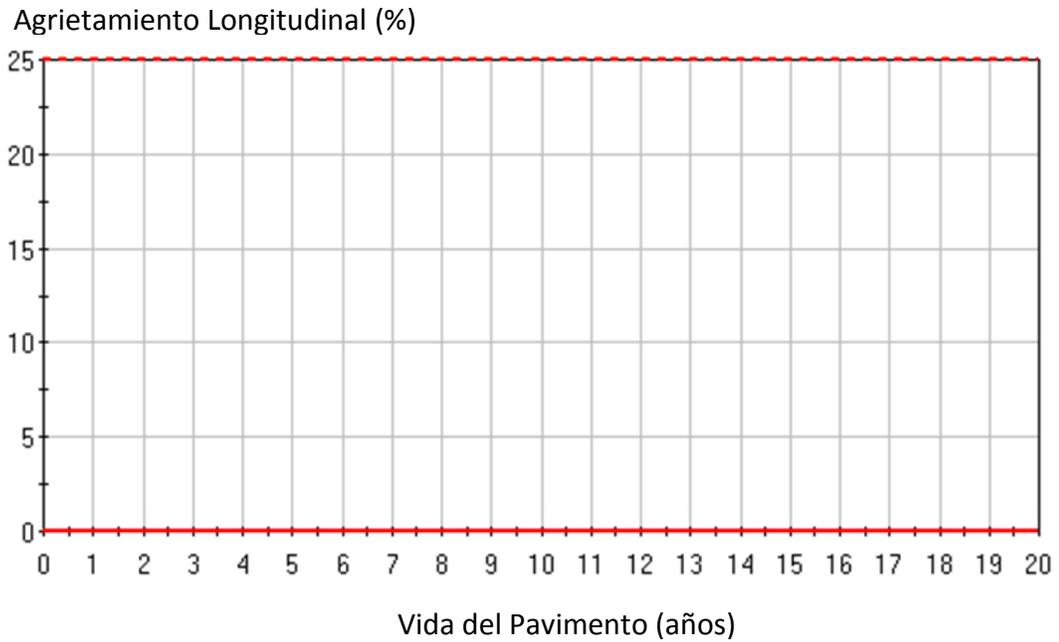
Hora	Tiempo	Temperatura (°C)	Humedad (%)	V. Viento (KPH)
51	06:00 p.m.	27	77	8
52	07:00 p.m.	27	77	8
53	08:00 p.m.	26	81	8
54	09:00 p.m.	24	90	6
55	10:00 p.m.	24	93	5
56	11:00 p.m.	23	95	3
57	12:00 a.m.	23	95	5
58	01:00 a.m.	23	95	3
59	02:00 a.m.	24	89	3
60	03:00 a.m.	23	88	5
61	04:00 a.m.	23	89	5
62	05:00 a.m.	22	91	5
63	06:00 a.m.	22	93	5
64	07:00 a.m.	22	94	6
65	08:00 a.m.	22	91	6
66	09:00 a.m.	24	83	8
67	10:00 a.m.	26	78	8
68	11:00 a.m.	28	70	8
69	12:00 p.m.	29	68	6
70	01:00 p.m.	30	66	6
71	02:00 p.m.	31	64	8
72	03:00 p.m.	30	66	8

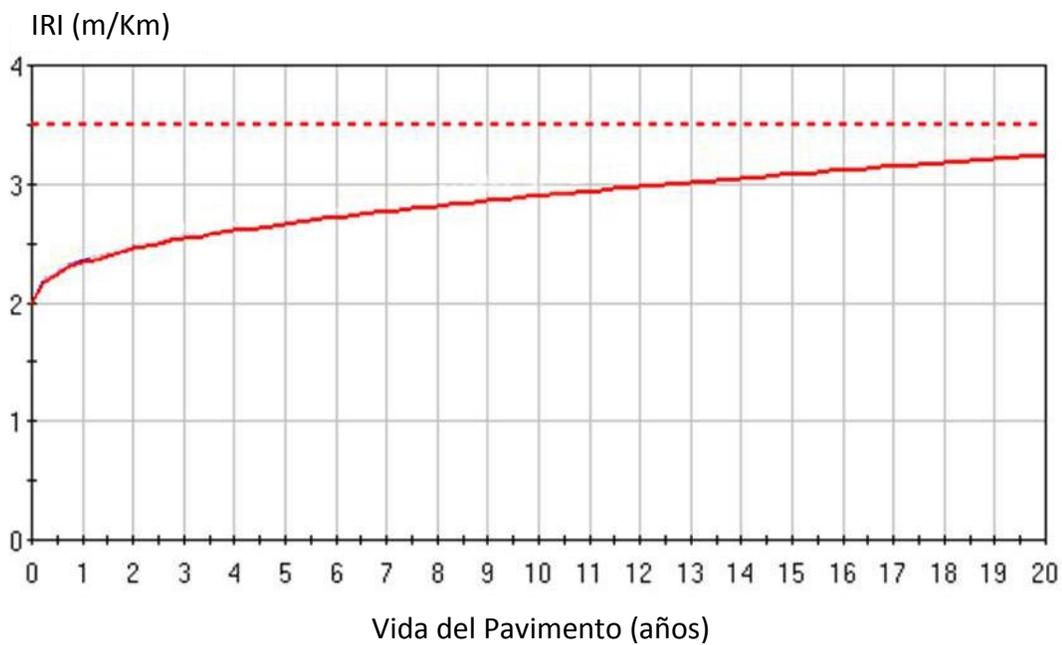
*Los datos anteriores corresponde a la ciudad de San Salvador y fueron obtenidos de la página web: <http://clima.starmedia.com>.

5.4.1 Simulación de comportamiento del pavimento N°3



Losas de 1.8x1.8 metros





5.4.2 RESULTADOS OBTENIDOS

En las gráficas resultantes de las simulaciones en el HIPERPAV III se demuestra que las losas de dimensiones superficiales optimizadas de 1.8x1.8 metros presentan un buen desempeño en el agrietamiento transversal y longitudinal, prácticamente el resultado fue 0% de agrietamiento de las losas en el periodo de diseño .En cuanto a las gráficas del IRI y serviciabilidad cumplieron satisfactoriamente los criterios de comportamiento a largo plazo establecidos para la presente metodología de diseño.

CAPITULO VI:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- En el contenido del capítulo II del presente trabajo de graduación, se estableció el contenido teórico que respaldara el método de diseño de losas de dimensiones superficiales optimizadas, en pavimentos de concreto hidráulico.
- Basados en las configuraciones de los Ejes de carga y en el dimensionamiento de las losas, realizadas en el programa EverFE 2.24, se determina como losas de dimensiones superficiales optimizadas aquellas que un solo set de ruedas se apoya por cada losa en los pavimentos de concreto hidráulico y esto fue posible en losas menores a 2.2x2.2 metros.
- Basándose en el contenido teórica planteado en el capítulo II y con los resultados obtenidos en las simulaciones efectuadas en el programa de elementos finitos EverFE 2.24. Se concluye que los esfuerzos resultantes a la combinación de carga de eje y ambientales son menores en las losas de dimensiones superficiales optimizadas con respecto a los producidos en las losas con dimensiones tradicionales y además que son menos susceptibles al aumento de esfuerzos generados por los cambios de temperatura que ocurren a través del espesor de las losas, es decir a los esfuerzos por alabeo.

- En las simulaciones realizadas en el programa de elementos finitos EverFE 2.24 se determinó que las losas de 1.5x1.5 m y de 1.8x1.8 m fueron las que proporcionaron los menores esfuerzos generados por las combinaciones de cargas de ejes y de temperatura (alabeo).
- En las simulaciones realizadas en el programa HIPERPAV III, se concluye que satisfactoriamente los pavimentos de losas de dimensiones superficiales optimizadas, cumplieron los criterios de comportamiento a largo plazo (agrietamiento longitudinal y transversal, serviciabilidad e IRI) durante el periodo de diseño de 20 años.

6.2 RECOMENDACIONES

- Continuar con el estudio sobre el diseño de losas de dimensiones superficiales optimizadas, con la finalidad de perfeccionar una metodología alternativa que sea viable para el diseño de pavimentos rígidos de concreto hidráulico.
- Trabajar en el desarrollo de especificaciones para la construcción de losas de dimensiones superficiales optimizadas en pavimentos de concreto hidráulico; ya que las características especiales de este tipo de pavimentos requiere consideraciones que deben ser incorporadas en normativas y manuales de construcción utilizados en el país.
- Se recomienda utilizar losas de dimensiones superficiales optimizadas que sean mayores a 1.5x1.5 m y menores a 1.8x1.8 m, para obtener un mejor desempeño de este tipo de pavimento, siempre tomando en cuenta el dimensionamiento del ancho de los carriles.
- Se recomienda realizar un estudio del progreso del deterioro de pavimentos construidos con losas de dimensiones superficiales menores a las convencionales para poder determinar la funcionalidad de estos en la práctica.

- Se recomienda en próximos trabajos de investigación realizar un análisis numérico del factor de ajuste de dimensionamiento superficial de losa con el objetivo de calcular los valores adecuados para la utilización de este factor, para ello deberá de apoyarse en documentación existente como los estudios realizados por la NCHRP (Programa Nacional Cooperativo de Investigación de Carreteras) y además utilizando ecuaciones donde se tome en cuenta parámetros como el número de pasadas admisibles, el módulo de ruptura del concreto y el esfuerzo resultante de la losa debido a combinaciones de carga; conocer el daño por fatiga que causa la carga de tráfico en las losas de dimensiones superficiales optimizadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Instructivo LNV Difusión de nuevas tecnologías
Ministerio de Obras Públicas del gobierno de Chile (MOP)
Santiago – Chile, 2012

- Tesis método constructivo de losas cortas en Pavimentos de concreto hidráulico
Ing. Luis Rolando Román Ávila
Guatemala–Guatemala 2008

- Resumen ejecutivo de análisis y predicción de comportamiento pavimentos semi-rígidos de losas cortas de hormigón.
ICH (Instituto Chileno del Hormigón)
Santiago - Chile, 2010

- Guion de clases de Ingeniería de Pavimentos Rígidos
Ing. Mauricio Ernesto Valencia
Ciudad Universitaria – El Salvador, 2012

- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 4th Edition, Supplement, 1998.

- AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures AASHTO, 1993

- Manual Centroamericano para el diseño de pavimentos. Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA.

- Huang, Yang H. Pavement Analysis and Design, First Edition, Prentice-Hall, Inc., 1993.

- Traffic. Part 2, Chapter 4. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP, March 2004.

- Design of New and Reconstructed Rigid Pavements. Part 3, Chapter 4. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP, March 2004.