

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE LOSAS CORTAS Y LOS FACTORES QUE PODRÍAN AFECTAR EL RENDIMIENTO DE LOS TRAMOS EN GUATEMALA

Trabajo de investigación presentado por

Álvaro José Rubio Haasler

para optar al grado académico de

Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2014

**ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE LOSAS CORTAS Y LOS
FACTORES QUE PODRÍAN AFECTAR EL RENDIMIENTO DE
LOS TRAMOS EN GUATEMALA**

Universidad del Valle de Guatemala

Facultad de Ingeniería



**ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA DE LOSAS CORTAS Y
LOS FACTORES QUE PODRÍAN AFECTAR EL
RENDIMIENTO DE LOS TRAMOS EN GUATEMALA**

Trabajo de investigación presentado por

Álvaro José Rubio Haasler

para optar al grado académico de

Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2014

Vo. Bo. :


(f)  _____

Ing. Hugo González

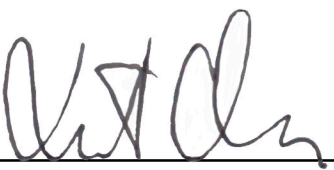
Tribunal Examinador:

(f)  _____

Ing. Alex Amado

(f)  _____

Ing. Hugo González

(f)  _____

Ing. Roberto Godo Levensen

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de diciembre del 2014

PREFACIO

Este trabajo de tesis busca informar a los profesionales o estudiantes interesados en aprender más sobre la metodología que se ha denominado como losas cortas. El trabajo busca exponer los principales criterios que utiliza esta metodología y analizar los resultados que se han visto en Guatemala hasta hoy en día, basándose en testimonios de ingenieros que han estado relacionados con el tema. Esta metodología es relativamente nueva y hasta hoy en día se está comenzando a recibir retroalimentación del rendimiento de esta tecnología en Guatemala. Por esta razón, en este trabajo de tesis se tocan varios temas e hipótesis que aún deben de estudiarse a fondo para predecir con certeza el comportamiento de un tramo de losas cortas. Mientras más información se vaya recopilando y más a fondo se estudie el tema de las losas cortas, se sabrá con mayor certeza como optimizar esta tecnología. Mientras tanto, se cuenta con el testimonio de muchos ingenieros que han trabajado en diversos tramos de losas cortas y quienes ya tienen hipótesis que asumen el rendimiento de las losas cortas.

El objetivo principal de esta tesis es informar de la metodología de losas cortas e incentivar a ingenieros y futuros estudiantes para que investiguen más a fondo este tema. Se deben enfocar los esfuerzos de varias instituciones y profesionales para determinar la factibilidad de seguir desarrollando tramos de losas cortas. El autor agradece al Ing. Hugo Gonzalez, quien dio un gran aporte al desarrollo de este trabajo por medio de su asesoría. También se agradece al Ing. Estuardo Herrera por su apoyo a lo largo del desarrollo de este trabajo, al Ing. Leonel Aguilar por aportar su gran experiencia en el campo de carreteras para beneficio de este trabajo y a todos los profesionales que dieron su criterio en las diferentes partes de este trabajo. Un especial agradecimiento a mi familia y amigos, quienes me apoyaron incondicionalmente a lo largo del desarrollo de este trabajo de tesis.

CONTENIDO

	Página
PREFACIO	vi
LISTA DE ILUSTRACIONES	xi
LISTA DE TABLAS	xiv
RESUMEN	xv
Capítulos	
I. Introducción	1
II. OBJETIVOS	3
A. Objetivo general	3
B. Objetivos específicos	3
III. ANTECEDENTES	4
IV. TIPOS DE PAVIMENTOS	6
A. Pavimento flexible	6
1. Sub rasante	6
2. Sub base	6
3. Base	6
4. Capa superficial	7
B. Pavimento rígido	7
1. Sub rasante	7
2. Sub base	7
3. Losa de concreto	7
C. Comparación entre pavimento rígido y pavimento flexible	8
D. Pavimentos semi-rígidos	9
V. PARÁMETROS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS	10
A. Tránsito	10
B. Sub-rasante	11
C. Clima	11
1. Cambio de temperatura	11

	2.	Precipitación	13
D.		Serviciabilidad	14
E.		Rugosidad	14
F.		Propiedades de los materiales	15
G.		Confiabilidad	15
H.		Espaciamiento entre juntas	15
	1.	Espaciamiento entre juntas en AASHTO 93	16
	2.	Espaciamiento entre juntas en losas cortas	17
	a.	Transmisión de carga	17
VI.		TIPOS DE FALLAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS	19
A.		Grietas	19
	1.	Grietas de esquina	19
	2.	Grietas longitudinales	20
	3.	Grietas transversales	20
B.		Deficiencias del sellado	21
C.		Separación de junta longitudinal	22
D.		Escalonamiento de juntas y grietas	22
VII.		ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN UN PAVIMENTO RÍGIDO	23
A.		Esfuerzos por factores climáticos	23
B.		Esfuerzos por carga de tráfico	25
	1.	Esfuerzo inducido por carga en la esquina de la losa	25
	2.	Esfuerzo inducido por carga en el borde de la losa	27
	3.	Esfuerzo inducido por carga en el centro de la losa	27
C.		Deflexiones en un pavimento rígido	28
D.		Cálculo de esfuerzos y deflexiones por medio de elementos finitos ...	29
VIII.		CONTROL DE CALIDAD	30
A.		Normativa guatemalteca El libro azul	30
	1.	División 200: Movimientos de tierras	31
	2.	División 204: Capa de sub base y base granular	32
	3.	Requisitos de construcción para bases y sub bases granulares .	33
	4.	División 305: Capa de sub base y base trituradas	34
	5.	División 307: Capa de sub base y base estabilizada	37

IX.	LOSAS CORTAS (PLANTEAMIENTO DE TCPAVEMENTS)	39
A.	Rigidez de la base	39
B.	Largo de la losa	40
C.	Gradiente hidráulico y térmico	41
D.	Transmisión de carga	41
E.	Tensiones en la losa	42
F.	Consideraciones especiales	43
G.	Procedimiento de diseño de losas cortas	43
H.	Programas de diseño	44
I.	Comparación de esfuerzos de una losa convencional contra esfuerzos de una losa corta	44
X.	FACTORES QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DE LAS LOSAS CORTAS	46
XI.	DESPLAZAMIENTO LATERAL	47
A.	Relación entre desplazamiento lateral y el peso de la losa	47
B.	Relación entre desplazamiento lateral y el área en contacto con la base	50
XII.	RECOMENDACIONES PARA MITIGAR EL DESPLAZAMIENTO LATERAL	52
A.	Barras de sujeción entre la losa y el hombro de la carretera	52
B.	Ancho de hombro adecuado	53
C.	Integrar dientes en los hombros	54
D.	Mejorar la fricción entre base y losa	56
E.	Inconveniente con barras de acero verticales para confinar	57
F.	Estructuras de borde y rellenos	57
XIII.	DRENAJE DEL PAVIMENTO	59
A.	Integridad en el diseño hidráulico de pavimentos	60
B.	Incremento de cantidad de juntas en un tramo de losas cortas	61
C.	Falta de sello en las losas	63
D.	Problemática con bombeo de finos	64
1.	Cargas rápidas y pesadas en el tramo	64
2.	Suelos malos	64

	3. Mal drenaje del pavimento	64
	4. Deterioro en los pavimentos	64
	E. Precipitación en Guatemala	64
XIV.	RECOMENDACIONES PARA MEJORAR EL DRENAJE EN UN PAVIMENTO DE LOSAS CORTAS	67
	A. Sellas las juntas	67
	B. Realizar un diseño adecuado de drenaje	68
	C. Inconveniente con bajar el nivel de la cuneta	69
XV.	TIPO DE CARGA	71
	A. Peso de camiones	71
	B. Modulación de losas	72
	C. Incremento de esquinas y bordes	74
XVI.	RECOMENDACIONES PARA MITIGAR PROBLEMÁTICA CON EL TIPO DE CARGA	77
	A. Realizar un estudio de tránsito adecuado	77
	B. Evaluar todos los casos de carga	78
	C. Mejorar la transmisión de carga	78
	1. Transmisión de carga en proceso constructivo y reparaciones ..	79
	2. Profundidad de juntas	79
XVII.	CALIDAD DE BASE	82
	A. Bases estabilizadas con cemento y bases granulares	82
	B. Aportación estructural de la base	83
XVIII.	RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LA CALIDAD DE BASE	84
XIX.	DISCUSIÓN	86
XX.	CONCLUSIONES	88
XXI.	RECOMENDACIONES	89
XXII.	BIBLIOGRAFÍA	91
XXIII.	TERMINOLOGÍA	93
XXIV.	ANEXOS	94
	A. Cálculo de esfuerzos y deflexiones por medio del programa de elementos finitos Everfe	94

LISTADO DE ILUSTRACIONES

No.		Página
1.	Comparación entre pavimento rígido y pavimento flexible	8
2.	Esquema de comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos	9
3.	Representación visual del alabeo en las losas	12
4.	Concepto propuesto por TCPavments de cargar un solo eje por losa	17
5.	Falla de grieta de esquina en un pavimento rígido	19
6.	Grieta longitudinal en un pavimento rígido	20
7.	Grieta transversal en un pavimento rígido	21
8.	Deficiencia de sellos en un pavimento rígido	21
9.	Diagrama de falla por separación en la junta	22
10.	Diagrama de escalonamiento en pavimentos rígidos	22
11.	Tabla para cálculo de coeficiente de corrección C.	24
12.	Posiciones de cargas críticas en un pavimento rígido	25
13.	Concentración de esfuerzos en una losa alabeada sobre una base rígida	39
14.	Comparación entre el voladizo generado entre una base granular contra una estabilizada con cemento	40
15.	Relación entre largo de la losa y el largo del voladizo generado por el alabeo	40
16.	Relación entre longitud de la losa y las fuerzas inducidas por la concentración de la misma	41
17.	Comparación del comportamiento de losas con dovelas y sin dovelas	42
18.	Comparación de los esfuerzos generados en una losa corta contra una losa convencional	42
19.	Diagrama de fuerzas que interactúan en una losa convencional	47
20.	Diagrama de fuerzas que interactúan en una losa corta	48
21.	Problema de apertura de junta por desplazamiento lateral de las losas en	

	un tramo de losas cortas	49
22.	Área superficial de una losa corta y de una losa convencional	50
23.	Losa y hombro de la carretera sin detalle de diente	55
24.	Losa y hombro de la carretera con detalla de diente	55
25.	Comparación de la cantidad de juntas entre losas cortas y losas convencionales	62
26.	Precipitación y temperatura promedio en Chile	65
27.	Precipitación y temperatura promedio en Guatemala	65
28.	Flujo de agua superficial en pavimento de losas cortas	67
29.	Perdida de fraccionamiento entre base y losa debido a infiltración de agua en pavimento	68
30.	Drenaje ineficiente en pavimento de losas cortas	68
31.	Esquema de cuneta por debajo del nivel de pavimento	69
32.	Tramo de losas cortas con cuneta debajo del nivel de la capa de concreto	70
33.	Camión de ejemplo con distribución de peso en un eje simple de 10,000 lbs. y dos ejes tándems de 32,000 lbs.	72
34.	Eje tándem con llantas separadas a 1.80 m, una llanta carga sobre cada losa	73
35.	Eje tándem con llantas separadas a 1.60 m, ambos ejes cargan sobre la misma losa	73
36.	Efecto de carga en el centro de una losa y en el borde de la siguiente, generando un potencial escalonamiento	74
37.	Comparación de modulación de losas cortas contra la modulación de losas convencionales	75
38.	Grieta en la esquina de una losa corta	75
39.	Detalle de dovelas en junta fría en proceso constructivo de losas de concreto	79
40.	Diferencia de profundidad entre junta longitudinal y junta transversal en losas cortas de 18 centímetros de espesor	80
41.	Imagen de paso 1 para cálculo en Everfe	94
42.	Imagen de paso 2 para cálculo en Everfe	95
43.	Imagen de paso 3 para cálculo en Everfe	96

44.	Imagen de paso 4 para cálculo en Everfe	97
45.	Imagen de paso 5 para cálculo en Everfe	98
46.	Imagen de paso 6 para cálculo en Everfe	99
47.	Imagen de paso 7 para cálculo en Everfe	100
48.	Imagen de paso 8 para cálculo de Everfe	101
49.	Imagen de cálculo de elementos finitos en la parte superior de la losa	102
50.	Imagen de cálculo de elementos finitos en la parte inferior de la losa	102

LISTADO DE TABLAS

No.		Página
1.	Niveles de confiabilidad R recomendados para diseño, "Manual centroamericano para el diseño de pavimentos"	15
2.	Dimensiones recomendadas para dovelas en pavimentos rígidos	18
3.	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada	33
4.	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada	35
5.	Comparación de esfuerzos en la parte superior de la losa, para losas convencionales y tramos de losas cortas	45
6.	Anchos mínimos de hombros y aceras	54
7.	Valores de resistencia a la fricción de diferentes tipos de bases	56
8.	Comparación entre una base granular y una base estabilizada con cemento en losas cortas de 1.8.m x 1.8.m	82

RESUMEN

La presente tesis realiza un análisis de la metodología de losas cortas en Guatemala. Se estudiaron los posibles factores que pueden afectar los tramos actualmente en funcionamiento, y los planteamientos que se utilizaron para diseñar dichos tramos.

En los primeros capítulos, se hace una síntesis de los conceptos básicos de diseño de pavimentos y las normativas vigentes en Guatemala. Posteriormente se explica cómo la empresa que tiene la patente de las losas cortas plantea ésta tecnología. Dentro de estos planteamientos, se describen los temas: transmisión de carga, rigidez de base, gradiente hidráulico y térmico, esfuerzos en las losas, entre otros factores, que se utilizan como base para diseñar los tramos de losas cortas. En ésta sección, también se comenta en términos generales cómo se plantea la metodología de diseño para este tipo de tramos, haciendo una comparación entre los esfuerzos de una losa corta y una losa convencional; por medio de cálculos elaborados con metodología de elementos finitos.

En la segunda parte de la investigación, se procedió a realizar una serie de entrevistas a diferentes profesionales en el medio guatemalteco, que hubieran participado en las diferentes etapas de los proyectos de losas cortas. Se plantearon las principales dificultades que se han observado en el medio, proponiendo varias soluciones preliminares para mitigar dichos problemas. Se determinó, que la causa principal de los problemas son: el desplazamiento lateral de las losas, el drenaje en los pavimentos, el tipo de carga a los que son sometidos los pavimentos y la calidad de la base.

Dentro de las recomendaciones que se plantearon se mencionaron desde deficiencias en los materiales utilizados hasta detalles que aún faltan por definir para terminar de plantear ésta tecnología, como los son: los hombros de los tramos y el detalle de junta. Se discutió cómo las diferentes adversidades del medio guatemalteco pueden afectar el rendimiento de un pavimento de espesor optimizado.

Hay muchos factores que deben considerarse en la metodología de losas cortas, para crear un diseño completo para la región, señalando entre los más importantes: el clima tropical de altas precipitaciones, y los sellos en las juntas. Aún falta mucha investigación para poder validar esta tecnología, que deberá incluir una retroalimentación del desempeño observado en los tramos de losas cortas, que se encuentran funcionando actualmente en la región.

I. INTRODUCCIÓN

Los tramos de losas cortas han dado mucho de qué hablar en Guatemala. Esta metodología fue desarrollada por el Dr. Covarrubias en Chile y básicamente consiste en reducir el espaciamiento de las juntas de las losas de los pavimentos de concreto para redistribuir los esfuerzos y optimizar el espesor de la losa. Con esto se busca tener un mejor rendimiento de los pavimentos de concreto a un menor costo. La metodología fue implementada en varios tramos de carreteras en Guatemala, sin embargo no cuenta con el respaldo de un código formal y todavía se tiene muchos puntos que se deben de investigar más a fondo para entender los alcances de esta metodología. Actualmente Guatemala cuenta con más de 100 km de carreteras construidos con la metodología de losas cortas. Se han encontrado varios factores que afectan en rendimiento de este tipo de tramos y recientemente se han comenzado a investigar soluciones para mejorar el desempeño de esta metodología en Guatemala.

Este trabajo de tesis tiene como fin describir el sistema de losas cortas y analizar factores que puedan afectar el desempeño de las mismas. Se describe el planteamiento propuesto en el documento "Thin Concrete Pavements", publicado por TC Pavements en el 2007, y los parámetros básicos de diseño para pavimentos de concreto. También se indaga en un análisis mecanicista de los pavimentos de concreto, en el cual se utilizó el programa de cálculo por medio de elementos finitos para pavimentos de concreto Everfe. Los factores que afectan el desempeño de los tramos de losas cortas se dividen en cuatro capítulos: el desplazamiento lateral, el drenaje, el tipo de carga y la calidad de la base. Con desplazamiento lateral se refiere a la falta de confinamiento y la apertura de las juntas debido a un desplazamiento lateral generado por la carga de tránsito en el pavimento. El capítulo de drenaje trata temas como la problemática de un drenaje ineficiente y el énfasis que se le debe de dar a este tema en un país con un clima muy lluviosos como es Guatemala. El tipo de carga describe la problemática que hay en Guatemala con sobrepesos de camiones y estimaciones de tránsito así como la modulación de las losas y el espesor de las mismas es afectada por estos factores. El capítulo de calidad de base se enfoca mucho en la importancia de un buen control de calidad poder lograr los parámetros que requiere el pavimento para un buen desempeño.

Luego de analizar todos los factores mencionados con anterioridad se prosiguió a realizar una serie de entrevistas a profesionales que han estado involucrados tanto en el diseño como en la elaboración de tramos de carreteras con la metodología de losas cortas. Estas entrevistas se utilizaron como base para determinar una serie de recomendaciones que se deben seguir para mejorar el desempeño de este tipo de tramo, así como también detectar los

temas que se deben profundizar para entender el comportamiento de los pavimentos de concreto con losas cortas. El fin de esta tesis no es resolver en su totalidad los puntos de discusión que se tienen respecto al tema de losas cortas, sino dar un panorama de lo que se sabe actualmente y de temas que se deben tratar para llegar a tener soluciones concretas que mejoren el desempeño de este tipo de pavimentos.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

- Analizar los factores que pueden afectar el comportamiento de los tramos de losas cortas.

B. Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento de las losas cortas, los esfuerzos y las deflexiones utilizando programas de cálculo de pavimentos.
- Buscar los casos críticos y los principales factores de falla en tramos con menor espesor de losa, tomando en cuenta tanto criterios de diseño como proceso constructivo.
- Analizar el proceso de diseño de TCPavements, así como el proceso de diseño de AASHTO para losas convencionales.
- Investigar cómo el entorno guatemalteco afecta a los tramos de losas cortas tomando en cuenta factores como: clima, calidad de mano de obra, calidad de suelo, entre otros.
- Buscar oportunidades de mejora potenciales para mejorar el diseño de este tipo de tramos.

III. ANTECEDENTES

Los tramos de losas cortas en Guatemala ya tienen más de 100 kilómetros en toda la república. Esto ya es una cantidad considerable y toma vías importantes del país como es el caso de Tecpán, Escuintla, Calzada Villa Lobos, entre otros tramos que son indispensables para Guatemala. El problema con la metodología de losas cortas es que existe falta de conocimiento sobre cómo funciona realmente el sistema y los factores que hay que reforzar para utilizar esta metodología. Con el fin de reducir costos, se aceptó rápidamente esta metodología sin llegar a analizar los alcances de la misma. Actualmente Guatemala cuenta con una gran variedad de tramos de losas cortas con diferentes características, en las cuales se han tenido tramos con buen desempeño y también tramos que han fallado antes de llegar a su vida útil proyectada. Con toda esta información que se está obteniendo de los tramos que ya llevan un tiempo considerable en funcionamiento, los ingenieros guatemaltecos deben de comenzar un proceso de retroalimentación para poder determinar realmente los alcances, las limitaciones, y las soluciones idóneas para que los tramos diseñados con la metodología de losas cortas se desempeñen de la mejor manera posible.

Actualmente no se tiene una investigación formal del desempeño de las losas cortas en Guatemala y las soluciones que se han presentado se han realizado empíricamente en campo. En 2009, University of Illinois at Urbana-Champaign publicó una investigación en donde se ensayó un tramo de losas cortas variando el tipo de base. TCPavementes, la empresa a la que pertenece la patente, también publicó un resumen de la metodología y los criterios que ellos utilizan para diseñar por medio de losas cortas. En Sudamérica también se han realizado estudios del desempeño de este tipo de tramos. Sin embargo, la bibliografía referente a este tema en general, es muy escasa y hay mucha que todavía está en desarrollo. Instituciones como el Instituto del Cemento y el Concreto de Guatemala (ICCG), ya están realizando esfuerzos para poder analizar el comportamiento de los tramos actuales y poder sacar conclusiones al respecto. La Universidad del Valle también ha indagado en el tema pero no se lograron determinar conclusiones concretas.

La mayoría de tramos de losas en Guatemala han mostrado deterioros de diferentes tipos. Estos factores se están determinando actualmente debido a la investigación de varias empresas guatemaltecas. Entre las fallas encontradas se encuentran inconvenientes con el drenaje, escalonamiento, falta de confinamiento lateral, entre otros. Es importante determinar qué

factores afectan el comportamiento de una losa corta que no se toman en cuenta en una losa convencional y Guatemala es el mejor lugar para determinar estos factores debido a la amplia experiencia de campo que se tiene.

Este documento pretende identificar puntos potenciales de mejora en la metodología de losas cortas en el caso específico de Guatemala. Las herramientas que se utilizaron para lograr esto fueron: cálculos por medio Everfe, un programa computacional para el cálculo de esfuerzos y desplazamientos en pavimentos de concreto por medio de elementos finitos, y entrevistas a ingenieros que han estado involucrados en el diseño, la construcción y la supervisión de tramos de losas cortas en Guatemala. De esta manera se puede utilizar la mezcla de las últimas tecnologías de diseño por elementos finitos con la experiencia que se ha conseguido empíricamente en Guatemala para comenzar a tener conclusiones referentes al rendimiento de los tramos de losas cortas en el país.

Para lograr mejorar el desempeño de las losas cortas, se debe indagar en el tema con trabajos de investigación que permitan que cada vez sea más la información y el conocimiento sobre esta metodología. Actualmente, en Guatemala, se tienen las condiciones ideales para desarrollar investigación sobre el rendimiento de la metodología de losas cortas. Esto se debe a que Guatemala es el país que tiene más tramos de losas cortas en el mundo y ya tienen un tiempo considerable de vida que nos permite comenzar a analizar los tramos y sacar conclusiones del desempeño de las mismas. Este trabajo pretende aportar a esta causa mostrando un panorama general de la problemática de losas cortas en Guatemala. Posteriormente se deberá indagar de una manera más profunda en cada uno de los temas presentados para llegar a determinar a detalle el funcionamiento, las aplicaciones y las limitantes de los tramos de losas cortas.

IV. TIPOS DE PAVIMENTOS

Los pavimentos pueden ser clasificados en tres categorías: pavimentos flexibles, pavimentos rígidos y pavimentos semi rígidos. Cada una de estas categorías tiene sus propios componentes y su desempeño es diferente, por lo que se deben de contemplar diferentes parámetros para cada una de las categorías en el proceso de diseño y construcción, dependiendo del caso.

A. Pavimento flexible

El AASHTO 93 define el pavimento flexible como un pavimento con una estructura que mantiene contacto directo con la sub rasante y su estabilidad depende de la trabazón entre los agregados, la fricción entre partículas y la cohesión. Este tipo de pavimento contiene una sub rasante tratada, una capa de sub base, una capa de base y una capa superficial de asfalto. Cada una de estas capas tiene diferentes funciones, las cuales se mencionan a continuación:

1. Sub rasante. Esta capa es el soporte del pavimento, el suelo natural. Esta capa debe de ser compactada a una densidad proporcionada para asegurar un soporte estable para el pavimento.

2. Sub base. La sub base es la capa que se encuentra entre el material sub rasante y la capa de base, normalmente consiste en una base de un material granular compactado o en un suelo tratado. Se distingue de la base al tener propiedades menos estrictas de resistencia, plasticidad y graduación. Esta capa debe de ser de una mayor calidad que el material de sub rasante, por lo que en casos en los que el material sub rasante sea de alta calidad, esta capa se omite. La función principal de ésta capa es aportar estructuralmente al pavimento, sin embargo tiene otras funciones como: evitar la intrusión de finos provenientes de la sub rasante, mitigar el efecto de congelamiento, ayudar al drenaje de la estructura del pavimento y funcionar como plataforma para la maquinaria de construcción utilizada en otras etapas.

3. Base. La base es la capa que se encuentra debajo de la capa superficial y esta soportada en la sub base. Normalmente consiste en agregados como gravas, arenas o una combinación de éstas, las cuales pueden ser complementadas con materiales estabilizadores

como cemento o asfalto. Los materiales utilizados en la base deben ser de mayor resistencia, plasticidad y graduación que los materiales utilizados en la sub base, debido a que la función fundamental de esta capa es estructural.

4. Capa superficial. La capa superficial de un pavimento flexible consiste en una mezcla de agregados minerales y material bituminoso colocado sobre la capa de base. Ésta capa tiene función estructural en el pavimento, pero también debe de ser diseñada para resistir las fuerzas abrasivas del tráfico, reducir la cantidad de agua que se infiltra en el pavimento, tener resistencia a la fricción superficial y proveer una superficie con poca rugosidad.

B. Pavimento rígido

El AASHTO 93 define el pavimento rígido como un pavimento cuya estructura distribuye la carga a la sub rasante por medio de una losa de concreto tiene una relativamente alta resistencia a la flexión. Este tipo de pavimento contiene una sub rasante tratada, una capa de sub base y capa superficial que consiste en una losa de concreto. Cada una de estas capas tiene diferentes funciones, las cuales se mencionan a continuación:

1. Sub rasante. Esta capa es el soporte del pavimento, el suelo natural. Ésta capa debe de ser compactada a una densidad proporcionada para asegurar un soporte estable para el pavimento.

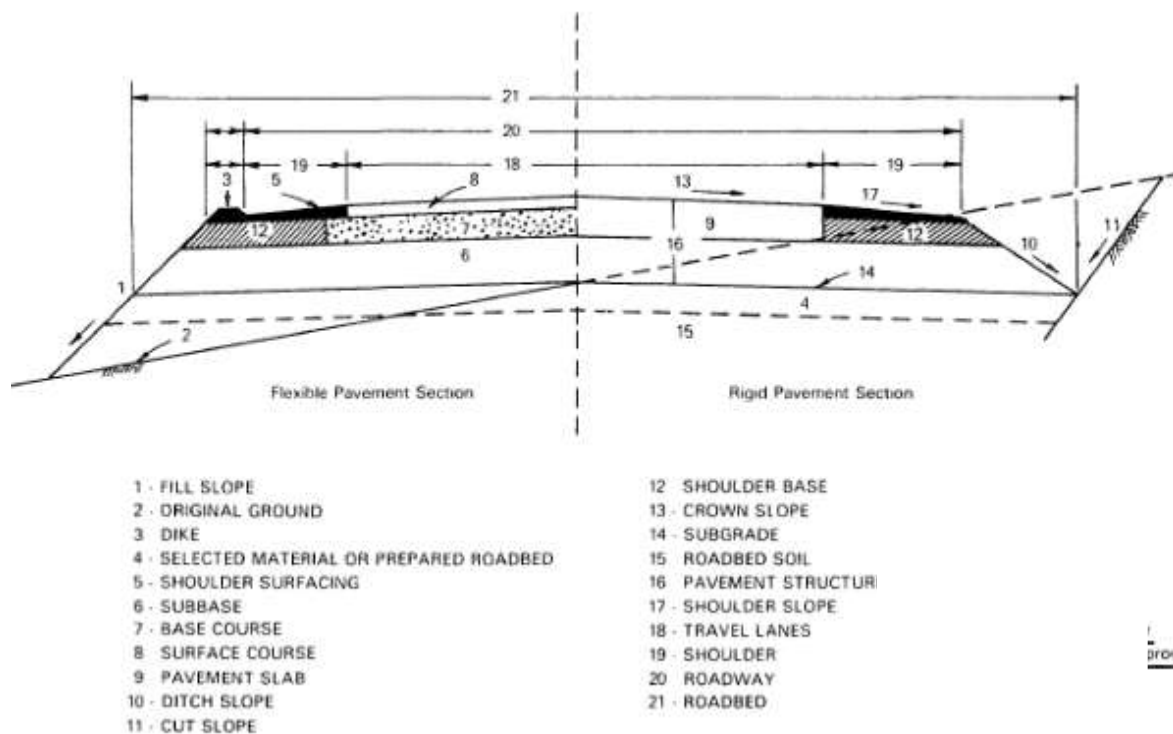
2. Sub base. La sub base de la estructura de un pavimento rígido consiste en una o más capas compactadas de material granular o estabilizado, colocadas entre la sub rasante y la losa rígida de concreto. Las funciones de ésta capa de la estructura son: proveer un soporte estable y uniforme, incrementar el módulo K de la sub rasante, minimizar los efectos de congelamiento, mitigar los efectos de bombeo producido por las partículas de finos en las juntas y proveer una plataforma de trabajo para la maquinaria en futuras etapas del proyecto.

3. Losa de concreto. Los materiales básicos de esta capa son: cemento Portland, acero de refuerzo, elementos de transmisión de carga y materiales sellantes. Es necesario, un control de calidad estricto para asegurar la máxima capacidad de la losa. La función de ésta capa es transmitir la carga de una manera distribuida a la sub base, así como proteger a la sub estructura de la erosión y otros factores externos como el clima y la carga de tránsito.

C. Comparación entre pavimento rígido y pavimento flexible

Las estructuras de un pavimento rígido y uno flexible son diferentes y por lo tanto el comportamiento a lo largo de estos es distinto. En la Ilustración No. 1 se puede observar como varía la estructura de un pavimento rígido y uno flexible.

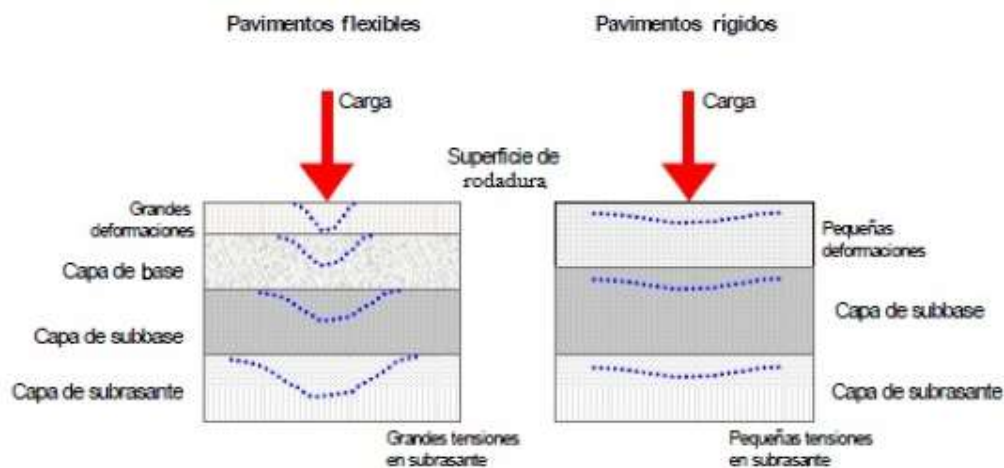
Ilustración No. 1. Estructura típica de pavimentos flexibles y rígidos.



(AASHTO, 1993)

Es importante analizar cómo se comporta la distribución de la fuerza a lo largo de un pavimento flexible y de un pavimento rígido para entender los fundamentos de diseño de cada tipo de pavimento. En un pavimento rígido, la carga a la sub estructura se transmite de una manera más distribuida. En un pavimento flexible la carga se transmite de una manera mucho más directa y puntual. Este concepto, se ilustra en la Ilustración No. 2.

Ilustración No. 2. Esquema de comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos.



(Coronado, 2002)

Ambos tipos de pavimentos, tiene sus ventajas y desventajas dependiendo del proyecto que se esté analizando; por lo que la utilización de uno sobre otro dependerá de la ubicación, el fin, y las condiciones del proyecto.

D. Pavimentos semi-rígidos

Un pavimento semi-rígido se puede definir como un pavimento que presenta componentes de pavimento flexible así, como componentes de pavimento rígido. Normalmente consiste en una mezcla de asfalto caliente sobre una base tratada con cemento, base de concreto de baja resistencia o mezcla de cemento agregados, con o sin capas de sub bases granulares. En el documento "Thin Concrete Pavements" se menciona que las losas de concreto diseñadas con la metodología de losas cortas debe de ser considerados como pavimentos semi-rígidos (Covarrubias, 2007), esto debido a la manera en que varían los esfuerzos y las deflexiones debido a la reducción en el espesor de las mismas.

V. PARÁMETROS DE DISEÑO EN PAVIMENTOS

Existen distintas metodologías para el diseño de pavimentos, sin embargo los parámetros de diseño son similares, por lo que se puede mencionar los más comunes. Para fines de esta tesis, se buscará relacionar todos estos parámetros para Guatemala, ya que es la región que se está estudiando.

A. Tránsito

El tránsito se puede subdividir en tránsito liviano y tránsito pesado. En general el tránsito pesado es mucho más relévate que el tránsito liviano, pues genera un mayor efecto en la estructura del pavimento. Es importante tomar en cuenta que el AASHTO 93 y MEPDG de la AASHTO toman con diferente criterio la carga de tránsito. El enfoque de cada una de estas normativas se explica a continuación:

AASHTO 93: Esta metodología se basa en calcular una cantidad de ejes equivalentes de 18 kips, o 80 KN, que pasan por la carretera en una cantidad de años determinada. Para lograr esto, se realiza un conteo de tráfico y se calcula una cantidad de ESALs dependiendo de las características del pavimento y del tránsito. Para esto, se multiplica un valor de carga equivalente, que depende de las características del vehículo y del pavimento, por la cantidad de vehículos con dichas características, ya tomando en cuenta el factor de crecimiento por año que el tránsito podría tener. Con esto se obtiene la cantidad de ESALs para llevar a cabo el diseño.

MEPDG: Esta metodología se enfoca directamente en un análisis detallado del tránsito de camiones. El MEPDG, utiliza los datos del espectro completo de carga completa por eje para cada tipo de eje. Utiliza parámetros como la velocidad del mismo, ya que en lugares donde el camión tiene menor velocidad, este genera mayores esfuerzos en el pavimento. También se toman en cuenta factores como la configuración por eje de carga, el tráfico por carril, el zigzagado de los camiones, la distribución por meses y hora, etc.

En el "Manual centroamericano para el diseño de pavimentos", se utiliza la metodología AASHTO 93 de ejes equivalentes para el conteo de tráfico y las normas de pesos y dimensiones están regidas por la SIECA, aprobadas en 1958. Basados en esta norma, cada país de la región realizó sus modificaciones dependiendo de sus necesidades o requerimientos especiales. Una

vez realizado un conteo de tráfico, se procede a calcular la cantidad de ejes equivalentes, con la metodología AASHTO 93, basándose en la normativa de cada país. El principal problema en la región centroamericana es que los controles de vehículos pesados son ineficientes, por lo que es difícil estimar una cantidad de ejes equivalentes de una manera acertada.

Los parámetros para realizar el conteo de tráfico en Guatemala son regidos por el “Reglamento para el control de pesos y dimensiones de vehículos automotores y sus Combinaciones”, emitido por la Dirección General de Caminos. En este documento se encuentran los tipos de vehículos, sus separaciones entre ejes y pesos, entre otros parámetros útiles para el conteo del tránsito.

B. Sub rasante

La sub rasante se define como el suelo natural sobre el cual se coloca la estructura de un pavimento. AASHTO, determina el módulo resiliencia (M_r) como la propiedad principal que describe una sub rasante. El procedimiento para el cálculo del mismo se describe en AASHTO Test Method T-274. En Guatemala, se utiliza mucho el ensayo T-193, el cual calcula el CBR, y luego se correlaciona con el dato necesario para el diseño. Este parámetro es muy importante para el soporte de la estructura del pavimento y por lo tanto se debe supervisar la compactación y colocación de una manera cuidadosa. Se deben tener consideraciones especiales para suelos expansivos, suelos con alto porcentaje de material orgánico, suelos altamente arcillosos, suelos sin cohesión o cualquier caso inusual que pueda generar problemas al pavimento.

C. Clima

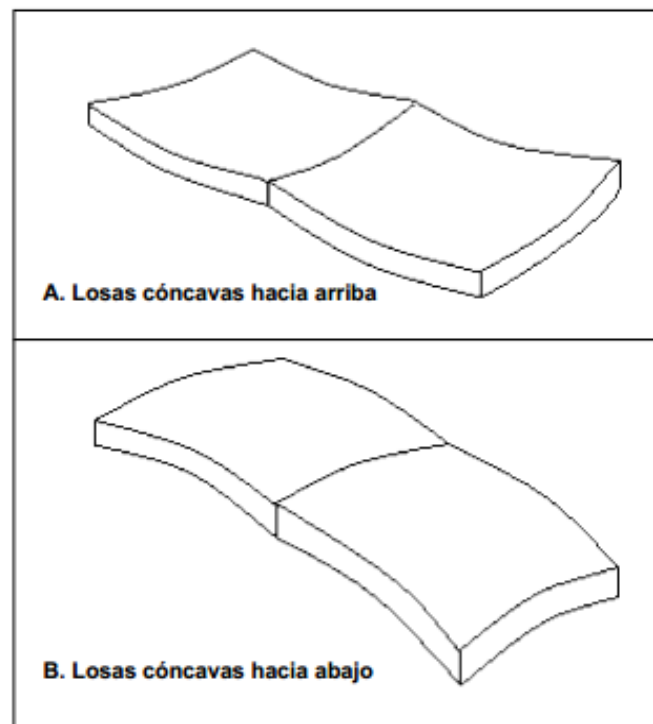
El clima es un factor importante y difícil de tomar en cuenta cuando hablamos del diseño de carreteras. Dentro de este criterio se toman en cuenta dos principales variables: el cambio de temperatura y la precipitación. En AASHTO 93 se explica la problemática de cada uno de estos factores como se menciona en a continuación:

- 1. Cambio de temperatura.** Los cambios de temperatura pueden afectar al pavimento de cuatro maneras:

- Dañando las propiedades físicas de los pavimentos asfálticos.
- Induciendo un esfuerzo adicional en los pavimentos asfálticos.
- Generando contracción y expansión en los pavimentos rígidos, por lo tanto generando un esfuerzo adicional.
- El congelamiento y descongelamiento de la capa sub rasante, lo cual puede afectar el desempeño de la misma.

En los pavimentos rígidos, el diferencial de temperatura y humedad entre la superficie inferior y la superficie superior de la losa genera un alabeo. Este alabeo puede ser positivo o negativo, si en la parte superior de la losa la temperatura es mayor que en la parte inferior, el alabeo será negativo, si en la parte superior de la losa la temperatura es menor que en la parte inferior el alabeo, será positivo. Este efecto induce esfuerzos en la losa y puede generar fallas en el pavimento.

Ilustración No. 3. Representación visual del alabeo en las losas.)



Otro factor importante que se debe contemplar son los ciclos de congelamiento y descongelamiento. Este factor lo despreciaremos en este estudio, debido a que, en la región de Guatemala, no se tienen temperaturas lo suficientemente frías para generar congelamiento.

2. Precipitación. La precipitación del área y el drenaje en los pavimentos es un factor importante en el diseño de pavimentos, especialmente en un país lluvioso como Guatemala. El agua puede infiltrarse en la estructura del pavimento de muchas maneras: por medio de grietas, en las juntas, por un nivel freático alto, entre otros. En AASHTO 93 se mencionan cuatro efectos del agua atrapada en la estructura del pavimento; las cuales se enumeran a continuación:

- Reducción de la capacidad soporte de los materiales granulares no ligados.
- Reducción de la capacidad soporte de la subrasante.
- Bombeo de finos en pavimentos rígidos provocando una pérdida de soporte, lo cual conlleva a diferentes tipos de falla como: grietas, escalonamiento, entre otros.
- Bombeo de finos en la base de pavimentos, generando una pérdida de soporte.
- También se mencionan algunos efectos que, aunque no son tan recurrentes, siempre se debe de tener conocimiento de los mismos.
- Stripping en los pavimentos asfálticos.
- Hinchamiento en suelos expansivos.
- Daños por heladas.

En un país tropical como Guatemala, es importante tener en cuenta la alta precipitación que se presenta, y por lo tanto diseñar para que la estructura del pavimento no sea tan propensa a los efectos mencionados. Se debe considerar utilizar materiales resistentes a los efectos de la humedad y buscar un drenaje lo más eficiente posible.

D. Serviciabilidad

El manual centroamericano para el diseño de pavimentos define el índice de serviciabilidad como un valor de apreciación con el cual se evalúan las condiciones de deterioro o confort de la superficie de la rodadura de un pavimento. Actualmente, la manera más utilizada para medir el deterioro es por medio del IRI, índice Internacional de Rugosidad. Este índice luego se relaciona con el índice de serviciabilidad por medio de la siguiente expresión:

$$PSI = 5 * e^{-0.0041 \cdot IRI}$$

IRI = Índice Internacional de Rugosidad (plg/milla)

PSI = índice de Serviciabilidad

Una carretera ideal, sin deterioro alguno, tendría un Índice de serviciabilidad de 5, mientras que una carretera completamente deteriorada tendría un índice de serviciabilidad de 0. Los valores recomendados para el parámetro de diseño de serviciabilidad inicial, dependen del tipo de pavimento. Se recomienda 4.5 para pavimentos rígidos y 4.2 para pavimentos flexibles. Para la serviciabilidad final se recomienda 2.5 para rutas de gran importancia y 2 para rutas de menor tránsito.

E. Rugosidad

La rugosidad es el parámetro utilizado para determinar el índice de serviciabilidad. Este parámetro se mide con el IRI, índice Internacional de Rugosidad. Este índice se determina con un rugosímetro, el cual mide los altibajos en un tramo y las sumas, obteniendo un valor acumulado en metros por kilómetro (m/km) o en pulgadas por milla (plg/milla). Mientras mayor sea el índice de Rugosidad, mayor es el deterioro en el tramo.

Un rango aceptable de medición de IRI para un camino pavimentado es entre 0 y 6 m/km, donde 0 es una superficie perfectamente recta y de 6 en adelante es un pavimento que ya requiere rehabilitación. En general, un pavimento nuevo tendrá entre 0 y 1.8 m/km de medición de IRI, uno en buen estado entre 1.4 y 3 m/km y uno regular entre 3 y 4.5 m/km. Mediciones mayores comenzarán a indicar problemas significativos en los pavimentos.

F. Propiedades de los materiales

Las características de los materiales utilizados en la estructura del pavimento son importantes en el diseño, pues de esto dependen muchos de los factores de los que se han comentado. Desde las características de la mezcla de concreto, hasta las propiedades de los materiales utilizados en la base o sub base del pavimento, se deben seguir las especificaciones de cada material por medio de un control de calidad para asegurar que el pavimento construido esté acorde al diseño particular que se esté utilizando.

G. Confiabilidad

En AASHTO 93, la confiabilidad se define como la probabilidad de que un pavimento desempeñe la función para la cual fue diseñado, bajo las condiciones encontradas durante su vida útil. La confiabilidad en el diseño se selecciona dependiendo de qué tan riesgoso es una falla en el tramo, o que tan transitado sea este. Mientras más importancia tenga el tramo diseñado, mayor confiabilidad deberá tener el mismo. El Manual Centroamericano Para el Diseño de Pavimentos recomienda los siguientes parámetros de confiabilidad para el diseño:

Tabla No.1. Niveles de confiabilidad R recomendados para diseño,
“Manual centroamericano para el diseño de pavimentos”.

Tipo de carretera	Niveles de confiabilidad R	
	Suburbanas	Rurales
Autopista Regional	85 - 99.9	80 - 99.9
Troncales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	50 - 80

(Coronado, 2002)

Es importante recordar que estos parámetros están recomendados para la metodología AASHTO 93, la cual es la que recomienda utilizar el Manual Centroamericano Para el Diseño de Pavimentos.

H. Espaciamiento entre juntas

El espaciamiento entre juntas se plantea de manera diferente dependiendo el tipo de pavimento rígido que estemos trabajando. Es diferente el acercamiento que tiene AASHTO para

losas convencionales, al acercamiento propuesto en el documento "Thin Concrete Pavements" para losas cortas. A continuación, se describe el planteamiento de cada metodología de manera general.

1. Espaciamiento entre juntas en AASHTO 93. En AASHTO 93 se definen tres tipos de juntas: juntas de contracción, de expansión y de construcción. Las juntas de contracción y expansión son juntas que se realizan para reducir los esfuerzos inducidos por la contracción o la expansión de la losa, debido a los cambios de temperatura y otros factores. Las juntas de construcción se generan para facilitar el proceso constructivo del pavimento.

En general se toman en cuenta dos factores para determinar el espaciamiento entre juntas: el costo y los esfuerzos. Las juntas deben de estar espaciadas de una manera que se pueda liberar los esfuerzos que se generan por la contracción, o la expansión del concreto debido a cambios de temperatura u otros factores. De lo contrario, se generara una fisura al azar en la losa debido a estos esfuerzos inducidos. El costo es otro factor importante, ya que las juntas son la mayor razón de costos de mantenimiento en un pavimento rígido y también muchas juntas podrían complicar el proceso constructivo. Se busca optimizar el espaciamiento entre juntas para que cumpla con ambos factores: libere esfuerzos y optimice costos. El ancho de la junta es otro factor que se debe de diseñar dependiendo de la región en la que se esté trabajando. Este valor se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta L = \frac{CL(\alpha_c * DTD + Z)}{S} * 100$$

En donde:

ΔL = Ancho de junta (in)

S = Tensión soportada por el material sellante (%)

α_c = Coeficiente térmico del concreto (°F)

Z = Coeficiente de contracción por secado del concreto (in/in)

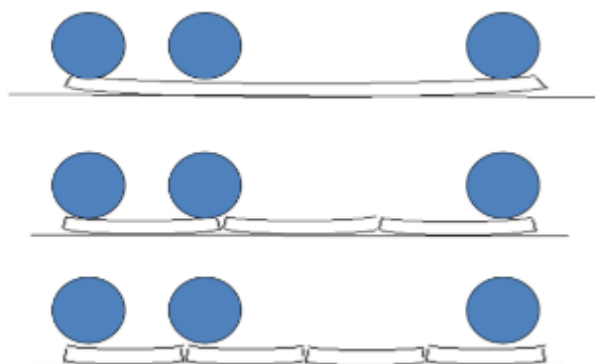
L = Espaciamiento entre juntas (in)

DTD = Rango de temperatura (°F)

C = Factor de ajuste debido a la fricción entre sub base y la losa de concreto. (0.65 para base estabilizada y 0.80 para base granular)

2. Espaciamiento entre juntas en losas cortas. En el documento “Thin Concrete Pavements”, publicado por TCPavements, se plantean dos factores para el diseño del espaciamiento entre juntas: reducción de alabeo y modular de manera que únicamente haya un eje por losa. Por esta razón se propone un espaciamiento de aproximadamente 1.80 m x 1.80 m. Al tener losas de menor dimensión se reduce de manera drástica el alabeo y las tensiones inducidas por el cambio de temperatura. Al modular de una manera que únicamente haya un eje por losa se reducen las tensiones en las losas. Este concepto se muestra en la siguiente figura:

Ilustración No. 4. Concepto propuesto por TCPavements de cargar un solo eje por losa.



(Covarrubias, 2007)

El ancho de la junta debe de ser de 2 mm, esto es para prevenir desportillamientos y reducir filtraciones, pues las juntas no se sellan en esta metodología. Esto reduce los costos de mantenimiento en los tramos de losas cortas.

a. Transmisión de carga. Las cargas de tráfico deben de ser transmitidas de una losa a otra con el fin de minimizar las deflexiones en las juntas. Para lograr esta transmisión de carga se pueden utilizar dos principios:

1) Transmisión de carga por medio de trabazón de agregados. La trabazón de agregado funciona por medio de la fricción generada en las caras irregulares que se

forman en las juntas. Esta fricción se mejora al tener agregado de mayor tamaño, mejor resistencia y mayor durabilidad. Sin embargo, este tipo de transmisión pierde efectividad ante cargas muy pesadas. La eficiencia de la trabazón de los agregados depende de los siguientes factores:

- El ancho de la junta, así como el coeficiente térmico y la contracción por humedad el concreto. Funciona mejor cuando estos factores son menores.
- El tamaño máximo de agregado. La transmisión de carga funciona mejor con tamaño de agregados más grandes.
- Resistencia del agregado. Mientras más resistente sea el agregado, mejor tolerará las cargas cíclicas del tráfico.
- Una base estabilizada con cemento provee un mejor soporte, por lo que mejora el rendimiento del agregado.

(Delatte, 2008)

2) Trasmisión de carga por medio de dovelas. En tramos donde las cargas son mayores, se recomienda el uso de dovelas para la trasmisión de carga. La principal función de las dovelas es prevenir el bombeo y las fallas. Las dovelas deben tener un tamaño adecuado para resistir los esfuerzos de corte entre una losa y la otra. Si la dovela está sobre diseñada puede dañar el concreto. Las dovelas deben de ser colocadas en el centro de la losa y sus dimensiones están en función del espesor de la losa. En el siguiente cuadro, se muestran las características de dovelas recomendables para cada espesor de pavimento.

Tabla No. 2. Dimensiones recomendadas para dovelas en pavimentos rígidos.

<i>Slab thickness, mm (in)</i>	<i>Dowel diameter, mm (in)</i>	<i>Dowel length, mm (in)</i>	<i>Dowel spacing, mm (in)</i>
<200 (<8)		Dowels not required	
200 (8)	32 (1.25)	450 (18)	300 (12)
250 (10)	32 (1.25)	450 (18)	300 (12)
280 (11)	38 (1.5)	450 (18)	300 (12)
300 (12)	38 (1.5)	450 (18)	300 (12)
350 (14)	44 (1.75)	500 (20)	300 (12)
400 (16) and up	50 (2)	600 (24)	450 (18)

(Delatte, 2008)

VI. TIPOS DE FALLAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

Todos los pavimentos rígidos mostrarán fallas con el tiempo una vez su vida útil de diseño termine. Las fallas que se pueden encontrar en un pavimento rígido se muestran a continuación:

A. Grietas

Las grietas en un pavimento rígido normalmente se generan debido a la aplicación de una sobrecarga o debido a fatiga acumulada de las cargas aplicadas a lo largo de tiempo. Entre los tipos de grietas que se pueden encontrar, están las siguientes:

1. Grietas de esquina. Esta falla se basa en una grieta en la esquina de la losa. Esta puede medir entre 30 centímetros y la mitad de la longitud de la losa. Este tipo de falla ocurre con más frecuencia en pavimentos largos debido a que el alabeo hacia arriba en las losas causa que las esquinas del pavimento no estén soportadas adecuadamente en la base. Esto genera que cuando una carga pesada pase por la losa la esquina se rompa. Este problema se puede mitigar con menor longitud de losas o con mecanismos de transmisión de carga.

Ilustración No. 5. Falla de grieta de esquina en un pavimento rígido.



(DIRCAIBEA, 2002)

2. Grietas longitudinales. Las grietas longitudinales se definen como grietas paralelas al centro del pavimento. Estas grietas se pueden generar por una combinación de repeticiones de cargas pesadas, pérdida de soporte, esfuerzos de alabeo por temperatura o por gradiente hidráulico o por la mala construcción de las juntas longitudinales. Una grieta longitudinal podría no afectar el desempeño del pavimento, si la grieta no es de un tamaño considerable.

Ilustración No. 6. Grieta longitudinal en un pavimento rígido.



(DIRCAIBEA, 2002)

3. Grietas transversales. Las grietas transversales se definen como las grietas perpendiculares al centro de la carretera. Este tipo de grieta normalmente se genera por una combinación de una repetición de carga pesada y esfuerzos de temperatura, gradiente hidráulico y de construcción. Los pavimentos que se encuentran en climas cálidos son más propensos a tener este tipo de grieta, debido a que los esfuerzos por temperatura son mayores. La distancia entre juntas también es un factor determinante en estas fallas, ya que mientras más espacio hay entre juntas más propenso será el pavimento a presentar grietas transversales.

Ilustración No. 7. Grieta transversal en un pavimento rígido.



(DIRCAIBEA, 2002)

B. Deficiencias del sellado

Este tipo de falla ocurre cuando un deterioro en el sello permite que materiales incompresibles se infiltren en la junta, así como también infiltración de agua superficial. El deterioro del sello puede ser por endurecimiento, el despegado de una o ambas paredes, la fluencia fuera de la caja, la carencia de sello o la incrustación de materiales ajenos. Este tipo de falla normalmente se da, debido a una mala calidad de material o envejecimiento del mismo.

Ilustración No. 8. Deficiencia de sellos en un pavimento rígido.

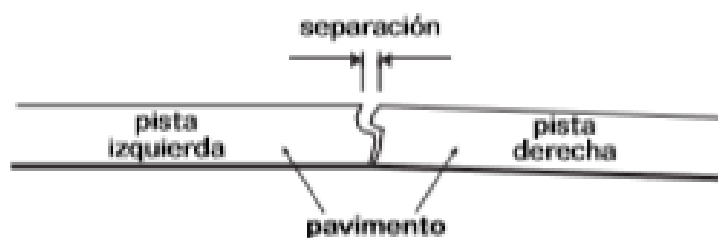


(DIRCAIBEA, 2002)

C. Separación de junta longitudinal

Esta falla se define como la abertura en la junta longitudinal en un pavimento. Este tipo de falla se genera debido a la ausencia de barras de amarre entre pistas adyacentes, así como también por carencia de bermas o desplazamiento lateral de las losas.

Ilustración No. 9. Diagrama de falla por separación en la junta.



(DIRCAIBEA, 2002)

D. Escalonamiento de juntas y grietas

El escalonamiento se define como el desnivel entre dos superficies del pavimento separadas por una junta o una grieta. Las principales causas del escalonamiento son: erosión de la base en la junta o grieta, deficiencia de transmisión de cargas, asentamiento diferencial de la sub rasante o drenaje insuficiente.

Ilustración No. 10. Diagrama de escalonamiento en pavimentos rígidos.



VII. ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN UN PAVIMENTO RÍGIDO

Un pavimento rígido tiene esfuerzos tanto de tensión como de compresión dentro de su funcionamiento. Los esfuerzos que se producen sobre un pavimento rígido se deben principalmente a dos factores:

- Factor climático.
- Carga de tráfico.

Siempre se debe recordar que el pavimento está sometido a una combinación de estos factores, y por lo tanto se deben considerar ambos factores para calcular los esfuerzos reales en el pavimento. A continuación se detalla el análisis de cada uno de estos esfuerzos.

A. Esfuerzos por factores climáticos

Como ya se mencionó anteriormente, que los cambios de temperatura en el ambiente generan que el concreto se contraiga y se alabee, produciendo esfuerzos adicionales en el mismo. Estos esfuerzos dependen de la relación entre el largo de la losa y el radio de rigidez relativa de la losa. El radio de rigidez relativa de la losa se puede calcular con la siguiente ecuación:

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

En donde:

l = Radio de rigidez relativa.

E = Módulo de elasticidad del concreto.

D = Espesor del pavimento.

ν = Relación de Poisson del concreto. (Se utiliza normalmente 0.15)

k = Módulo de reacción de la sub rasante.

Al calcular este valor se determina el valor L/ℓ . El esfuerzo en el borde de la losa debido al alabeo por temperatura, se puede determinar utilizando la ecuación de Bradbury (1938):

$$\sigma = \frac{CE \alpha \Delta t}{2(1 - \nu^2)}$$

En donde:

σ = Esfuerzo en el borde de la losa por alabeo.

E = Módulo de elasticidad del concreto.

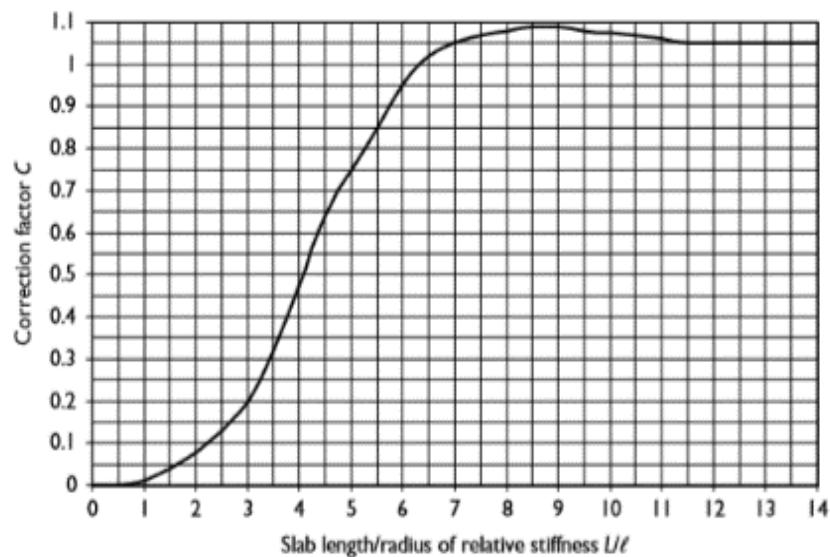
α = Coeficiente térmico del concreto.

ν = Relación de Poisson del concreto. (se utiliza normalmente 0.15)

C = Factor de corrección por losa finita.

El factor de corrección C depende del valor L/ℓ calculado anteriormente. Este factor se puede determinar en la siguiente gráfica:

Ilustración 11. Tabla para cálculo de coeficiente de corrección C.



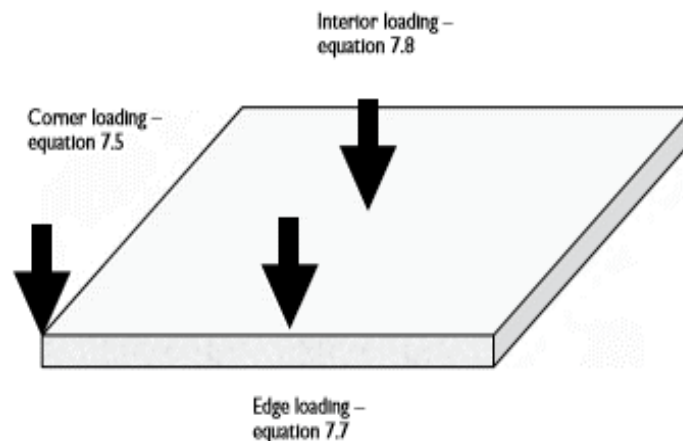
(Delate, 2008)

Se debe recordar que el ciclo de cambio de temperatura ocurre diariamente, induciendo esfuerzos de tensión en la parte superior de la losa durante el día y en la parte inferior durante la noche.

B. Esfuerzos por carga de tráfico

Los esfuerzos en un pavimento rígido generados por tráfico dependen de donde esté colocada la carga. Generalmente se analizan tres casos críticos, los cuales son: carga en esquina, carga en el borde y carga en el centro de la losa. Estos tres casos son donde se generan los mayores esfuerzos, tanto de tensión como los de compresión. Los esfuerzos críticos pueden cambiar dependiendo de la combinación de esfuerzos de tránsito con los esfuerzos de alabeo. A continuación se muestra un análisis de los esfuerzos, únicamente tomando en cuenta la carga de tránsito.

Ilustración No. 12. Posiciones de cargas críticas en un pavimento rígido.



(Delatte, 2008)

1. Esfuerzo inducido por carga en la esquina de la losa. La carga de esquina normalmente es la que provoca roturas en las esquinas. El esfuerzo depende de factores como: la carga aplicada, la configuración de la carga, el espesor del pavimento, el módulo k de la sub

rasante y el radio de rigidez relativa. La primera fórmula que se utilizó para calcular este esfuerzo, fue desarrollada por Golbeck (1919) y Older (1924).

$$\sigma_c = \frac{3P}{D^2}$$

En dónde:

σ_c = Esfuerzo de momento en la esquina de la losa.

P = Carga equivalente al tránsito.

D = Espesor de la losa.

Esta fórmula es conservadora ya que, se asume que la carga está en la esquina de la losa y que no está soportada por la sub base, caso que ocurre cuando se tiene problemas de bombeo. Sin embargo, esta es una condición que difícilmente se llega a presentar. Esta ecuación fue actualizada por Westergaard (1926) y por Ioannides *et al.* (1985) y se muestra continuación.

$$\sigma_c = \frac{3P}{D^2} \left[1 - \left(\frac{1.772a}{\ell} \right)^{0.72} \right]$$

En donde:

a = Radio de un círculo con área de contacto de la carga equivalente.

ℓ = Radio relativo de rigidez.

Para el cálculo del círculo con radio equivalente al área de contacto de la carga, se asume que la carga es uniformemente distribuida en el círculo equivalente. Por lo que se calcula con la siguiente ecuación:

$$a = \sqrt{\frac{P}{\rho\pi}}$$

En donde:

ρ = presión de la llanta

2. Esfuerzo inducido por carga en el borde de la losa. Las cargas en borde suelen ser la razón de las grietas longitudinales, debido a que los esfuerzos suelen ser mayores que con una carga de centro. La primera ecuación para calcular estos esfuerzos la desarrolló Westergaard, sin embargo la última actualización la realizó Ioannides *et al.* (1985), la cual es la siguiente:

$$\sigma_e = \frac{0.803P}{D^2} \left[4 \log \left(\frac{a}{l} \right) + 0.666 \left(\frac{a}{l} \right) - 0.034 \right]$$

Esta ecuación indica que, bajo condiciones normales, los esfuerzos de la carga de borde son mayores que los de la carga de esquina. Se asume que el ratio de Poisson del concreto (ν) es igual a 0.15 para los cálculos efectuados.

3. Esfuerzo inducido por carga en el centro de la losa. Los esfuerzos para la carga de centro se pueden calcular utilizando la ecuación de Westergaard (1926), la cual es la siguiente:

$$\sigma_i = \frac{0.316P}{D^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{b} \right) + 1.069 \right]$$

En donde $b = a$ si a es mayor o igual a $1.724D$, de lo contrario:

$$b = \sqrt{1.6a^2 + D^2} + 0.675D$$

Esta ecuación también asume que el ratio de Poisson del concreto es 0.15 y de muestra que, con la carga de centro se tiene el menor esfuerzo en la losa.

C. Deflexiones en un pavimento rígido

Determinar las deflexiones en un pavimento es de mucha utilidad, puede dar mucha información sobre el desempeño del mismo. Westergaard (1926) y Ioannides et al. (1985) También desarrollaron ecuaciones para calcular la deflexión de los pavimentos con carga en el centro de la losa, carga en el borde de la losa y carga de esquina. Estas ecuaciones se resumen a continuación:

Ecuación para calcular la deflexión de una losa con una carga en el centro:

$$\Delta_c = \frac{P}{k\ell^2} \left[1.205 - 0.69 \left(\frac{1.772a}{\ell} \right) \right]$$

Ecuación para calcular la deflexión de una losa con carga en el borde:

$$\Delta_s = \frac{0.431P}{k\ell^2} \left[1 - 0.82 \left(\frac{a}{\ell} \right) \right]$$

Ecuación para calcular la deflexión de una losa con carga en la esquina:

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

Es importante recordar que las deflexiones más importantes son las de esquina o las de borde, ya que en estos puntos es donde se puede generar problemas de bombeo y con mayores deflexiones este problema se magnifica. Se puede concluir que las deflexiones en los pavimentos están muy íntimamente relacionadas con la carga aplicada, la calidad de la base y el radio de rigidez relativa de la losa.

D. Cálculo de esfuerzos y deflexiones por medio de elementos finitos

Las ecuaciones mostradas anteriormente desarrolladas por Westergaard y Ioannides, plasman situaciones ideales que difícilmente ocurren en la práctica. Estas ecuaciones son muy conservadoras y no toman en cuenta otros factores como la transmisión de carga, el alabeo de las losas, entre otros. Por esta razón, se ha optado por desarrollar programas que calculan los esfuerzos y las deflexiones por medio de elementos finitos. Por medio de esta metodología se pueden obtener resultados más certeros de los esfuerzos y las deflexiones en un pavimento.

Entre los programas que existen hoy en día para calcular esfuerzos y deflexiones de pavimentos por medio de elementos finitos, podemos mencionar los siguientes: EVERFE, KENSLABS, ILLI-SLAB, JSLAB, ISLAB 2000. ISLAB 2000 es el programa utilizado por TCPavements para calcular los esfuerzos en las losas cortas. Para fines de esta tesis se utilizará EVERFE por la facilidad de acceso al programa. La tendencia de diseño en pavimentos, tanto rígidos como flexibles, es apoyarse de este tipo de programas para respaldar el diseño con cálculos por medio de elementos finitos. Con esta metodología se puede determinar de una manera más clara el comportamiento que tendrá un pavimento durante su vida útil.

VIII. CONTROL DE CALIDAD

Los ensayos de calidad son indispensables para asegurar un buen rendimiento del tramo, ya que es necesario validar que lo que se está construyendo en campo es acorde al diseño. Aunque existen muchos ensayos para diferentes tipos de pavimentos y circunstancias, a continuación se mencionan los ensayos más comunes utilizados en Guatemala para proyectos de carreteras:

- Valor soporte de California, CBR (AASHTO T 193)
- Ensayo de plato de carga, valor k (AASHTO T 222)
- Límite líquido (AASHTO T 89)
- Límite plástico (AASHTO T 90)
- Hinchamiento (AASHTO T 193)
- Humedad de campo con carburo (AASHTO T 217)
- Compactación (AASHTO T 180 y T 191)
- Material inadecuado (AASHTO M 145)
- Granulometría (AASHTO T 88)
- Resistencia a compresión no confinada (ASTM D1633)
- Desgaste por máquina de Los Ángeles
- Equivalente de arena (AASHTO T 176)

A. Normativa guatemalteca – El libro azul

El denominado Libro Azul es la normativa utilizada en Guatemala para el diseño y control de pavimentos. El Libro Azul, publicado con el nombre de, “Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes”, fue publicado por el Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda en el año 2001. En todo momento, el contratista y el supervisor deben velar por que se cumplan las normativas impuestas por esta norma. Esta norma abarca

temas desde movimiento de tierras hasta estructuras de apoyo como muros de contención. Para fines de esta tesis, nos enfocaremos en las siguientes secciones:

- Sección 200: Movimiento de tierras.
- División 304: Capa de sub base y base granular.
- División 305: Capa de sub base y base de grava o piedra trituradas.
- División 307: Capa de sub base y base estabilizada

Se tocarán únicamente estas secciones, ya que nuestro principal interés es hacer énfasis a los requisitos de calidad que deben tener los materiales. El propósito de mostrar un resumen de estas secciones es mostrar la normativa que debe aplicarse en Guatemala. Todas las buenas prácticas descritas en el Libro Azul ayudarían a un mejor desempeño de cualquier pavimento, incluyendo losas cortas.

1. División 200: Movimiento de tierras. La División 200 del Libro Azul menciona todo lo referente al movimiento de tierras y sus especificaciones. Este capítulo se divide en las siguientes divisiones:

- División 201: Retiro de estructuras, servicios existentes y obstáculos.
- División 202: Limpia, chapeo y destronque.
- División 203: Excavación y terraplenes.
- División 204: Excavación de canales.
- División 205: Excavación estructural para estructuras mayores y menores.
- División 206: Relleno para estructuras.
- División 207: Relleno permeable.
- División 208: Acarreo libre y acarreo.
- División 209: Capa de balasto.
- División 210: Uso de explosivos.
- División 211: Geo sintéticos utilizados en movimiento de tierras para terraplenes.

- Es indispensable seguir los lineamientos de esta división para asegurar una base de buena calidad para cimentar el pavimento. Esto es indispensable para el buen desempeño del mismo y se le debe de dar la importancia que amerita.

2. División 304: Capa de sub base y base granular. En la sección 304.03 se mencionan los requisitos mínimos para los materiales. Se menciona que la base granular no debe estar triturada y que se debe tener en cuenta los siguientes requisitos:

a. Valor Soporte. El CBR se debe determinar con el método AASHTO T 193 y debe de tener un valor mínimo de 40 para sub-base y de 70 para la base. Este ensayo se debe de realizar sobre una muestra saturada a 95% de compactación, compactado por el método AASHTO T180, y debe tener un hinchamiento máximo de 0.5%, en el ensayo según AASHTO T 193.

b. Abrasión. La porción del agregado retenido en el Tamiz No.4 (4.75 mm) no debe tener un porcentaje de desgaste por abrasión mayor de 50 a 500 revoluciones determinado por el método AASHTO T 96.

c. Partículas planas o alargadas. No más del 25% del peso retenido en el tamiz No.4 (4.75 mm) puede ser partículas planas o alargadas. Con esto nos referimos a que tienen una longitud mayor de cinco veces el espesor promedio de dichas partículas.

d. Impurezas. El material no debe contener materia orgánica, basura, terrones de arcilla o sustancias que puedan provocar fallas en el pavimento.

e. Graduación. El material debe llenar los requisitos de graduación, determinada por los métodos AASHTO T 27 y AASHTO T 11, para el tipo que se indique en la Tabla No. 3. El porcentaje que pasa el tamiz No.200 (0.075 mm) debe ser menor que la mitad del porcentaje que pasa el tamiz No.40 (0.425 mm)

Tabla No. 3. Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada

Standard mm	Tamiz N°	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)					
		TIPO "A" (Sub-base) 50 mm (2") máximo	TIPO "A" (Base) 50 mm (2") máximo		TIPO "B" (Sub-base y Base) 38.1 mm (1 1/2") máximo		TIPO "C" (Sub-base y Base) 25 mm (1") máximo
		<u>A-1</u>	<u>A-1</u>	<u>A-2</u>	<u>B-1</u>	<u>B-2</u>	<u>C-1</u>
50.0	2"	100	100	100			
38.1	1 1/2"	-	-	-	100	100	
25.0	1"	60-90	65-90	60-85	-	-	100
19.0	3/4"	-	-	-	60-90	-	-
9.5	3/8"	-	-	-	-	-	50-85
4.75	N° 4	20-60	25-60	20-50	30-60	20-50	35-65
2.00	N° 10	-	-	-	-	-	25-50
0.425	N° 40	-	-	-	-	-	12-30
0.075	N° 200	3-12	3-12	3-10	5-15	3-10	5-15

(AASHTO T27) (Libro Azul, 2001)

f. Plasticidad y cohesión. La fracción que pasa Tamiz No.40 (0.425 mm) no debe tener un índice de plasticidad mayor de 6, determinado por el método AASHTO T 90, ni un límite líquido mayor de 25, determinado por el método AASHTO T 89. Ambos determinados sobre muestra preparada en húmedo de conformidad con AASHTO T 146.

g. Equivalente de arena. El equivalente de arena no debe de ser menor de 30, determinado por medio de AASHTO T 176.

h. Material de relleno. Si se necesita realizar algún relleno, el material para realizarlo debe de tener características adecuadas de granulometría y cohesión y debe estar libre de impurezas así como consistir de un suelo arenoso, polvo de roca, limo inorgánico u otro material de alto porcentaje que pasa tamiz No.10 (2 mm).

3. Requisitos de construcción para bases y sub bases granulares. Dentro de estos requisitos, se pueden mencionar los siguientes que trata el Libro Azul.

a. Producción del material: El contratista debe de efectuar previamente a la utilización de un banco: la limpieza, el chapeo, y la eliminación de la vegetación, capa de material orgánico, arcilla, basura y sustancias que puedan contaminar el material. El contratista

también debe efectuar un control continuo de laboratorio para asegurar la calidad y las características del material producido y efectuar las correcciones necesarias para que cumpla con los requisitos mínimos descritos en el Libro Azul.

b. Colocación y tendido. El material debe de ser tendido en la sub rasante o sub base previamente preparada por medio de motoniveladora o por medio de un equipo especial que asegure su distribución en una capa de material uniforme. El espesor no debe de ser mayor a 300 milímetros ni menor a 100 milímetros.

c. Mezcla. La homogenización de la mezcla debe de realizarse con una humedad adecuada, mezclando el material en todo el espesor de la capa mediante la utilización de maquinaria y equipo apropiado.

d. Riego de agua. Previamente a la compactación de la capa de sub-base o base granular, se debe humedecer adecuadamente el material para lograr la densidad especificada. La humedad se determina por medio del método carburo, según AASHTO T 217.

e. Conformación y compactación. Se debe conformar tomando en cuenta las secciones típicas del diseño y se debe lograr hasta un 100% de la densidad máxima determinada por el método AASHTO T 180. La compactación en campo debe comprobarse, de preferencia, con el método AASHTO T 191.

4. División 305: Capa de sub base y base trituradas. En la sección 305.03 se mencionan los requisitos mínimos para los materiales. Menciona que el material de sub-base o base trituradas debe consistir en piedra o grava trituradas y mezcladas con material de relleno. La mezcla obtenida debe cumplir los siguientes requisitos:

a. Valor soporte. El CBR se debe determinar con el método AASHTO T 193 y debe de tener un valor mínimo de 50 para sub-base y de 90 para la base. Este ensayo se debe de realizar sobre una muestra saturada a 95% de compactación, compactado por el método AASHTO T180, y debe tener un hinchamiento máximo de 0.5% en el ensayo según AASHTO T 193.

b. Abrasión. La porción del agregado retenido en el Tamiz No.4 (4.75 mm) no debe tener un porcentaje de desgaste por abrasión mayor de 50 a 500 revoluciones determinado por el método AASHTO T 96.

c. **Caras fracturadas.** No menos del 50% en peso de las partículas retenidas en el tamiz No.4 (4.75 mm) deben de tener por lo menos una cara fracturada

d. **Partículas planas o alargadas.** No más del 20% del peso retenido en el tamiz No.4 (4.75 mm) puede ser partículas planas o alargadas. Con esto se refiere a que tienen una longitud mayor de cinco veces el espesor promedio de dichas partículas.

e. **Impurezas.** El material no debe contener materia orgánica, basura, terrones de arcilla o sustancias que puedan provocar fallas en el pavimento.

f. **Graduación.** El material debe llenar los requisitos de graduación, determinada por los métodos AASHTO T 27 y AASHTO T 11, para el tipo que se indique en la Tabla No. 4.

Tabla No. 4. Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada

Estándar mm	Tamiz N°	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)		
		TIPO "A" 50 mm (2") máximo	TIPO "B" 38.1 mm (1 ½") máximo	TIPO "C" 25 mm (1") máximo
50.0	2"	100		
38.1	1 ½"	-	100	
25.0	1"	65-90	70-100	100
19.0	¾"	-	60-90	70-100
9.5	⅜"	-	45-75	-
4.75	N° 4	25-60	30-60	35-65
2.00	N° 10	-	20-50	-
0.425	N° 40	10-30	10-30	12-30
0.075	N° 200	3-12	5-15	5-15

(AASHTO T27) (Libro Azul, 2001)

g. **Plasticidad y cohesión.** La fracción que pasa Tamiz No.40 (0.425 mm) no debe tener un índice de plasticidad mayor de 6, determinado por el método AASHTO T 90, ni un límite líquido mayor de 25, determinado por el método AASHTO T 89. Ambos determinados, sobre muestra preparada en húmedo de conformidad con AASHTO T 146.

h. **Equivalente de arena.** El equivalente de arena no debe de ser menor de 40, determinado por medio de AASHTO T 176.

i. **Material de relleno.** Si se necesita realizar algún relleno, el material para realizarlo debe de tener características adecuadas de granulometría y cohesión y debe estar libre de impurezas así como consistir de un suelo arenoso, polvo de roca, limo inorgánico u otro material de alto porcentaje que pasa tamiz No.10 (2 mm).

Dentro de los requisitos de construcción para bases y sub bases trituradas podemos mencionar los siguientes puntos que trata el Libro Azul:

- **Producción del material:** El contratista debe de efectuar previamente a la utilización de un banco: la limpieza, el chapeo, y la eliminación de la vegetación, capa de material orgánico, arcilla, basura y sustancias que puedan contaminar el material. El contratista también debe efectuar un control continuo de laboratorio para asegurar la calidad y las características del material producido y efectuar las correcciones necesarias para que cumpla con los requisitos mínimos descritos en el Libro Azul.
- **Colocación y tendido:** El material debe de ser tendido en la sub rasante o sub base previamente preparada por medio de motoniveladora o por medio de un equipo especial que asegure su distribución en una capa de material uniforme. El espesor no debe de ser mayor a 300 milímetros ni menor a 100 milímetros.
- **Mezcla:** La homogenización de la mezcla debe de realizarse con una humedad adecuada, mezclando el material en todo el espesor de la capa mediante la utilización de maquinaria y equipo apropiado.
- **Riego de agua:** Previamente a la compactación de la capa de sub-base o base granular, se debe humedecer adecuadamente el material para lograr la densidad especificada. La humedad se determina por medio del método carburo, según AASHTO T 217.
- **Conformación y compactación:** Se debe conformar tomando en cuenta las secciones típicas del diseño y se debe lograr hasta un 100% de la densidad máxima determinada por el método AASHTO T 180. La compactación en campo debe comprobarse, de preferencia, con el método AASHTO T 191.

5. División 307: Capa de sub base y base estabilizada

En la sección 307.13 se menciona los requisitos para la estabilización con cemento hidráulico o con mezclas de cemento hidráulico y otros estabilizadores (cal, puzolanas, y escorias de alto horno). Entre estos requisitos del Libro Azul, se describen algunos a continuación:

a. **Cantidad de aplicación.** La cantidad de cemento para estabilización debe de ser determinada, tomando como base los resultados de los ensayos AASHTO T 134, T 135, ASTM D 1632 y D 1633. La cantidad de cemento normalmente oscila entre el 3% y el 8% de cemento por peso.

b. **Mezcla.** El material debe de aplicarse uniformemente y en el tiempo establecido. El material debe tener un contenido de humedad adecuado en el momento de colocar el cemento, tomando como referencia los resultados del ensayo AASHTO T 134. La humedad debe determinarse, secando el material por el método usando carburo, conforme al ensayo AASHTO T 217. El cemento no debe aplicarse de forma manual.

c. **Aplicación y mezcla en planta.** La aplicación y mezcla del cemento con el material a estabilizar debe ser efectuada en planta, cuando las disposiciones espaciales lo establezcan.

d. **Tendido.** Los materiales mezclados deben de ser tendidos en capas no mayores a 300 milímetros ni menores a 150 milímetros. Esta colocación debe estar acorde a los planos de la sección típica.

e. **Requisitos de tiempo para las operaciones de estabilización con cemento hidráulico.** El material no debe permanecer sin disturbar más de 30 minutos. Entre la aplicación del agua a la mezcla y la terminación de la conformación y la compactación inicial, no deben transcurrir más de dos horas. No deben de transcurrir más de dos horas y media entre la aplicación de agua a la mezcla, la compactación final y lograr una superficie firme.

f. **Afinamiento y compactación.** La compactación debe de realizarse en los tiempos establecidos y debe lograr un mínimo del 100% de la densidad máxima determinada por el método AASHTO T 134. La compactación en campo debe de ser verificada de preferencia con el método AASHTO T 191.

g. Curado. La base o sub base estabilizada con cemento debe ser cubierta con un sello de emulsión asfáltica. Este sello debe ser aplicado el mismo día que se efectuó la compactación final tan pronto sea posible después de la compactación final.

IX. LOSAS CORTAS (PLANTEAMIENTO DE TCPAVEMENTS)

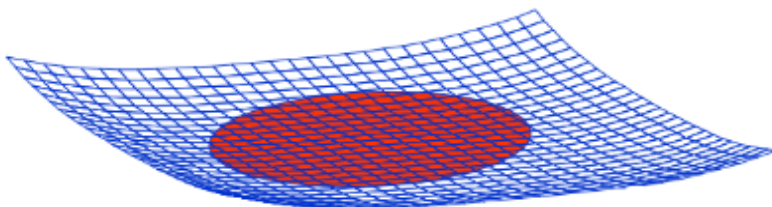
Una losa corta se define como una losa de concreto con juntas espaciadas a una distancia más corta de lo normal. Estas losas tienen una dimensión aproximada de 1.80 m x 1.80 m, esto con el fin de generar que únicamente una llanta cargue la losa a la vez, y no varias llantas como en losas convencionales. Esta metodología busca reducir los esfuerzos en las losas y con esto reducir los espesores de las mismas, optimizando los costos del tramo.

TCPavements es la empresa que desarrollo la metodología de losas cortas. El Dr. Covarrubias fue el que planteo esta metodología y la desarrolló en varios países de Latinoamérica, siendo Guatemala uno de los principales. A continuación se describen los principales planteamientos que considera para esta metodología, los cuales están resumidos en su publicación titulada: "*Thin Concrete Pavements*" publicada en el 2007 por TCPavements.

A. Rigidez de la base

El documento hace énfasis en que se debe considerar el alabeo de las losas cuando se habla de la rigidez de la base. Se considera que una base muy suave generará deformaciones excesivas y por lo tanto se generarán grietas transversales en la losa. Una losa muy rígida provocará un efecto en el que el alabeo de la losa crea un voladizo y la losa, al no poder empotrarse a la base, aumenta los esfuerzos en la misma. Este concepto se muestra en la siguiente figura:

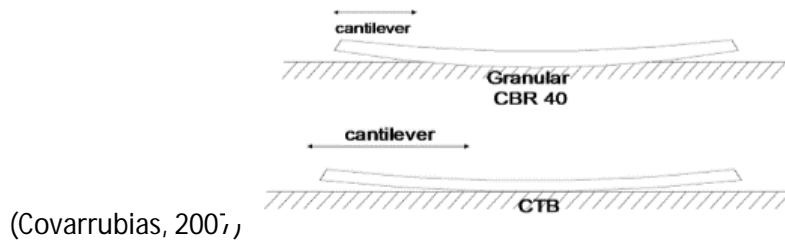
Ilustración No. 13. Concentración de esfuerzos en una losa alabeada sobre una base rígida.



(Covarrubias, 2007)

Debido a este efecto se recomienda una base que no sea demasiado rígida para reducir el voladizo creado por el albeo, ni demasiado suave para evitar deflexiones excesivas. Los valores óptimos que se consideran son de un CBR entre 20% y 50%. Estos valores generan que la losa pueda empotrarse en la base y reduce el voladizo como se muestra en la siguiente figura:

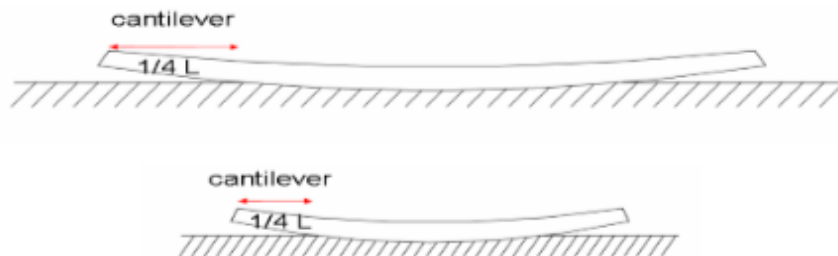
Ilustración No. 14. Comparación entre el voladizo generado entre una base granular contra una estabilizada con cemento.



B. Largo de la losa

Al tener losas de menor dimensión se logra un voladizo menor debido al albeo de la misma. Este albeo se produce debido a los gradientes hidráulicos y de temperatura, así como cualquier albeo generado por el proceso constructivo. En otras palabras, el albeo es proporcional al largo de la losa y al tener losas de menor dimensión se logra mitigar este efecto como se muestra en el siguiente esquema:

Ilustración No. 15. Relación entre largo de la losa y el largo del voladizo generado por el albeo.

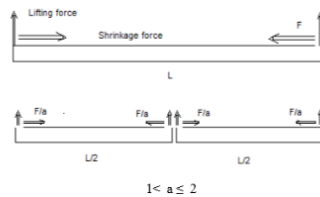


(Covarrubias, 2007)

C. Gradiente hidráulico y térmico

Al igual que el voladizo generado por estos factores, las fuerzas y los esfuerzos generados por el gradiente hidráulico y térmico son proporcionales a la longitud de la losa. Esto se debe a que la contracción o dilatación del concreto será menor si tiene una menor longitud. Por esta razón el gradiente hidráulico y térmico tiene un efecto reducido en losas cortas en comparación a losas convencionales. Este concepto se muestra gráficamente en la siguiente ilustración:

Ilustración No. 16. Relación entre longitud de la losa y las fuerzas inducidas por la contracción de la misma.

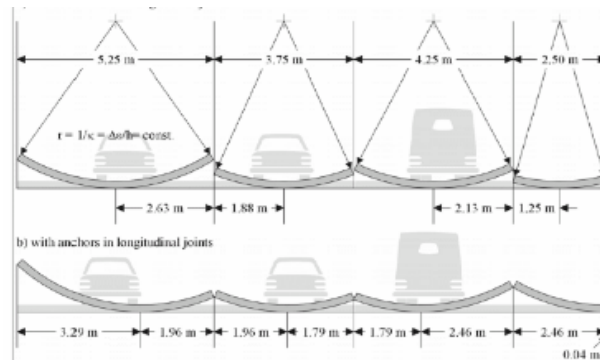


(Covarrubias, 2007)

D. Transmisión de carga

Uno de los capítulos del documento "Thin Concrete Pavements" plantea que en una losa corta se quiere evitar la transmisión de carga entre losas. En una losa convencional, la transmisión de carga ayuda a las losas a soportar la carga en conjunto. En una losa corta la transmisión de carga aumentará los esfuerzos en la losa al no permitir que la losa se acomode en una posición donde se generan menos esfuerzos. Es importante recordar que la losa corta está diseñada para cargar un solo eje del vehículo, al transmitir la carga de losas adyacentes se está contradiciendo este concepto. En la siguiente figura se muestra cómo afecta la transmisión de carga al posicionamiento de las losas.

Ilustración No. 17. Comparación del comportamiento de losas con dovelas y sin dovelas.

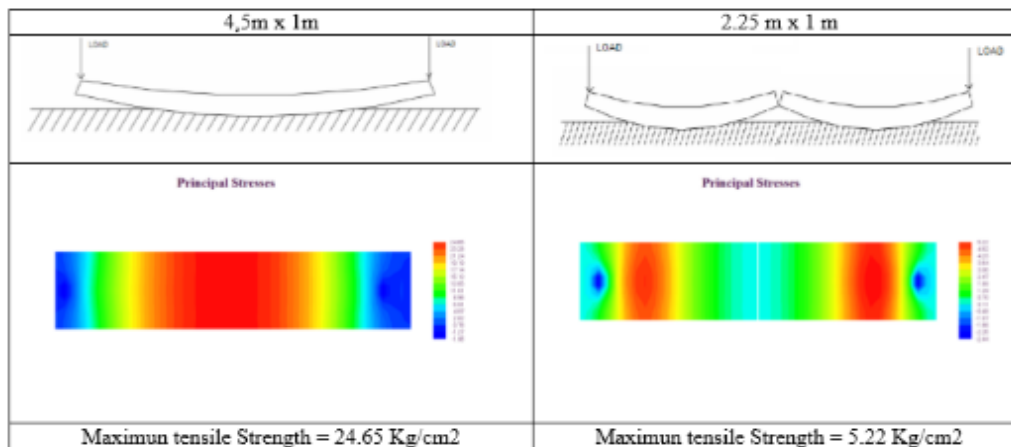


. (Covarrubias, 2007)

E. Tensiones en la losa

Como se ha mencionó anteriormente, el concepto de la losa corta es acortar la longitud para reducir esfuerzos. Esto se logra debido a que la losa únicamente carga una rueda, a diferencia de la losa convencional, donde puede cargar varias a la vez. Esto permite a la losa acomodarse para reaccionar de manera óptima ante la carga. En la siguiente tabla se muestra cálculos publicados en el documento *"Thin Concrete Pavements"* en donde se muestra la reducción de esfuerzos comentada:

Ilustración No. 18. Comparación de los esfuerzos generados en una losa corta contra una losa convencional.



(Covarrubias, 2007)

F. Consideraciones especiales

Para que funcione óptimamente el diseño de losas cortas, se deben tomar en cuenta algunas consideraciones. Estos puntos son importantes, pues mitigan efectos como erosionabilidad de la base y problemas de drenaje que se dan debido a la reducción del espesor de la carpeta. Las consideraciones que se deben tomar en cuenta son las siguientes:

Se deben realizar juntas de 2mm de ancho para evitar desportillamiento en la junta debido a material incompresible. Es importante recordar que la junta no se sella.

Se puede considerar una base granular que tenga menos de 6% de finos que pasen tamiz 200. Esto es para tener una base que tenga una estructura que no sea afectada por el agua, debido a que las juntas no se sellan. Si se toma en cuenta esta consideración, no se tiene cambio volumétrico debido al confinamiento.

Debe colocarse una base impermeable o geo textil entre el suelo natural y la base para evitar que finos del suelo natural se mezclen con la base.

Deben colocarse barras para confinamiento lateral. Esto es para prevenir el desplazamiento lateral de las losas. Debido a que es muy costoso colocar dovelas se propone colocar barras de 50 cm de largo enterradas en los extremos del pavimento para lograr esta restricción.

G. Procedimiento de diseño de losas cortas

El procedimiento para el cálculo de losas cortas toma como base cualquier metodología de diseño AASHTO. En el documento publicado por TCPavements, *"Thin Concrete Pavements"*, se explica el procedimiento de diseño en tres pasos:

- Diseñar con metodología AASHTO para una losa convencional de 4.5 m.
- Calcular por medio de un cálculo de elementos finitos los esfuerzos en los diferentes puntos críticos de la losa.

- Reducir el tamaño de las losas y por medio de un cálculo de elementos finitos se itera para lograr los mismos esfuerzos calculados anteriormente con un menor espesor de carpeta.

H. Programas de diseño

Se comenzó con el programa llamado "Pavement Evaluator", posteriormente se discontinuó y se publicó el programa que se promociona actualmente, llamado "Optipave". La mayoría de diseños en Guatemala fueron desarrollados con "Pavement Evaluator". El último programa toma en cuenta distintos casos críticos de carga entre los cuales se destacan tres que rigen el diseño: carga en el borde, carga en el centro y carga a 15 cm del borde. También se menciona que para el análisis se toman en cuenta gradientes térmicos desde 5 °C hasta -21 °C. Para el gradiente hidráulico se toma en cuenta un gradiente térmico equivalente de -11 °C.

I. Comparación de esfuerzos de una losa convencional contra esfuerzos de una losa corta

Para realizar el diseño de una losa corta, primero se diseña una losa convencional con un método AASHTO. Luego se busca igualar los esfuerzos del diseño convencional, pero con un espesor reducido utilizando la metodología de losas cortas. Esto se puede ver en el siguiente cuadro comparativo en donde se muestra como con la metodología de losas cortas, se puede reducir el espesor del pavimento para tener los mismos esfuerzos que en el diseño convencional.

Tabla No. 5. Comparación de esfuerzos en la parte superior de la losa, para losas convencionales y tramos de losas cortas.

Comparación de esfuerzos entre una losa convencional y losas cortas (TOP)			
	Centro (Mpa)	Borde (Mpa)	Esquina (Mpa)
	$\sigma(+)$	$\sigma(+)$	$\sigma(+)$
Losa convencional (25 cm)	0,22	0,485	0,86
Losa corta (25 cm)	0,0968	0,349	0,79
Losa corta (22 cm)	0,106	0,428	0,81
Losa corta (20 cm)	0,113	0,493	0,86
Losa corta (18 cm)	0,12	0,569	0,91

(Elaboración propia, 2014)

En este ejemplo en particular se puede concluir que para una sub rasante de $K = 0.04$ Mpa/mm, una base estabilizada ($E = 250,000$ psi) y una carga tándem de 142 KN, los esfuerzos en la parte superior de la losa serán similares en una losa corta de 20 cm que en una losa convencional de 25 cm. Es decir que con 5 centímetros menos de espesor se obtienen los mismos esfuerzos tensionales en la parte superior de la losa.

Esta es la base con la que funciona la metodología de diseño de losas cortas. Luego procede a realizar análisis de deterioro para calcular el tiempo de vida del pavimento. Este análisis de deterioro fue desarrollado por TCPavements y no se indica en ninguna parte del documento como se desarrolla este cálculo o qué criterios se aplican. Sin embargo, es muy probable que estos modelos de deterioro sean basados en los desarrollados por AASHTO, los cuales son para losas convencionales y no aplican para losas cortas. Es importante recordar que, en los análisis de deterioros, se debe de buscar valores específicamente para losas cortas, ya que un valor aceptable en losas convencionales, por ejemplo porcentaje de losas falladas, puede ser inaceptable en losas cortas debido a que se tiene mayor cantidad de losas.

X. FACTORES QUE AFECTAN EL DESEMPEÑO DE LAS LOSAS CORTAS

Actualmente se está recibiendo mucha retroalimentación en Guatemala sobre el desempeño de los tramos de losas cortas. Muchos tramos de este tipo ya tienen un tiempo de uso lo suficientemente significativo para permitir obtener conclusiones. Existen pocos documentos que validen como se han desempeñado las losas cortas. Por esta razón, los inconvenientes en este tipo de tramos se han intentado solucionar empíricamente en campo conforme se van haciendo evidentes y las mejoras realizadas se informan de manera informal entre los profesionales. La retroalimentación que se ha obtenido ha servido para que los diseñadores tomen en cuenta ciertos factores en el diseño, pero de una manera igualmente empírica, ya que no existe documentación suficiente que indique como desarrollar esta metodología de una manera óptima para el caso de Guatemala, ni qué mejoras se deben implementar.

Dentro de los factores principales que afectan el desempeño de las losas cortas, se pudieron detectar los siguientes:

- Desplazamiento lateral.
- Tipo de carga.
- Drenaje del pavimento.
- Calidad de la base.

Para analizar cada uno de estos factores se realizaron entrevistas a diseñadores y ejecutores de losas cortas en Guatemala. En base a la experiencia práctica que se ha visto en campo, comentada por estos profesionales, se prosiguió a analizar los factores mencionados, formular hipótesis sobre el comportamiento observado hasta la fecha y plantear posibles soluciones a los problemas que se han detectado. La información recopilada se presenta en los siguientes capítulos de esta tesis.

Este documento no pretende llegar a definir el diseño óptimo de un tramo de losas cortas, sino que busca encontrar los factores que se deben investigar para poder llegar a desarrollar una normativa para la construcción de losas cortas en Guatemala. En este documento solo se plantearán posibles soluciones que deben de ser validadas posteriormente.

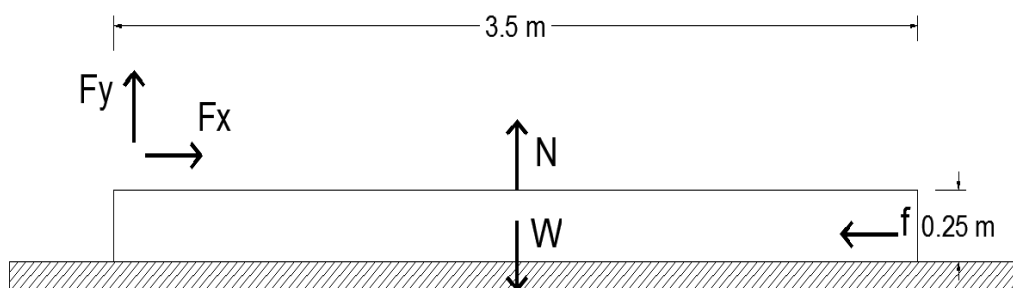
XI. DESPLAZAMIENTO LATERAL

El desplazamiento lateral de las losas es una de los principales factores que afecta el rendimiento de las losas cortas en Guatemala. Este problema es complicado de abordar, debido a que no se tiene ninguna norma que calcule el desplazamiento lateral de una losa. Lo único que se tiene son algunas recomendaciones generales de los factores que pueden reducir este factor. La problemática del desplazamiento lateral, se puede explicar con dos planteamientos físicos sencillos que se muestran a continuación.

A. Relación entre desplazamiento lateral y el peso de la losa

El primer planteamiento es un sencillo diagrama de las fuerzas que funcionan en una losa convencional y en una losa corta. Para una losa convencional se tiene la siguiente situación:

Ilustración No. 19. Diagrama de fuerzas que interactúan en una losa convencional



(Elaboración propia, 2014)

Se debe recordar que la fricción depende de la fuerza normal y por lo tanto del peso de la losa:

$$f = \mu \cdot N$$

En donde:

f = Fuerza de fricción

μ = Coeficiente de fricción

N = Fuerza normal

Se puede estimar el peso de la losa sabiendo que la densidad promedio del concreto es 2400 kg/m³. Si se asume un largo de losa de 4.5 metros, se sabe que el ancho es de 3.5 metros y el espesor de 25 centímetros, se puede calcular el peso de la losa con la siguiente ecuación:

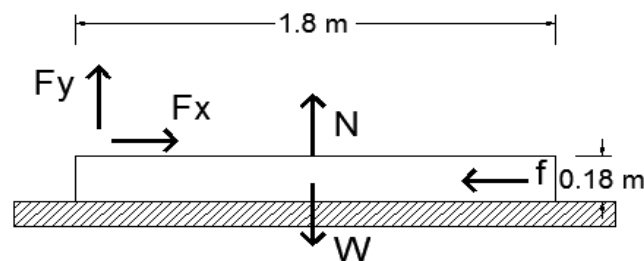
$$w = (3.5m)(4.5m)(0.25m)\left(2400 \frac{kg}{m^3}\right) = 9450 kg$$

Por lo tanto, la fuerza de fricción será:

$$f = \mu(9450 kg)\left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) = \mu 92,704.5 N$$

De igual manera, planteamos las fuerzas en una losa corta:

Ilustración No. 20. Diagrama de fuerzas que interactúan en una losa corta.



(Elaboración propia, 2014)

Se estima el peso de la losa sabiendo que la densidad promedio del concreto es 2400 kg/m³, asumiendo un largo de losa de 1.8 metros, sabemos que el ancho es de 1.8 metros y el espesor de 18 centímetros, se puede calcular el peso de la losa:

$$w = (1.8m)(1.8m)(0.18m) \left(2400 \frac{kg}{m^3} \right) = 1399.68 \text{ kg}$$

Por lo tanto, la fuerza de fricción será:

$$f = \mu(1399.68kg) \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) = \mu 13,730.86 \text{ N}$$

Una vez realizado ambos análisis se puede observar que debido a la diferencia de peso entre una losa convencional y una losa corta, la fuerza de fricción en una losa convencional será aproximadamente 6.75 veces mayor que en una losa corta.

Ilustración No. 21. Problema de apertura de junta por desplazamiento lateral de las losas en un tramo de losas cortas.



(G. Rodríguez ,2014)

B. Relación entre desplazamiento lateral y el área en contacto con la base

El segundo planteamiento se basa en que mientras mayor sea el área de contacto de la losa con la base, mayor será la resistencia de la losa a los esfuerzos de corte que genera la carga de tránsito al intentar desplazar la losa lateralmente. La resistencia a los esfuerzos de corte se simplifica en la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{V}{A}$$

En donde:

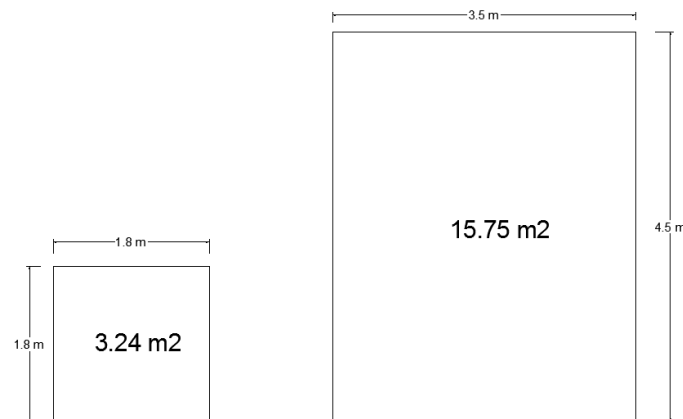
τ = Esfuerzo de corte.

V = Fuerza de corte.

A = Área de superficie de contacto.

Al analizar esta ecuación se puede notar que el esfuerzo cortante que se produce depende de dos factores, el área de contacto y la fuerza. A continuación se muestra la variación entre el área de una losa convencional y una losa corta:

Ilustración No. 22. Área superficial de una losa corta y de una losa convencional.



(Elaboración propia, 2014)

Al analizar lo mencionado anteriormente, se puede determinar que la superficie de contacto de una losa convencional es 4.86 veces mayor que en una losa corta. Por lo tanto, el esfuerzo cortante generado por la carga de tráfico será aproximadamente cinco veces mayor en una losa corta que en una convencional, generando que sea más factible que suceda un desplazamiento lateral.

XII. RECOMENDACIONES PARA MITIGAR EL DESPLAZAMIENTO LATERAL

Para mitigar el desplazamiento lateral en una losa corta se pueden tomar varios enfoques. Sin embargo, se debe de buscar una manera en que la combinación de estos enfoques pueda resolver este problema. Las posibles soluciones a la problemática del desplazamiento lateral en losas cortas se mencionan a continuación.

A. Barras de sujeción entre la losa y el hombro de la carretera

Las barras de sujeción se utilizan en los pavimentos para restringir el movimiento de la losa al unirla con el hombro del pavimento. La función de la barra de sujeción es restringir el movimiento, por lo que otros criterios como la transmisión de carga, no son relevantes en el diseño de las barras de sujeción.

Al utilizar barras de sujeción entre la losa y el hombro se estaría restringiendo el movimiento lateral de las mismas. Para losas entre 18 y 20 centímetros, los valores típicos en losas cortas, las barras de sujeción deberían de ser barras no.4 a cada 1.2m-1m de 80 cm de longitud aproximadamente (Delatte, 2008). Se debe recordar que para que esta medida sea efectiva se debe tener un hombro de carretera diseñado adecuadamente. Se debe evitar hombros muy pequeños, pues estos ayudarán menos a prevenir el desplazamiento lateral. Para el diseño del área de acero requerida en las barras de sujeción podemos avocarnos a la ecuación de Huang (2004: 170), la cual se muestra a continuación:

$$A_s = \frac{\gamma_c D L f_a}{f_s}$$

En donde:

γ_c = Densidad del concreto

D = Espesor de losa

L = Distancia de la junta longitudinal a un extremo libre.

f_a = Coeficiente de fricción entre la losa y la sub rasante.

f_s = Resistencia del acero.

Es importante recordar que las ecuaciones desarrolladas hasta hoy en día son para losas convencionales, esto es tanto para el diseño de hombros como para el diseño de las barras de sujeción. Esto provoca que el diseño se base mucho en la geometría de la carretera y no en las fuerzas que pudiera estar generando la carga en la losa. Por esta razón se debería de calibrar una ecuación para el caso de las losas cortas, en donde otros factores como el peso de la losa y la magnitud de la carga comienzan a ser más críticos.

B. Ancho de hombro adecuado

Como se mencionó anteriormente, para que el hombro de la carretera cumpla su función de restringir el movimiento es necesario que tenga dimensiones adecuadas. En el Manual "Normas Para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales" de la SIECA se mencionan los parámetros generales para los hombros de las carreteras. En general, según SIECA, los hombros de las carreteras tienen las siguientes funciones:

- Proveer espacios para acomodar vehículos que ocasionalmente sufren desperfectos durante su recorrido.
- Proveer estabilidad estructural a los carriles por medio de confinamiento, es decir prevenir el desplazamiento lateral de las losas.
- Permitir el movimiento peatonal en áreas donde lo sea requerido.
- Proporcionar un espacio libre para que se tenga espacio para la instalación de señales de tránsito verticales.

Los valores recomendados para el ancho de los hombros se determinan en función al tipo de carretera. A continuación se muestra una tabla con los anchos mínimos para hombros y aceras:

Tabla No. 6. Anchos mínimos de hombros y aceras

Tipo de carretera		Tipo de superficie	Ancho de hombros (m)		Ancho de aceras (m)
			Internos	Externos	
AR	Autopistas regionales	Alto	1.0 – 1.5	1.8 – 1.5	
TS	Troncales suburbanas	Alto	1.0 – 1.5	1.8 – 1.5	1.2 – 2.0
TR	Troncales rurales	Alto	0.5 – 1.0*	1.2- 1.8	1.2 – 1.5
CS	Colectoras suburbanas	Intermedio	0.5*	1.2 – 1.5	1.0 – 1.2
CR	Colectoras rurales	Intermedio	-	1.2 – 1.5	1.0 – 1.2

* Solamente con mediana

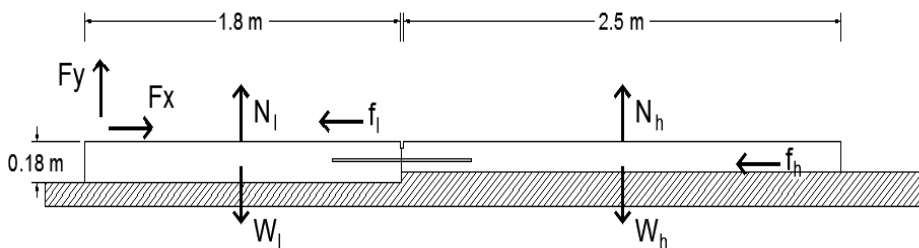
(Leclair, 2004)

Como se puede observar, los anchos mínimos de los hombros se diseñan en base a la geometría de la carretera, no al diseño estructural de la misma. Se debe recordar que todos estos valores se asumieron para pavimentos de concreto con losas convencionales. Por esta razón, estos anchos mínimos deberían de revisarse para la metodología de losas cortas, pues el peso y las dimensiones de las losas podrían provocar que estos valores mínimos no sean suficiente lograr la función de confinamiento.

C. Integrar dientes en los hombros

Es importante tomar en cuenta detalles como dientes en los hombros, ya que estos mejoran el efecto de confinamiento que se genera en las losas. El diente ayuda en el sentido que ya no solo se tiene una fuerza de fricción entre el suelo y la losa sino que el suelo también genera una presión pasiva en el diente. Este concepto se muestra en los siguientes esquemas:

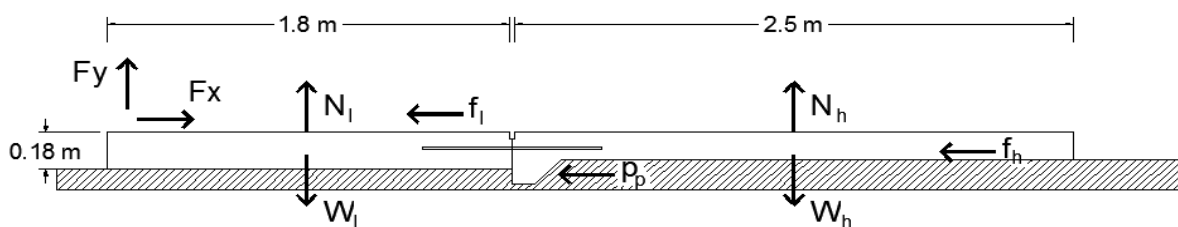
Ilustración 23. Losa y hombro de la carretera sin detalle de diente.



(Elaboración propia, 2014)

En este esquema se puede ver que los componentes que evitan el desplazamiento lateral son los pesos tanto de la losa como del hombro y la fricción entre la base y la losa, así como también el hombro. En la Ilustración No. 24, se muestra el mismo caso de la Ilustración 23 pero con el detalle del diente, el cual genera una presión pasiva en contra de la fuerza de tránsito que genera el desplazamiento lateral. El diente mostrado es un detalle típico pero se debe buscar un diseño que optimice su función y a la vez no sea tan costoso de realizar.

Ilustración No.24. Losa y hombro de la carretera con detalle de diente.



(Elaboración propia, 2014)

D. Mejorar la fricción entre base y losa

El principal factor que evita que la losa se desplace lateralmente es la fricción que tiene la losa con la base. Al reducir el tamaño de la losa y el área superficial que esta tiene en contacto con la base se reduce la fricción entre base y losa. Por lo tanto es necesario modificar el tipo de suelo para que este genere la mayor fricción posible y pueda mitigar el desplazamiento lateral de las losas.

En la publicación *"Influence Of Supporting Base Characteristics On Shrinkage-Induced Stresses In Concrete Pavements"* se menciona como los desplazamientos de las losas dependen del tipo de suelo en el que estas están apoyadas. Aunque esta publicación está enfocada a los esfuerzos generados por contracción, se logra determinar qué tipo de base es la que genera mayor fricción con la base. A continuación se muestran los valores de resistencia a la fricción de diferentes tipos de bases publicado en dicho artículo.

Tabla No. 7. Valores de resistencia a la fricción de diferentes tipos de bases.

Base type	τ_0 (MPa)	δ_0 (mm)
Cement stabilized (CS)	0.106	0.025
Untreated 32-mm HMA (AC-R)	0.104	0.25
Granular (GR)	0.023	0.50
Asphalt concrete (AC-S)	0.021	0.60
Asphalt stabilized (AS)	0.015	1.00
Lime-treated clay (LTC)	0.012	0.30
Natural clay (NC)	0.008	1.30

(Zhang, Li, 2001)

Como se puede observar, el tipo de base que genera más fricción entre la losa y el suelo es la base estabilizada con cemento, muy por encima de las bases granulares. Por lo tanto, el tipo de base más recomendable para mejorar la fricción entre losa y base es una base estabilizada con cemento. Se deben de tomar en cuenta varias consideraciones para optimizar el rendimiento de la base, las cuales se mencionan a continuación:

- Un estricto control de calidad es necesario, para asegurar que la base tenga las mejores propiedades posibles.

- Se debe utilizar un tamaño de agregado que ayude a mejorar la fricción entre losa y base.
- La base debe estar adecuadamente preparada previamente a la fundición de la losa.
- La base debe ser rugosa para mejorar la fricción con la losa.

E. Inconveniente con barras de acero verticales para confinar

En el documento "*Thin Concrete Pavements*" se propone para el confinamiento de las losas colocar barras de 50 cm de largo verticalmente en los bordes del pavimento. Esto no ha sido efectivo debido a las siguientes razones:

- Estas barras no tienen una metodología de diseño, simplemente son colocadas empíricamente. Por esta razón, no se sabe si están dimensionadas adecuadamente para confinar el pavimento.
- No tiene protección contra la corrosión. Si se coloca la barra sin recubrimiento esta se oxidará rápidamente, ya que está en contacto con el suelo.
- Las barras trabajan a flexión, no a corte. Por esta razón es posible que la barra tienda a deformarse en vez de confinar el pavimento.

Por las razones descritas, no es recomendable utilizar barras verticales para resolver el problema de confinamiento en tramos de losas cortas o se debe realizar un estudio más profundo de esta solución para validar si cumple la función de confinamiento.

F. Estructuras de borde y rellenos

Según la topografía del terreno, se tendrán partes del tramo que requerirán de rellenos o estructuras auxiliares como muros de contención. Si estos elementos no se realizan adecuadamente se tendrá un desplazamiento o hundimiento completo del terreno, en donde el desplazamiento lateral de las losas será evidente pero por condiciones del terreno. Estas fallas son independientes de la metodología entre losas cortas y losas convencionales, suceden por falta de criterio de diseño o un mal trabajo en campo.

Un estudio de suelos debe formar parte de cualquier diseño de pavimento para asegurar que este tipo de situaciones no se desarrollen durante el desempeño del mismo. En Guatemala, muchas veces se limitan a recaudar información muy limitada de los suelos, lo que provoca distintos tipos de fallas, en especial en ubicaciones con topografía muy pronunciada, complicada o con problemas de nivel freático.

XIII. DRENAJE DEL PAVIMENTO

El drenaje es un factor importante para el desempeño de un pavimento. En Guatemala, se tiene una precipitación promedio alta a comparación de otros países, debido a que es un país tropical. Esto implica que las fallas de drenaje en un pavimento serán más notables. AASHTO describe que la humedad en un pavimento puede generarse de diversas maneras. Entre las cuales podemos mencionar las siguientes:

- El agua puede subir por capilaridad desde fuentes de agua subterráneas.
- El agua puede fluir lateralmente de los bordes del pavimento, o las cunetas del mismo.
- Infiltración por medio de juntas o grietas en el pavimento, en especial en pavimentos deteriorados.

La escorrentía generada por la precipitación es uno de los principales factores de humedad en los pavimentos de concreto. Las juntas o grietas en el pavimento generan una filtración directamente la estructura del pavimento. La metodología de losas cortas tiene algunas especificaciones que podría amplificar estos efectos, los cuales se mencionan a continuación:

El espaciamiento entre juntas es menor, generando más puntos potenciales de infiltración. En vez de tener una junta en el sentido longitudinal aproximadamente a cada 4 metros, se tiene una junta a cada 1.8 metros. En el sentido transversal se duplican la cantidad de juntas, pues se tiene dos losas por carril en vez de una.

Las juntas no se sellan. Esto genera que la infiltración del agua a la estructura del pavimento suceda más fácilmente.

Los efectos del agua cuando está atrapada dentro de la estructura de un pavimento según el Manual centroamericano para el diseño de pavimentos, son los siguientes:

- Reducción en la resistencia de los materiales granulares.
- Cuando la sub rasante se satura durante un tiempo prolongado, pierde resistencia.

- Succión en los suelos de apoyo, y por lo tanto fallas de grietas y deterioro de los hombros.
- Bombeo de finos y pérdida de soporte.
- Degradación en la calidad del material por el efecto de la humedad.
- Hinchamiento del suelo, por el exceso de humedad.
- Expansión y contracción, por congelamiento de los suelos. (Este caso no aplica a Guatemala)

Es importante recordar que el agua puede generar dos tipos de efectos no deseados en el pavimento, puede generar fallas inducidas por la humedad o acelerar el efecto de otro tipo de deterioro. La mayoría de fallas en los pavimentos se potencializan con la presencia de agua. El hecho que la humedad acelere el deterioro del pavimento, hace que este sea un factor muy importante en el desempeño final del mismo.

A. Integridad en el diseño hidráulico de pavimentos

El objetivo en el diseño de los drenajes del pavimento debe evitar que la base, sub base y sub rasante se saturen o tengan contacto por un periodo prologado a la humedad. Para lograr esto, el diseñador debe buscar los siguientes enfoques:

- Evitar que la humedad entre al pavimento.
- Utilizar materiales que sean afectados lo menos posible, por los efectos de la humedad.
- Incluir en el diseño, elementos que mitiguen los daños ocasionados por la humedad.
- Remover de una manera rápida y eficiente, la humedad que haya entrado al pavimento.

En el diseño de la estructura del pavimento se debe de tomar en cuenta todos estos enfoques, para lograr una solución integral ante el problema de humedad, en especial cuando se tienen cargas pesadas. Para el diseño de las bases permeables, el parámetro más importante

es la permeabilidad de la base, o el tiempo que esta toma en drenar el agua. Este enfoque clasifica la base en un rango entre "pobre" y "excelente", la base "excelente" con buenas características de drenaje y la "pobre" con características nulas o malas de drenaje. Normalmente, se utiliza como parámetro el tiempo requerido para drenar el 50% del agua en una base saturada. Este tiempo se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$t_{50} = \frac{N_e * L_R^2}{2k(S_R * L_R + H)}$$

En donde:

t_{50} = Tiempo requerido para drenar el 50% del agua en una base saturada.

N_e = porosidad efectiva.

L_R = Largo resultante.

k = Coeficiente de permeabilidad.

S_R = Pendiente resultante.

H = Espesor de la base permeable.

Al analizar esta ecuación se puede concluir que las características geométricas de pendientes y la permeabilidad de la base son los factores que más impactan en el drenaje del pavimento. Por esta razón, el diseño hidráulico, geométrico y estructural del pavimento deben de combinarse de una manera que se integren para lograr el desempeño óptimo del pavimento. El diseño geométrico debe de ser un diseño con pendientes adecuadas para que las cunetas contempladas en el diseño hidráulico capten adecuadamente el agua y que la posible infiltración en la estructura del pavimento sea rápidamente evacuada y sufra el menor daño debido al efecto del agua.

B. Incremento de cantidad de juntas en un tramo de losas cortas

Para el diseño de tramos de losas cortas se debe tomar en cuenta que este sistema genera un problema de infiltración debido a la falta de sello y la separación entre las juntas. Para

visualizar mejor este concepto, se puede observar la ecuación de infiltración de AASHTO, la cual se muestra a continuación:

$$q_c = I_c \left(\frac{N + 1}{W} + \frac{1}{C_s} \right)$$

En donde:

I_c = infiltración promedio en grietas la superficie del pavimento, normalmente se utiliza 0.223 m³/day/m².

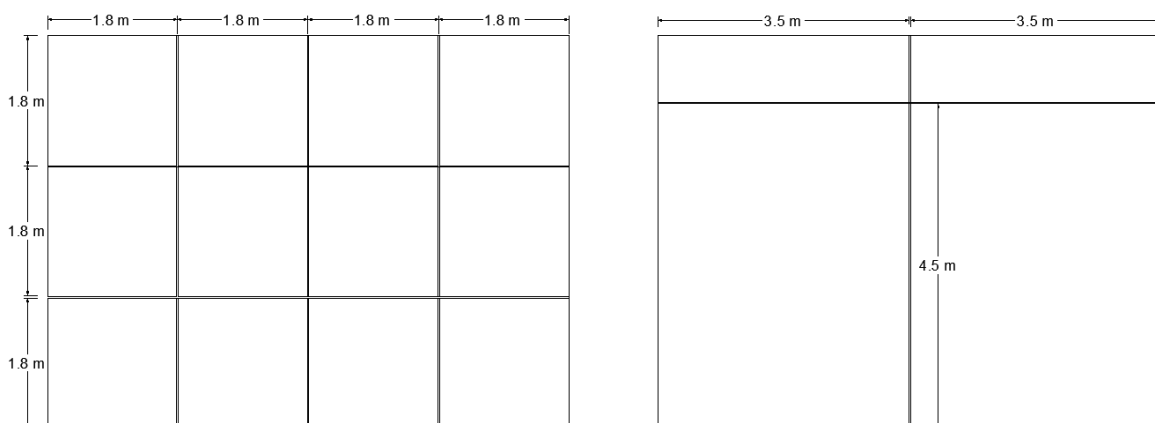
N = Número de carriles.

W = Ancho del pavimento.

C_s = Distancia entre grietas o juntas.

Al analizar esta ecuación se puede concluir que el espaciamiento entre juntas no selladas es crítico en la infiltración del pavimento. En la siguiente figura se puede observar que, en un tramo de losas cortas, las juntas se incrementan significativamente.

Ilustración No. 25. Comparación de la cantidad de juntas entre losas cortas y losas convencionales.



(Elaboración propia, 2014)

Al reducir el espaciamiento de 3.5 o 4.5 metros de la losa convencional a 1.8 metros promedio de una losa corta, las juntas se duplican en el sentido longitudinal y se tiene una junta adicional por cada carril que tenga el tramo. Por esta razón, un tramo de losas cortas tiene más probabilidad que el agua se infiltre a la estructura del pavimento por medio de las juntas, al no estar selladas las juntas se hace más crítico este escenario. El diseñador debe de ser consciente de este inconveniente y tomar el drenaje del pavimento como un punto crítico en el diseño.

C. Falta de sello en las losas

La junta que se realiza en las losa de concreto, al final es una junta diseñada. Se debe recordar que la principal función de las juntas, es evitar que la losa se agriete por naturaleza del concreto. En el caso de las losas cortas, los espaciamientos se reducen para lograr distribuir las cargas de las llantas en diferente losa, por esto es que están espaciadas a menor distancia. Los sellos en las juntas tienen dos funciones:

- Evitar el ingreso de agua por infiltración a través de las juntas a la estructura del pavimento.
- Evitar que partículas de material incompresible entre en la junta y provoque destornillamientos u otro tipo de falla en el pavimento.

En la metodología de losas cortas, se recomienda una junta no mayor a 2 mm de ancho para evitar que el material incompresible entre a la junta y dañe la losa. Sin embargo, no se discute la problemática de la infiltración del agua en las juntas debido a la falta del sello. El drenaje de la estructura del pavimento debe de ser diseñada considerando la infiltración que ocurre a través de las juntas. Si se buscara sellar las juntas en un tramo de losas cortas como solución a los problemas mencionados se tendrían tres claros inconvenientes:

- El costo se incrementaría debido a que sellar las juntas no estaba contemplado.
- Se incrementaría el tiempo de construcción del tramo.
- El mantenimiento del tramo sería más elevado debido a que el sello de las juntas tiene un período determinado de vida.

A pesar de estos inconvenientes sellar las juntas es la opción más viable para solucionar los problemas de infiltración en el pavimento. La opción alternativa sería mejorar el drenaje para mitigar este problema. De cualquier manera se debe buscar diseñar el pavimento de manera que el diseño mitigue los inconvenientes mencionados.

D. Problemática con bombeo de finos

El bombeo de finos una de las principales problemáticas que tienen los pavimentos. Por esta razón, si un pavimento tiene un drenaje deficiente, se debe buscar que la base sea lo más resistente posible a los efectos del agua. En general, el efecto de bombeo de finos se amplifica con los siguientes factores:

1. **Cargas rápidas y pesadas en el tramo.** Si la carga es liviana, el efecto de bombeo se reduce drásticamente debido a que el movimiento que ésta produce es mucho menor.
2. **Suelos malos.** Arcillas de alta plasticidad o suelos con presencia de finos, son los expulsados durante el bombeo.
3. **Mal drenaje del pavimento.** Al tener un mal drenaje el suelo se satura, y genera la condición ideal para que comience a producirse el bombeo de finos.
4. **Deterioros en los pavimentos.** Las grietas, fisuras, escalonamientos, aumentan la cantidad de lugares donde se pueden tener problemas de bombeo.

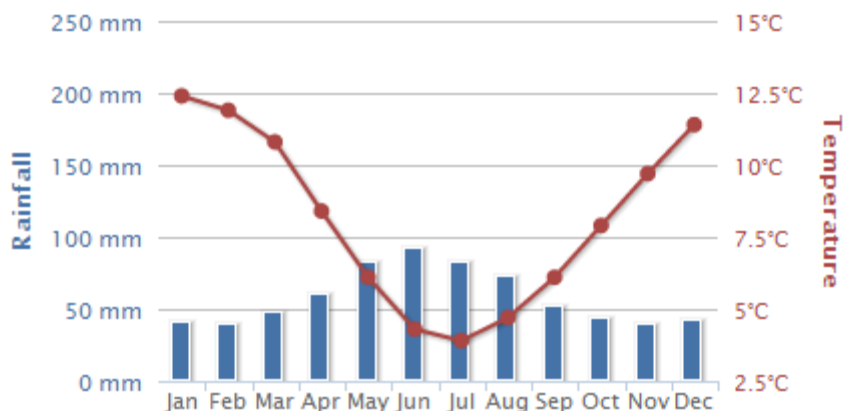
La combinación del mal drenaje y los efectos magnificados de deformación debido al menor espesor de la losa en tramos de losas cotas, generan que esta sea más propensa al bombeo de finos. Se recomienda tener bases estabilizadas y de buena calidad que tengan una mayor resistencia a la erosión y los problemas de bombeo.

E. Precipitación en Guatemala

Al utilizar la metodología de losas cortas se debe tener presente que todo el planteamiento fue desarrollado mayormente Chile. Al querer aplicar en Guatemala esta

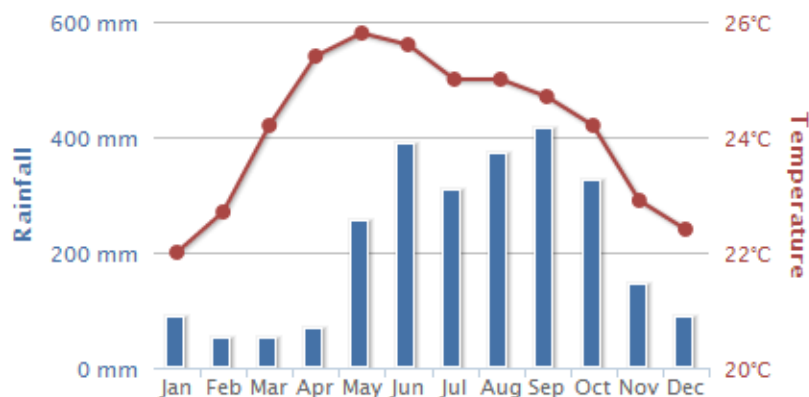
metodología se debe tomar en cuenta las variaciones climáticas que hay entre Guatemala y Chile. La más significativa para el diseño de pavimentos es la cantidad de precipitación promedio en cada país. A continuación, se muestran las gráfica desarrolladas por el Banco Mundial de la precipitación promedio de Chile y de Guatemala entre 1960 y 1990.

Ilustración No. 26. Precipitación y temperatura promedio en Chile



(World Bank Group, 2009)

Ilustración No. 27. Precipitación y temperatura promedio en Guatemala



(World Bank Group, 2009)

Al analizar las gráficas se pueden deducir:

Chile tiene temperaturas más bajas que Guatemala, ya que sus temperaturas promedio máximas en verano son de aproximadamente 12°C, mientras en Guatemala llegan hasta 25°C

La precipitación promedio en Guatemala durante la estación lluviosa es cuatro veces mayor que la de Chile.

Es importante mencionar que lo que se está visualizando es la precipitación y temperatura promedio de todo el país. Hay regiones en Guatemala como Escuintla que presentan una precipitación más alta que la descrita y tramos en estos lugares son los que son más susceptibles a problemas con el agua. También hay que tomar en cuenta que el factor de la temperatura es importante, ya que la principal ventaja de las losas cortas es que reducen los esfuerzos de temperatura en la losa, por lo que su desempeño será mejor en tramos con gran variante de temperatura.

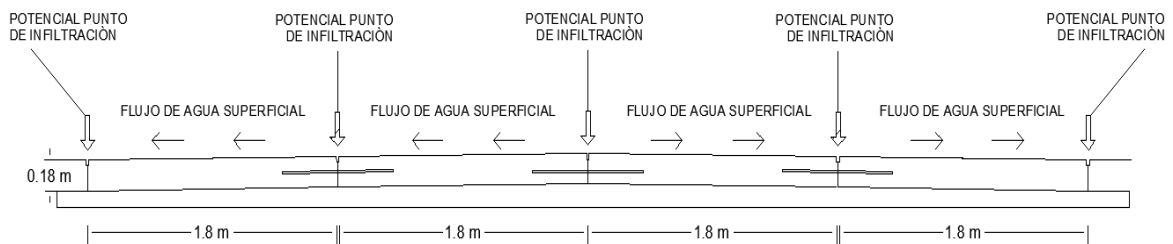
Se debe de revisar si los planteamientos propuestos en la metodología de losas cortas aplican a las condiciones de lluvia extremas que se tienen en Guatemala. El diseñador debe de tomar en cuenta estas condiciones, en especial en regiones como la costa sur en donde se llegan a tener las lluvias más fuertes. En Guatemala, se debe tener mucho énfasis en el diseño de los drenajes de los pavimentos y en la estabilización de suelos que son problemáticos al tener contacto con la humedad. Para lograr esto se debe buscar lo mencionado con anterioridad: buscar un diseño integral del pavimento, minimizar el bombeo de finos y considerar la aplicación de sello en las juntas.

XIV. RECOMENDACIONES PARA MEJORAR EL DRENAJE EN UN PAVIMENTO DE LOSAS CORTAS

A. Sellar las juntas

Sellar las juntas debe de ser un requisito indispensable, no solo para los tramos de losas cortas, sino para cualquier pavimento en Guatemala. Esto es debido a la cantidad de precipitación que se tiene en la región. En un tramo de losas cortas, el agua superficial correrá hacia una junta sin importar en qué dirección drene superficialmente, ya que hay juntas en todas las direcciones.

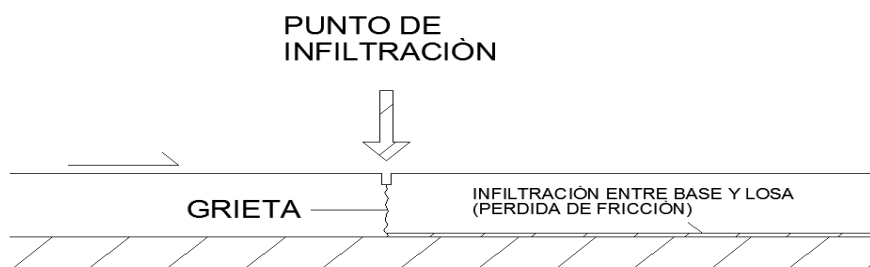
Ilustración 28. Flujo de agua superficial en pavimento de losas cortas.



(Elaboración propia, 2014)

El hecho de evitar que el agua se infiltre en la superficie ayudará a que el agua no dañe la fricción entre la base y la losa. Al entrar el agua por las juntas y no poder evacuar, el agua se infiltrará entre la base y la losa como se muestra en la Ilustración 29. Este problema puede provocar desde pérdida de fricción entre losa y sub base, hasta problemas de bombeo y erosión. La junta entre la losa y el hombro también debe de ser sellada, pues este es un punto donde puede generarse infiltración significativa.

Ilustración No. 29. Pérdida de fricción entre base y losa debido a infiltración de agua en pavimento.



(Elaboración propia, 2014)

B. Realizar un diseño adecuado de drenaje

Un diseño de drenaje adecuado debería de ser un requisito indispensable, no solo en tramos de losas cortas, sino en cualquier pavimento en Guatemala. Muchas veces, los daños en los pavimentos se deben a fenómenos del terreno no contemplados y a sub drenajes mal diseñados o inexistentes. En Guatemala, generalmente no se desarrolla un diseño de drenaje apropiado. En tramos de losas cortas, este problema sobresale más debido a los problemas mencionados anteriormente.

Ilustración No. 30. Drenaje ineficiente en pavimento de losas cortas.



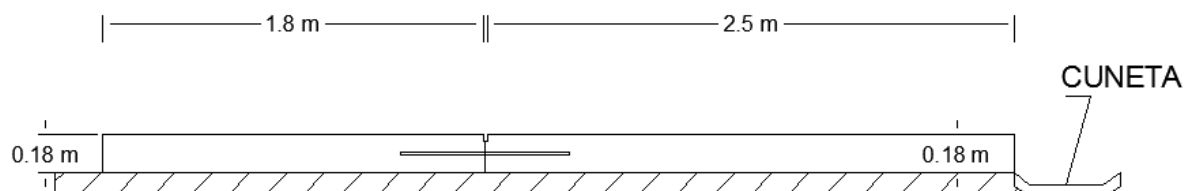
(G. Rodríguez ,2014)

Para que un pavimento funcione de manera óptima es importante enfocarse en el buen diseño del drenaje, más que en la resistencia de la base a la erosión y la humedad. Actualmente se están buscando materiales que no sean afectados por la problemática de drenaje. Sin embargo, no se debe de dejar a un lado el diseño hidráulico que impide que el agua infiltre el pavimento, así como facilitar el drene del agua que se logra infiltrar. Se debe enfatizar más en el diseño puramente hidráulico, en vez de buscar soluciones para mitigar la carencia del mismo.

C. Inconveniente con bajar el nivel de la cuneta

Actualmente, una de las soluciones que se ha implementado para reducir la problemática del drenaje en las losas cortas es bajar el nivel de la cuneta para permitir que el agua atrapada en las juntas drene. Para lograr esto, no se debe de olvidar continuar la junta en el hombro del tramo.

Ilustración No. 31. Esquema de cuneta por debajo del nivel del pavimento.



(Elaboración propia, 2014)

Esto genera una salida evidente para el agua que se infiltra en el pavimento por medio de las juntas y evita que el agua se quede estancada dentro de la estructura del pavimento. Aunque esta solución ha dado algunos resultados positivos, no es la opción óptima por las siguientes razones:

- El borde del pavimento que está sobre la cuneta es propenso a erosión.
- Aunque el agua drene con mayor facilidad, de igual manera infiltra en las juntas y aún puede generar problemas de erosión y bombeo.

- Esta medida es delicada en el tema de seguridad vial, pues si un carro se sale del carril puede accidentarse gravemente al caer en la grada que se genera entre el pavimento y la cuenta.
- Si la cuneta no está bien dimensionada, generará un problema de infiltración grave, ya que el nivel del agua llegaría a la apertura en donde drena el agua y se infiltraría en la estructura.

Ilustración No. 32. Tramo de losas cortas con cuneta debajo del nivel de la capa de concreto.



(G. Rodríguez, 2014)

XV. TIPO DE CARGA

Uno de los factores que más afecta el rendimiento de un pavimento es el tipo de carga al que es sometido. El diseño del pavimento está relacionado directamente con el conteo de tráfico pero, si la estimación del tráfico es errónea, el pavimento puede deteriorarse con mayor rapidez. Aparte de la cantidad de tráfico estimado, se tienen tres factores que afectan el rendimiento del pavimento:

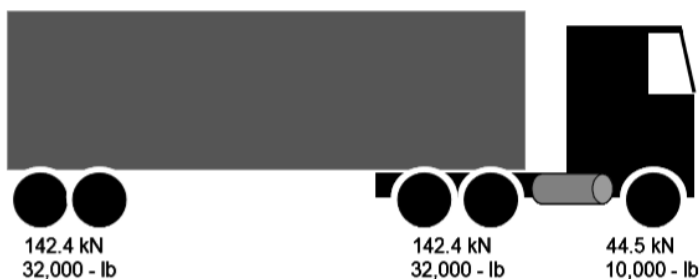
- El peso de los camiones, en especial el sobrepeso que se da en nuestro medio.
- El efecto que tiene la modulación geométrica de las losas en conjunto con las características del tránsito.
- El incremento de esquinas y bordes debido al incremento de juntas. Esto incrementa la cantidad de puntos donde se tiene caso crítico de carga.

Es importante entender como estos factores afectan significativamente el rendimiento de un pavimento, ya que es importante proyectar esto en el diseño y buscar la manera de mitigar estos efectos. Aunque controlar el sobre peso de los camiones no está en manos del diseñador, si se puede trabajar las losas cortas de una manera geométrica para reducir estos efectos.

A. Peso de camiones

El peso de los camiones es un problema recurrente en Guatemala, pues se ha visto repetidas veces que no se respetan los pesos máximos establecidos por la ley. Esto sucede con todo tipo de vehículos pesados, desde camionetas hasta cabezales. El sobre peso de los camiones conlleva a esfuerzos y deflexiones amplificadas en el pavimento, así como también incrementa la problemática con el bombeo de finos y el desplazamiento lateral de las losas.

Ilustración No. 33. Camión de ejemplo con distribución de peso en un eje simple de 10,000 lbs. y dos ejes tandems de 32,000 lbs.



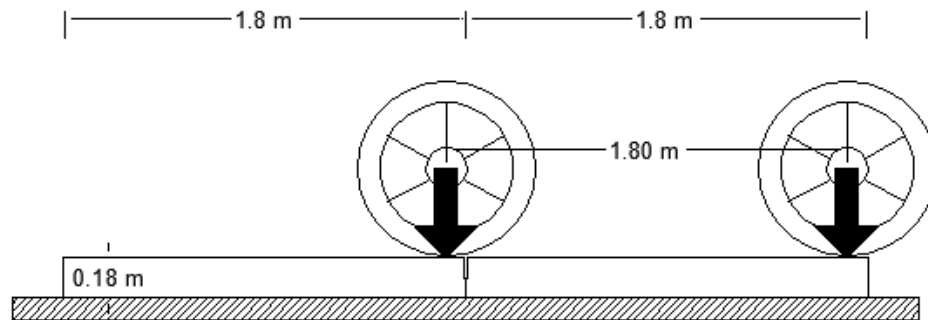
(Coronado, 2002)

Esto genera una serie de problemas pues no solo se sobre pasan los valores proyectados para el tránsito, sino también se somete el pavimentos a esfuerzos y deflexiones para los cuales no ha sido diseñado. Por consiguiente, el tiempo de vida del pavimento se reducirá significativamente. Este efecto de sobre peso afecta más a los tramos de losas cortas que a los tramos de losas convencionales debido a las deflexiones generadas por el espesor reducido.

B. Modulación de losas

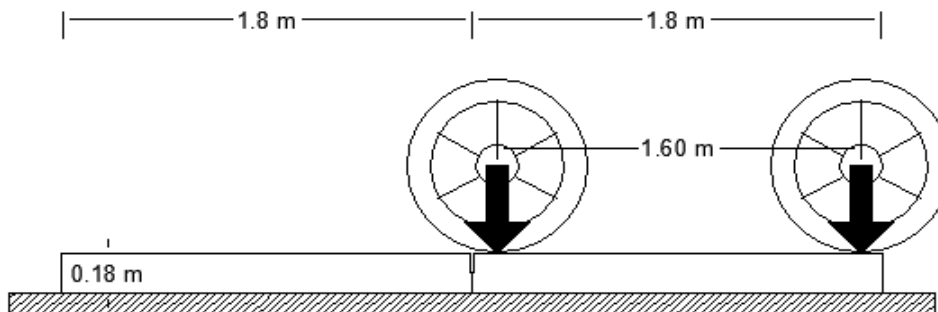
El concepto de losas cortas se basa bajo el principio de que una sola llanta debe de cargar en cada losa, de esta manera se reducen los esfuerzos en la losa (Covarrubias, 2007). De tal manera que las losas deben de estar moduladas para lograr esto. Una modulación típica de losas cortas utilizada en Guatemala es de 1.80 m x 1.80m. Se debe analizar si esta medida es la ideal para el tipo de transito que se tiene en Guatemala, pues se llegan a tener camiones tandem con espaciamento entre ejes de 1.20-1.60 metros. En las Ilustraciones 34 y 35 se muestra de manera gráfica la problemática mencionada.

Ilustración No. 34. Eje tándem con llantas separadas a 1.80 m, una llanta carga sobre cada losa.



(Elaboración propia, 2014)

Ilustración No. 35. Eje tándem con llantas separadas a 1.60 m, ambos ejes cargan sobre la misma losa.



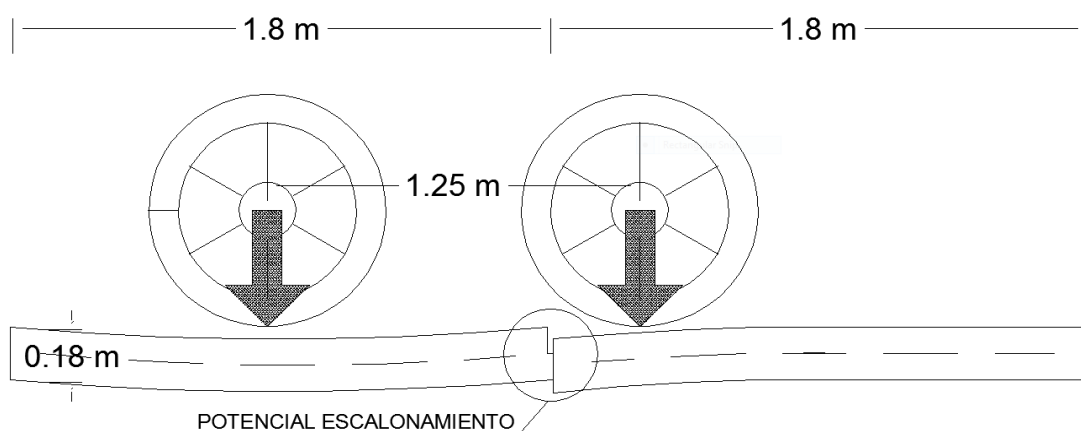
(Elaboración propia, 2014)

En la Ilustración No. 34, se observa el caso que se plantea en el documento "Thin Concrete Pavements", una llanta carga sobre cada losa y por lo tanto se disminuyen los esfuerzos. Sin embargo, en la Ilustración No. 35 se observa un caso que se puede dar en Guatemala en donde las llantas están espaciadas a menor distancia, por lo tanto ambas llantas cargan en la misma losa a pesar de ser una losa corta. Se debe de investigar que tan perjudicial es este efecto en las

losas de menor espesor, ya que la tendencia sería que incrementaran tanto los esfuerzos como las deflexiones.

Otro efecto que debe de ser investigado más a fondo para determinar qué tan perjudicial es para los tramos de losas cortas es el efecto doble que se da cuando, en un eje tándem, un eje está en el centro de una losa, mientras que el otro en la esquina. El eje que está en el centro deforma el centro de la losa, mientras que el eje en la esquina de la losa siguiente deforma la esquina. Esto genera en la junta un potencial caso de escalonamiento como se muestra en la Ilustración No. 36.

Ilustración 36. Efecto de carga en el centro de una losa y en el borde de la siguiente, generando un potencial escalonamiento.

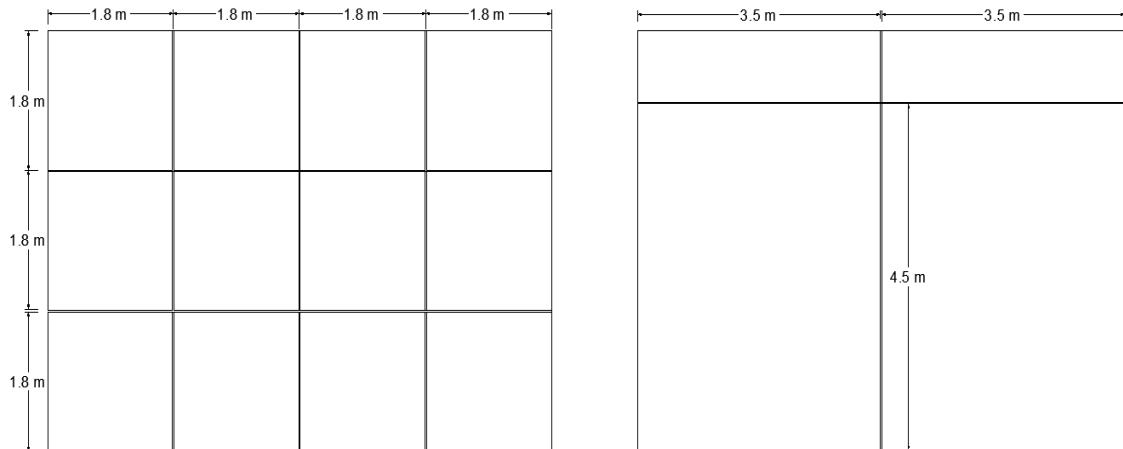


(Elaboración propia, 2014)

C. Incremento de esquinas y bordes

Como se mencionó anteriormente, los casos críticos de carga en un pavimento son las cargas en el borde de la losa y las cargas en la esquina de la losa. Estos son los puntos en la losa donde se esperaría que la losa comience fallar cuando termine su tiempo de vida útil. La cantidad de fallas observadas en tramos de losas cortas debería incrementar por el hecho de tener mayor cantidad de puntos de carga críticos. Esto se puede visualizar en la Ilustración No. 37.

Ilustración 37. Comparación de modulación de losas cortas contra la modulación de losas convencionales.



(Elaboración propia, 2014)

El problema de tener más de este tipo de casos es que se incrementa la cantidad de fallas en un tiempo de vida determinado. Esto se debe a que se incrementa la posibilidad que cada vehículo que pase provoque que la losa tenga los esfuerzos más críticos posibles. Este inconveniente también incrementa significativamente los puntos en donde puede haber problemas de bombeo o escalonamiento entre losas, pues se incrementa la cantidad de juntas.

Ilustración 38. Grieta en la esquina de una losa corta



(G. Rodríguez, 2014)

En la Ilustración No. 38, se muestra un ejemplo del tipo de falla que puede llegar a presentar una carga en la esquina combinado con el efecto de bombeo. Al tener esfuerzos de alabeo reducidos, el parámetro crítico que debemos de tomar en cuenta es las deflexiones que la losa puede llegar a tener debido a una carga, ya sea en la orilla o en la esquina de la losa. Una buena calidad de base aportaría para reducir este tipo de inconveniente.

XVI. RECOMENDACIONES PARA MITIGAR PROBLEMÁTICA CON EL TIPO DE CARGA

A. Realizar un estudio de tránsito adecuado

El estudio de tráfico es una parte fundamental del diseño, ya que es el que determina la cantidad de cargas que soportará un pavimento a lo largo de su tiempo de vida. Si este estudio se realiza de una manera ineficiente, se estimará incorrectamente la proyección y por lo tanto afectará el tiempo de vida del pavimento. También es indispensable que la muestra que se tome sea representativa. Es decir que el muestreo se realice de una manera adecuada para tener los datos más certeros posibles. Dentro de las principales limitantes que se tienen en Guatemala para realizar un estudio de tránsito adecuado se puede mencionar las siguientes:

- Aunque los diferentes tipos de camiones y pesos límites están normados por la SIECA, no suelen cumplirse estos parámetros.
- Las básculas de control son muy poco utilizadas o no están habilitadas, por lo que no se tiene control de los pesos de los camiones que transitan actualmente.
- Las tasas de crecimiento, tanto de población como de tránsito en Guatemala, no están actualizadas. El último censo nacional se realizó en el 2002, hace 12 años. Por esta razón, proyectar el crecimiento del tránsito de forma certera es muy difícil.
- Para mitigar el efecto de la sobre carga en el pavimento podría considerarse colocar un factor de seguridad en la carga proyectada. De esta manera se estaría reforzando al pavimento para soportar estas sobre cargas. Lo ideal sería que se comenzaran a cumplir las normas de pesos establecidas por la ley, sin embargo esto no está en manos del diseñador, por lo que no se puede asumir que se van a cumplir, en especial en tramos de losas cortas que son más propensos a este tipo de sobre carga.

B. Evaluar todos los casos de carga

Cuando se realiza el diseño mecanicista de losas cortas, el diseñador debe buscar evaluar los esfuerzos y las deflexiones de todos los casos críticos de carga. De esta manera se puede realizar un análisis más completo de los alcances de la metodología de losas cortas y determinar cuánto espesor de la losa de concreto se puede reducir sin comprometer el rendimiento de la misma. Para asegurar un análisis completo, se deben evaluar los puntos mencionados a continuación.

- Los esfuerzos de tensión en todos los casos críticos de carga: centro, borde y esquina.
- Las deflexiones máximas en todos los casos críticos de carga: centro, borde y esquina.
- Evaluar el efecto del alabeo y otros esfuerzos inducidos en conjunto con la carga aplicada.
- Evaluar las diferentes configuraciones de vehículos para poder determinar la modulación más adecuada para el tramo.
- Evaluar las reacciones del tramo con diferentes tipos de bases para obtener el tipo de base ideal para el caso propuesto.

Se debe de contemplar dentro del diseño factores como los mencionados anteriormente como: problemas de drenaje y desplazamiento lateral. Esto es con el fin de modelar los esfuerzos y las deflexiones de la manera más realista posible y evitar diseñar un pavimento bajo condiciones ideales. Esta recomendación es para pavimentos en general, sin embargo en el caso de losas cortas estos factores tienden a ser más significativos en el desempeño.

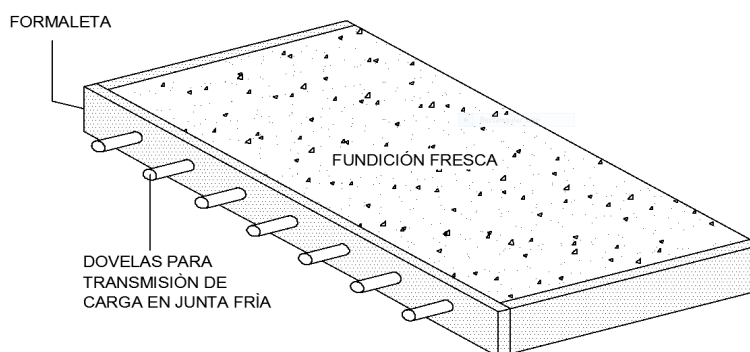
C. Mejorar la transmisión de carga

Una adecuada transmisión de carga generará que los esfuerzos y las deflexiones se reduzcan. Para esto es indispensable la utilización de dovelas y otros mecanismos de transmisión de carga, esto también evitará desportillamientos y escalonamientos en las juntas. Se debe de

tomar en cuenta la transmisión de carga en las juntas de construcción y reparaciones y como la profundidad del corte de la sisa puede generar problemas de este tipo.

1. Transmisión de carga en proceso constructivo y reparaciones. Es importante evitar juntas frías que generen una pérdida en la transmisión de carga en las losas, tanto en lugares donde se comienza otro tramo de fundición nueva, como en reparaciones de losas que se tuvieron que demoler. Para las juntas longitudinales de construcción se debe de dejar previsto dovelas de transmisión de carga en la formaleta. Como se muestra en la siguiente ilustración:

Ilustración No. 39. Detalle de dovelas en junta fría en proceso constructivo de losas de concreto.



(Elaboración propia, 2014)

Cuando se demuelen partes de un tramo para reparaciones también se debe de tomar en cuenta la transmisión de carga. Pues si no se realiza un procedimiento adecuado las losas nuevas serán más propensas a fallar debido a la falta de transmisión de carga. Esto se debe a que no se logra obtener un trabazón de agregado adecuado.

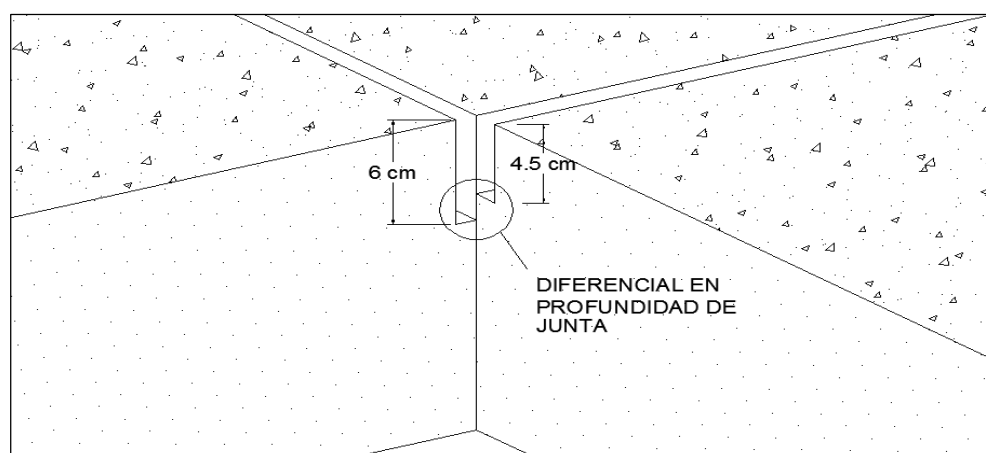
2. Profundidad de juntas. Las sisas de las juntas deben tener cierta profundidad determinada que permita que la falla se induzca en el lugar deseado. AASHTO recomienda las siguientes especificaciones para la profundidad del corte en las juntas:

- Para juntas transversales, un cuarto del espesor total del pavimento.
- Para juntas longitudinales, un tercio del espesor total del pavimento.

Se deben de realizar en el momento indicado para evitar una falla aleatoria en la losa previa al corte de las juntas.

Sin embargo, en tramos de losas cortas se ha visto un incremento en el desportillamiento de esquinas en tramos donde hay diferencia entre la profundidad de las juntas longitudinales y transversales. En la Ilustración 40 se puede observar el diferencial de profundidad.

Ilustración 40. Diferencia de profundidad entre junta longitudinal y junta transversal en losas cortas de 18 centímetros de espesor.



(Elaboración propia, 2014)

Las posibles causas de este fenómeno son:

- La concentración de esfuerzos generada en la esquina debido a la distribución de las losas y la diferencia de profundidad de corte.
- El incremento de deflexiones debido a un reducido espesor de losa en conjunto con el diferencial en la profundidad de la junta.
- La especificación del código AASHTO 93 mencionada anteriormente puede que se limite a losas con espesor convencional. Al reducir el espesor, podría necesitarse una especificación de diseño nueva.

Este fenómeno se debe de estudiar más con el fin de determinar el inconveniente con esta diferencia de profundidad entre juntas longitudinales y transversales. De esta manera se podría determinar cuál es la profundidad de junta que debe tener una tramo con metodología de losas cortas. Este tipo de detalles normalmente no están especificados, por lo que una práctica recomendable sería desarrollar un plano indicando los detalles de junta, para evitar que se realicen empíricamente en campo y perjudiquen en desempeño del pavimento.

XVII. CALIDAD DE BASE

A. Bases estabilizadas con cemento y bases granulares

Al tener una losa de menor espesor, la calidad de la base comienza a ser un factor importante en el desempeño del tramo. Cualquier inconveniente que se tenga con la base será de mayor importancia en un tramo de losas cortas que en un tramo de losas convencionales. En Guatemala, se suele utilizar bases estabilizadas con cemento para reducir las deflexiones en los pavimentos de losas cortas.

Tabla No. 8. Comparación entre una base granular y una base estabilizada con cemento en losas cortas de 1.8 m x 1.8 m

Comparación de reacciones entre bases granulares con bases estabilizadas con cemento para losas cortas (1.8 m x 1.8 m)						
Ubicación de carga	Granular (E = 310 Mpa)			Estabilizada con cemento (E = 1900 Mpa)		
	$\sigma (+)$, Mpa	$\sigma (-)$, Mpa	δ , mm	$\sigma (+)$, Mpa	$\sigma (-)$, Mpa	δ , mm
Centro	1,16	-1,38	0,521	0,83	-1,18	0,502
Borde	1,84	-1,97	0,891	1,3	-1,61	0,852
Esquina	1,25	-1,84	0,953	0,91	-1,93	0,886

(Elaboración propia, 2014)

En la Tabla No. 8, se muestran resultados de cálculos realizados por medio de elementos finitos en donde se proyecta como el tipo de suelo afecta los esfuerzos y las deflexiones en un tramo de losas cortas. Se puede concluir que mientras más rígida sea la base menores esfuerzos y deflexiones se tienen, mejorando el desempeño de las losas.

Es importante recordar que en el documento *"Thin Concrete Pavements"* se recomienda que la base no sea muy rígida dentro de las especificaciones técnicas de la metodología de losas cortas. Sin embargo, este es un punto que vale la pena debatir según la experiencia que se vaya encontrando en campo. En el mismo documento también se especifica que una base granular

con bajo contenidos de finos tendrá un mejor resultado que una base estabilizada con cemento. En Guatemala se tienen los siguientes inconvenientes con este tipo de base granular:

La mayoría empresas guatemaltecas no cuentan con la experiencia necesaria para trabajar adecuadamente una base granular.

Fabricar una base granular con no menos de 6% de finos sería una tarea complicada, no solo por la falta de capacidad sino por el costo que implicaría hacerlo. Una base granular que no cumpla esta condición presentaría problemas de bombeo y erosión.

Las bases granulares tienen menor capacidad estructural, por lo que no serían adecuadas para cargas pesadas.

Se debe validar si el contacto directo entre agregado grueso debido a la falta de finos no generará fisura con el tiempo debido al choque entre material con la aplicación de la carga.

B. Aportación estructural de la base

Al tener un espesor de pavimento menor, la base tendrá un aporte estructural mayor. Esto significa que proveer un soporte uniforme no es la única función que esta tiene. Por esta razón se deben de tener mejores bases que cumplan los requisitos del Libro Azul y las especificaciones de diseño. En un tramo de losas cortas la base estará sometida a mayores esfuerzos debido al espesor reducido de la losa. En otras palabras, la demanda estructural de la base es mayor en tramos de losas cortas que en losas convencionales.

Los tramos que han mostrado un mejor desempeño en Guatemala, son aquellos que fueron fundidos sobre una carpeta asfáltica. Este tipo de tramos llegan a asemejarse mucho a un White Topping, el cual ya está avalado y normado por AASHTO. Las propiedades de este tipo de base son ideales para los tramos de losas cortas, ya que no solo aportan estructuralmente al pavimento, sino son resistentes a la erosión. Si se tiene la opción de utilizar este tipo de base, es la más recomendable para los tramos de losas cortas.

XVIII. RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LA CALIDAD DE BASE

El desempeño de la base es más importante en un tramo de losas cortas que en un tramo de losas convencionales. Por esta razón, es indispensable que se tome en cuenta un control de calidad estricto, en donde se cumplan las especificaciones de diseño y del Libro Azul. Dentro de las recomendaciones que se deben de tomar en cuenta para poder tener una base de alto desempeño se pueden mencionar las siguientes:

- Tener un control estricto de calidad por medio de ensayos normados. Estos ensayos debe de incluir como mínimo los siguientes ensayos:
 - Valor Soporte de California, CBR (AASHTO T 193)
 - Límite Líquido (AASHTO T 89)
 - Límite Plástico (AASHTO T 90)
 - Hinchamiento (AASHTO T 193)
 - Humedad de Campo con Carburo (AASHTO T 217)
 - Compactación (AASHTO T 180 y T 191)
 - Material Inadecuado (AASHTO M 145)
 - Granulometría. (AASHTO T 88)
 - Cualquier otro ensayo indispensable para asegurar una base de buena calidad.

Evitar utilizar bases recicladas, debido a que tienden a ser de menor calidad o pueden estar propensas a tener más inconvenientes que una base nueva.

Mezclar las bases estabilizadas en planta para asegurar homogeneidad en la base y colocarlas con maquinaria que asegure un espesor de base constante. La mezcla en campo no asegura una base de buena calidad debido a los factores tanto ambientales, como humanos.

Se debe investigar, tomando en cuenta todos los factores mencionados en este trabajo, el tipo de base ideal para los tramos con metodología de losas cortas, ya que actualmente no se tiene una especificación concreta. La base tiene que aportar un valor estructural adecuado al

pavimento, generar fricción entre la losa y la base y ser resistente a los inconvenientes provocados por el agua. Es indispensable utilizar la experiencia en campo adquirida hasta el momento en los tramos de losas cortas existentes para encontrar la base óptima.

XIX. DISCUSIÓN

La metodología de losas cortas ha dado mucho de qué hablar últimamente en Guatemala, debido a la retroalimentación de los tramos que ya llevan un tiempo de uso. Los factores mencionados en el trabajo son lo que se lograron detectar hasta el momento y deben de ser investigados más a fondo para deducir conclusiones más concretas. El desplazamiento lateral, el drenaje, el tipo de carga y la calidad de base son factores que deben de ser analizados de una manera que funcionen en conjunto y no buscar soluciones temporales para los tramos con esta metodología.

El desplazamiento lateral es uno de los factores que más ha llamado la atención de distintos profesionales, ya que es un factor que no se analiza a fondo en el diseño. En general, la solución es confinar adecuadamente el pavimento por medio de barras de sujeción y hombros apropiados. En Guatemala el hombro de la carretera es muy pequeño o inexistente, llegando a tener únicamente una cuneta. Es importante desarrollar una metodología para calcular el ancho y las características del hombro indicado para los tramos de losas cortas, así como la necesidad de las dovelas, para evitar que estas se hagan en base al diseño geométrico o empíricamente en campo. Se debe saber cómo aporta a la estructura el hombro de la losa para poder determinar el ancho adecuado del mismo para los tramos de losas cortas.

El drenaje es uno de los factores que más se debe investigar, no solo para losas cortas sino para pavimentos en general debido a la gran cantidad de precipitación que hay en Guatemala. En el caso de losas cortas se tiene un inconveniente muy grande por la cantidad de juntas y esto empeora con el hecho que no se sellan. El agua será dañina para cualquier pavimento si logra afectar la estructura del mismo y afectará su rendimiento de manera considerable. En Guatemala no se acostumbra a diseñar drenajes de una manera adecuada, pues se toma como un elemento muy secundario del pavimento, cuando muchas veces es lo que más protege la estructura del mismo. En tramos de losas cortas es indispensable realizar un diseño de drenajes adecuado debido a los potenciales inconvenientes de drenaje que esta metodología presenta. La metodología se debe adaptar a las condiciones climáticas guatemaltecas, este factor debe de ser mucho más crítico y no se ha contemplado en los enfoques actuales. La opinión general de los profesionales en Guatemala es que las juntas se deben de sellar para asegurar un buen desempeño del pavimento.

El tipo de carga en Guatemala es un factor que, aunque está regulado por la ley, es muy difícil de controlar en nuestro medio. Es indispensable contar con la información suficiente para

poder estimar el tránsito y regular en la medida de lo posible el peso de los camiones, sin embargo esto no está en manos del diseñador. Por lo tanto, el diseñador debe de tomar en cuenta un factor de seguridad para contra restar esta incertidumbre. Es importante investigar los casos de carga que se dan en las losas cortas, ya que hay casos especiales que no se dan en una losa convencional. Los diseños se deben de realizar tomando en cuenta todos los casos críticos de esfuerzos y deflexiones, así como la combinación de esfuerzos de carga con esfuerzos por contracción de la losa. También se debe de validar la mejor manera de manejar la transmisión de carga en las losas cortas y cual debe de ser el ancho y la profundidad de junta ideal para este tipo de tramos.

En general, se hace mucho énfasis a que la base debe de ser de buena calidad y aportar estructuralmente al pavimento. En Guatemala se prefiere trabajar con bases estabilizadas con cemento debido al aporte estructural que esta da, y a que las bases granulares bajo contenido de finos son muy difíciles de producir en Guatemala. Se debe llevar un control de calidad muy estricto cuando se trabaja con losas cortas, ya que es una metodología que lleva muchos factores del diseño al límite. El gran problema en Guatemala es que muchas veces los contratistas no siguen las normativas ni el diseño debido a presiones políticas. Las bases no suelen cumplir con estándares de calidad muy altos, afectando gravemente el rendimiento del pavimento.

Las losas cortas es una metodología que está en proceso de desarrollo, la cual debe de estudiarse y encontrar las soluciones ideales para los factores mencionados en este trabajo. El medio guatemalteco es un medio complicado en donde las condiciones de trabajo no son ideales, por lo que puede no ser el ambiente ideal para desarrollar este tipo de metodología, ya que lleva al límite algunos aspectos del diseño. La metodología de losas cortas tiene ventajas innegables, como es la reducción del alabeo por temperatura y la reducción de esfuerzos en la losa. Sin embargo, no se puede aplicar sin considerar los demás factores que se ven afectados con la modificación del tamaño de las losas y la reducción del espesor. También se tiene muchos factores que no son directamente problemática de las losas cortas sino del medio guatemalteco que afectan de manera más evidente a las losas cortas debido a los factores que se optimizan durante el diseño.

XX. CONCLUSIONES

- Se determinó que los principales factores que afectan a los tramos de losas cortas en Guatemala son: el desplazamiento lateral en las losas, problemas de drenaje en el pavimento, el tipo de carga a la que se ven expuestas las losas y la calidad de la base.
- Se logró determinar que, para el medio guatemalteco, es más conveniente utilizar bases estabilizadas con cemento que bases granulares, debido al aporte estructural que esta da y la experiencia que se tiene en el medio para trabajar este tipo de bases.
- Se lograron determinar detalles constructivos como la diferencia entre la profundidad de juntas transversales y longitudinales y el diente de los hombros, que deben de ser estudiados más a profundidad para encontrar el diseño óptimo de un tramo de losas cortas.
- Se lograron determinar que existen casos de carga críticos que deben de ser estudiados más a fondo para comprender como pueden afectar el desempeño de un tramo de losas cortas. Es importante diseñar en base a todos los casos de carga posibles y no limitarse a casos ideales.
- Se determinó que el principal factor climático que afecta el rendimiento de las losas cortas en Guatemala es la elevada precipitación y que se requiere más énfasis en el diseño hidráulico del pavimento.
- Se determinó que una base estabilizada con cemento es más efectiva que una base granular para los tramos de losas cortas debido a su aporte estructural.
- Se determinó que la calidad de mano de obra en Guatemala, no es la ideal para trabajar tramos como las losas cortas, en donde se optimiza el diseño y se vuelven más relevantes los temas de calidad.
- Se logró plasmar las diferencias entre un pavimento diseñado con la metodología de losas cortas y un pavimento desarrollado con normativa AASHTO.
- Se describieron diferentes problemáticas que se dan en el medio guatemalteco como es la sobre carga de los camiones, la falta de drenajes adecuados y la falta de énfasis en el diseño del hombro. Esto afecta a las losas cortas de una manera más evidente que a las losas convencionales.

XXI. RECOMENDACIONES

- Es necesario continuar investigando para poder desarrollar una metodología para diseñar los diferentes componentes de las losas cortas como: los hombros, las barras de sujeción, la profundidad de las juntas y todos los demás factores comentados en este trabajo. Esto es indispensable para poder dar soporte a esta tecnología y evitar que estos detalles se continúen haciendo empíricamente.
- La metodología de losas cortas está aún en una etapa de desarrollo y validación. Por lo tanto debe aplicarse únicamente en tramos de prueba o de menor importancia. Para tramos importantes se debe utilizar una metodología validada, como la metodología mecanística-empírica de AASHTO (MEPDG), ya que está avalada por una institución importante y se ha comprobado su funcionalidad.
- Dentro de los tipos de base investigadas en este trabajo se recomienda una base estabilizada con cemento sobre una base granular, esto se debe a que esta es menos propensa a los efectos del agua, genera una mayor fricción entre losa y base y provee un mejor aporte estructural. El porcentaje de cemento necesario en la base estabilizada con cemento se debe investigar a fondo para encontrar el óptimo para este tipo de tramos.
- Los mejores resultados de losas cortas se han detectado en tramos donde la losa está sobre una capa de asfalto, asemejándose a un White Topping. Se recomienda mucho indagar en esta tecnología ya que se tendrá un mejor desempeño que utilizando la metodología de losas cortas. El White Topping es avalado y normado por AASHTO.
- Para los tramos de losas cortas en Guatemala es muy recomendable sellar las juntas debido a las condiciones climáticas del país. Esto es crítico en regiones con alto nivel de precipitación como Escuintla. Si no se sellan las juntas, el pavimento correrá riesgo de deterioro prematuro debido a los efectos del agua.
- Este tema todavía está comenzando el proceso de investigación y retroalimentación. Por esta razón se debe investigar temas de drenaje, comportamiento ante sobrecargas,

confinamiento lateral, entre otros temas, y luego validar este conocimiento en campo. Esto es indispensable para poder determinar los alcances reales de esta tecnología.

XXII. BIBLIOGRAFÍA

- *AASHTO Guide of Pavement Structures*, AASHTO, 1993, Estados Unidos, 626 pags.
- J. Covarrubias, 2007, *Thin Concrete Pavements*, TCPavements, 20 pags.
- J. Coronado, 2002, *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*, Guatemala, SIECA, 289 pags.
- APPENDIX QQ: STRUCTURAL RESPONSE MODELS FOR RIGID PAVEMENTS, 2003, *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, Estados Unidos, AASHTO, 93 pags.
- APPENDIX QQ: STRUCTURAL RESPONSE MODELS FOR RIGID PAVEMENTS, 2003, *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, Estados Unidos, AASHTO, 93 pags.
- APPENDIX SS: HYDRAULIC DESIGN, MAINTENANCE, AND CONSTRUCTION DETAILS OF SUBSURFACE DRAINAGE SYSTEMS, 2001, *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, Estados Unidos, AASHTO, 27 pags.
- N. Delatte, 2008, *Concrete Pavement Design, Construction and Performance*, 1^a ed, Tylor & Francis, Estados Unidos , 389 pags.
- R. Leclair, 2004, *Normas Para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales*, 2^{da} ed, Guatemala, SIECA, 332 pags.
- B. Davids, 2003, *EverFE Manual Práctico*, Universidad de Maine, Instituto Boliviano del Cemento y el Homigón, Bolivia, 61 pags.
- B. Davids, 2003, *EverFE Manual Teórico*, Universidad de Maine, Instituto Boliviano del Cemento y el Homigón, Bolivia, 61 pags.

- Guatemala, 2000, DIRECCION GENERAL DE CAMINOS, MINISTERIO DE COMUNICACIONES, INFRAESTRUCTURA Y VIVIENDA, *“ESPECIFICACIONES GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS Y PUENTES”*.
- *“Catálogo de Deterioros de Pavimentos Rígidos”*, 2002, DIRCAIBEA, Chile.
- Guatemala, 1992, DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS, *“REGLAMENTO PARA EL CONTROL DE PSOS Y DIMENSIONES DE VEHICULOS AUTOMOTRES Y SUS COMBINADOS”*.
- J. Zhang, V. Li, *“INFLUENCE OF SUPPORTING BASE CHARACTERISTICS ON SHRINKAGE-INDUCED STRESSES IN CONCRETE PAVEMENTS”*, 2001,
- E. Herrera, 12 de Agosto del 2014, Entrevista No.1 realizada en la Ciudad capital de Guatemala.
- F. Ajiatas, 18 de Agosto del 2014, Entrevista No.2 realizada en la Ciudad capital de Guatemala.
- G. Rodríguez, 18 de Agosto del 2014, Entrevista No.3 realizada en la Ciudad capital de Guatemala.
- L. Aguilar, 19 de Agosto del 2014, Entrevista No.4 realizada en la Ciudad capital de Guatemala.
- R. Alvarado, 25 de Agosto del 2014, Entrevista No.5 realizada en la Ciudad capital de Guatemala.

XXIII. TERMINOLOGÍA

AASHTO: Acrónimo para: Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte (American Association of State Highway and Transportation Officials).

MEPDG: Acrónimo para método de diseño de pavimentos Mecanístico-Empírico (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide).

ESAL: Acrónimo para carga de eje equivalente (Equivalent Single Axle Load).

SIECA: Acrónimo para Secretaría de Integración Económica Centroamericana.

IRI: Acrónimo para Índice de Rugosidad Internacional (international roughness index).

PSI: Acrónimo para el Índice de serviciabilidad (Present Serviceability Index)

DIRCAIBEA: Acrónimo para Consejo de Directores de Carreteras de Iberia e Iberoamérica.

CBR: Acrónimo para California Bearing Ratio, una medida utilizada en el ensayo nombrado de la misma manera.

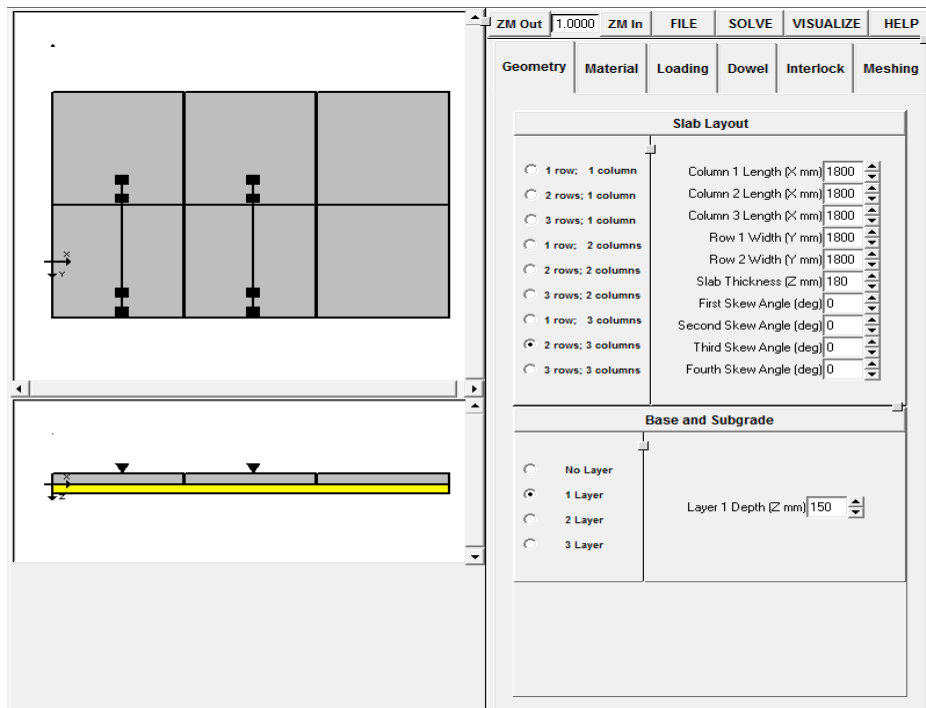
XXIV. Anexos

A. Cálculo de esfuerzos y deflexiones por medio del programa de elementos finitos Everfe

Para fines de esta tesis, los cálculos por elementos finitos se realizaron en Everfe, el cual es un programa de elementos finitos tridimensionales que permite la simulación de pavimentos de concreto. Este programa fue desarrollado por las universidades de Maine y Washington. A continuación se muestra el procedimiento que se utilizó para calcular esfuerzos y deflexiones con este programa.

Paso 1. Everfe cuenta con 6 pestañas de ingreso de datos. En la primera pestaña, "Geometry", se definen la cantidad, las características geométricas y el espesor de las losas. Para este caso se están calculando 6 losas cortas de 1.80 m por 1.80 m con un espesor de 18 cm. En esta pestaña también se define cuantas capas de base y sub base tenemos, para este ejemplo únicamente tendremos una capa de base de 15 cm.

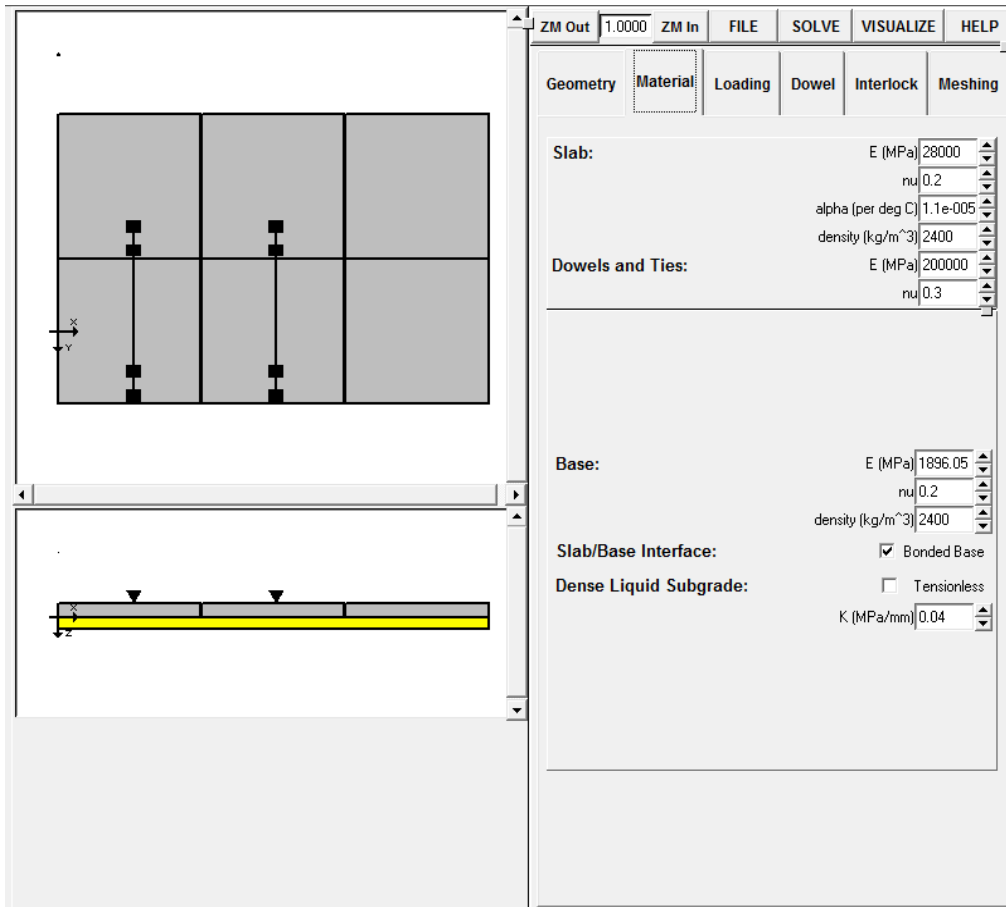
Ilustración No. 41. Imagen de paso 1 para cálculo en Everfe.



(Elaboración propia, 2014)

Paso 2. En la segunda pestaña denominada "Material", se define las propiedades de los materiales. En esta tesis se utilizaron los parámetros pre determinados para el concreto y para la base se utilizó $E = 1896.05$ MPa (250,000 psi) y 2400 kg/m³ de densidad. En esta sección también se debe ingresar el valor K de la sub rasante, para este ejemplo utilizamos 0.04 MPa/mm.

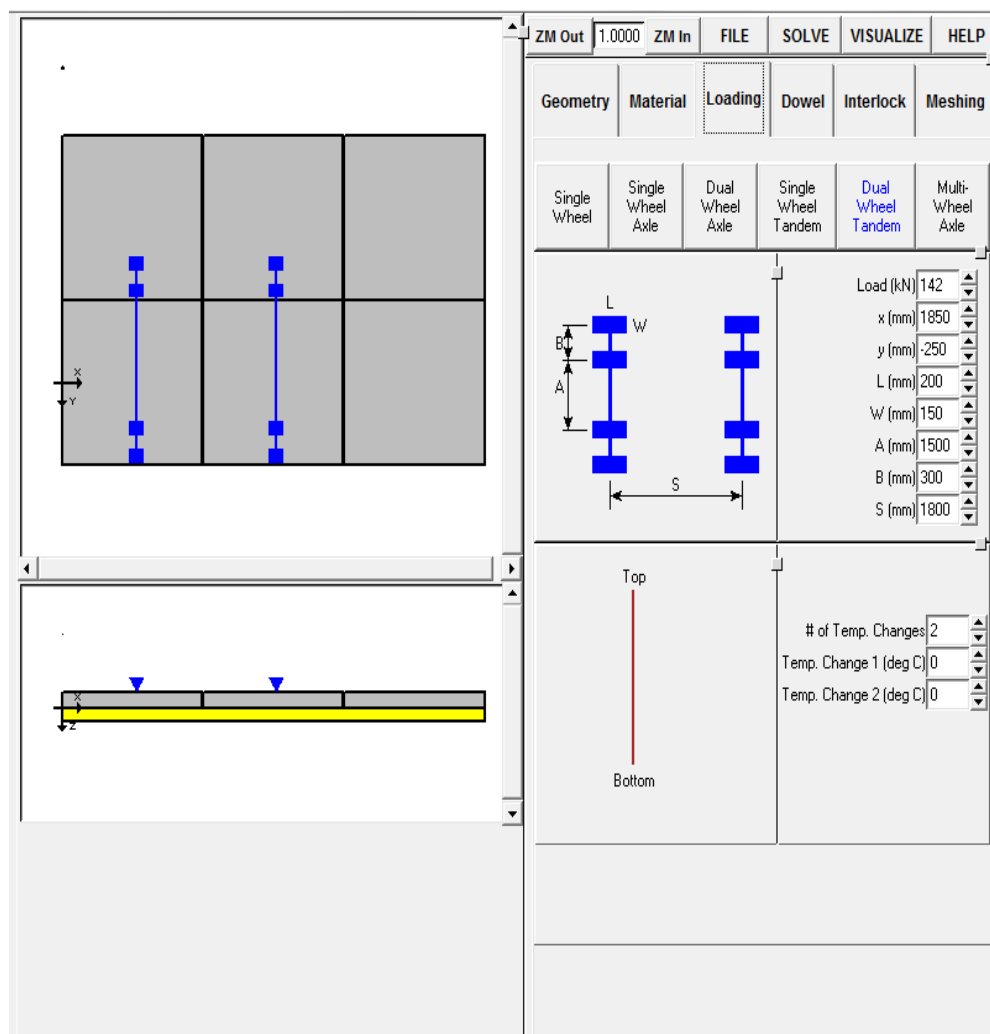
Ilustración 42. Imagen de paso 2 para cálculo en Everfe



. (Elaboración propia, 2014)

Paso 3. En la tercera pestaña denominada "Loading" se coloca las características de la carga: el peso, las coordenadas de ubicación y la separación entre ejes. En esta pestaña también se define los cambios climáticos de temperatura que se deben de considerar en el cálculo. Para este caso se utilizó un camión de 142 kN y con un espaciamiento de 1.80 metros entre ejes. No se contempló ningún cambio de temperatura.

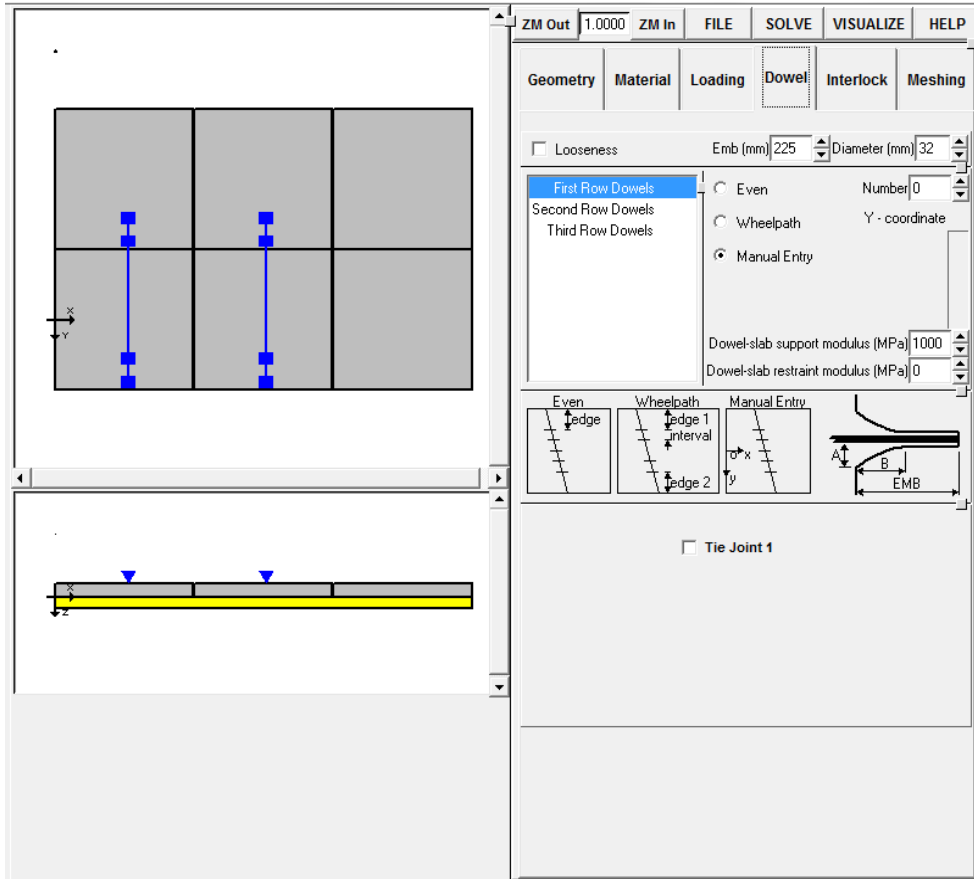
Ilustración No. 43. Imagen de paso 3 para cálculo en Everfe.



(Elaboración propia, 2014)

Paso 4. En la cuarta pestaña denominada "Dowel" se definen las dovelas y barras de sujeción. Para este ejemplo, no se colocaron dovelas.

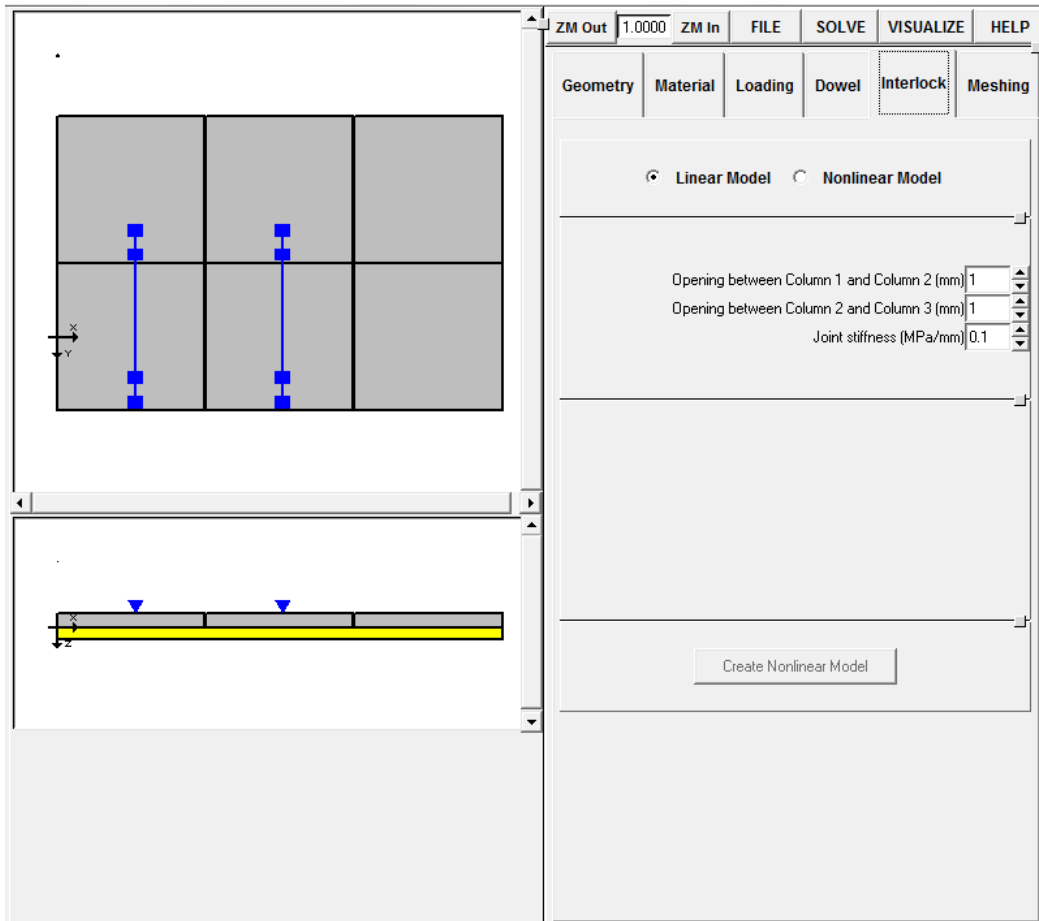
Ilustración No. 44. Imagen de paso 4 para cálculo en Everfe



. (Elaboración propia, 2014)

Paso 5. En la quinta pestaña denominada "Interlock" se trabaja el trabazón de agregados. Para fines de este ejemplo se utilizarán los valores pre determinados.

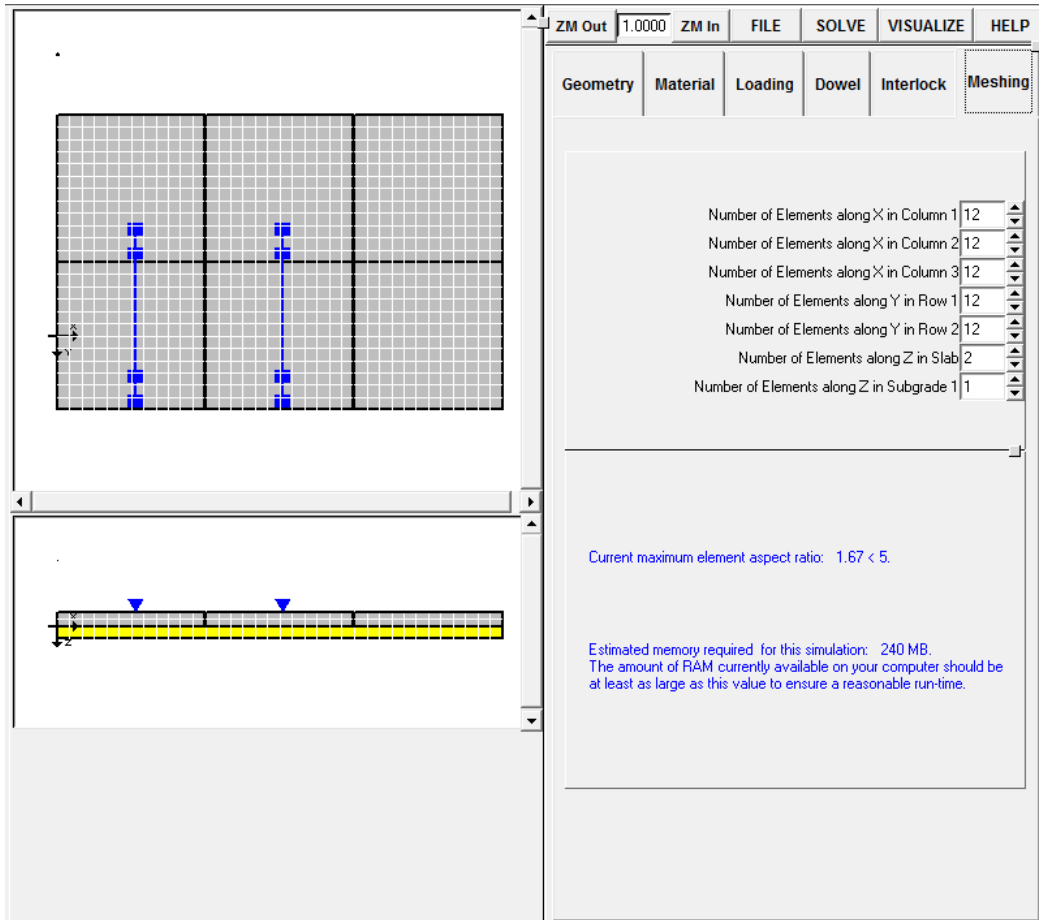
Ilustración No. 45. Imagen de paso 5 para cálculo en Everfe.



(Elaboración propia, 2014)

Paso 6. En la sexta pestaña denominada "Meshing" se ingresan datos para determinar las redes de cálculo de elementos finitos. Para fines de este ejemplo se dejaron los parámetros pre determinados.

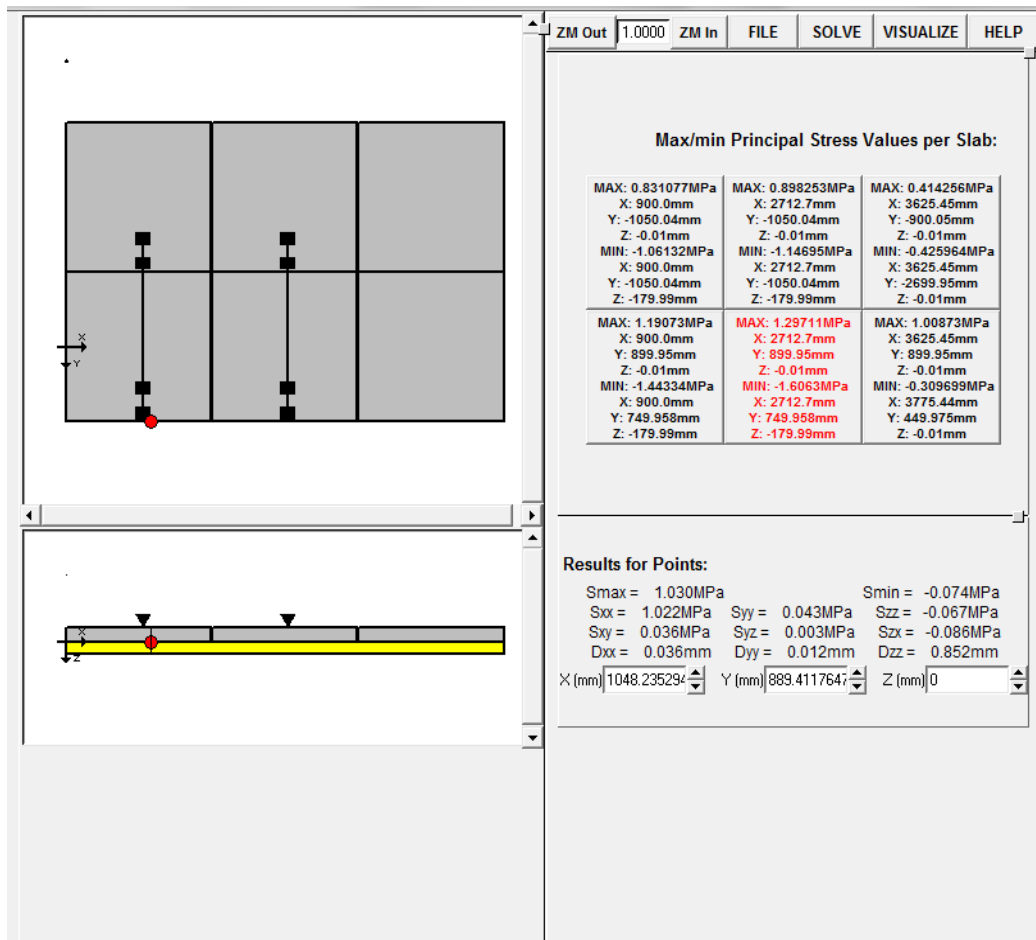
Ilustración No. 46. Imagen de paso 6 para cálculo en Everfe.



(Elaboración propia, 2014)

Paso 7. Luego de definir todos los parámetros se prosigue a correr el programa el cual calcula por medio de elementos finitos los esfuerzos y las deflexiones en las losas. Para este caso se tuvieron los mayores esfuerzos en la losa de en medio abajo, con un esfuerzo positivo de 1.29 MPa y uno negativo de -1.60 MPa. La deflexión mayor se detectó debajo de la llanta de la losa de la izquierda abajo con un valor de 0.852 mm.

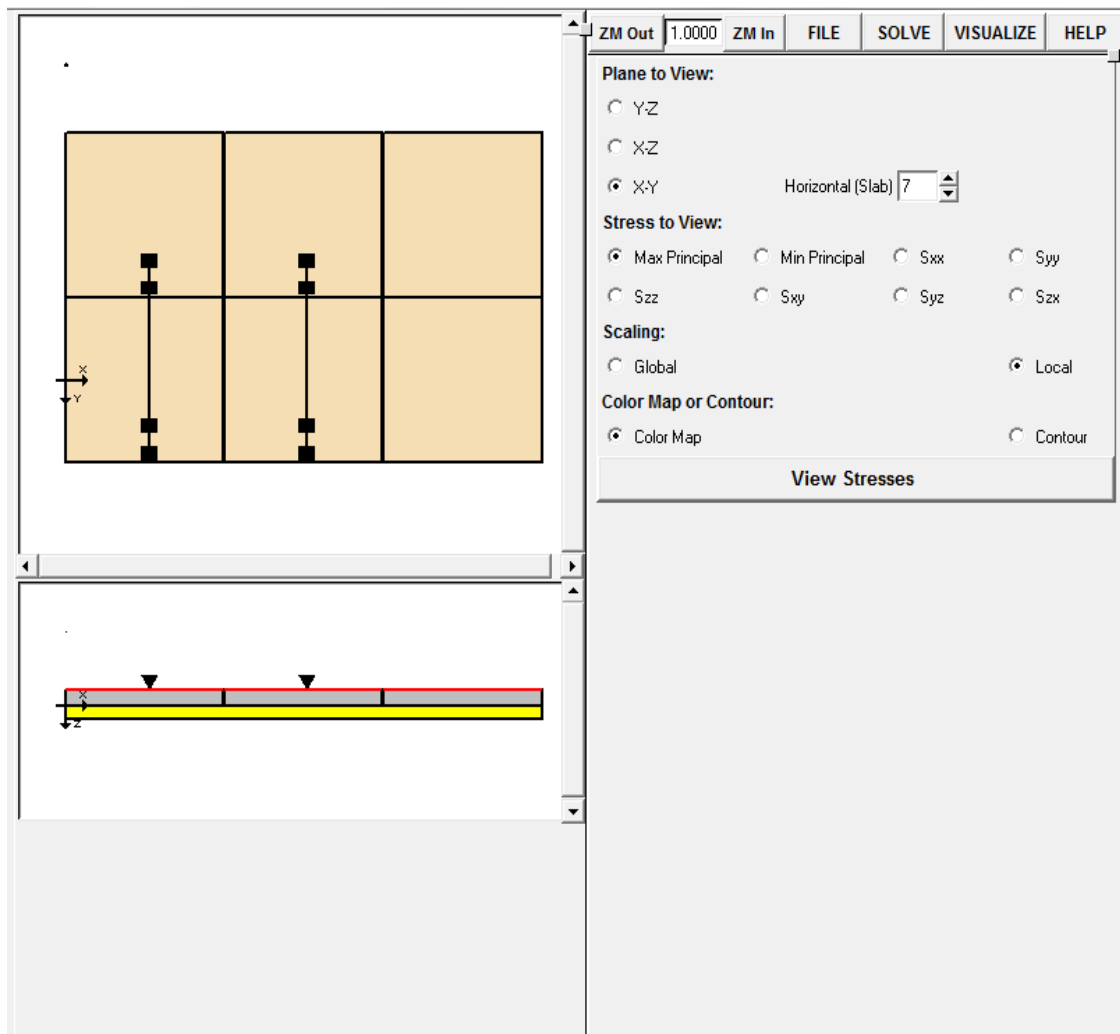
Ilustración 47. Imagen de paso 7 para cálculo en Everfe



. (Elaboración propia, 2014)

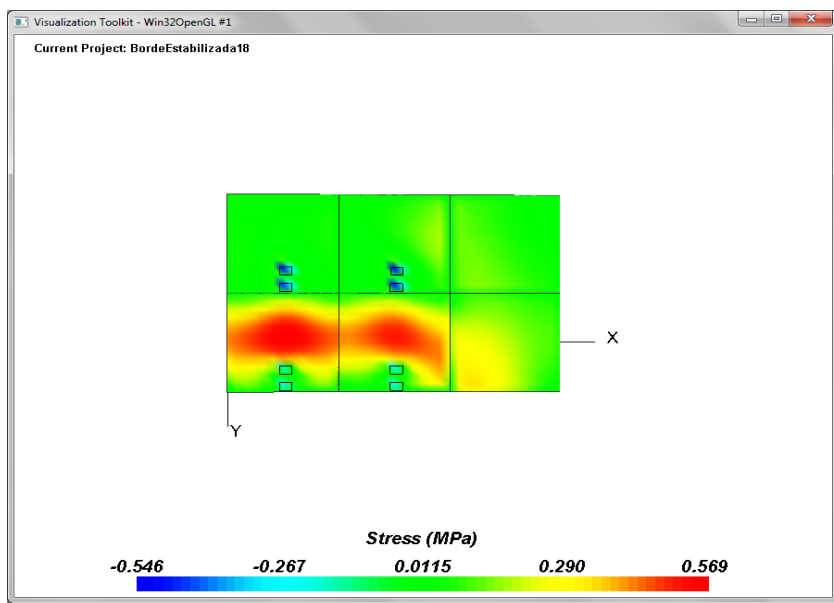
Paso 8. Luego de visualizar los esfuerzos máximos podemos proceder a visualizar los esfuerzos en la parte superior e inferior de la losa, así como en cualquier otra capa. Esto se logra con la opción de "Visualize".

Ilustración 48. Imagen de paso 8 para cálculo en Everfe.



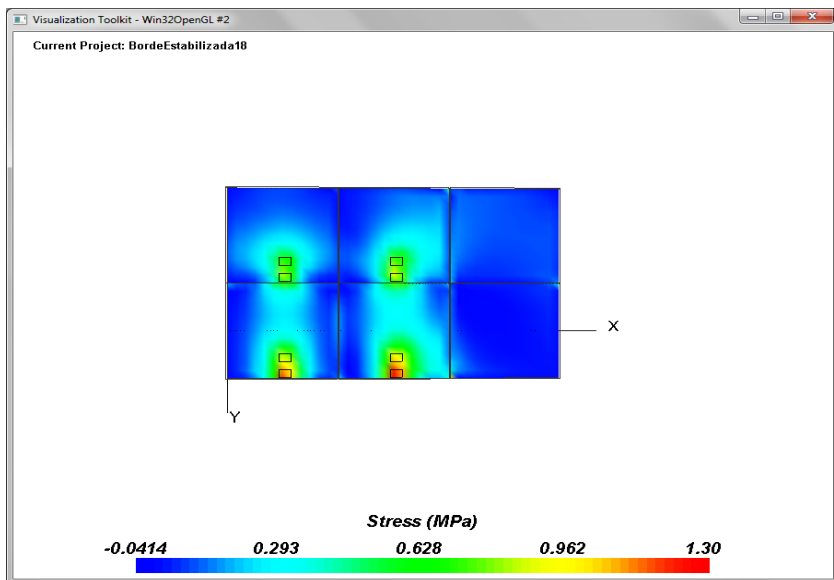
(Elaboración propia, 2014)

Ilustración No. 49. Imagen de cálculo de elementos finitos en la parte superior de la losa.



(Elaboración propia, 2014)

Ilustración No. 50. Imagen de cálculo de elementos finitos en la parte inferior de la losa.



(Elaboración propia, 2014)