

Universidad del Valle De Guatemala

Facultad de Ingeniería



Megaproyecto

**Aplicación de sistemas tecnológicos enfocados al  
diseño estructural**

**TOMO I**

Subtema

**“Diseño de losas cortas para pavimentos de concreto”**

Trabajo de Megaproyecto presentado por Daniel Enrique Cabezas Molina,  
Luis Eduardo De La Cruz Posadas, Diego Alejandro La Torre Jerez, para optar  
al grado académico del Licenciado en Ingeniería Civil.

Guatemala

2012



# **Aplicación de sistemas tecnológicos enfocados al diseño estructural**

Subtema

**“Diseño de losas cortas para pavimentos de concreto”**

Universidad del Valle De Guatemala

Facultad de Ingeniería



*Excelencia que trasciende*

**DELVALLE**  
GRUPO EDUCATIVO

Megaproyecto

**Aplicación de sistemas tecnológicos enfocados al  
diseño estructural**

**TOMO I**

Subtema

**“Diseño de losas cortas para pavimentos de concreto”**

Trabajo de Megaproyecto presentado por Daniel Enrique Cabezas Molina,  
Luis Eduardo De La Cruz Posadas, Diego Alejandro La Torre Jerez, para optar  
al grado académico del Licenciado en Ingeniería Civil.


Guatemala

2012

Vo.Bo.:

(f)   
Ingeniero Antonio Jiménez

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Roberto Godo

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de Noviembre 2012

## PREFACIO

El presente trabajo es una investigación y análisis del método constructivo de losas cortas. Se realizó una recopilación de información sobre este método, permitiendo sentar las bases teóricas y conocimientos necesarios para poder comprender y analizar cada aspecto que caracteriza el método.

Este informe se divide en seis capítulos, comenzando por definir conceptos generales del suelo, descripción y funciones del pavimento, generalidades sobre el estudio de tránsito para una carretera, descripción general del método constructivo de losas cortas, conceptos generales de la teoría de Elementos Finitos, entre otras cosas.

Posteriormente, se utilizó el programa computacional *Autodesk Inventor*, el cual utiliza el método de elementos finitos para realizar análisis de esfuerzo y deformaciones. En éste se modeló una losa corta a la cual se le aplicaron cargas comunes de tránsito para observar su comportamiento.

Agradecemos primeramente a Dios, que es el dador de todo conocimiento y sabiduría, y es quien nos da la vida y permite culminar las metas que hemos propuesto. A nuestros padres por brindarnos el apoyo tanto económico como emocional a lo largo de nuestras vidas y carrera. A la Universidad Del Valle de Guatemala, por brindarnos el apoyo y facilidades necesarias para la investigación y recopilación de información a través de su biblioteca. Al Ingeniero Roberto Godo por su apoyo incondicional y al Ingeniero Antonio Jiménez por su asesoría a lo largo de la realización de este informe.

# CONTENIDO

PREFACIO .....	iv
LISTA DE CUADROS.....	xii
LISTA DE ILUSTRACIONES .....	xiv
RESUMEN .....	XIX
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	2
III. OBJETIVOS .....	3
1. Generales .....	3
2. Específicos .....	3
IV. METODOLOGÍA.....	5
V. MARCO CONCEPTUAL.....	6
1. El suelo en el diseño de pavimentos.....	6
1.1. Definición de suelo y roca.....	6
1.2. Suelos residuales. ....	7
1.3. Características en los suelos transportados.....	8
2. Clasificación de los suelos .....	9
2.1. Definición de suelo y roca.....	10
3. Descripción de funciones de los pavimentos de carreteras.....	12
3.1. Pavimento.....	12
4. Principios para el diseño de pavimentos en caminos .....	13
4.1. Generalidades y definiciones .....	13

5.	Funcionamiento de los pavimentos de concreto .....	15
5.1.	Modelos de la mecánica de pavimentos .....	15
6.	Clasificación de los pavimentos .....	24
6.1.	Pavimentos flexibles. ....	24
7.	Factores que afectan el diseño de los pavimentos.....	27
7.2.	El clima.....	28
7.3.	El tránsito.....	28
8.	Fallas en pavimentos .....	29
8.1.	Causas de fallas en pavimentos .....	29
8.2.	Fallas en pavimentos rígidos .....	30
9.	Modelación del componente del pavimento. Ilustración del modelo de Burmister (Programa Alize III DEL LCPC) .....	32
10.	Dimensionamiento de pavimentos de concreto .....	33
10.1.	Pavimentos con tránsito pesado. ....	33
10.2.	Pavimentos de tránsito bajo.....	36
10.3.	Pavimentos en placa gruesa para tránsitos medios y pesados. ....	36
10.4.	Concreto reforzado en continuo. ....	36
11.	Determinación de la importancia de la longitud y forma geométrica de las losas .....	37
11.1.	Espesor de la losa .....	37
11.2.	Corte de losas.....	38
11.3.	Diseño de juntas. ....	39
12.	Estudio de tránsito para el diseño de pavimentos.....	44
12.1.	Aspectos generales (Montejo, 2006).....	44



12.2. Clasificación de los vehículos. ....	45
12.3. Determinación del tránsito existente. ....	46
12.4. Cálculo del tránsito durante el período de diseño. ....	47
13. Determinación de la longitud de la losa .....	49
13.1. Ecuación de Weestergard.....	49
13.2. Definición del tamaño de las losas.....	49
14. Método de diseño PCA.....	50
15. Método de diseño AASHTO .....	51
15.1. Definición del tamaño de las losas.....	53
15.2. Tráfico.....	56
16. Requerimientos para el diseño de pavimentos rígidos según norma AASHTO 1993.....	65
16.1. Variables de Diseño.....	66
16.2. Criterio de desempeño.....	67
16.3. Propiedades de los materiales para el diseño estructural. ....	67
16.4. Características estructurales.....	67
16.5. Variables de refuerzo.....	67
16.6. Variables de tiempo. ....	67
16.7. Tránsito.....	68
16.8. Confiabilidad.....	70
16.9. Efectos ambientales.....	73
16.10.Criterio de desempeño.....	75
16.11.Propiedades de los materiales.....	76
17. Métodos de elementos finitos.....	79

17.1. Introducción.....	79
17.2. Breve historia del método de los elementos finitos. ....	82
17.3. Conceptos generales.....	83
18. Análisis de flexión en una placa infinita .....	88
19. Descripción del método constructivo de losas cortas .....	92
V. DESARROLLO DEL DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO POR MÉTODO AASHTO .....	97
VI. PROGRAMA SAFE .....	103
1. Desarrollo .....	104
1.1. Diseño de losa de 3.6 m x 3.6 m, h = 27 cm. ....	105
1.2. Diseño de losa corta de 1.8 m x 1.8 m, h = 0.27 m. ....	115
1.3. Diseño de losa de 1.8 m x 1.8 m , h = 20 cm. ....	117
1.4. Análisis comparativo .....	121
2. Comparación económica .....	124
2.1. Corte de Juntas .....	124
2.2. Costo de reducción de espesor de concreto .....	126
VII. IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA AUTODESK INVENTOR PARA LA MODULACIÓN DE LOSAS CORTAS.....	131
1. Acerca del programa.....	131
2. Consideraciones de diseño .....	132
2.1. El suelo.....	132
2.2. Área de contacto de neumáticos del vehículo. ....	134
2.3. Restricciones a la losa y resortes.....	135
2.4. Aplicación de cargas.....	135

VIII. ELABORACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL .....	136
1. Modulación de losa convencional .....	136
1.1 Dimensiones de losa.....	136
1.2. Asignación de cargas.....	136
1.3. Características del material.....	137
1.4. Resultados.....	137
2. Modulación de losa corta .....	138
2.1 Dimensiones de losa.....	140
2.2. Asignación de cargas.....	140
2.3. Características del material.....	141
2.4. Resultados losa corta de 27 cm de espesor .....	141
2.5. Resultados losa corta de 18 cm espesor. ....	143
IX. DESCRIPCIÓN GENERAL DE COSTOS .....	146
1. Costos generales pavimento convencional .....	146
1.1. Datos generales.....	146
1.2. Volumen de concreto.....	146
1.3. Cantidad de metros lineales de corte en juntas.....	147
1.4. Cuantificación de discos de corte de juntas. ....	147
1.5. Cálculo de costos. ....	148
2. Costos Generales losa corta.....	148
2.1. Datos generales.....	148
2.2. Volumen de concreto.....	149
2.3. Cantidad de metros lineales de corte de juntas.....	149
2.4. Cuantificación de discos de corte de juntas .....	149

2.5. Cálculo de costos .....	150
X. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MÉTODO AASHTO ....	151
XI. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVOS DE RESULTADOS DE PROGRAMA SAFE .....	152
XII. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVOS DE RESULTADOS.....	156
1. Aspectos generales .....	156
2. Implementación del programa computacional como herramienta de diseño de pavimentos.....	157
3. Comparación entre losa convencional y losa corta con mismo espesor .....	158
4. Comparación entre losas cortas de 27 y 18 cm. ....	159
4.1. No utiliza refuerzo ni barras de transferencia.....	160
4.2. Contribuye con la capacidad del suelo.....	160
4.3. Reduce el alabeo.....	160
4.4. Filtración.....	160
4.5. Adherencia. ....	161
4.6. Ahorro económico.....	161
XIII. CONCLUSIONES .....	162
XIV. RECOMENDACIONES.....	165
XV. BIBLIOGRAFÍA.....	167
XVI. ANEXOS.....	170

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1: Características de suelos transportados .....	8
Cuadro 2: Clasificación de suelos por el método AASHTO.....	12
Cuadro 3: Porcentaje de vehículos pesados por carril de diseño.....	48
Cuadro 4: Tabla de determinación de requisitos para el diseño de pavimentos bajo la norma AASHTO.....	66
Cuadro 5: Período de análisis por clasificación de vía.....	68
Cuadro 6: Posibles valores de DI dependiendo de la cantidad de carriles.....	70
Cuadro 7: Valores recomendados para la confiabilidad dependiendo de su calificación funcional .....	72
Cuadro 8: Nivel de serviciabilidad y porcentaje de rechazo de parte de los usuarios ....	75
Cuadro 9: Coeficientes de drenaje basados en porcentaje de exposición anual a humedad y calidad de drenaje.....	79
Cuadro 10: Ejes equivalentes para pavimentos rígidos con índice de serviciabilidad final de 2.5 .....	97
Cuadro 11: Ejes Equivalentes para pavimentos rígidos con índice de serviciabilidad final de 2.5 .....	98
Cuadro 12: Ejercicio de estudio de tránsito .....	99
Cuadro 13: Desviación estándar según porcentaje de confianza escogido .....	100
Cuadro 14: Propiedades de la losa.....	104
Cuadro 15: Carga aplicada.....	104
Cuadro 16: Propiedades del concreto.....	104
Cuadro 17: Esfuerzos en ejes X y Y de losas cortas .....	121
Cuadro 18: Deformaciones y reacciones del suelo de losas cortas .....	122

Cuadro 19: Esfuerzos de losa de 3.6 m x 3.6 m .....	122
Cuadro 20: Deformaciones y reacciones del suelo en losa de 3.6 m x 3.6 m .....	122
Cuadro 21: Características de la losa corta .....	123
Cuadro 22: Características de la losa tradicional.....	123
Cuadro 23: Propiedades de resistencia del concreto.....	123
Cuadro 24: Costo de cortar concreto en losa tradicional .....	124
Cuadro 25: Costo de cortar concreto en losas cortas .....	125
Cuadro 26: Costo de concreto en 1 Km de losa tradicional de 1 carril.....	126
Cuadro 27: Costo de concreto en 1 Km de losa corta 1 carril.....	127
Cuadro 28: Costo de concreto en 1 Km de losa corta 1 carril de 0.17 m .....	128
Cuadro 29: Costo de colocar pasadores de acero.....	130
Cuadro 30: Volumen de concreto losa convencional (2 carriles) .....	147
Cuadro 31: Metros lineales de corte de juntas.....	147
Cuadro 32: Cuantificación de discos de corte de juntas - losa convencional .....	147
Cuadro 33: Presupuesto general losa convencional.....	148
Cuadro 34: Volumen de concreto losa corta 2 carriles.....	149
Cuadro 35: Metros lineales de corte de juntas - losa corta .....	149
Cuadro 36: Cuantificación de de discos de corte de juntas.....	149
Cuadro 37: Presupuesto general - losa corta.....	150

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Modelo de Westergaard .....	16
Ilustración 2: Modelo de Burmister .....	18
Ilustración 3: Modelo Dalle (placa) bidimensional .....	19
Ilustración 4: Modelo de pavimento rígido .....	20
Ilustración 5: Variación de nivel de losa.....	30
Ilustración 6: Agrietamiento piel de cocodrilo.....	30
Ilustración 7: Grietas logitudinales .....	31
Ilustración 8: Grietas transversales.....	31
Ilustración 9: Grietas de esquina .....	32
Ilustración 10: Grietas de voladura .....	32
Ilustración 11: Tráfico de pesos pesados (MJM) por día en la vía más cargada .....	33
Ilustración 12: Combinaciones de suelos con pavimento.....	35
Ilustración 13: Ejemplo de la berma con drenaje lateral.....	35
Ilustración 14: Comportamiento de agrietamiento en losas en función de la longitud ....	37
Ilustración 15: Forma constructiva tradicional de juntas para continuidad constructiva del pavimento. Parte A. ....	41
Ilustración 16: Forma constructiva tradicional de juntas para continuidad constructiva del pavimento. Parte B. ....	42
Ilustración 17: Forma constructiva nueva de junta sencilla para la continuidad del pavimento .....	42
Ilustración 18: Ubicación de ejes vehiculares de diseño y sus cargas en losas largas rectangulares de 4.50 x 3.50 m. ....	43
Ilustración 19 Ubicación de ejes vehiculares de diseño y sus cargas en losas cortas cuadradas de 1.8 m.....	43

Ilustración 20 Monograma para determinación de módulo de ruptura .....	50
Ilustración 21: Sección típica de pavimentos flexibles y rígidos según norma AASHTO .....	53
Ilustración 22: Tendencia del desempeño del pavimento .....	55
Ilustración 23: Gráfico de relaciones de ESAL's contra tiempo de diseño.....	69
Ilustración 24: Gráfico de representación de confiabilidad .....	71
Ilustración 25: Criterios de comportamiento.....	73
Ilustración 26: Gráfico que representa los efectos del ambiente contra la serviciabilidad de los materiales.....	74
Ilustración 27: Relación aproximada entre los valores K y otras propiedades del suelo .....	77
Ilustración 28: Modelado de elemento finito.....	81
Ilustración 29: Partes de un sistema a analizar.....	84
Ilustración 30: Ejemplo de viga en voladizo .....	84
Ilustración 31 Dominio de viga en voladizo .....	85
Ilustración 32: Distribución del gradiente térmico.....	89
Ilustración 33 Losa con dimensiones finitas.....	90
Ilustración 34: Factor de corrección de esfuerzos en una losa finita .....	91
Ilustración 35 Alabeo en losas cortas y largas debido al gradiente térmico .....	93
Ilustración 36: Forma inicial en que actúan las fuerzas de alabeo en losas .....	94
Ilustración 37 Forma en que actúan las fuerzas de alabeo en el nuevo dimensionamiento.....	94
Ilustración 38 Ubicación del punto de falla a corte provocada por la deformación de alabeo.....	95
<b>Ilustración 39: Proceso de diseño mediante método gráfico.....</b>	<b>102</b>
Ilustración 40: Pantalla de inicio de SAFE .....	105



Ilustración 41: Definir sistema de unidades .....	106
Ilustración 42: Selección tipo de elemento a diseñar .....	106
Ilustración 43: Dimensiones del área de contacto de una llanta.....	107
Ilustración 44: Dimensionamiento de losa .....	108
Ilustración 45: Dimensiones de la losa.....	108
Ilustración 46: Combinación de cargas .....	109
Ilustración 47: Características de la losa .....	110
Ilustración 48: Propiedades de la losa .....	110
Ilustración 49: Datos de las propiedades de la losa .....	111
Ilustración 50: Materiales de la losa.....	111
Ilustración 51: Propiedades de los materiales.....	112
Ilustración 52: Propiedades de módulo de subgrado del suelo .....	112
Ilustración 53: Datos de las propiedades del suelo .....	113
Ilustración 54: Deformación de losa 27cm .....	113
Ilustración 55: Reacciones del suelo en la losa de 27 cm.....	114
Ilustración 56: Esfuerzos en el eje Y.....	114
Ilustración 57: Esfuerzos en el eje X.....	115
Ilustración 58: Dimensionamiento para losa de 15 cm.....	115
Ilustración 59: Deformación de losa corta de 27 cm .....	116
Ilustración 60: Esfuerzo interno Y .....	117
Ilustración 61: Esfuerzo interno X.....	117
Ilustración 62: Ancho de carril de 3.6 m.....	118
Ilustración 63: Deformación de losa corta de 27 cm .....	118

Ilustración 64: Espesor de losa 20 cm. ....	119
Ilustración 65: Camión sobre losas cortas .....	119
Ilustración 66: Dimensionamiento para losa de 20 cm.....	120
Ilustración 67: Deformación de losa de 20 cm .....	120
Ilustración 68: Reacción del suelo en la losa de 20 cm.....	121
Ilustración 69: Costo de concreto en 1 Km de losa corta 1 carril de 0.17 m.....	129
Ilustración 70: Ahorro económico .....	129
Ilustración 71: Autodesk inventor.....	131
Ilustración 72 Área tributaria del resorte .....	133
Ilustración 73: Losa con cama de resortes .....	133
Ilustración 74: Ejemplo medición de área de contacto .....	134
Ilustración 75: Ejemplo de contacto de neumáticos de vehículo .....	134
Ilustración 76: Restricciones en losa y resortes.....	135
Ilustración 77: Vista losa convencional de 3.6 x 3.6m.....	136
Ilustración 78: Características del material .....	137
Ilustración 79: Esfuerzo XX losa convencional 27 cm.....	137
Ilustración 80: Deformación losa convencional 27 cm .....	138
Ilustración 81: Dimensión carretera pueblo nuevo – El Cerinal.....	139
Ilustración 82: Distribución de carga de vehículo de losa 1.8 x 1.8m. (a).....	139
Ilustración 83: Distribución de carga de vehículo de losa 1.8 x 1.8m. (b).....	139
Ilustración 84: Asignación de cargas losa corta 27 cm. ....	140
Ilustración 85: Características de material de losa corta 27 cm. ....	141
Ilustración 86: Esfuerzos XX losa corta de 27 cm.....	141

Ilustración 87: Esfuerzos YY losa corta de 27 cm .....	142
Ilustración 88: Deformación losa corta de 27 cm .....	142
Ilustración 89: Tramo carretera Pueblo Nuevo Viñas – El Cerinal.....	143
Ilustración 90: Espesor de pavimento pueblo Nueva Viñas – El Cerinal .....	143
Ilustración 91: Esfuerzos XX losa corta de 18 cm .....	144
Ilustración 92: Esfuerzos YY losa corta de 18 cm .....	144
Ilustración 93: Deformación losa corta 18 cm .....	145
Ilustración 94: Modulaci3n de pavimento convencional .....	146
Ilustraci3n 95: Distribuci3n carril losa corta.....	148

## RESUMEN

El siguiente documento es una investigación con el objetivo de proponer un método de diseño de losas cortas mediante la modulación de estas estructuras en programas computacionales. Este trabajo es de carácter teórico y recopila información sobre el diseño de losas cortas, los materiales a utilizar y procesos a realizar para su elaboración. Para esto, se realizó una recopilación de información del contexto de análisis en la teoría de pavimentos, lo cual proveyó un enriquecimiento de conceptos relacionados con el mismo y sentaron las bases teóricas para la elaboración de su diseño.

Esta investigación contiene datos fundamentales sobre el proceso de construcción de un pavimento convencional, los distintos suelos sobre los que se puede fundamentar, estudio de tránsito, juntas, entre otras cosas. Así mismo nos da una explicación general en lo que consiste el método constructivo de losas cortas.

Se realizó una hoja cálculo para el dimensionamiento de las losas cortas, aparte se modeló una losa en el programa llamado SAFE. El programa SAFE ayudará a revisar deformaciones y esfuerzos en cualquier punto de la losa y a compararlos con los resultados que proporciona la hoja de cálculo que está prevista hacer.

Esta información marca las bases teóricas que se utilizarán en la elaboración de un modelo computacional, aplicando conceptos de la teoría de elementos finitos. Para esto se usó el programa *Autodesk Inventor* que permite diseñar en un entorno real tomando en cuenta factores de calor, fatiga, entre otras cosas presentes en la realidad; esto ayuda a que se realice un análisis más exacto y preciso.

Para realizar estos análisis y modelos, se utilizó un espesor inicial que será obtenido en base a metodología AASHTO del cual se iniciarán las comparaciones pertinentes para que los valores obtenidos por las herramientas computacionales sean coherentes y útiles para los análisis posteriores.

La elaboración del modelo computacional consiste en la modulación de un pavimento con medidas convencionales y diferentes espesores, utilizando la teoría AASTHO; así también de un pavimento con la teoría de losas cortas. Estos modelos computacionales fueron sometidos a cargas de tráfico, especificadas por la Dirección General de Caminos, para así observar su comportamiento, esfuerzos y deformaciones.

Se realizó una descripción general de costos de algunos materiales en la losa convencional y losa corta, luego de esto se elaboró una comparación de ambos para conocer la factibilidad del método de losas cortas.

Luego del análisis individual de los modelos, se procede al análisis comparativo entre los elaborados de manera convencional y los que se elaboraron utilizando la teoría de losas cortas.

# I. INTRODUCCIÓN

El aumento poblacional y vehicular que existe hoy en día en Guatemala es significativo, por lo que se necesita cada vez más la mejora de vías principales y alternas para tener un mejor orden y control en el tránsito. Para esto las nuevas tecnologías y formas de construcción han evolucionado de manera exponencial, creando nuevas alternativas para un mejor desempeño y eficacia en la construcción de carreteras.

Este estudio tiene como finalidad la implementación de las bases teóricas acerca del método constructivo de losas cortas y la observación del comportamiento del mismo bajo cargas de diseño en un entorno real, utilizando el programa computacional Autodesk Inventor, que involucra el Método de Elementos Finitos en su análisis. Se pretende comprobar la funcionalidad del método, las ventajas y desventajas que posee.

El método constructivo de losas cortas es un método que ha tomado auge en los últimos años, por lo que este estudio se limita a una recopilación de información acerca de todo lo relacionado con dicho método, además de la observación del comportamiento que una losa con dimensiones determinadas y distintos espesores tiene al someterlo a cargas en un entorno real.

La investigación se llevó a cabo a través de libros y documentos encontrados en el internet, además de algunos datos recopilados en informes académicos. Así también se hizo uso del programa computacional Autodesk Inventor para la realización del modelo y el análisis de los esfuerzos en la losa.

El método constructivo de losas cortas brinda una mejora en cuanto a las deformaciones causadas por las cargas de tránsito, ya que permite construir losas con espesores menores conservando la capacidad en su funcionamiento. De esta forma la utilización de herramientas computacionales, tal como el programa Autodesk Inventor para el análisis de pavimentos, son de gran importancia para poner en práctica y aplicarlos en los diseños contemporáneos de pavimentos de concretos hidráulicos.

## II. JUSTIFICACIÓN

El motivo por el cual se realiza este trabajo es debido que en Guatemala se carece del conocimiento y de los lineamientos necesarios para la construcción de pavimentos, en este caso, por el método de losas cortas. Probablemente se tengan las fuentes de información adecuadas, sin embargo la aplicación que se les da no es la correcta. Con la elaboración e implementación de estos modelos, se pretende comprobar la factibilidad y funcionalidad del mismo y que las bases teóricas investigadas converjan en resultados plausibles.

Por causa de esto, es muy importante implementar investigaciones que realcen la importancia de establecer un proceso adecuado en la construcción de cualquier tipo de pavimentos. El contar con una red vial adecuada beneficia al país de manera económica, ya que la comunicación entre los pueblos se torna más eficiente, colaborando con el comercio, turismo y lo más importante, el transporte de emergencia al momento de una catástrofe.

Debido a la exigencia del país con respecto a la creación de vías alternas y principales, para la mejor distribución de vehículos a causa del crecimiento poblacional y vehicular, es necesario que se cuente con el conocimiento de métodos alternos a los convencionales, ya que debido al avance tecnológico en la teoría de pavimentos, han surgido nuevos métodos y nuevas maneras de construir carreteras más óptimas, durables y económicas.

### **III. OBJETIVOS**

#### **1. Generales**

- ❖ Implementar las bases teóricas para un modelado experimental y computacional de losas cortas.

#### **2. Específicos**

- ❖ Investigar sobre los antecedentes y la historia de las estructuras de pavimento
- ❖ Investigar sobre los factores generales que afectan a un pavimento rígido
- ❖ Investigar acerca del tipo de fallas que sufre un pavimento rígido
- ❖ Investigar la norma AASHTO y sus consideraciones
- ❖ Investigar los requerimientos de la norma AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos
- ❖ Desarrollar un modelo de una losa basado en la metodología AASHTO
- ❖ Analizar el resultado obtenido por el método AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos.
- ❖ Investigación de los conceptos relacionados con la teoría de pavimentos rígidos.
- ❖ Elaboración del modelo computacional de losas cortas utilizando el método de elementos finitos SAFE
- ❖ Elaboración del modelo computacional de una losa tradicional utilizando el programa SAFE
- ❖ Análisis comparativo e interpretación de los resultados obtenidos de los diseños del modelo computacional y losa tradicional.
- ❖ Comparación económica que representan los materiales de construcción de las losas cortas contra losas tradicionales.
- ❖ Investigación del contexto y conceptos relacionados con la teoría de pavimentos convencionales de concreto hidráulico.
- ❖ Investigación del contexto y conceptos relacionados con la teoría de Losas Cortas



- ❖ Implementación del programa Autodesk Inventor para la modulación de losas cortas.
- ❖ Elaboración de modelo computacional de un pavimento convencional
- ❖ Elaboración del modelo computacional de pavimento de losas cortas.
- ❖ Análisis e interpretación de resultados obtenidos en los modelos computacionales
- ❖ Análisis comparativo de costos generales entre la construcción de una losa convencional y una losa corta.

## IV. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este proyecto consta en la realización de una hoja de cálculo para el diseño de losas cortas, haciendo uso de la herramienta de Microsoft Excel, perteneciente al paquete de Microsoft Office. En esta hoja de cálculo se plasman los procedimientos y especificaciones necesarias para el diseño de losas cortas, tomando en cuenta los factores como fatiga, desgaste, entre otras cosas.

Así también se realizó un modelo en computadora de una losa corta, utilizando un programa que utilice el Método de Elementos Finitos. Esto es para tener un entorno visual de cómo el método de losas cortas actúa bajo las cargas del tránsito y demás factores. Este programa nos permite analizar elementos de manera más precisa, ya que además de tomar en cuenta el entorno visual, incluye en su diseño factores de calor y fluido dinámico, fatiga, entre otras cosas.

Para realizar estos análisis y modelos, se basó en la bibliografía que se encuentra en la ICCG (Instituto del Cemento y de Concreto de Guatemala), utilizando las especificaciones descritas en el libro de la AASHTO; así mismo se hizo uso de bibliografía relacionada con la teoría de pavimentos. Se utilizó también la herramienta de internet para encontrar algunas definiciones y métodos para el entendimiento de los procesos a utilizar al momento del diseño de las losas.

Las recomendaciones van orientadas hacia la mejora de la construcción y diseño de losas cortas, así como el mejoramiento del uso de los materiales, haciendo este proceso más eficiente.

## V. MARCO CONCEPTUAL

### 1. El suelo en el diseño de pavimentos

El interés de las propiedades básicas del suelo en el diseño y construcción de los pavimentos juega un papel muy importante, ya que el suelo se usa extensamente en proceso constructivo de una vía. Las propiedades que el suelo posee tienen una gran relevancia debido que normalmente los pavimentos se enfrentan con volúmenes elevados de tránsito, que en un gran porcentaje tienen carga pesada. No así, cuando se realizan construcción de terraplenes altos y cuando la resistencia del suelo tiene que aumentarse para usarlo como apoyo intermedio para el pavimento. Por ese motivo, conforme el tiempo y tecnología progresan, se han mejorado los procedimientos para la investigación de las propiedades que los suelos poseen, para la utilización de los mismos en pavimentos. (Montejo, 2006)

1.1. **Definición de suelo y roca.** El concepto de roca en el ámbito de diseño de pavimentos se define como un agregado natural de granos minerales, unidos por fuerzas de cohesión que los atraen. El suelo se considera como un agregado natural de granos minerales, con o sin componentes orgánicos, que pueden separarse por medios mecánicos comunes, tales como la agitación en agua. (Montejo, 2006)

1.1.1. **Origen y deformación de los suelos.** Los suelos tienen su origen principalmente en la alteración de las rocas a causa de los fenómenos atmosféricos durante cierta cantidad de tiempo. Este proceso, al cual se le denomina meteorización, ocurre por medio de la desintegración o descomposición de las rocas. La desintegración es un proceso mecánico que se encarga de dividir las rocas en partículas de menor tamaño, sin que pierdan sus características físicas y químicas de la roca madre; la descomposición es el proceso en el cual la roca se convierte en un producto de diferentes propiedades físicas y químicas. Los principales componentes físicos que provocan la meteorización son: agua, glaciares, viento y temperatura. (Montejo, 2006)

- **El agua.** Este elemento arrastra las rocas y las desintegra, provocando la reducción de su tamaño y creando suelos que por lo general son gravas y arenas
- **Los glaciares.** Estos son movimientos de grandes bloques de hielo, que llevan velocidades muy pequeñas, pero provocan la creación de un suelo llamado polvo o harina de roca, los cuales se encuentran en grandes cantidades en la base de los glaciares.
- **Viento.** El efecto que este provoca es el desgaste de rocas por medio de la erosión.
- **El calor.** Este produce un fenómeno llamado exfoliación, en el cual las rocas sufren de un desprendimiento de sus partículas, provocando que tomen formas redondeadas en su superficie.

Los principales componentes químicos que provocan la meteorización son: hidratación, carbonatación, oxidación y solución. Estos elementos químicos tienen como consecuencia la formación de suelos finos, en su mayoría arcillas. Los agentes biológicos más importantes son: vegetales y micro-organismos, estos son los que causan la formación de la capa superficial del suelo, que en su mayoría son suelos orgánicos; los vegetales cuando se descomponen originan la creación de un suelo denominado turba, que posee un comportamiento elástico. (Montejo, 2006)

La creación de los suelos resultantes de cada uno de los componentes anteriormente mencionados, se pueden agrupar en dos tipos: suelos residuales y suelos transportados.

**1.2. Suelos residuales.** Estos suelos son aquellos que han sido formados y establecidos a través del tiempo en el mismo lugar, en otras palabras, estos están establecidos junto a la roca madre de donde provienen.

**1.2.1. Características de los suelos residuales.** Es importante que en una obra de construcción de un pavimento se conozcan las propiedades del suelo residual y se tenga pleno conocimiento de su comportamiento, ya que ellas influyen en el comportamiento de obras como taludes y terraplenes. Una característica que es importante tomar en cuenta en este tipo de suelo es el llamado perfil de meteorización que consta de una secuencia de capas de materiales, los cuales poseen diferentes propiedades, estos se encuentran encima o en lugar próximo a la roca madre. Este perfil se forma a causa de la desintegración y descomposición de la roca. Dependiendo del

nivel de alteración que tenga se diferencian tres capas sobre la roca sana. (Montejo, 2006)

- **Capa superior.** Es la capa donde se encuentra una mayor alteración, causando un cambio en sus productos; comúnmente esta capa suele ser la capa delgada de descomposición orgánica.
- **Capa intermedia.** Es donde se produce la acumulación de las alteraciones de la capa superior.
- **Capa de transición.** Esta capa se le llama de transición debido que esta de manera intermedia entre el suelo y la roca sana.

**1.3. Características en los suelos transportados.** Estos suelos, básicamente han pasado por los mismos procesos por los que paso el residual, con la variación que han sido transportados a otro lugar que no es su lugar de origen. Este tipo de suelo es trasladado por medio de agentes transportadores, como el agua, el viento, la gravedad, el hielo, entre otras cosas. A continuación se indica en que manera las partículas son afectadas dependiendo del tipo de agente que las transporte. (Montejo, 2006)

**Cuadro 1: Características de suelos transportados**

	<b>Agente</b>
--	---------------

Características	Agua	Aire	Hielo	Gravedad
Tamaño	Disminución por solución, poca abrasión en carga suspendida, impacto en carga arrastrada	Una reducción considerable	considerable molienda e impacto	impacto
Forma	Da forma redondeada a gravas y arenas	Alto grado de redondeo	Pulimiento angular de caras	Angular no esférico
Textura	Arena lisa pulida brillante	Superficies deslustradas por impacto	Superficies estriadas	Superficies estriadas

Fuente: Montejo, 2006

Los sedimentos que se dan como resultado de estos agentes desembocan en depósitos que dependen del tipo de agente que lo ocasiono. El agua produce depósitos aluviales, lacustres y marinos. El viento causa la formación de depósitos eólicos, como las unas y los loess. El hielo produce depósitos glaciares y la gravedad produce los llamados depósitos de talud. (Montejo, 2006)

## 2. Clasificación de los suelos

En la naturaleza se encuentran una gran variedad de suelos, por lo que se han creado varios métodos que clasifican los mismos. Cada método tiene su campo de aplicación dependiendo la necesidad y el uso que se le quiera dar. Los sistemas mas utilizados en la actualidad en estudios para diseño de pavimentos de carreteras y aeropistas son el de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y el Unified Soil Classification System, conocido como Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S). (Montejo, 2006)

**2.1. Definición de suelo y roca.** El concepto de roca en el ámbito de diseño de pavimentos se define como un agregado natural de granos minerales, unidos por fuerzas de cohesión que los atraen. El suelo se considera como un agregado natural de granos minerales, con o sin componentes orgánicos, que pueden separarse por medios mecánicos comunes, tales como la agitación en agua. (Montejo, 2006)

**2.1.1. Descripción de los grupos de clasificación.**

2.1.1.1. **Suelos granulares.** Son los que tienen 35% o menos del material fino que pasa el tamiz No. 200. Están compuestos por los grupos A-1, A-2 y A-3.

- **Grupo A-1:** En este material se comprende una mezcla bien graduada por fragmentos de piedra, grava, arena y material ligante poco plástico. En este grupo también se incluyen los materiales que carecen de material ligante.
  - **Subgrupo A-1a:** Consta de los materiales en los cuales predomina la piedra o grava, con o sin material ligante bien graduado.
  - **Subgrupo A-1b:** consta de los materiales en los cuales predomina la arena gruesa bien graduada, con o sin ligante.
- **Grupo A-2:** se comprende una gran variedad de material granular que contiene menos del 35% del material fino.
  - **Subgrupos A-2-4 y A-2-5:** En estos subgrupos pertenecen los materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor del 35% y cuya fracción que pasa el tamiz 40 tiene las mismas características que los suelos A-4 y A-5, respectivamente. Estos grupos incluyen aquellos suelos gravosos y arenosos que tengan un contenido de limo, o índices de Grupo, en excesos a los indicados por el grupo A-1. Así también, entran en este rango las arenas finas con un contenido de limo no plástico en exceso al indicado para el grupo A-3.
  - **Subgrupos A-2-6 y A-2-7:** los materiales de estos subgrupos son semejantes a los anteriores, pero la fracción que pasa el tamiz número 40 tienen las mismas características de los suelos A-6 y A-7, respectivamente.

- **Grupo A-3:** Este grupo comprenden las arenas finas, de playa y aquellas con poca cantidad de limo que no tengan plasticidad. Este grupo incluye, además, las arenas de río que contengan poca grava y arena gruesa.

2.1.1.2. **Suelos finos limo arcillosos.** Contienen más del 35% del material fino que pasa el tamiz número 200. Estos suelos constituyen los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.

- **Grupo A-4:** Pertenecen a este grupo los suelos limosos poco o nada plásticos, que tienen un 75% o más del material fino que pasa el tamiz número 200. Además, se incluyen en este grupo las mezclas de limo con grava y arena hasta en un 64%.
- **Grupo A-5:** los suelos comprendidos en este grupo son semejantes a los del anterior, pero contienen material micáceo o diatomáceo. Son elásticos y tienen un límite líquido elevado.
- **Grupo A-6:** Por lo menos el 75% más de estos suelos pasan por el tamiz 200, pero también están las mezclas arcillas-arenosas cuyo porcentaje de arena y grava sea inferior el 64%. En estos materiales se presentan generalmente grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.
- **Grupo A-7:** Estos suelos tienen similares propiedades a los suelos A-6 pero son elásticos. Sus límites líquidos son elevados.
- **Grupo A-7-5:** incluye aquellos materiales cuyos índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos.
  - **Subgrupo A-7-6:** Comprende aquellos suelos cuyos índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos y que, además, experimentan cambios de volumen extremadamente grandes.
- **Índice de grupo:** Aquellos suelos que tienen un comportamiento similar se hallan dentro de un mismo grupo, y están representados por un determinado índice. La clasificación de un suelo en un determinado grupo se basa en su límite líquido, grado de plasticidad y porcentaje de material fino que pasa el tamiz número 200. Los índices de grupo de los suelos granulares están generalmente comprendidos entre 0 y 4; los correspondientes a los suelos limosos, entre 8 y 12 y los de suelos arcillosos, entre 11 y 200, o más. Cuando se indica un índice de grupo hay que



colocarlo entre paréntesis. Por ejemplo, A-2-4 (1), quiere decir un suelo A-2-4 cuyo índice de grupo es 1.

**Cuadro 2: Clasificación de suelos por el método AASHTO**

Clasificación general	Materiales granulares (35%, 0 menos, pasa el tamiz No. 200)			Materiales limo-arcillosos (mas del 35% pasa el tamiz No. 200)			
	A-1	A-3*	A-2	A-4	A-5	A-6	A-7
<b>Grupos - Tamiz No.</b>							
No. 10 (2.00mm)	-	-	-	-	-	-	-
No. 40 (0.425 mm)	50	51	-	-	-	-	-
	máx.	mín.					
No. 200 (0.075 mm)	25	10	35	36	36	36mín	36mín
	máx.	mín.	máx.	máx.	mín.		

Fuente: Montejo, 2006

El índice de grupo se calcula con la fórmula:

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Donde:

IG = Índice de grupo

F = Porcentaje del suelo que pasa por el tamiz No. 200, expresado como numero entero

LI = límite líquido

IP = Índice de plasticidad

El índice de grupo se puede también determinar por un diagrama para la determinación del mismo, llamada Fracción del índice de grupo.

### 3. Descripción de funciones de los pavimentos de carreteras

**3.1. Pavimento.** Un pavimento está compuesto por un conjunto de capas superpuestas, de forma casi horizontal, las cuales se diseñan y construyen con materiales apropiados y compactados de una manera adecuada. Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de una vía elaborada a través de un movimiento de tierra en la etapa de exploración, que en teoría son capaces de resistir los esfuerzos que las cargas

del tránsito transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

**3.1.1. Parámetros a cumplirse en un pavimento.** Para que un pavimento cumpla de manera adecuada sus funciones, debe cumplir con lo siguiente:

- 1) Debe ser durable.
- 2) Presentar condiciones que sean amigables con la distribución de drenajes.
- 3) Ser resistente a los agente de intemperismo.
- 4) Ser capaz de resistir la acción de cargas y esfuerzos ocasionados por el tránsito.
- 5) Que la textura que lo constituye se adapte a las velocidades de circulación de vehículos previstas en el diseño vial.
- 6) Ser resistente al desgaste ocasionado por el efecto abrasivo de las llantas de vehículos.
- 7) Debe poseer en su textura un color adecuado, para así evitar deslumbramientos a causa del reflejo, proveyendo así de una adecuada seguridad al tránsito.
- 8) Su construcción debe ser económica.
- 9) El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como el exterior, que influye en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.

## **4. Principios para el diseño de pavimentos en caminos**

**4.1. Generalidades y definiciones.** La ejecución de obra de pavimentación viene desde muy atrás en la historia de la humanidad. Civilizaciones antiguas, como los romanos, egipcios e inclusive los mayas, realizaron este tipo de obra civil. (Juárez, 2008)

Las cargas actuales a las cuales son sometidos los pavimentos, la velocidad del tránsito, el número de repeticiones, etc. causaron que en la actualidad, las técnicas de construcción de pavimentos sufrieran un desarrollo veloz, que a través de pruebas empíricas se fueran afinando la teoría acerca del diseño y ejecución de este tipo de obras. (Juárez, 2008)

Para efectos del presente trabajo se definirá por pavimento a la capa o conjunto de capas comprendidas entre la subrasante o y la superficie de rodamiento de una obra vial, cuya finalidad es proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, resistente al tránsito vehicular, al intemperismo causado por los agentes naturales y cualquier otro

agente perjudicial a la obra. Como función estructural, un pavimento tiene el objetivo de transmitir adecuadamente los esfuerzos a la subrasante, de modo que esta no se deforme de manera perjudicial. (Juárez, 2008)

Una subrasante se define como la superficie de una terracería terminada, siendo esta el último conjunto de cortes y terraplenes de una obra vial. (Juárez, 2008)

Existen actualmente dos tipos de pavimentos: pavimentos rígidos y pavimentos flexibles. Este trabajo se centrará en los pavimentos rígidos. Los pavimentos rígidos están formados por una losa de concreto hidráulico con recubrimiento bituminoso o sin él, apoyada sobre una subrasante o sobre una capa de material seleccionado (grava y arena). Los concretos utilizados son de resistencia relativamente alta, que se comprenden entre el rango de 210 kg/cm<sup>2</sup> y 350 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días de fraguado. En general, se utiliza concreto simple y, ocasionalmente, presforzado. Las losas de concreto simple son de dimensiones aumentan al usar algún refuerzo y llegan a los 100 m en concreto presforzados. Los espesores usados para las losas son del mismo orden usando o no refuerzo. (Juárez, 2008)

En general, cualquier suelo natural es aprovechable para terracería; se exceptúan los suelos orgánicos o aquellos cuyo rebote elástico sea importante y, por lo tanto, produzcan deformaciones excesivas a las capas suprayacentes. Cuando el material de la terracería sea de mala calidad puede hacerse necesario el empleo de una verdadera capa subrasante de material de mejor calidad que haga de transición entre el suelo y el pavimento; cuando el material de terracería sea de mejor calidad, la capa subrasante está formada por el propio material de terracería con tratamiento constructivo de mejor calidad en cuanto a términos de compactación. (Juárez, 2008)

Para cumplir sus funciones, un pavimento debe satisfacer dos condiciones básicas: ofrecer superficie resistente y apta para transitar, que cuente con la rugosidad necesaria para garantizar buena fricción con la llanta de los vehículos y con el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramiento; en segundo lugar, debe poseer la resistencia apropiada y las características mecánicas convenientes para soportar las cargas impuestas por el tránsito sin falla y con deformaciones que no sean permanentes y no representen problemas para el tránsito. (Juárez, 2008)

Las características de resistencia y deformación se satisfacen con una capa de material que se encargue de distribuir los esfuerzos de manera tolerable para la subrasante y no generen fallas, asentamientos u otras deformaciones perjudiciales. Esta capa debe

de ser formada por materiales friccionantes que son los más adecuados para llenar esta función estructural. (Juárez, 2008)

La capacidad de carga de los materiales friccionantes es baja en la superficie debido a la falta de confinamiento, razón por la que se requiere que sobre esta se coloque un material cohesivo y con resistencia a la tensión. (Juárez, 2008)

## 5. Funcionamiento de los pavimentos de concreto

El análisis del funcionamiento de los pavimentos se basa en tres elementos principales.

- El seguimiento experimental de secciones de pavimentos y la observación a lo largo del tiempo.
- El estudio sobre el modelo matemático.
- El estudio del comportamiento de los materiales en laboratorio.

**5.1. Modelos de la mecánica de pavimentos.** Los modelos de la mecánica de pavimentos que se utilizan para el dimensionamiento de los pavimentos de concreto son el modelo de Westergard y el modelo de Burmister. (Reyes L. FJ, 2003)

**5.1.1. Modelo de Westergaard (1926).** Este modelo, anterior al modelo de Hogg y que sigue la logia del modelo de Boussinesq, conduce a una aproximación diferente. La complejidad relativa del modelo de Hogg proviene, en efecto, de la naturaleza misma del masivo de Boussinesq, que soporta el pavimento. (Reyes L. FJ, 2003)

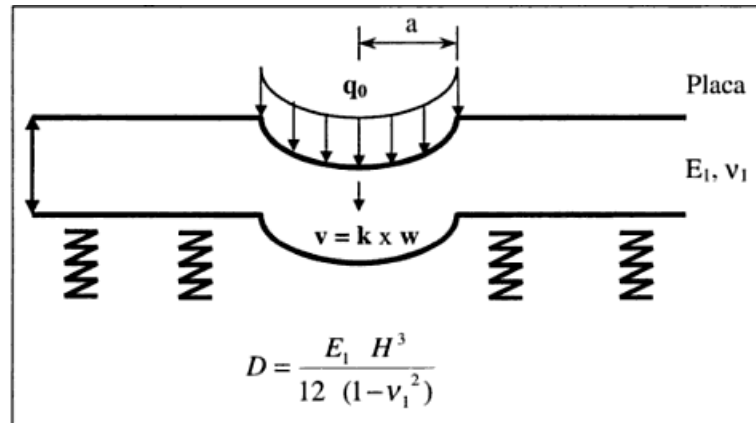
Partiendo del principio de que la hipótesis de un masivo de Boussinesq para el soporte del pavimento no es sino una hipótesis simplificada (el comportamiento del suelo es infinitamente más complejo), Westergaard adoptó para el suelo otra hipótesis significativa que facilita los cálculos. (Reyes L. FJ, 2003)

La hipótesis de la placa delgada para el pavimento, del modelo de Westergaard, lleva a cabo la esquematización del suelo así:

Este se asimila a un sistema de resortes cuyo desplazamiento vertical en un punto ( $w$ ), es proporcional a la presión vertical ( $v$ ) en ese punto, osea  $v = kw$ .

El modelo de cálculo adoptado, que se esquematiza en la figura siguiente todavía se usa mucho. En efecto, las hipótesis simplificativas permiten tratar problemas que otros modelos (Hogg y Burmister) no pueden resolver, en particular los de carga en el borde o esquina de la placa en concreto. (Reyes L. FJ, 2003)

**Ilustración 1: Modelo de Westergaard**



Fuente: Reyes L. FJ., 2003

Donde:

V = esfuerzo vertical sobre el masivo

K = modulo de reacción del suelo soporte

W= desplazamiento vertical de la placa.

En el modelo aparece el radio de rigidez de la placa, variable fundamental del comportamiento de los materiales tratados con ligantes hidráulicos.

$$l = \sqrt[4]{\frac{(E_1 H^3)}{12(1 - \nu_1^2)K}}$$

P es la carga aplicada y a es el radio de la carga del esfuerzo de tracción en la base del pavimento:

$$\sigma_T = \frac{P}{H^2} C \left( \frac{1}{a} \right)$$

Donde C es una función creciente de l, que depende de la posición de la carga. La influencia del espesor se representa por H<sup>3</sup> y el soporte por E<sub>1</sub>/K o E<sub>1</sub>/E<sub>2</sub>, según el modelo. La influencia de una variación del modelo de suelo soporte o del pavimento es bajo en comparación con el de la variación del espesor de pavimento. (Reyes L. FJ, 2003)

**5.1.2. Modelos multicapas (Burmister, 1943).** El modelo bicapa es interesante puesto que permite determinar las grandes tendencias de variación (papel del espesor, papel de la relación de módulos entre capas, influencia de radio de carga), pero se limita a una bicapa, lo que hace necesario pasar a modelos de n capas, ya que estos facilitan enormemente la esquematización de la estructuras. Una estructura tradicional se representa mejor por un esquema tricapa (suelo, cuerpo granular y capa de rodadura). (Reyes L. FJ, 2003)

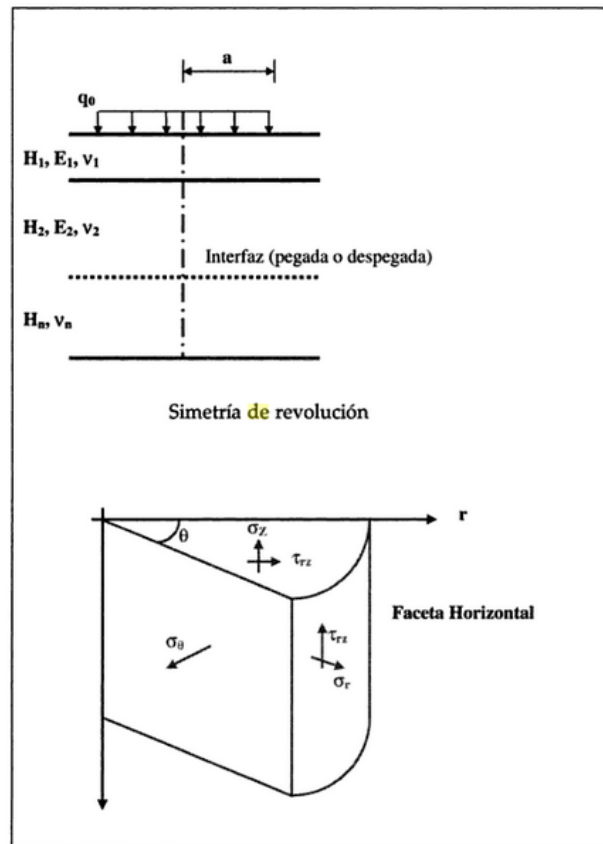
Los esquemas de estructuras que hacen intervenir un número de capas más importante son deseables en los estudios de refuerzo (por ejemplo, tres capas para el pavimento antiguo y dos adicionales para el refuerzo). (Reyes L. FJ, 2003)

Burmister trata el problema general de en capas tal como se esquematiza en la Ilustración 2.

Este es un modelo muy efectivo, ya que:

- Todas las capas se tratan como sólidos elásticos (se evita la hipótesis de placa)
- Las interfaces entre placas pueden ir pegadas o no, y una misma estructura puede tener tanto capas pegadas como despegadas. (Reyes L. FJ, 2003)
- En el caso de cargas múltiples (ejes simples, tándem o tridem), se pueden tratar adicionando los efectos de capas elementales.

## Ilustración 2: Modelo de Burmister



Fuente: Reyes L. FJ., 2003

La principal limitación de este modelo reside en el hecho de que, como en el modelo de Boussinesq o de Hogg, las capas son infinitas en el plano, por lo que no se pueden tratar los efectos de borde (carga en el borde o una fisura en el borde del pavimento). Sin embargo, los bordes están en general suficientemente lejanos de la banda de rodadura, lo cual permite que se pueda adoptar la hipótesis de capas infinitas. (Reyes L. FJ, 2003)

**5.1.3. Modelo de elementos finitos Dalle.** Un sólido linealmente elástico de cualquier forma reposa sobre un masivo estratificado elástico. La relación es de dimensiones finitas, las diversas capas que compone el masivo son infinitas horizontalmente y el espesor de la última capa es infinito. (Reyes L. FJ, 2003)

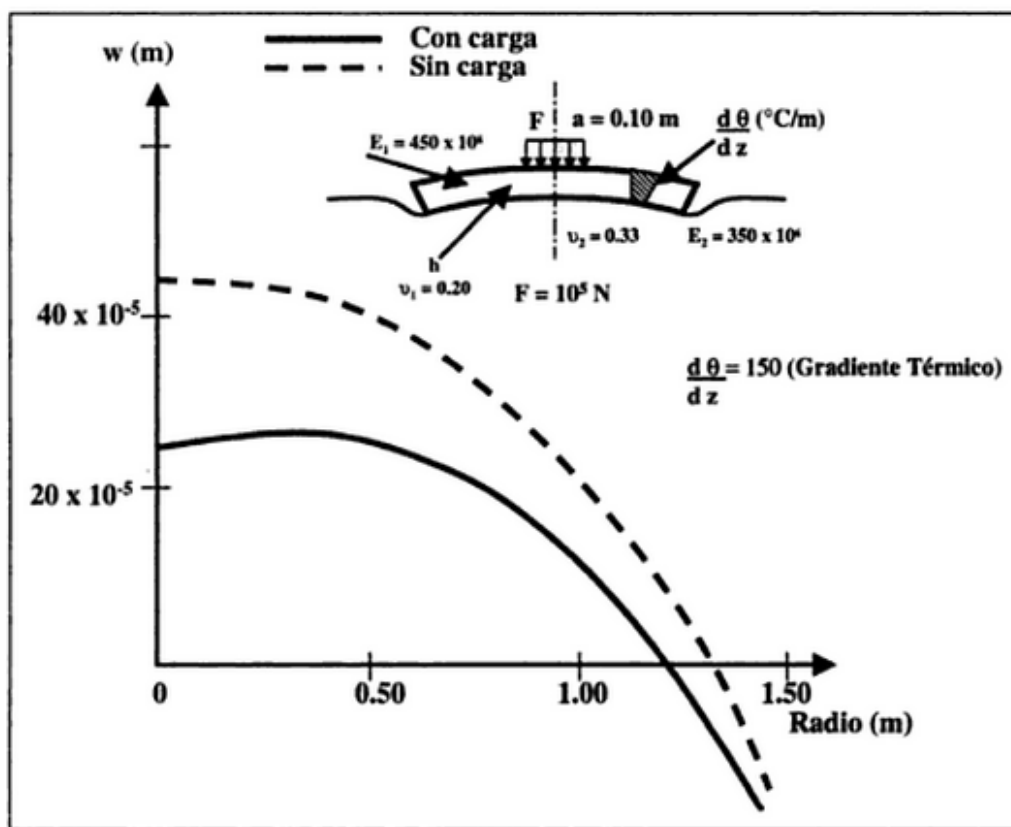
La liga entre sólido y el masivo puede ser bilateral, ya que el sólido está pegado al masivo en toda su superficie de contacto; esto significa que en cualquier punto de esta

superficie los desplazamientos verticales del sólido y del masivo son iguales o unilaterales (el sólido puede desprenderse del masivo, sin punzonarlo, y la superficie de contacto no se conoce). (Reyes L. FJ, 2003)

Los desplazamientos del masivo y del sólido se calculan cuando éste se somete a un cierto número de fuerzas exteriores, por lo que la reacción del masivo sobre el sólido y la superficie de contacto no se conoce. De los desplazamientos del sólido se deduce la intensidad de los esfuerzos inducidos por los tales desplazamientos. (Reyes L. FJ, 2003)

Se tiene en cuenta sólo las acciones exteriores, que se reducen a fuerzas de superficie y de volumen, como por ejemplo las fuerzas de gravedad, los efectos térmicos y las diversas cargas estáticas aplicadas al sólido. (Reyes L. FJ, 2003)

**Ilustración 3: Modelo Dalle (placa) bidimensional**



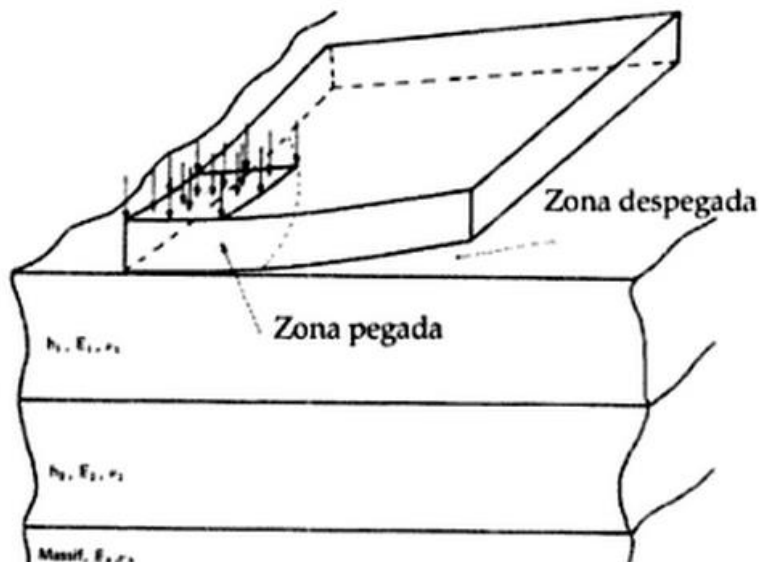
Fuente: Reyes L. FJ., 2003



**5.1.4. Modelo Dalle (placa) de tres dimensiones.** El modelo objeto de este estudio está destinado a calcular los esfuerzos y los desplazamientos de una estructura definida de las siguientes maneras:

- La placa tiene una forma cualquiera, que no es necesariamente homogénea.
- La subrasante está representada por un masivo multicapa de Burmister.
- La reacción del masivo sobre la placa tiene cualquier orientación.
- La placa puede desprenderse del soporte, ya que la superficie de contacto la calcula el modelo mismo.
- La placa está sometida a cargas:
  - Externas, en cualquier dirección.
  - Internas, Gravedad (peso propio), dilataciones diferenciales creadas por la temperatura, entre otras.

**Ilustración 4: Modelo de pavimento rígido**



El modelo Dalle es particularmente interesante para estudiar el funcionamiento del pavimento rígido gracias a una modelación mas real de los fenómenos, per también puede llevar a ciertos inconvenientes, característicos de los modelos de elementos finitos. (Reyes L. FJ, 2003)

Las limitaciones en la memoria del computador, el examen de muchas placas y la transferencia de carga entre ellas reducen la modelación del soporte a un líquido denso

o a un masivo de Winkler. Al contrario de la modelación, el soporte es un masivo elástico, multicapa, semi infinito, cuyo número de elementos es escaso, es decir, con baja precisión de resultados en la capa superior de la estructura. (Reyes L. FJ, 2003)

En efecto, el modelo real deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Posibilidad de usar un método de cálculo de elementos finitos para la menos dos capas superiores, con el fin de tener en cuenta las fundaciones tratadas con cemento y así modelar un refuerzo en concreto o en material bituminoso o semirrígido.
- Posibilidad de tener en cuenta los efectos de transferencia de carga en las juntas o fisuras ligadas a los diferentes dispositivos de transferencia (trabazón de agregados, pasadores, hierros de amarre o armaduras longitudinales).
- Posibilidad de considerar los efectos de deformaciones de origen térmico.
- Posibilidad de tener en cuenta las variaciones de las condiciones de apoyo de las placas (desprendimientos, cavidades, etc.)
- Posibilidad de representar el soporte para un masivo elástico seminfinito de al menos tres capas.
- Posibilidad de representar las diferentes geometrías de carga del tráfico (vías y aeropuertos)
- Posibilidad de calcular los esfuerzos y las deformaciones tan precisas como en los modelos analíticos.

A estos objetivos puede adicionarse la simplificación de la concepción de dichos programas, tanto para la entrada de datos como para salida de resultados. (Reyes L. FJ, 2003)

**5.1.5. Clasificación de los pavimentos.** Los pavimentos se clasifican en: pavimentos flexibles, semirrígidos o semi-flexibles, rígidos y articulados.

**5.1.5.1. Pavimentos flexibles.** Estos pavimentos están compuestos por un estrato bituminoso comúnmente apoyado sobre dos capas no rígidas, que son la base y sub-base. Sin embargo se puede omitir el uso de estas capas, con base en la necesidad que el pavimento exija. (Montejo, 2006)

#### **5.1.5.1.1. Subbase**

**5.1.5.1.1.1. Función económica:** esta capa posee una de las funciones más importantes en la construcción de un pavimento, que es la económica. Esto es debido que se puede distribuir las capas con un material más calificado o costoso en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad o menos costosa. Esta solución puede a su vez, proveernos de un aumento en el espesor total del pavimento y así mismo resulta económica. (Montejo, 2006)

**5.1.5.1.1.2. Función de filtración:** La subbase cumple con la función de filtro, impidiendo la penetración de materiales provenientes de la base con los de la subrasante; así mismo impide que el material fino de la subrasante contaminen la base, reduciendo así la calidad de la misma. (Montejo, 2006)

**5.1.5.1.1.3. Disminución de las deformaciones:** Muchas veces se producen cambios volumétricos en la subrasante, ocasionados por cambios de temperatura o aumento del contenido de agua en la misma; estos cambios pueden ser transmitidos a la superficie de rodamiento ocasionado fisuras y alteraciones en su diseño, sin embargo, la subbase cumple con la función de absorción de estas alteraciones, disminuyendo las deformaciones. (Montejo, 2006)

**5.1.5.1.1.4. Resistencia:** La subbase debe estar en la capacidad de soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos que transitan en el pavimento y transmitirla de manera adecuada a la capa inmediata inferior, que es la subrasante. (Montejo, 2006)

**5.1.5.1.1.5. Drenaje:** En muchos casos la subbase debe tener la capacidad de drenar el agua proveniente de la carpeta superior o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar. (Montejo, 2006)

#### **5.1.5.1.2. Base**

**5.1.5.1.2.1. Resistencia:** La función primordial de la base es de proveer de una resistencia suficiente para poder transmitir de manera eficiente los esfuerzos ocasionados por el tránsito, a la subbase, que a su vez se transmite a la subrasante. (Montejo, 2006)

### **5.1.5.1.3. Carpeta**

**5.1.5.1.3.1. Superficie de rodamiento:** La carpeta debe proveer una superficie uniforme y estable para el tránsito, con una textura y color amigable con el conductor, resistiendo los efectos que producen el tránsito sobre el pavimento.

**5.1.5.1.3.2. Impermeabilidad:** Esta debe evitar de manera eficiente el paso del agua a las capas inferiores, teóricamente no será totalmente impermeable, sin embargo esta debe estar lo más apegado a lo impermeable.

**5.1.5.1.3.3. Resistencia:** Esta debe poseer una eficiente resistencia a la tensión, para así complementar la capacidad estructural que el pavimento debe tener. (Montejo, 2006)

### **5.1.5.2. Métodos de diseño para pavimentos flexibles.**

Los métodos que se han desarrollado hasta nuestros días, con respecto a la determinación de espesores requeridos en las capas de un pavimento no han sido en su totalidad satisfactorios. Por esto, al realizar un diseño de un pavimento existen especificaciones estrictas que rigen su calidad, con respecto a los materiales que se utilizaran en cada uno de los diferentes estratos. (Montejo, 2006)

Las características más importantes que deben ser tomadas en cuenta en este diseño se refieren a granulometría, cantidad de finos, calidad en la compactación, resistencia al desgaste e intemperismo, entre otras cosas. A través del tiempo y la experiencia que se ha adquirido en la construcción de pavimentos, se puede inducir que si se utilizan los materiales con propiedades correctas y un manejo adecuado, los métodos de diseño creados hasta la actualidad pueden llegar a garantizar una gran eficiencia y buen comportamiento de los pavimentos construidos. Hay una gran variedad de métodos de diseño para pavimentos, existen países donde cada estado posee sus propios métodos de diseño. (Montejo, 2006)

**5.1.5.3. Pavimentos semirrígidos.** Este tipo de pavimentos están estructurados de manera similar a los pavimentos flexibles, con la diferencia que una capa del mismo es rigidizada artificialmente con aditivos que pueden ser: cal, cemento, asfalto, emulsión o químicos. Esto se debe a que los materiales que se poseen en el lugar de construcción no son aptos o no poseen las características requeridas del diseño. Los aditivos anteriormente mencionados corrigen o modifican las propiedades mecánicas de estos materiales para que se asemejen a las condiciones requeridas. (Montejo, 2006)

**5.1.5.4. Pavimentos rígidos.** Los pavimentos rígidos en la construcción de una carretera constan de una capa de subrasante y pueden o no tener una capa de base entre ésta y la carpeta de concreto. En los casos donde se opta por utilizar una capa de base, se le suele llamar capa de sub base. Estos pavimentos rígidos tienen algo de resistencia a la flexión, algo parecido al comportamiento de una viga a través de irregularidades menores en el material subyacente. Así, esas irregularidades pueden no reflejarse en el pavimento de concreto. Cuando se realiza el diseño y construcción adecuados de un pavimento rígido, se puede llegar a obtener largas vidas de servicio y el mantenimiento tiende a ser menos costos que un pavimento flexible. (Montejo, 2006)

Este tipo de pavimento son construidos con el objetivo de soportar cargas pesadas de tránsito, sometiénolo a grandes esfuerzos a causa de las mismas, aunque en ocasiones se han usado para caminos residenciales y locales.

## **6. Clasificación de los pavimentos**

Los pavimentos se clasifican en: pavimentos flexibles, semirrígidos o semi-flexibles, rígidos y articulados.

**6.1. Pavimentos flexibles.** Estos pavimentos están compuestos por un estrato bituminoso comúnmente apoyado sobre dos capas no rígidas, que son la base y subbase. Sin embargo se puede omitir el uso de estas capas, con base en la necesidad que el pavimento exija. (Montejo, 2006)

**6.1.1. Pavimentos flexibles.** Estos pavimentos están compuestos por un estrato bituminoso comúnmente apoyado sobre dos capas no rígidas, que son la base y subbase. Sin embargo se puede omitir el uso de estas capas, con base en la necesidad que el pavimento exija. (Montejo, 2006)

#### flexible 6.1.1.1. Funciones de las capas de un pavimento

##### i) Subbase

- **Función económica:** esta capa posee una de las funciones más importantes en la construcción de un pavimento, que es la económica. Esto es debido que se puede distribuir las capas con un material más calificado o costoso en la parte superior y colocar en la parte inferior del pavimento la capa de menor calidad o menos costosa. Esta solución puede a su vez, proveernos de un aumento en el espesor total del pavimento y así mismo resultar económica. (Montejo, 2006)
- **Función de filtración:** La subbase cumple con la función de filtro, impidiendo la penetración de materiales provenientes de la base con los de la subrasante; así mismo impide que el material fino de la subrasante contaminen la base, reduciendo así la calidad de la misma. (Montejo, 2006)
- **Disminución de las deformaciones:** Muchas veces se producen cambios volumétricos en la subrasante, ocasionados por cambios de temperatura o aumento del contenido de agua en la misma; estos cambios pueden ser transmitidos a la superficie de rodamiento ocasionado fisuras y alteraciones en su diseño, sin embargo, la subbase cumple con la función de absorción de estas alteraciones, disminuyendo las deformaciones. (Montejo, 2006)
- **Resistencia:** La subbase debe estar en la capacidad de soportar los esfuerzos transmitidos por las cargas de los vehículos que transitan en el pavimento y transmitirla de manera adecuada a la capa inmediata inferior, que es la subrasante. (Montejo, 2006)
- **Drenaje:** En muchos casos la subbase debe tener la capacidad de drenar el agua proveniente de la carpeta superior o por las bermas, así como impedir la ascensión capilar. (Montejo, 2006)

**ii) Base**

- **Resistencia:** La función primordial de la base es de proveer de una resistencia suficiente para poder transmitir de manera eficiente los esfuerzos ocasionados por el tránsito, a la subbase, que a su vez se transmite a la subrasante. (Montejo, 2006)

**iii) Carpeta**

- **Superficie de rodamiento:** La carpeta debe proveer una superficie uniforme y estable para el tránsito, con una textura y color amigable con el conductor, resistiendo los efectos que producen el tránsito sobre el pavimento.
- **Impermeabilidad:** Esta debe evitar de manera eficiente el paso del agua a las capas inferiores, teóricamente no será totalmente impermeable, sin embargo esta debe estar lo más apegado a lo impermeable.
- **Resistencia:** Esta debe poseer una eficiente resistencia a la tensión, para así complementar la capacidad estructural que el pavimento debe tener. (Montejo, 2006)

**6.1.1.2.** Métodos de diseño para pavimentos flexibles. Los métodos que se han desarrollado hasta nuestros días, con respecto a la determinación de espesores requeridos en las capas de un pavimento no han sido en su totalidad satisfactorios. Por esto, al realizar un diseño de un pavimento existen especificaciones estrictas que rigen su calidad, con respecto a los materiales que se utilizaran en cada uno de los diferentes estratos. (Montejo, 2006)

Las características más importantes que deben ser tomadas en cuenta en este diseño se refieren a granulometría, cantidad de finos, calidad en la compactación, resistencia al desgaste e intemperismo, entre otras cosas. A través del tiempo y la experiencia que se ha adquirido en la construcción de pavimentos, se puede inducir que si se utilizan los materiales con propiedades correctas y un manejo adecuado, los métodos de diseño creados hasta la actualidad pueden llegar a garantizar una gran eficiencia y buen comportamiento de los pavimentos construidos. Hay una gran variedad de métodos de diseño para pavimentos, existen países donde cada estado posee sus propios métodos de diseño. (Montejo, 2006)

**6.1.2. Pavimentos semirrígidos.** Este tipo de pavimentos están estructurados de manera similar a los pavimentos flexibles, con la diferencia que una capa del mismo es rigidizada artificialmente con aditivos que pueden ser: cal, cemento, asfalto, emulsión o químicos. Esto se debe a que los materiales que se poseen en el lugar de construcción no son aptos o no poseen las características requeridas del diseño. Los aditivos anteriormente mencionados corrigen o modifican las propiedades mecánicas de estos materiales para que se asemejen a las condiciones requeridas. (Montejo, 2006)

**6.1.3. Pavimentos rígidos.** Los pavimentos rígidos en la construcción de una carretera constan de una capa de subrasante y pueden o no tener una capa de base entre ésta y la carpeta de concreto. En los casos donde se opta por utilizar una capa de base, se le suele llamar capa de sub base. Estos pavimentos rígidos tienen algo de resistencia a la flexión, algo parecido al comportamiento de una viga a través de irregularidades menores en el material subyacente. Así, esas irregularidades pueden no reflejarse en el pavimento de concreto. Cuando se realiza el diseño y construcción adecuados de un pavimento rígido, se puede llegar a obtener largas vidas de servicio y el mantenimiento tiende a ser menos costos que un pavimento flexible. (Montejo, 2006).

Este tipo de pavimento son construidos con el objetivo de soportar cargas pesadas de tránsito, sometiéndolo a grandes esfuerzos a causa de las mismas, aunque en ocasiones se han usado para caminos residenciales y locales.

## **7. Factores que afectan el diseño de los pavimentos**

Existen factores que afectan directamente al pavimento sin importar el método o la calidad del diseño, estos se pueden ser clasificados en tres grupos.

**7.1. Pavimentos flexibles.** Los materiales que constituyen la terracería y la capa subrasante de un camino o aeropista juegan un papel fundamental en el comportamiento pero muy poco para el espesor de la losa. Por ello es importante la determinación de las características del suelo que formará la terracería y la capa subrasante. Mediante la aplicación de los principios y métodos de trabajo usuales en la Mecánica de Suelos se puede obtener estos datos y es por esta razón por lo cual, los pavimentos se ven involucrados en este tipo de especialidad de obra, por lo que no sólo requiere una terracería y subrasante, sino que en también una base y en algunos casos una sub-base.



La determinación de las propiedades mecánicas e hidráulicas la base a utilizar definen o solucionan gran parte del diseño de pavimentos. (Juarez, 2008)

Para lograr lo antes mencionado, es de suma importancia realizar exploraciones y muestreos con el objetivo de conocer las características específicas del material que será utilizado para la terracería. Hay dos métodos clásicos de obtener material para este fin: préstamo lateral o por préstamo de banco. El primer caso consiste en obtener material por medio de excavaciones de poca profundidad a lo largo del camino y a relativa distancia de este. El segundo caso presenta acarrear el material de un depósito o banco de material, este por lo general es el más costoso. (Juarez, 2008)

En el primer caso, la exploración se circunscribe normalmente a la realización de pozos a cielo abierto en el número o profundidad adecuados, de los que se extraen muestras alteradas que permiten clasificar el suelo, a fin de establecer su posibilidad de utilización en el cuerpo de la terracería. De no ser realizados estos estudios de Mecánica de Suelos por expertos con un criterio confiable, se tiene la opción de utilizar un criterio rutinario para la separación de pozos generalmente a cada 100 cm.

El segundo caso involucra en buscar un depósito cercano y realizar un muestreo para evaluar si el material cumple con las propiedades mecánicas para ser utilizado.

**7.2. El clima.** El clima es el factor principal que afecta a los pavimentos desde el primer día de construcción. El evento climático que representa el mayor daño para los pavimentos es la lluvia, ya sea por acción directa o por elevación de los niveles freáticos. Es frecuente que el diseño de este tipo de estructura incluyan drenajes adicionales, debido a que es de suma preocupación los efectos negativos que puede presentar al pavimento.

Las heladas en climas rigurosos y en suelos susceptibles pueden ser una de las fuentes de mayores problemas para los pavimentos. Las variaciones de temperatura generan esfuerzos que provocan grandes daños a las losas de concreto, si es que estos no fueron considerados.

**7.3. El tránsito.** El tránsito produce las cargas a que el pavimento se encontrará sujeto. El diseño de los pavimentos prevé la magnitud de las cargas que

transitaran sobre el mismo, las presiones de las llantas de los vehículos, para obtener el área de contacto, y el tipo de tránsito que hará uso del pavimento.

Gran parte de las características previamente mencionadas son muy difíciles de suponer o reproducir en laboratorios. Por lo cual el estudio de los pavimentos se puede considerar en su mayoría empírico. Esto genera una limitación en el campo, que no guarda un balance correcto entre la teoría y la experiencia. Es por ellos que se han construidos tramos de carretera poniendo a prueba la información obtenida en la práctica y reforzada por teoría desarrollada en el tema.

La magnitud de las cargas varía en un rango entre 8 toneladas hasta 150 toneladas. Es importante mencionar que las cargas se deben considerar dependiendo del tráfico de diseño que se proponga. Es por eso que la aplicación de las cargas se basa en el concepto de repetición. Es decir, que el diseño se basa en estadísticas sobre el supuesto tránsito, que contempla tipo de ejes y cantidad de veces que pasará por el tramo en una cantidad definida de años.

## **8. Fallas en pavimentos**

### **8.1. Causas de fallas en pavimentos**

- Diseño deficiente en cuanto a la consideración de factores que afectarán a la carretera en el futuro, como por ejemplo, incorrecta evaluación de tránsito de la zona, la calidad de materiales a utilizar y mala elección de método de diseño de diseño a utilizar.
- Alto incremento de las cargas y aumento de su frecuencia de circulación con respecto a lo considerado en el diseño original
- Desperfectos creados en el proceso constructivo como por ejemplo, mala calidad de los materiales o densificación errónea de las capas.
- Errónea evaluación climática y geológica del sitio de construcción, como por ejemplo, cantidad de precipitación y nivel freático de la zona.
- Falta de mantenimiento

## 8.2. Fallas en pavimentos rígidos

### 8.2.1. Deformaciones

**8.2.1.1. Variación del nivel de las losas.** Esta deformación puede ser causada por tres tipos de escenarios; deficiente compactación del suelo utilizado en las capas inferiores. Infiltración de agua y expansión de la subrasantes y pérdida de uniformidad en la subrasante por bombeo.

#### Ilustración 5: Variación de nivel de losa



**8.2.2. Fisuras y grietas. Piel de cocodrilo.** Agrietamiento del pavimento en varias direcciones asemejando el cuero de un cocodrilo. Este tipo de fallas ocurren en zonas del pavimento que son sometidas a cargas con mayor frecuencia.

#### Ilustración 6: Agrietamiento piel de cocodrilo



**8.2.3. Longitudinales.** Tipo de grietas que tienden a ser paralelas al borde del pavimento, aunque existen excepciones que tienden a ser parabólicas.

**Ilustración 7: Grietas logitudinales**



**8.2.4. Transversales.** Tipo de grietas que atraviesan toda o mayor parte de la superficie del pavimento debido al fenómeno de bombeo causando que las losas queden como un voladizo y como resultado se fracturan.

**Ilustración 8: Grietas transversales**



**8.2.5. De esquina.** Tipo de agrietamiento debido a la falta de soporte uniforme a la estructura y acción de una carga pesada.

**Ilustración 9: Grietas de esquina**



**8.2.6. Voladura.** Tipo de fisura causada por la existencia de un material incompresible cuando se presentan esfuerzos de compresión en la junta transversal causados por el aumento de temperatura. Dicha acción causa que la losa no se dilate adecuadamente causando así el agrietamiento.

**Ilustración 10: Grietas de voladura**



## **9. Modelación del componente del pavimento. Ilustración del modelo de Burmister (Programa Alize III DEL LCPC)**

Las principales dificultades encontradas por los promotores de estos modelos son aquellas que han llevado al desarrollo de un programa Delle. Cuando se requiere una muy buena precisión para los cálculos de los esfuerzos o de las deformaciones, o cuando

se multiplican las placas para examinar los efectos de la transferencia de carga en las juntas o fisuras, o cuando se combinan los dos efectos, el número de elementos del modelo aumenta rápidamente y se sobrepasa la capacidad de los computadores; cuando este no es el caso, la duración y el costo de los cálculos son productivos. (Reyes L. FJ, 2003)

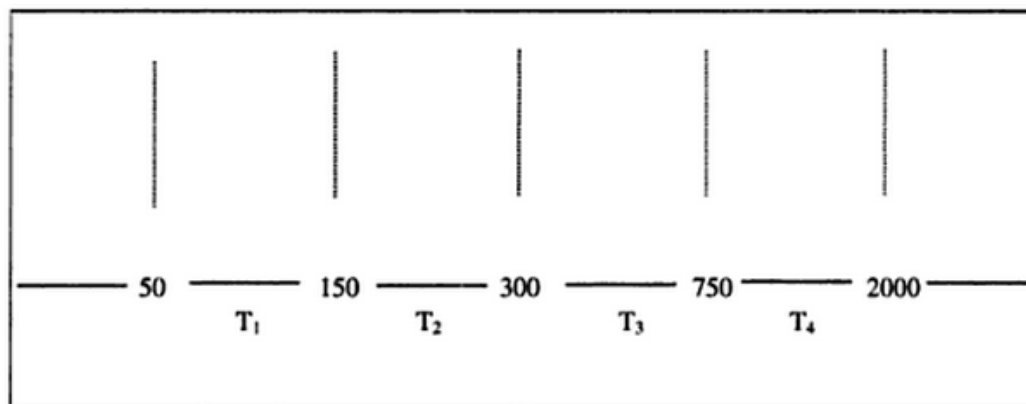
En fin, la posibilidad de acceso a estos modelos es muy escasa. La introducción de datos y la lectura son bastante dispendiosas, pues se demoran de cinco a diez veces más que el caso de un modelo analítico. (Reyes L. FJ, 2003)

## 10. Dimensionamiento de pavimentos de concreto

**10.1. Pavimentos con tránsito pesado.** El catálogo de las estructuras se presenta en forma de planchas de estructuras (18 en total). Cada plancha corresponde a un tipo de estructuras definido por la naturaleza de las capas de pavimento y presenta doce casos que corresponde a diferentes parejas T1 y PF. (Reyes L. FJ, 2003)

T1 es la clase de tráfico determinado en función del tránsito de pesos pesados (de carga útil superior a 50 kN) por día sobre el carril más cargado.

**Ilustración 11: Tráfico de pesos pesados (MJM) por día en la vía más cargada**



Fuente: (Reyes L. FJ, 2003)

Se evidencia que las duraciones de vida de servicio son largas (alrededor de 20 años), así como la estrategia de construcción y el mantenimiento de carreteras de concesión nacionales y departamentales. (Reyes L. FJ, 2003)

PF es la clase de plataforma soporte de pavimento que se determina en función de la capacidad soportante estimada del suelo a lo largo plazo y la incidencia de una capa tratada. (Reyes L. FJ, 2003)

Se consideran tres clases de plataforma:

- PF1, cuyo modulo de elasticidad está comprendido entre 20 y 50 Mpa;
- PF2, cuyo modulo de elasticidad se encuentra entre 50 y 120 MPa,
- PF3, cuyo modulo de elasticidad está entre 120 y 200 MPa.

Los pavimentos de concretos, estructuras de placas cortas, sin pasadores, se contemplan en dos planchas:

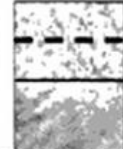


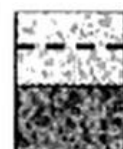





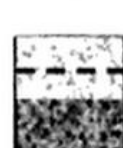
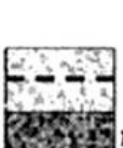

- Planchas 5: Concreto de cemento / concreto pobre
- Planchas 6: Concreto de cemento / grava cemento.

La única diferencia entre dos estructuras es el espesor de la capa de fundación, en ciertos casos, mayor en gravas cemento. (Reyes L. FJ, 2003)

Para limitar los riesgos de aparición de bombeo, se prevé los siguientes:

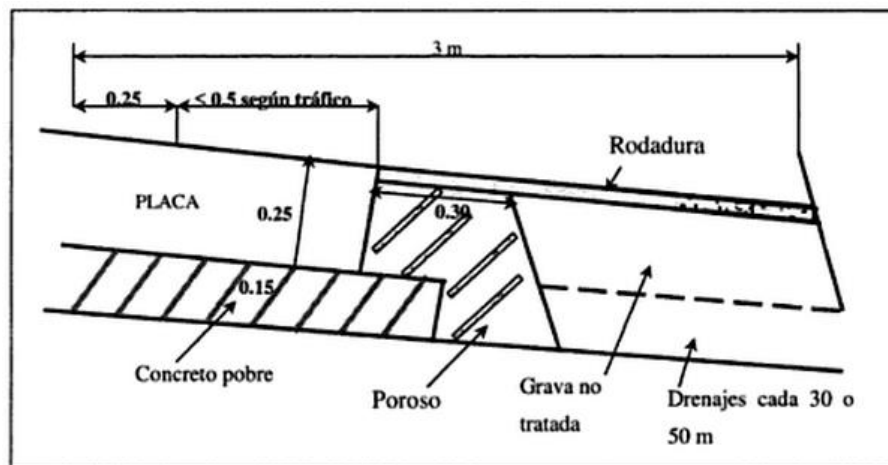
- Fundaciones poco erosionables (concreto pobre y grava cemento)
- Efectuar un sobre ancho de la placa del carril del tráfico pesado (75cm en T5 y T4, 50 cm en T3 y 25 cm para los otros tráfico) para alejar las cargas del borde y limitar la deflexión en el borde de la placa. (Reyes L. FJ, 2003)
- Realizar un sobre ancho de materiales de remantes para evacuar el agua que puede encontrarse en la interfaz y en la junta entre la berma y la placa. (Reyes L. FJ, 2003)

Ilustración 12: Combinaciones de suelos con pavimento

	PF1	PF2	PF3
T <sub>4</sub>	 <p>22 cm BAC 22 cm BM</p>	 <p>22 cm BAC 19 cm BM</p>	 <p>22 cm BAC 15 cm BM</p>
T <sub>3</sub>	 <p>22 cm BAC 18 cm BM o 20 cm GH, SH</p>	 <p>20 cm BAC 17 cm BM o 18 cm GH o 20 cm SH</p>	 <p>20 cm BAC 15 cm BM</p>
T <sub>2</sub>	 <p>20 cm BAC 19 cm BM o 20 cm GH o 22 cm SH</p>	 <p>18 cm BAC 18 cm BM, GH o 20 cm SH</p>	 <p>18 cm BAC 14 cm BM o 15 cm GH o SH</p>
T <sub>1</sub>	 <p>18 cm BAC 19 cm BM o 20 cm GH o 22 cm SH</p>	 <p>17 cm BAC 18 cm BM, GH o 20 cm SH</p>	 <p>18 cm BAC 14 cm BM o 15 cm GH o SH</p>

Fuente: (Reyes L. FJ, 2003)

Ilustración 13: Ejemplo de la berma con drenaje lateral



Fuente: (Reyes L. FJ, 2003)



Se debe señalar, igualmente, que para los pavimentos unidimensionales de dos carriles el espesor puede variar 5 cm en el perfil transversal, lo que constituye una ventaja para el concreto cuando la variación se hace sobre otro material. (Reyes L. FJ, 2003)

Así, para los pavimentos de tráfico alto las opciones tomadas sobre las estructuras deben proporcionar una gran duración, con un mantenimiento periódico de las juntas y la regeneración de características antiderrapantes. (Reyes L. FJ, 2003)

**10.2. Pavimentos de tránsito bajo.** Se ofrece la posibilidad de escoger la estrategia de dimensionamiento y mantenimiento. De aquí resulta que la duración de las estructuras no es fija, y es el usuario quien determina el tráfico para el cual se dimensiona el pavimento. Los espesores de las estructuras se definen en forma de ábaco, en funciones de la pareja (N, P) N es el tráfico acumulado, calculado a partir del tráfico inicial, en función de la duración de servicio escogido y de la tasa de crecimiento estimada. P es la capacidad portante de la plataforma soporte del pavimento, en función de la capacidad portante del suelo a lo largo plazo y de la incidencia de los mejoramientos hechos (tratamientos). (Reyes L. FJ, 2003)

El ábaco define cinco clases de capacidad portante: 1, 2, 3, 4 y 5, por orden creciente de la calidad. La estructura en concreto se define por su espesor, placa sin fundación o placa gruesa. Aunque no se han prescrito disposiciones particulares en cuanto al drenaje y la erosión del soporte, éstas deben tomarse en la medida en que el tráfico supere los 50 vehículos pesados por carril. (Reyes L. FJ, 2003)

**10.3. Pavimentos en placa gruesa para tránsitos medios y pesados.** La estructura del pavimento en placa gruesa, es decir, sin capa de fundación para un tráfico de la clase T3/T4, es la siguiente:

Una placa en concreto: 37 cm en el borde derecho y 27 cm en el borde izquierdo y una capa drenante: 10 cm de granulometría 6/20

El problema consiste en saber si las estructuras en placa gruesa no definidas en este catalogo presentan las mismas garantías. (Reyes L. FJ, 2003)

**10.4. Concreto reforzado en continuo.** Este tipo de pavimento tiene un cierto desarrollo en las autopistas antiguas que necesitan un refuerzo. El espesor del revestimiento es de 18 cm (como máximo), con una tasa de acero longitudinal del orden de 0.7% de la sección transversal. (Reyes L. FJ, 2003)

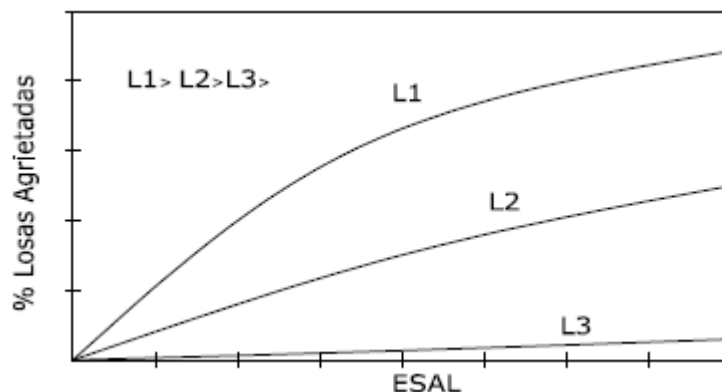
Para el dimensionamiento se debe considerar la ausencia de las juntas transversales, que ayuda a ganar algunos centímetros con respecto a la estructura clásica. (Reyes L. FJ, 2003)

En casos muy particulares (pavimento urbano, túnel, etc.), parece que esta estructura es particularmente interesante en los planos técnicos y económicos, sobre todo donde la capa de forma se ha tratado con ligantes hidráulicos. (Reyes L. FJ, 2003)

## 11. Determinación de la importancia de la longitud y forma geométrica de las losas

De lo anterior se deriva la influencia de la forma geométrica de la losa, pasando de ser la tradicionalmente de geometría rectangular, a una geometría cuadrada; teniendo como finalidad que su longitud concentre la menor cantidad de puntos de esfuerzos, evitando en lo posible las fallas tanto transversales como longitudinales. Según experiencias en Latinoamérica donde se ha evaluado el agrietamiento de losas de forma geométrica cuadrada con diferentes longitudes, se ha establecido la influencia de los esfuerzos respecto a ejes equivalentes de 18,000 lb (ESAL) como se muestra en la siguiente figura. (Román, 2008)

**Ilustración 14: Comportamiento de agrietamiento en losas en función de la longitud**



Fuente: Román, 2008

Dada la información anterior se sugiere que se utilicen losas cuadradas cortas.

**11.1. Espesor de la losa.** A medida que pasan los años los pavimentos de concreto hidráulico han demostrado un muy buen comportamiento, superando en muchos años su vida útil proyectada.

Esta realidad ha hecho reevaluar la metodología actual de diseño de pavimentos de concreto, basa normalmente en los métodos AASHTO y PCA, ya que estaría obligando a utilizar pavimentos con una capacidad mucho mayor a la que es realmente requerida. (Román, 2008)

Por otro lado, se recomienda espesores de 20cm como mínimos para carreteras, y según experiencias en países de Latinoamérica sugieren que el espesor mínimo de pavimentos de concreto para vías urbanas no debería ser inferior a 12cm. Para este último puede utilizarse una carga de tráfico de aproximadamente 1 millón de ejes equivalentes (ESAL) de diseño en 20 años. (Román, 2008)

Pavimentos delgados han sido construidos recientemente en países como Colombia y Chile, y ser probados en forma experimental, los cuales inicialmente están teniendo un buen comportamiento. En el caso específico de Guatemala actualmente para carreteras de alto flujo de vehículos se están construyendo losas cortas, con pistas de 3.6m de ancho y realizando losas cuadradas de 1.80 x 1.80m. (Román, 2008)

**11.2. Corte de losas.** Se deberán cortar las juntas de contracción longitudinales y transversales en el pavimento a partir del momento en que se pueda colocar la máquina de corte sobre la superficie de rodadura sin dejar las ruedas marcadas, debiendo considerar la temperatura del ambiente para definir el endurecimiento del concreto y el momento cuando se debe iniciar el corte de juntas, el cual deberá realizarse lo antes posible para evitar fisuras por retraso de estos trabajos. (Román, 2008)

Se deberá contar con la cantidad de recursos, equipos y sierras de corte necesarios. En el caso, de que no se pueda disponer de una cantidad razonable de equipos se deberán comenzar los cortes del concreto por lo menos cada 7.2m de distancia longitudinal, o a menor distancia según la modulación que resulte de los sectores a realizar, pero nunca superando la medida de los 7.2m; Luego se realizarán los cortes intermedios, tan pronto como sea posible. (Román, 2008)

Un corte muy importante es el longitudinal, para evitar el alabeo del borde del pavimento. Por esta razón, el orden de corte recomendado es: primero los transversales cada 7.2m; después, el corte longitudinal al centro de la pista; luego, los transversales cada 3.6m, intermedios a los anteriores; y finalmente el resto de los cortes transversales.

Con la innovación en la dimensión de losas, también se ha visto la conveniencia de construir juntas simples para la continuidad en la construcción del pavimento, aprovechando la forma geométrica de las losas y promoviendo una menor cantidad de

zonas de falla, evitando el desportillamiento prematuro ocasionado por la concentración de esfuerzos en áreas de corte como se muestra en las figuras 4.6 y 4.7 (Román, 2008)

**11.3. Diseño de juntas.** En las losas que conforman un pavimento se dan esfuerzos como consecuencia del paso de los vehículos y de los movimientos de contracción y dilatación del concreto y a las diferencias en la temperatura, o en la humedad, entre la cara superficial y la de soporte de la losa, estos esfuerzos se controlan con el diseño de las juntas (Londono, 2008)

**11.3.1. Clasificación de las juntas.** Las juntas en los pavimentos tienen diferentes funciones y según ellas se pueden clasificar en juntas de construcción, de contracción, de alabeo y de expansión o aislamiento. También se pueden clasificar según su alineación, en longitudinales y transversales. (Londono, 2008)

**11.3.1.1. Juntas de construcción.** Lo más frecuente es construir los pavimentos de concreto por carriles, generando juntas longitudinales. Además de las juntas longitudinales descritas, se presentan juntas de construcción transversales, cuando se suspenden las labores de colocación del concreto, bien sea por la finalización de la jornada laboral, por alguna interrupción en el suministro del material o por averías en alguno de los equipos empleados para su producción, transporte o colocación. Pero esa interrupción debe ser tan larga como para que el concreto ya colocado haya alcanzado su fraguado final. El tiempo en que esto sucede depende de las propiedades del concreto, del empleo o no de aditivos retardantes y de las condiciones climáticas.

**11.3.1.2. Juntas de Retracción o contracción.** Con este nombre se denominan las juntas que se hacen para liberar los esfuerzos que se desarrollan, en las primeras horas después de construido el pavimento, cuando el concreto sufre contracciones mientras se seca y enfría. Estas juntas se hacen cortando el concreto, después de que pasan dos horas de haber terminado las labores de enrasado, nivelado y rayado, pero antes de pasadas 12 horas, si el corte se va a realizar con equipos de aserrado dotados de discos adiamantados.

El momento del corte depende de la conjugación de muchas variables, sobretodo del contenido de cemento, las temperaturas del concreto y ambiente durante la construcción del pavimento, la calidad de los agregados y la fricción de la losa con su soporte. Las juntas también se pueden cortar mientras el concreto está fresco cuando se trata de obras con bajo nivel de tránsito, con velocidad de circulación restringida o en

aquellas vías en las que la regularidad superficial no sea un parámetro de gran importancia.

El espaciamiento de estas fisuras, llamadas de retracción o contracción, oscila entre 15 y 40 m, según las características del concreto, la fricción de la losa con su apoyo y las condiciones climáticas durante la construcción del pavimento y apenas termina ésta.

**11.3.1.3. Juntas por alabeo.** El concreto se puede agrietar si se ve sometido a cambios diferenciales en la humedad y en la temperatura. En un día caluroso, la superficie del pavimento tiene mayor temperatura que su apoyo, obligando a las losas a levantarse en el centro y a apoyarse en los extremos, lo que produce esfuerzos que pueden generar fisuras; en la noche, el fenómeno se invierte y los esfuerzos de tracción se desarrollan en la cara inferior del pavimento.

Los gradientes de humedad también inducen esfuerzos en el pavimento, pero de menor magnitud y casi siempre opuestos a los generados por los gradientes térmicos; esto se debe a que una mayor temperatura, en condiciones normales, va acompañada, de un menor contenido de humedad. Las fisuras inducidas en el pavimento por los gradientes térmicos y por la retracción del concreto, son características propias del comportamiento del material, e inevitables, por lo cual el diseño de las juntas está orientado, a controlar la dirección y aparición descontrolada de dichas fisuras.

Pero se ha comprobado, por medio de la observación de antiguos pavimentos contruidos con juntas muy separadas entre sí, que las fisuras por ello generadas, llamadas de alabeo, tienen una separación que oscila entre 4,5 y 6 m y se localizan intercaladas entre las de contracción.

**11.3.1.4. Juntas longitudinales.** Las juntas longitudinales pueden ser de alabeo o de construcción. El objetivo básico de estas juntas es el de controlar las fisuras que se pueden presentar en los pavimentos cuando se construyen con anchos superiores a los 4,5 metros. En nuestro medio, en el cual existe la tradición de construir los pavimentos por carriles, con un ancho cercano a los 3,6 m, las juntas longitudinales son normalmente de construcción. (Londono, 2008)

**11.3.1.5. Juntas transversales.** Las juntas transversales agrupan a las de contracción, alabeo, expansión y construcción, pues, cuando el pavimento se da al servicio, es muy difícil determinar la función de cada una de ellas. El diseño de las juntas transversales se realiza, con el fin de controlar las fisuras del concreto por contracción y alabeo; por lo tanto, el espaciamiento entre ellas, debe ser menor que

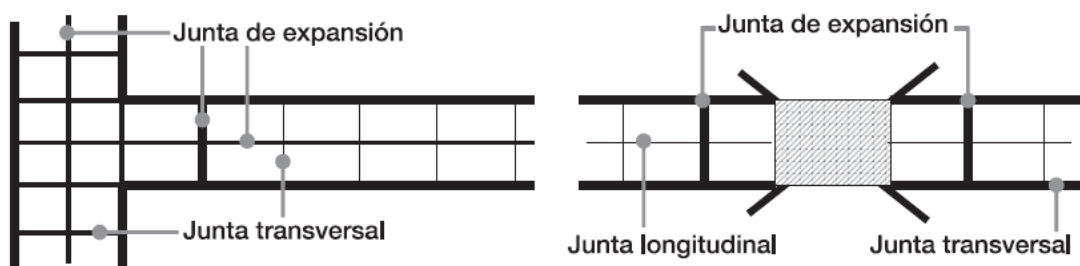
seis metros. Se ha demostrado que cuando la separación se aproxima a 4,5 m, permiten controlar prácticamente todas las fisuras y el comportamiento del pavimento a lo largo de su vida de servicio es mejor. (Londono, 2008)

#### 11.3.1.6. Varillas de transferencia de carga (Dovelas).

Cuando la trabazón de agregados no es suficiente para lograr la transmisión de carga, se pueden utilizar, para alcanzar dicho objetivo, varillas de transferencia de carga, conocidas como pasadores de carga, o dovelas, que son, barras de acero cortas y lisas con un límite de fluencia ( $f_y$ ) mínimo de 280 MPa (2800 kg/cm<sup>2</sup> o 60000 psi), de acuerdo con el Artículo INV 500-07 y el Artículo INV 640-07, medidas dentro del concreto fresco. Los pasadores se instalan en las juntas de tal manera que le permitan a las losas separarse y unirse entre sí, pero no desplazarse verticalmente, y su función es, entonces, absorber los esfuerzos de cortante, generados por las cargas del tránsito al cruzar las juntas y transmitir a la losa adyacente entre el 40 y 45% de la carga de diseño, cuando esta se coloca cerca de la junta. (Londono, 2008)

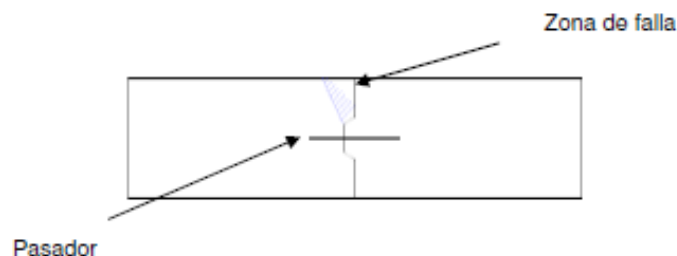
Las dovelas, para poder cumplir con su objetivo, deben ser fáciles de instalar, lisas y al menos dos terceras partes de su longitud deben estar recubiertas con un material antiadherente, con el propósito de no restringir los desplazamientos horizontales de las losas. Además, deben ser resistentes a la fatiga y a la corrosión.

**Ilustración 15: Forma constructiva tradicional de juntas para continuidad constructiva del pavimento. Parte A.**



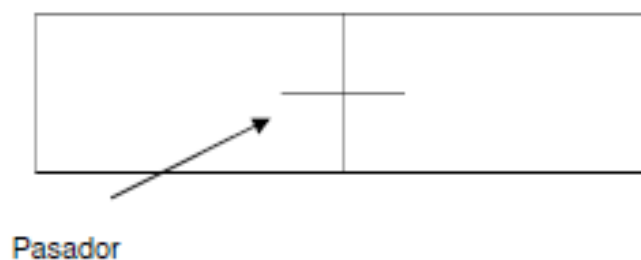
Fuente: Román, 2008

**Ilustración 16: Forma constructiva tradicional de juntas para continuidad constructiva del pavimento. Parte B.**



Fuente: Román, 2008

**Ilustración 17: Forma constructiva nueva de junta sencilla para la continuidad del pavimento**



Fuente: Román, 2008

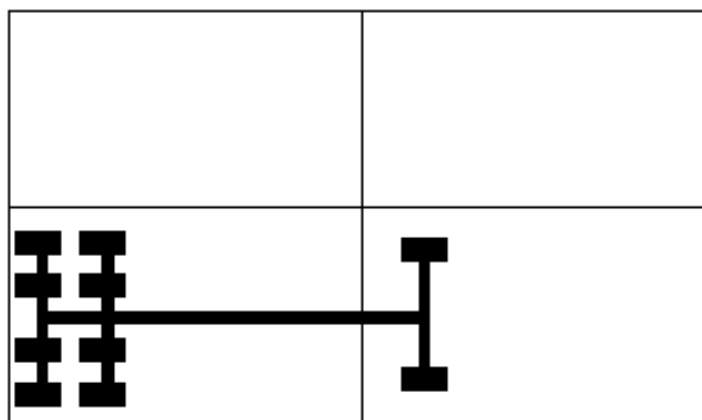
Se deberá disponer de, por lo menos, dos equipos de corte para efectuar el corte del concreto, en el caso de que el hormigonado se haya hecho en un larga extensión. El corte se deberá realizar con sierra delgada de modo que el corte quede con espesor no mayor que 2.0 mm de manera de evitar el ingreso de partículas dañinas al interior de la junta, lo que pudiera deteriorarla. (Román, 2008)

Las juntas no se sellarán si se ha realizado el corte con sierra delgada, ya que su poco espesor impide el ingreso de partículas incompresibles. Sin embargo, se deberá reparar la membrana de curado en los cortes para asegurar una buena hidratación de las aristas de éste, asegurando su resistencia al desgaste y rotura. (Román, 2008)

Para evitar colocar sellos, se recomienda el uso de sierras de corte delgado (1.8mm): su espesor impide el ingreso de partículas en las juntas y, por lo tanto, éstas pueden dejarse sin sellar y prescindir de su futuro mantenimiento. Entonces si la finalidad del análisis de elementos finitos en losas es la distribución de cargas y el comportamiento que tiene en las mismas los efectos de alabeo provocado por los gradientes térmicos,

hace necesario reflejar la importancia que tiene la distancia entre las juntas longitudinales y transversales en el pavimento terminado, como se muestra en la siguiente ilustración (Román, 2008)

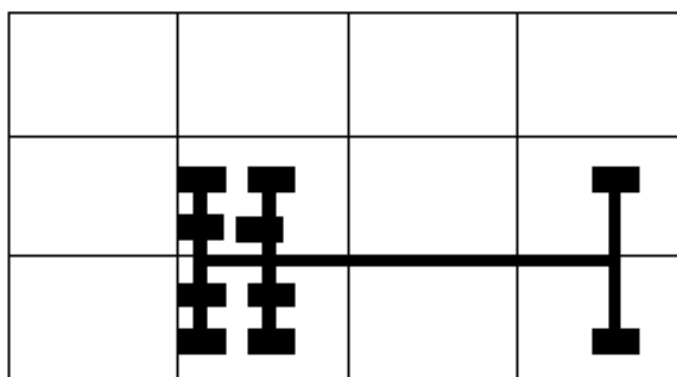
**Ilustración 18: Ubicación de ejes vehiculares de diseño y sus cargas en losas largas rectangulares de 4.50 x 3.50 m.**



Fuente: Román, 2008

Redistribuyendo las cargas sin concentrar la mayoría de las cargas solamente en una sección de la losa, se propone:

**Ilustración 19 Ubicación de ejes vehiculares de diseño y sus cargas en losas cortas cuadradas de 1.8 m**



Fuente: Román, 2008)

Con este sistema de distribución, solo una rueda cruza la junta al mismo tiempo, lo cual minimiza el efecto de una carga mayor del vehículo y baja el esfuerzo sobre la



losa. Este tipo de juntas deben ser usadas cuando no se pretende utilizar barras de transferencia de cargas.

Las juntas deben estar diseñadas para transferir una porción de la carga entre losas adyacentes minimizando así deflexiones verticales en la junta producidas por las cargas de vehículos. El reducir deflexiones disminuye el potencial bombeo de materiales de subbase además del escalonamiento. Debe recordarse nuevamente que el clima y la dureza de los agregados tienen un gran impacto en la eficiencia de la transferencia. (Román, 2008)

## **12. Estudio de tránsito para el diseño de pavimentos**

Probablemente, la variable más importante en el diseño de una vía es el tránsito, pues, si bien el volumen y dimensiones de los vehículos influyen en su diseño geométrico, el número y el peso de los ejes de estos son factores determinantes en el diseño de la estructura del pavimento. (Montejo, 2006)

### **12.1. Aspectos generales (Montejo, 2006)**

**12.1.1. Eje sencillo:** es un eje en cuyos extremos lleva una o dos ruedas sencillas

**12.1.2. Eje tándem:** es aquel constituido por dos ejes sencillos con rueda doble en los extremos.

**12.1.3. Eje trídem:** es aquel constituido por tres ejes sencillos con rueda doble en los extremos.

**12.1.4. Vehículos livianos:** son aquellos de menos de 5 toneladas de capacidad tales como automóviles, camionetas, camperos, etc.

**12.1.5. Vehículos comerciales:** Son aquellos de más de 5 toneladas de capacidad tales como camiones, buses, remolques, etc.

**12.1.6. Volumen de tránsito:** es el número de vehículos que circulan en ambas direcciones por una sección de vía durante un período específico de tiempo. Este puede ser horario, diario, semanal, etc.

**12.1.7. Tránsito promedio diario:** es el volumen de tránsito durante un periodo de tiempo, dividido por el número de días del periodo. Abreviadamente se denota como TDP. Según el período utilizado para medir el volumen de tránsito, el TDP puede ser anual, mensual o semanal, denominándose TPDA, TPDM, Y TPDS, respectivamente.

**12.1.8. Tránsito existente:** es aquel que presenta la vía antes de ser pavimentada

**12.1.9. Tránsito atraído:** es el volumen de tránsito que, sin cambiar ni su origen ni su destino, puede ocupar la futura vía pavimentada como ruta alterna, afluyendo a ella a través de otras vías ya existentes.

**12.1.10. Tránsito generado en una vía nueva o mejorada:** es el volumen de tránsito que resulta como consecuencia del desarrollo económico y social de la nueva zona de influencia.

**12.1.11. Tránsito inducido:** es la suma del tránsito atraído y generado.

**12.1.12. Nivel de servicio:** es una medida de la calidad del flujo de tránsito por la vía. Se cuantifica con una serie de factores tales como la velocidad, el tiempo de recorrido, las interrupciones del tránsito, la libertad de manejo, la seguridad y los costos de operación.

**12.1.13. Volumen de servicio:** es el volumen de tránsito que le corresponde a cada nivel de servicio.

**12.1.14. Capacidad:** la capacidad de una vía o de un carril es el número máximo de vehículos que puede circular por una u otra durante un período de tiempo determinado sin que se presenten demoras ni restricciones en la libertad de movimiento de los vehículos.

**12.2. Clasificación de los vehículos.** El INV (Instituto Nacional de Vías) ha designado la siguiente terminología para los vehículos que circulan en el país:

A= Vehículos livianos

B = Buses

C= Camiones

## **12.2.1. Clasificación del tipo de vehículo de acuerdo con la disposición de sus ejes**

**12.2.1.1. Carga máxima legal.** La diversidad de las características de los vehículos que circulan sobre un pavimento durante su vida de diseño, traen como consecuencia un amplio espectro de ejes de carga, con diferentes espacios entre llantas y distintas presiones de inflado, lo que origina una amplia gama de esfuerzos y deformaciones aplicados a un determinado punto de la estructura. La anterior consideración, plantea un problema muy complejo que hace necesario recurrir a simplificaciones prácticas. (Montejo, 2006)

Dado que la estimación de daño producido por las diversas cargas por eje es muy complejo, y que la única fuente confiable de información para afrontar este problema es el "AASHTO ROAD TEST", de cuyos resultados se derivaron una serie de factores de equivalencia, adoptados por el INV, la carga tomada como patrón es un eje sencillo de 8.2 toneladas, cuya elección se hizo por dos motivos principales: (Montejo, 2006)

- Porque el valor de esta carga era similar a la de 8.0 toneladas propuesta en la convención de Génova en 1949
- Porque dicha carga por eje fue normalizada como carga para diseño de pavimentos flexibles, por muchos países y entidades.

**12.3. Determinación del tránsito existente.** La información necesaria para cuantificar el tránsito existente de una vía se debe recolectar con base en los procedimientos de la ingeniería de Tránsito. La información que se requiere es la siguiente:

- El tránsito promedio diario semanal (TPDS)
- Número, tipo y peso de los ejes de los vehículos pesados

El TPD se halla efectuando un conteo, durante una semana, de todos los vehículos que pasan por la carretera objeto del estudio. Teniendo en cuenta que el tránsito en general presenta variaciones mensuales y estacionales, es necesario hacer una cuidadosa elección de la semana de aforo. El INV efectúa los conteos de tránsito preferencialmente en época de verano. (Montejo, 2006)

El tránsito total registrado se divide por los siete días del conteo obteniéndose el TPDS, el cual debe discriminarse en vehículos livianos y comerciales. Estos últimos son los que realmente se tienen en cuenta para el diseño de un pavimento. En cada tramo de carretera estudiado se indica en un círculo el número de la estación de conteo y una línea

horizontal sobre la cual se encuentra relacionado el tránsito promedio diario semanal (TPDS). Bajo dicha línea se encuentran relacionados los porcentajes de automóviles, buses y camiones respectivamente. (Montejo, 2006)

La determinación del número, tipo y peso de los vehículos comerciales se hace en nuestro medio por medida directa, utilizando básculas para el pesaje de los ejes de todos los vehículos clasificados como comerciales, registrando en cada caso la clase de vehículo y el tipo de eje pesado, ya sea simple, tándem o trídem. (Montejo, 2006)

En la determinación del tránsito existente probable de una vía nueva, es evidente que no puede cuantificarse por medio de conteos directos, razón por la que es necesario recurrir a alguno de los siguientes procedimientos. (Montejo, 2006)

- Realizar un estudio de origen y destino entre los dos sitios que serán unidos por la nueva vía
- Adoptar los datos de tránsito de otra vía situada en una zona de características similares
- Utilizar los datos de tránsito de otra vía alterna a la que se desea construir

**12.4. Cálculo del tránsito durante el período de diseño.** Un pavimento debe ser diseñado para soportar el tránsito inicial y aquel que pase durante su vida de servicio. Sin embargo, es necesario reconocer que no es fácil calcular tales cargas, por cuanto en el tránsito futuro intervienen factores muy complejos, dado que es muy difícil predecir los cambios en la economía regional general, en la población y en el uso de la tierra a lo largo de la vía durante el periodo de diseño. Pero, el volumen de tránsito futuro de una vía nacional en servicio, que se encuentre en afirmado, puede ser estimado con razonable exactitud a partir de datos sobre el tránsito existente y mediante un análisis estadístico de su evolución histórica. (Montejo, 2006)

El estimativo en mención requiere del conocimiento del valor de la tasa anual de crecimiento del tránsito, el cual es indispensable para efectuar proyecciones a mediano y largo plazo, necesarias para los estudios de pavimento, tanto en la etapa de diseño como de funcionamiento. Para el cálculo de dicho parámetro es necesario contar con una serie cronológica de datos como la que presenta anualmente la Subdirección de Apoyo Técnico del INV en su publicación denominada *Volúmenes de tránsito*. A partir de dichos datos y mediante la aplicación de modelos de regresión es posible ajustar las series históricas del tránsito con el uso de los modelos lineal y exponencial, pues son los que más se

ajustan a estas series históricas. Eligiendo para el análisis el modelo que presente la mejor correlación de los valores de tránsito. (Montejo, 2006)

El tránsito inicial de vehículos comerciales utilizado para el diseño de un pavimento será la suma de: el normalmente existente, el atraído y el generado. Además, es conveniente tener en cuenta que para efectos del dimensionamiento de un pavimento interesa solamente el tránsito que pasa por un carril, al que se denomina carril de diseño, que es aquel por el cual se espera que circulen el mayor volumen de vehículos pesados, y para su determinación deben utilizarse los siguientes valores: (Montejo, 2006)

**Cuadro 3: Porcentaje de vehículos pesados por carril de diseño**

<b>Número de carriles</b>	<b>Porcentaje de vehículos pesados en el carril de diseño (%)</b>
2	50
4	45
6+	40

Fuente: Montejo, 2006

El tránsito así obtenido habrá de proyectarse hacia el futuro una vez establecido el período de diseño y determinada la tasa anual de crecimiento de tránsito. Tradicionalmente en Colombia las proyecciones del tránsito se han efectuado utilizando el modelo exponencial expresado mediante las siguientes fórmulas de interés: (Montejo, 2006)

$$T_n = T_i \times (1 + r)^n$$

Donde:

$T_n$  = Tránsito en cualquier año  $n$ .

$T_i$  = Tránsito en el año cero (inicial).

$r$  = Tasa de crecimiento anual de tránsito.

A partir de esta fórmula es posible por integración obtener el tránsito acumulado durante los  $n$  años del período de diseño, mediante la siguiente ecuación:

$$T_{acumulado} = T_i \times \frac{(1 + r)^n - 1}{Ln(1 + r)}$$

### 13. Determinación de la longitud de la losa

Tomando en cuenta la ecuación 4.12 se puede calcular el valor de C para unas condiciones de gradiente térmico  $\Delta t$ , coeficiente expansión del concreto  $\alpha_t$ , Módulo de elasticidad del concreto E y de esfuerzo admisible en la losa  $\sigma$ . (Román, 2008)

El esfuerzo admisible se puede fijar para una condición alta de repeticiones de carga, por ejemplo de más de 500,000 repeticiones, valor en el cual el esfuerzo no debe ser mayor que la mitad del Módulo de rotura de concreto. (Román, 2008)

$$R = 6.52 * 10^{11} e^{-28.05(\frac{\sigma}{Mr})} \quad (4.14)$$

En esta ecuación, R es el número de repeticiones admisibles,  $\sigma$  el esfuerzo generado en la losa y Mr el Módulo de rotura del concreto.

**13.1. Ecuación de Weestergard.** La ecuación desarrollada por Weestergard y en la que se basó Bradbury para desarrollar el ábaco con el que se determina C es la siguiente:

$$\sigma_x = \sigma_0 \left[ 1 - \frac{2\cos\lambda\cosh\lambda}{\sen 2\lambda\sinh\lambda} ((\tan\lambda + \tanh\lambda)\cos\frac{y}{\iota\sqrt{2}}\cosh\frac{y}{\iota\sqrt{2}} + (\tan\lambda - \tanh\lambda))\sen\frac{y}{\iota\sqrt{2s}}\sinh\frac{y}{\iota\sqrt{2}} \right] \quad (4.16)$$

Donde:

$$\iota = \lambda = \frac{b}{\sqrt[4]{8}}$$

b= ancho de la losa

**13.2. Definición del tamaño de las losas.** En general para el análisis de la dimensión e las losas, anteriormente se proponía la construcción de losas de forma geométrica rectangular y cuadradas, donde la dimensión usualmente utilizada oscilaba entre 650cm y 450 cm, pero con las nuevas propuestas y software de evaluación, se han reducido considerablemente las dimensiones de las mismas. (Román, 2008)

El Módulo de Rotura y la resistencia a la compresión del Concreto Hidráulico a los 28 días ( $f'c$ ), es uno de los principales factores utilizados en el diseño y evaluación con elementos finitos. El cálculo ideal es el siguiente: (Román, 2008)

$$Mr = \frac{PL}{bd^2} \left( \frac{kg}{cm^2} \right) \quad (4.18)$$

Donde:

P = Carga de Rotura

L = Distancia entre apoyos

b = ancho de la viga

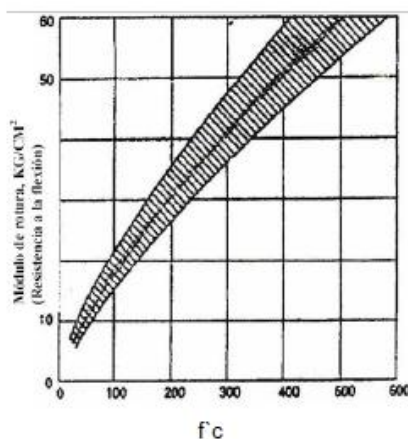
d = altura o canto de la viga

Sugiriendo el siguiente intervalo:  $0.10f'c \leq Mr \leq 0.17f'c$

En pavimentos de Concreto Hidráulico se exige:

$Mr \geq 45.7 \text{ kg/cm}^2$  pudiendo aceptarse  $f'c \geq 210 \text{ kg/cm}^2$  para tráfico ligero, pudiendo auxiliarse también con el monograma de la Ilustración 20.

#### Ilustración 20 Monograma para determinación de módulo de ruptura



Fuente: (Román, 2008)

Se han unificado criterios de dos métodos existentes para la dimensión de las losas, así como el espesor de las mismas, estos son el método PCA y el método AASHTO, siendo sus características las siguientes: (Román, 2008)

## 14. Método de diseño PCA

Este método se basa en dos criterios específicos, uno relativo a la resistencia a la fatiga del concreto y el otro a la erosión de la base. En el primer caso, se supone que la carga máxima se aplica en medio de la losa justo sobre la junta longitudinal que da la

tensión máxima con la losa. En el segundo caso, se supone que la carga máxima se aplica en una esquina de la losa para generar deflexión máxima de la losa. (Román, 2008)

Cuando se usa este método de diseño, hay que conocer cuatro parámetros fundamentales:

- El Módulo de ruptura del concreto
- El Módulo de reacción del suelo de fundación
- El período de diseño
- Características del tráfico

## **15. Método de diseño AASHTO**

El método de diseño AASHTO fue desarrollado en los Estados Unidos de América basándose en pruebas realizadas a escala real en Illinois durante un período de dos años. Estas dieron como resultado el desarrollo de gráficos, tablas y fórmulas que presentan una relación entre desgaste y serviciabilidad de las distintas secciones ensayadas.

En la edición de 1993, AASHTO incorporó métodos mecanicistas para adaptar ciertos parámetros a condiciones distintas a las presentadas previamente.

El método AASHTO introduce el concepto de serviciabilidad al diseño de pavimentos como un parámetro para asegurar la capacidad del pavimento para mantener una superficie transitable y lisa para el usuario.

El método de diseño bajo la norma AASHTO – Guía para diseño de pavimentos toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Desempeño del pavimento
- Tráfico
- Suelo
- Materiales de construcción
- Ambiente
- Drenaje
- Confianza
- Costo de ciclo de vida
- Diseño de hombro



La guía describe y provee el método específico que puede ser utilizado para el diseño alternativo o recomendaciones para rehabilitación para estructuras de pavimentos, existen varias consideraciones que determinan los coeficientes de drenaje, factores ambientales y serviciabilidad final

La guía pretende proveer los procedimientos para evaluar los materiales y el ambiente, sin embargo, en casos en que la guía tenga una variación por experiencia documentada, se tiene que considerar el criterio de la experiencia. El diseñador necesitará concretar algunos aspectos del diseño en los que no siempre se presentan en la guía.

Este trabajo se centra en pavimentos rígidos por lo que sólo se mencionará teoría acerca del mismo.

Para el diseño de pavimentos rígidos, la norma AASHTO presenta la siguiente fórmula:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32$$

$$\times p_t) \times \log_{10} \left[ \frac{s_c \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[ D^{0.75} \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}} \right]} \right]$$

(Ec. 1.2.2, AASHTO, 1993)

Donde:

$W_{18}$ = número previsto de 18 kips, equivalente a una carga de un eje simple

$Z_R$ = desviación estándar normal

$S_o$ = Error estándar del tráfico previsto y el desempeño previsto.

$D$ = espesor de losa

$\Delta PSI$ = Diferencia entre la serviciabilidad inicial y la serviciabilidad terminal.

$s_c$ = Módulo de ruptura del cemento portland utilizado en ese proyecto.

$J$ = Coeficiente de transferencia de carga utilizado para ajustar las características de transferencia de carga del diseño en específico.

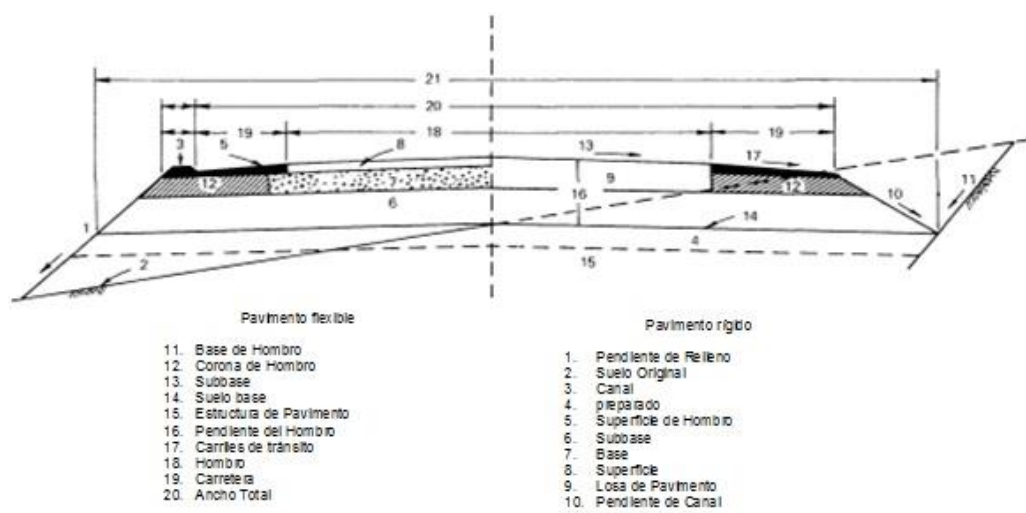
$C_d$ = Coeficiente de drenaje.

$E_c$ = Módulo de elasticidad del cemento portland

$k$ = Módulo de reacción del subgrado.

Los nomogramas presentados más adelante presenta la solución para el espesor de los en pavimentos rígidos. Es importante mencionar nuevamente que la fórmula presentada para pavimentos rígidos es derivada de información empírica. La solución de esta fórmula representa el tráfico que puede ser transportado en entradas específicas. En otras palabras existe una probabilidad de 50% que la serviciabilidad terminal puede ser prevista. En orden para disminuir el riesgo de una deterioración prematura debajo de los niveles de serviciabilidad aceptados, un factor de confianza es incluido en el proceso de diseño.

**Ilustración 21: Sección típica de pavimentos flexibles y rígidos según norma AASHTO**



**15.1. Definición del tamaño de las losas.** El desempeño estructural de pavimento se ve afectado por condiciones físicas como la ocurrencia de fisuras, fallas, agrietamiento y otras condiciones en las que en condiciones adversas afectan la capacidad de carga de la estructura del pavimento.

La funcionalidad de desempeño de un pavimento concierne al nivel de servicio que presenta el pavimento al usuario. Esto quiere decir que la comodidad y la calidad del

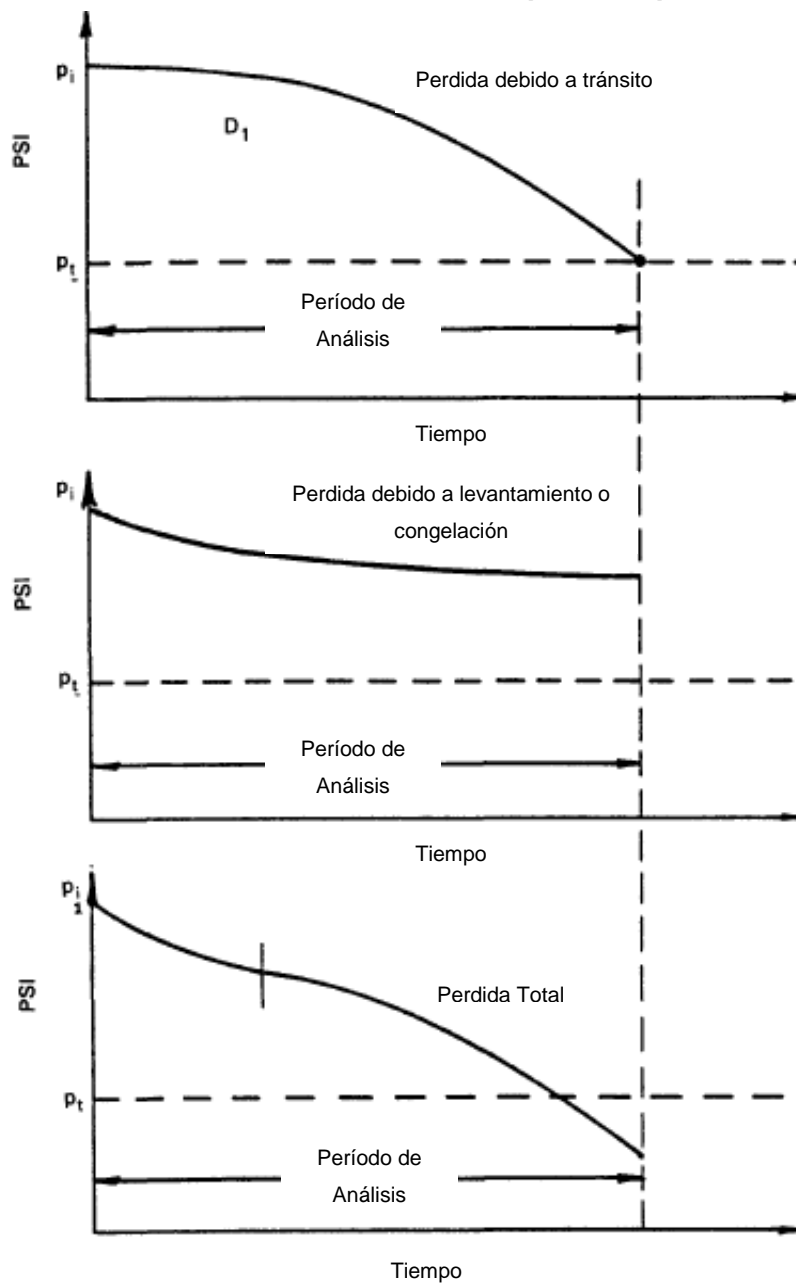
tránsito sobre la carpeta de rodadura define el concepto de serviciabilidad–desempeño. Este concepto fue desarrollado en 1957, y desde entonces es usa para medir el desempeño de las ecuaciones de diseño utilizadas en la norma.

La serviciabilidad – desempeño está basada en cinco asunciones.

- Las carreteras son cómodas y de conveniencia para los usuarios.
- Calidad de tránsito es cuestión de una respuesta subjetiva o la opinión del usuario.
- Serviciabilidad puede ser expresada por medio de calificaciones por los usuarios
- Existen características físicas del pavimento que sirven de evaluación objetiva y pueden ser puestas a prueba a una evaluación subjetiva.
- Desempeño puede ser representada como historial de serviciabilidad del pavimento.

La serviciabilidad es expresada en términos de un índice de serviciabilidad (PSI). Este es obtenido por medio de mediciones de aspereza y fatiga, agrietamiento y bacheo en un tiempo en particular durante su tiempo de vida. La aspereza es un factor dominante en la estimación del índice de serviciabilidad. La medición de este aspecto es importante para el monitoreo del desempeño del pavimento.

**Ilustración 22: Tendencia del desempeño del pavimento**



La escala de PSI entra en el rango entre 0 a 5, donde 5 es el valor más alto en cuanto a serviciabilidad. Para el diseño es necesario considerar ambos índices, índice de serviciabilidad inicial e índice de serviciabilidad terminal o final.

El índice de serviciabilidad inicial es estimado por el diseñador, este valor es el índice en el que funcionará el pavimento inmediatamente después de construido. Para pavimentos rígidos se considera 4.5 como índice de serviciabilidad inicial. (AASHTO, 1993). Para el índice de serviciabilidad final recomienda utilizar un valor de 2.0 e inclusive se puede utilizar 1.5 tomando en cuenta las consideraciones económicas del proyecto.

Este índice se ve afectado por varios factores, el clima, la edad, el medio ambiente y sobre todo el tráfico. Para la fórmula del diseño de pavimentos rígidos la diferencia entre la serviciabilidad del pavimento se obtiene considerando todas la perdida de serviciabilidad a partir del índice de serviciabilidad inicial.

**15.2. Tráfico.** La información acerca del tráfico es requerida por las ecuaciones de diseño utilizadas en la metodología AASHTO en la cual incluye cargas axiales, configuración de ejes y varias aplicaciones.

El resultado de las pruebas empíricas realizadas mostró que el daño generado por el paso de un eje de cualquier masa, nombrado carga en el documento, puede ser representado como un número de ejes simples equivalentes a 18 kips también llamados ESAL's por sus siglas en ingles (Equivalent Single Axle Loads). La determinación del ESAL de diseño es de suma importancia para el diseño de pavimentos.

**15.2.1. Evaluación del tráfico.** El procedimiento para la conversión del flujo del tráfico mixto de distintos ejes y configuraciones de ejes en un tráfico de diseño es mediante la conversión de dichos ejes en ejes simples de 18 kips y tomar la sumatoria en un periodo de tiempo de diseño.

Existen cuatro consideraciones claves que influyen de manera precisa la estimación del tráfico y que afectan de manera significativa el ciclo de vida del pavimento: (1) la exactitud del valor de equivalencia de la carga utilizada para estimar el daño relativo inducido por los ejes de carga de las distintas masas y configuraciones, (2) la precisión de la información del volumen y peso del tráfico presentado en las proyecciones de carga actuales, (3) la predicción de los ESAL's sobre el periodo de diseño y (4) la interacción de la edad y el tráfico a manera que afecta la serviciabilidad del pavimento.

El tráfico puede ser considerado como constante o incrementar lineal o exponencialmente dependiendo de la clasificación de la carretera a diseñar. Por ejemplo, carreteras consideradas como arterías son representadas con un crecimiento exponencial, mientras que otras, como carreteras colectoras presenta un crecimiento

lineal y carreteras residenciales urbanas no presentan un incremento, por lo que son presentadas con un valor constante. La norma recomienda que el diseñador siempre considere un crecimiento de tráfico basado en información de crecimiento o desarrollo del proyecto.

En resumen, es necesario que exista información fiable concierne al acumulado de ESAL's debido a la importancia para la determinación de la estructura del pavimento. Es necesario mantener un monitoreo al tráfico para comparar las cargas de tráfico previstas con las actuales sobre los tramos de carretera diseñados, lo cual ayuda a controlar la serviciabilidad del pavimento como a producir información fiable para futuros diseños.

**15.2.2. Suelo base.** La propiedad definitiva del material utilizado como suelo base para el diseño de pavimentos es el módulo de resiliencia ( $M_R$ ). Este factor debe ser convertido en el módulo de reacción del subgrado (Valor  $k$ ) para el diseño de pavimentos rígidos. El cálculo directo de la reacción del subgrado puede ser llevado a cabo en caso que dicho procedimiento será considerado preferible para el encargado del diseño.

El módulo de resiliencia fue escogido para remplazar el valor soporte del suelo utilizado en ediciones previas debido a las siguientes razones:

- Éste indica un material básico que puede ser utilizado para un análisis de sistema multicapa mecanicista para predecir la aspereza, las fracturas, las fallas, etc.
- Métodos para la determinación del módulo de resiliencia se describe en el AASHTO Test Method T274.
- Éste ha sido reconocido internacionalmente como el método para la caracterización de los materiales para el uso de diseño y evaluación de pavimentos
- Existen varias técnicas para la estimación de las propiedades del módulo de resiliencia in situ con pruebas no destructivas.

Existen varios factores que permiten que el  $M_R$  sea estimado mediante el uso del valor CBR del suelo, valor  $R$ . el desarrollo de dichos factores se basa en correlaciones.

La relación propuesta por Heukelom y Klomp respecto al módulo de resiliencia y el valor CBR utilizando compactación dinámica y el módulo del suelo in situ es la siguiente:

$$M_R \text{ (psi)} = 1500 \times \text{CBR} \quad (\text{Ec. 1.5.1 AASHTO, 1993})$$

La información de la cual esta correlación fue desarrollada se encuentra en el rango entre 750 a 3,000 veces el CBR. Esta relación ha sido utilizada extensamente por agencias de diseño e investigadores y ha sido considerada como razonable para suelos granulares finos con un CBR de 10 o menos.

Para la colocación de suelo base es importante para el desempeño del pavimento. En orden de mejorar la confiabilidad general del diseño, es necesario considerar los requerimientos de compactación del suelo. Para situaciones comunes, no es necesario especificar las condiciones de compactación. Sin embargo, existen circunstancias en las cuales el diseñador debe requerir modificaciones a las especificaciones:

- El criterio básico de la compactación del suelo incluye una densidad apropiada. El procedimiento de inspección debe ser el adecuado para asegurarse que el valor de la densidad solicitada se está obteniendo durante la construcción. De existir condiciones que no permitan obtener la compactación solicitada, el diseñador debe ajustar el valor de  $M_R$ .
- El suelo es excesivamente expansivo o la resiliencia debe recibir una consideración especial. Una solución es cubrir tal material con una capa de selecto lo suficientemente profunda para modificar los efectos expansivos del suelo o la resiliencia. Suelos expansivos pueden ser mejorados mediante la compactación con agua mediante la aplicación de 1 ó 2 por ciento arriba de lo óptimo. En casos donde exista una restricción económica, se puede aplicar cemento o utilizar membrana impermeables para estabilizar el contenido de agua en el suelo.
- En áreas susceptibles a congelamiento, el suelo puede ser removido y remplazado con material selecto y no susceptible. Cuando exista el caso donde realizar dicho procedimiento represente un gasto extenso, se debe cubrir con una capa de material lo suficientemente profunda para modificar los efectos del material susceptible.
- Problemas con suelos altamente orgánicos se presentan debido a su extrema compresibilidad natural y asentarse en depósitos no uniformes en propiedades o

- profundidades. Problemas con estratos de gran profundidad han sido aliviados mediante la sobrecarga de terraplenes para preconsolidación, incluso con provisiones especiales de remoción rápida de agua para acelerar la consolidación.
- Provisiones especiales para tipos de suelos inusualmente variables en condiciones que pueden incluir escarificado y recompactación, tratamiento de la capa superior del suelo base con una mezcla adecuada, utilizando una profundidad apreciable para el suelo base, sobre excavación de secciones y colocando material selecto para rellenar las áreas o el ajuste del espesor de la subbase en la transición de un suelo con otro.
  - Aunque en el proceso de diseño tenga contemplado la realización de drenajes superficiales, existen casos en los que se requiere atención especial para el diseño y construcción de un sistema de drenaje. Drenajes son importantes cuando existen grandes flujos de agua, donde existen condiciones de congelamiento o donde los suelos son susceptibles a expansiones o pérdidas de resistencia con el incremento de su contenido de agua. Drenajes debajo de la superficie especiales pueden incluir la provisión de una capa adicional de material permeable que permita la filtración debajo del pavimento. Drenajes superficiales especiales pueden requerir sistema de evacuación como cunetas o cuencas de absorción para la evacuación del agua.
  - Ciertos tipos de suelo base presentan dificultades en el proceso constructivo. Estos primeramente son suelos no cohesivos, en los que fácilmente son desplazados por el equipo utilizado para la construcción del pavimento. Estos no pueden ser compactados a grandes cantidades de agua debido al desplazamiento bajo el equipo utilizado y estos requieren de largos periodos de tiempo para secar. Las soluciones para este tipo de suelos son (1) mezcla con material granular, (2) añadir aditivos a arenas para proveer cohesión, (3) añadir aditivos adecuados a las arcillas para acelerar el secado o incrementar su resistencia al corte y (4) cubrir con una capa de material selecto para que actúe como plataforma de trabajo para la construcción del pavimento.
  - El valor del módulo de resiliencia para diseño de estructuras de pavimentos debe estar basado en las propiedades de una capa de suelo base compactado. En algunos casos puede ser necesario incluir consideraciones para suelos no compactados en situaciones donde los materiales del lugar tengan propiedades débiles. Es importante recalcar que el diseño de pavimentos bajo la norma toma



en cuenta el valor promedio  $M_R$ . Aunque la confiabilidad considera una variación de varios factores asociados con el diseño, este es tratado mediante el ajuste del tráfico de diseño. El valor del tráfico de diseño es esperado que sea igual a un ESAL de 18 kips durante el período de diseño. El diseñador no debe elegir un valor  $M_R$  de diseño bajo o de criterio conservador ya que esto introducirá un diseño conservador mayor al pretendido con el diseño.

**15.2.3. Materiales de construcción.** Los materiales para la construcción de una estructura de pavimento se dividen en dos: (1) materiales para pavimentos flexibles y (2) materiales para pavimentos rígidos. Debido al objetivo de este trabajo, se enfocará únicamente en los materiales para pavimentos rígidos.

Como es representado en la Ilustración 7, los pavimentos rígidos se componen generalmente de un suelo base, una subbase y una losa de pavimentación. La subbase puede ser estabilizada o no. En casos en donde el volumen de tráfico sea bajo, la capa de la subbase puede no ser necesaria entre la capa de suelo base y la losa de pavimentación.

La capa de drenaje puede ser incluida en los pavimentos rígidos al igual en que los pavimentos flexibles.

**15.2.3.1. Subbase.** La subbase de un pavimento rígido consiste en una o más capas de suelo granular o material estabilizado colocado entre el subgrado y la losa rígida con los siguientes propósitos:

- Proveer un soporte estable, uniforme y permanente.
- Incrementar el módulo de reacción del subgrado ( $k$ )
- Minimizar los efectos dañinos de la acción de congelado
- Prevenir el socavamiento del material fino en juntas, fisuras o vértices de la losa rígida
- Proveer una plataforma firme de trabajo para los equipos en la etapa constructiva

Sí el suelo base tienen una calidad igual a la subbase, o en caso donde el tráfico sea menor a 1, 000,000 ESAL's de 18 kips, una capa adicional de subbase puede no ser requerida.

Experiencia local respecto a los materiales puede ser utilizado para el criterio de selección de material de subbase. La prevención de acumulaciones de agua en el suelo base o subbases es esencial si se desea obtener un desempeño satisfactorio de la estructura del pavimento.

Problemas de erosión del material de la subbase debajo del pavimento en las juntas y al borde del pavimento han llevado a que el diseñador utilice un concreto flexible o una capa porosa de subbase. Mientras que el uso de una capa porosa es viable hay que considerar que el criterio de diseño para dicho material se encuentra todavía en proceso de desarrollo por lo que el diseñador deberá de investigar para poder utilizarlo de manera adecuada.

**15.2.3.2. Losa de pavimentación.** El material básico utilizado para la construcción de una losa de pavimentación es Cemento Portland, refuerzo de acero, dispositivos de transferencia de carga y material sellante en las juntas.

**15.2.3.3. Acero de refuerzo.** El acero de refuerzo utilizado en una losa debe tener una deformación adecuada que permita la combinación mecánica y desarrollo de esfuerzos en el acero.

#### **15.2.3.4. Materiales sellantes para juntas.**

15.2.3.4.1. Sellantes líquidos, estos incluyen a una amplia variedad de materiales incluyendo asfalto, caucho a alta temperatura, compuestos elastómeros, silicón y polímeros. Estos materiales son aplicados en su forma líquida y permiten la adaptación adecuada dentro de la junta. Al utilizar sellantes líquidos, se debe tener el cuidado de dar la forma apropiada al molde que servirá como recipiente para obtener el resultado requerido.

15.2.3.4.2. Sellos elastómeros prefabricados. Sellos de neopreno con malla interna que genera una fuerza contra la superficie de la junta.

15.2.3.4.3. Corcho expansivo para relleno de juntas, Existen dos tipos de rellenos de corcho, (a) relleno de junta de expansión estándar, (b) corcho tipo auto expansivo.

**15.2.3.5. Juntas longitudinales.** Las juntas longitudinales son necesarias para formar agrietamientos en ubicaciones deseadas. Estas deben ser acuñaadas, ensambladas, de juntas empalmadas o en combinación, debido a esto, las juntas longitudinales deben ser sisadas o formadas con un mínimo de  $\frac{1}{4}$  del espesor de

losa propuesta. Es importante realizar el sisado de estas juntas en un tiempo apropiado para que el agrietamiento se desarrolle en la ubicación deseada. El espaciamiento máximo recomendado entre juntas longitudinales es 16 pies (4.87 metros).

**15.2.3.6. Dispositivos de transferencia de carga.** Los dispositivos mecánicos de transferencia de carga para juntas transversales deben cumplir con los siguientes atributos:

- Deben ser de diseño simple, de instalación práctica, y permitir un confinamiento completo en concreto.
- Deben de distribuir los esfuerzos de carga de manera apropiada sin generar una sobrecarga en el concreto cuando entre en contacto con el dispositivo.
- Deben de ofrecer una restricción al movimiento longitudinal en la junta.
- Deben ser mecánicamente estables bajo la carga de una llanta y con la frecuencia a la cual serán sometidos.
- Deben tener resistencia a la corrosión cuando estén ubicados en lugares donde geográficamente puedan ser afectados por la corrosión.

AASHTO propone un dispositivo de transferencia de carga por medio del AASHTO Designation M 31, el cual consiste de una clavija de acero Grado 60 o mayor dependiendo de los requerimientos específicos de diseño en cuanto a diámetro, longitud o espaciamiento.

Las consideraciones presentadas pueden ser presentadas mediante la omisión de dispositivos de transferencia en las juntas del plano débil de la losa de concreto.

**15.2.3.7. Barras de unión.** Las barras de unión, ya sean las barras de deformación o conectoras, son diseñadas para mantener las caras de la losa colindante en un contacto firme. Las barras de unión son diseñadas para mantener un máximo de fuerzas tensoras requeridas para superar el arrastre del subgrado. Estas no están diseñadas para funcionar como dispositivos de transferencia de carga.

Se deben tomar consideraciones de utilizar materiales resistentes a la corrosión o revestimiento especial para las barras conectoras y clavijas donde exista la necesidad de colocar sales sobre la superficie del pavimento.

**15.2.4. Hombros.** Los hombros eran construidos en el pasado utilizando una base flexible con una capa asfáltica. La desigualdad entre el carril central y el hombro generaba problemas en las juntas al momento de ser sometidas a los esfuerzos

generados por las llantas. Investigaciones han probado que mediante el fortalecimiento el hombro y adicionando sellantes especiales han ayudado a aliviar este problema. También se han comprobado que utilizando concreto armado o una ampliación de 3 pies de concreto. Reduciendo el espesor de losa cerca de la junta ha resultado ser otra solución al problema del hombro con la junta.

**15.2.5. Ambiente.** Los dos factores ambientales principales a considerar en el diseño de un pavimento son temperatura y precipitación.

Temperatura afectará (1) arrastre de las propiedades del concreto asfáltico, (2) esfuerzos inducidos térmicos, (3) contracción y expansión del concreto y (4) congelación y descongelación del suelo base o subrasante. El diferencial en temperatura y humedad entre la superficie y el fondo de la losa de concreto en pavimentos de concreto articulados crea un hinchamiento en la superficie y pandeo en el fondo que puede resultar en un bombeo y una deterioración estructural del pavimento.

La precipitación, de penetrar en la estructura del pavimento o la subrasante, puede influenciar en las propiedades de los propios materiales. La guía presenta una solución a este problema en cuanto a precipitación con requisitos de drenaje en estas estructuras.

Congelación y descongelación de la subrasante genera un gran daño al pavimento causando que este se debilite y que tenga una reducción en la serviciabilidad del mismo. No se profundizará en este tema, debido a que Guatemala no presenta estas condiciones climáticas extremas.

Los factores climáticos de temperatura del aire, radiación solar recibida en la superficie, viento y precipitación son los parámetros mayores que afectan con severidad en un área geográfica específica.

La temperatura del lugar va a afectar el comportamiento del subgrado en tres maneras; (1) una baja temperatura causará fracturas, (2) agrietamiento por fatiga y (3) ruptura. Esto afectará directamente al índice de serviciabilidad lo cual incide en el costo de mantenimiento.

**15.2.6. Drenaje.** Drenar el agua de los pavimentos es una consideración importante dentro del diseño de una estructura de este tipo, sin embargo, los métodos actuales de diseño de drenaje han presentado resultados no favorables. El exceso de agua junto con el aumento en la carga vehicular generalmente causa un agotamiento en la estructura del pavimento.

El agua entra en la estructura del pavimento de muchas maneras como grietas, juntas, filtración propia del pavimento, como agua subterránea, un alto nivel freático de la zona o por la ubicación de un nacimiento de agua. Cuando existe agua atrapada dentro del pavimento es necesario incluir:

- Reducir al resistencia de materiales granulares.
- Reducir la resistencia de la subrasante
- Deterioración del hombro debido a bombeo subsecuente en grietas y juntas.
- La expulsión de agregados finos a través de las grietas o juntas.

**15.2.6.1. Consideraciones generales de diseño.** Es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones para tratar la amenaza de agua dentro de la estructura del pavimento.

- No permitir la penetración del agua
- Proveer un drene capaz de evacuar el agua eficazmente
- Construir un pavimento lo suficientemente resistente para soportar las cargas generadas por el agua.

Cuando es posible considerar todas las fuentes de agua, la protección del pavimento de la penetración del agua requiere la intercepción del agua subterránea como también sellar efectivamente la superficie del pavimento. Se ha considerado mayor atención a interceptar el agua subterránea. Es por esto que el diseñador tiene que tener en cuenta tres tipos de sistemas de drenaje; (1) drenaje superficial, (2) drenaje subterráneo y (3) drenaje estructural.

**15.2.7. Diseño de drenaje superficial.** El criterio de diseño de un sistema de drenaje superficial debe contener lo siguiente:

- Criterio para el tiempo de drenaje de la base o subbase iniciando con la condición de inundación y continuando a alcanzar un nivel aceptable de agua
- Se debe evitar la saturación, considerando diseñar una evacuación mayor o igual que el ingreso de agua al sistema.

La evacuación de agua libre puede ser obtenida mediante el drenado vertical hacia la subbase o lateral a una capa de drenaje con sistema de colectores.

## **16. Requerimientos para el diseño de pavimentos rígidos según norma AASHTO 1993.**

En este capítulo se discutirán los requerimientos necesarios al momento de diseñar un pavimento rígido. A continuación se presenta una tabla que identifica todos los requerimientos necesarios para varios tipos de estructuras de pavimentos. Ésta también indica los diseños estructurales específicos para cada tipo.

**Cuadro 4: Tabla de determinación de requisitos para el diseño de pavimentos bajo la norma AASHTO**

Description	Flexible		Rigid		Aggr. Surf.
	AC	ST	JCP/JRCP	CRCP	
<b>2 1 DESIGN VARIABLES</b>					
2 1 1 Time Constraints					
Performance Period	1	1	1	1	1
Analysis Period	1	1	1	1	1
2 1 2 Traffic	1	1	1	1	1
2 1 3 Reliability	1	1	1	1	
2 1 4 Environmental Impacts					
Roadbed Swelling	2	2	2	2	
Frost Heave	2	2	2	2	
<b>2 2 PERFORMANCE CRITERIA</b>					
2 2 1 Serviceability	1	1	1	1	1
2 2 2 Allowable Rutting					1
2 2 3 Aggregate Loss					1
<b>2 3 MATERIAL PROPERTIES FOR STRUCTURAL DESIGN</b>					
2 3 1 Effective Roadbed Soil Resilient Modulus	1	1			1
2 3 2 Effective Modulus of Subgrade Reaction			1	1	
2 3 3 Pavement Layer Materials Characterization	2	2	1	1	1
2 3 4 PCC Modulus of Rupture			1	1	
2 3 5 Layer Coefficients	1	1			
<b>2 4 PAVEMENT STRUCTURAL CHARACTERISTICS</b>					
2 4 1 Drainage					
Flexible Pavements	1	1			
Rigid Pavements		1	1		
2 4 2 Load Transfer					
Jointed Pavements			1		
Continuous Pavements				1	
Tied Shoulders or Widened Outside Lanes			2	2	
2 4 3 Loss of Support			1	1	
<b>2 5 REINFORCEMENT VARIABLES</b>					
2 5 1 Jointed Pavements					
Slab Length			1		
Working Stress			1		
Friction Factor			1		
2 5 2 Continuous Pavements					
Concrete Tensile Strength				1	
Concrete Shrinkage				1	
Concrete Thermal Coefficient				1	
Bar Diameter				1	
Steel Thermal Coefficient				1	
Design Temperature Drop				1	
Friction Factor				1	
AC—Asphalt Concrete	CRCP—Continuously Reinforced Concrete Pavement				
ST—Surface Treatment	1—Design input variable that must be determined				
JCP—Jointed Concrete Pavement	2—Design variable that should be considered				
JRCP—Jointed Reinforced Concrete Pavement					

Es necesario aclarar que para esto existen cinco categorías involucradas en el diseño:

**16.1. Variables de Diseño.** Esta categoría se refiere al criterio en que se considera cada tipo de procedimiento de diseño de superficie de carretera presentado por la norma.

**16.2. Criterio de desempeño.** Esta categoría se refiere a las condiciones frontera dentro de las cuales el diseño del pavimento deberá de desarrollarse. Esto se refiere a las serviciabilidad del pavimento.

**16.3. Propiedades de los materiales para el diseño estructural.** Esta categoría se refiere a todas las propiedades del pavimento y la subrasante o suelo base que son necesarias para el diseño y funcionamiento estructural del mismo.

**16.4. Características estructurales.** Esta categoría se refiere a las propiedades físicas de la estructura del pavimento en los cuales se efectuara su desarrollo.

**16.5. Variables de refuerzo.** Esta categoría cubre todos los diseños de los refuerzos necesarios para los diferentes tipos de pavimentos rígidos considerados por la norma.

Es importante mencionar, que debido al desarrollo de un nivel de confiabilidad, es necesario que el usuario tome en consideración valores promedio en lugar de valores estimados conservadores para que cada etapa de diseño requerida.

**16.6. Variables de tiempo.** Se consideran dos variables: período de análisis y vida útil del pavimento. La vida útil se refiere al tiempo transcurrido entre la puesta en operación del camino y el momento en el que el pavimento requiera rehabilitarse, es decir, cuando éste alcanza un grado de serviciabilidad mínimo. El período de análisis se refiere al período de tiempo para el cual va a ser conducido el análisis, es decir, el tiempo que puede ser cubierto por cualquier estrategia de diseño. Para el caso en el que no se considere rehabilitaciones, el período de análisis es igual al período de vida útil; pero sí se considera una planificación por etapas, es decir, una estructura de pavimento seguida por una o más operaciones de rehabilitación, el período de análisis comprende varios períodos de vida útil, el del pavimento y el de los distintos esfuerzos.

Para el efecto de diseño se considera el período de vida útil, mientras que el período de análisis se utiliza para la comparación de alternativas de diseño, es decir, para el análisis económico del proyecto. Los períodos de análisis recomendados son mostrados en la siguiente tabla:



**Cuadro 5: Período de análisis por clasificación de vía**

<b>Clasificación de la vía</b>	<b>Período de análisis (Años)</b>
Urbana de alto volumen de tráfico	30 – 50
Rural de alto volumen de tráfico	20 – 50
Pavimentada de bajo volumen de tráfico	15 – 25
No pavimentada de bajo volumen de tráfico	10 – 20

**16.7. Tránsito.** Los procedimientos para el diseño de carreteras se encuentran basados en una cantidad acumulada esperada de ESAL's durante un periodo de análisis. Para el diseño de un pavimento, el cual se espera que tenga un período de servicio, sin trabajos de rehabilitación, es requerido un total de tráfico sobre un análisis de periodo.

El tránsito previsto es generalmente es la cantidad acumulada de ESAL's esperada que transite sobre la carretera. Por lo tanto, el diseñador debe considerar un factor de tránsito de diseño por dirección y por cantidad de carriles. Dicha relación se presenta en la siguiente fórmula propuesta por la norma.

$$w_{18} = D_D \times D_L \times w_{18}$$

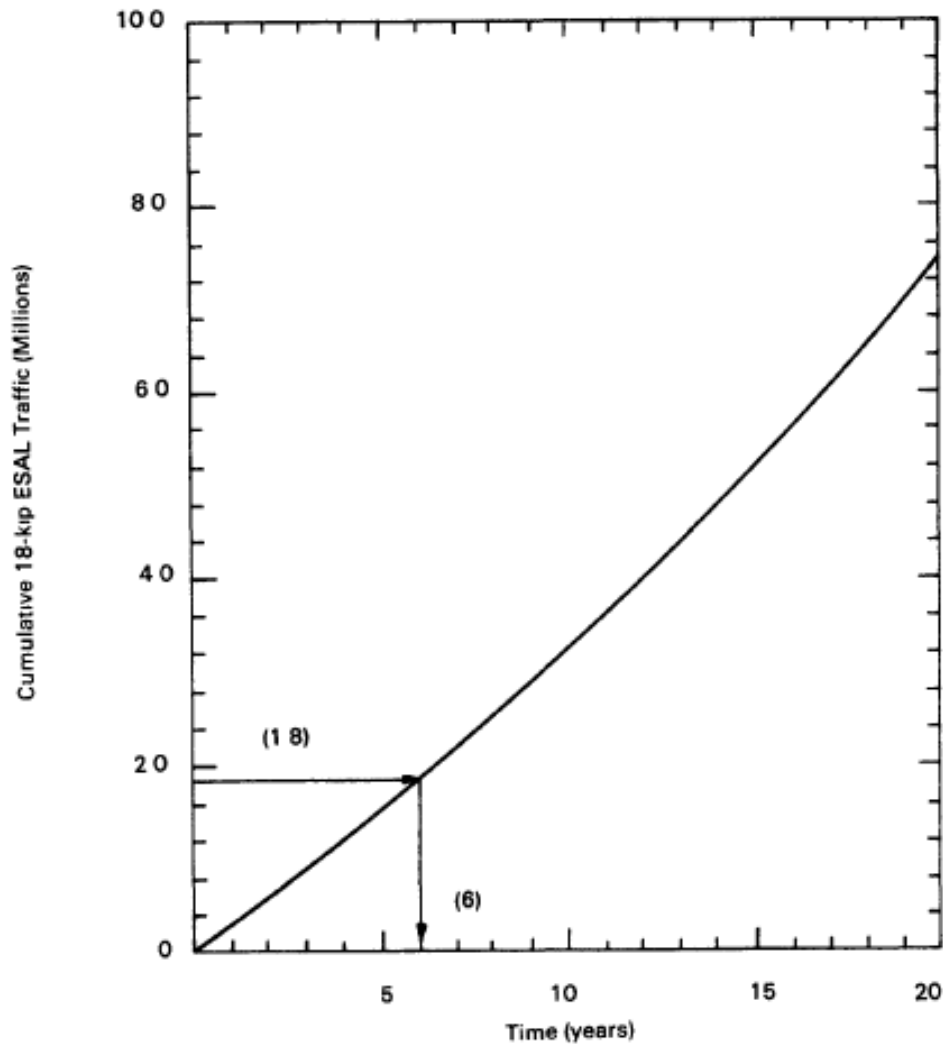
Donde:

$D_D$ = Factor de distribución direccional, este es expresado como una razón que toma en cuenta la distribución de ESAL's en una dirección.

$D_L$ =Factor de distribución de carril, expresado como una razón que toma en cuenta la distribución del tránsito dependiendo de la cantidad de carriles disponibles.

$w_{18}$ = El acumulado en dos direcciones de las unidades de ESAL's previstas para cada sección de la carretera durante el periodo de análisis.

Ilustración 23: Gráfico de relaciones de ESAL's contra tiempo de diseño



La norma AASHTO considera que generalmente el factor  $D_D$  es 0.5, debido a que en la mayoría de las carreteras existe una probabilidad del 50 por ciento de estar sometido bajo esfuerzos de carga. Este factor varía, por lo que también la norma presenta la consideración de que el valor varíe en el rango de 0.3 a 0.7 dependiendo de la dirección en la que se encuentra sometido a carga.

Para el valor de  $D_L$  existe una tabla que puede ser utilizada.

**Cuadro 6: Posibles valores de DI dependiendo de la cantidad de carriles**

Cantidad de carriles	Porcentaje de ESAL's de 18 kips en el carril de diseño
1	100
2	100-80
3	80-60
4	75-50

**16.8. Confiabilidad.** La confiabilidad es la probabilidad de que el pavimento se comporte satisfactoriamente durante su vida útil o período de diseño, resistiendo las condiciones de tráfico y medio ambiente dentro de dicho período de diseño, resistiendo las condiciones de tráfico y medio ambiente dentro de dicho período. Cabe resaltar, que cuando hablamos del comportamiento del pavimento nos referimos a la capacidad estructural y funcional de éste, es decir, a la capacidad de soportar las cargas impuestas por el tránsito, y asimismo de brindar seguridad y confort al usuario durante el período para el cual fue diseñado. Por lo tanto, la confiabilidad está asociada a la aparición de fallas en el pavimento.

La confiabilidad (R) de un pavimento puede definirse en términos de ESAL's como:

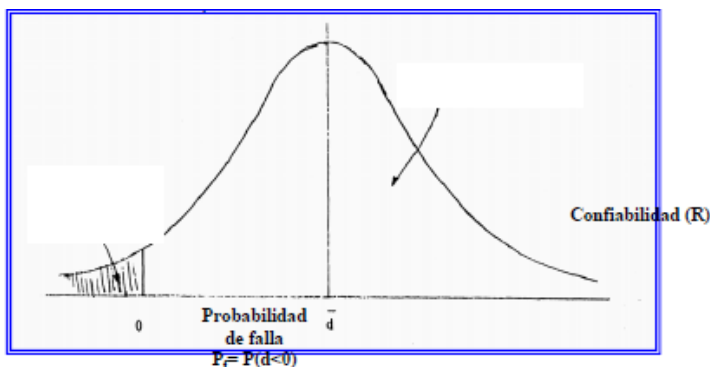
$$R(\%) = 100P(N_t > N_T)$$

Donde:

$N_t$  = Número de ESAL's de 80 kN que llevan al pavimento a su serviciabilidad final.

$N_T$  = Número de ESAL's de 80 kN previstos que actuarán sobre el pavimento en su período de diseño (vida útil)

Como  $N_t$  y  $N_T$  tienen una distribución normal, la diferencia entre ambas, también tendrá una distribución normal, como se muestra en la siguiente figura:

**Ilustración 24: Gráfico de representación de confiabilidad**

Es fácil deducir que si el número de ESAL's previstos es menor que el número de ESAL's reales, la vida útil del pavimento se acortará. Por lo tanto, la variabilidad en el diseño, en la construcción afecta en gran medida la bondad de un diseño, por ejemplo:

- La variación en las propiedades de los materiales a lo largo del pavimento, produce como resultado una variación en el desarrollo de fallas y rugosidades en ese pavimento. Las fallas localizadas en zonas débiles, dan como resultado una disminución en la vida útil del pavimento.
- La variación de la ubicación de los pasadores en las juntas y profundidad de colocación de la armadura da como resultado una variación en el desarrollo de fallas y rugosidades.
- La variación entre los datos de diseño del pavimento y los reales puede significar un aumento o disminución de la vida útil del mismo.

Es por esto que es necesario una variable ( $S_0$  – Desviación Estándar) que acote la variabilidad de todos éstos factores dentro de unos límites permisibles, con el fin de asegurar que la estructura del pavimento se comporte adecuadamente durante su período de diseño.

La desviación estándar es la desviación de la población de valores obtenidos por AASHTO que involucra la variabilidad inherente a los materiales y a su proceso constructivo. En la siguiente tabla se muestran valores para la desviación estándar. AASHTO recomienda al usuario a utilizar un valor para la variación de predicción del comportamiento del pavimento de 0.34 y para la variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito de 0.39

El número de ESAL's de diseño para una confiabilidad dada es:

$$\text{Log}(\text{ESALs diseño}) = \log N_T + Z_R \times S_0$$

Donde  $Z_R$  es el área bajo la curva de distribución, correspondiente a la curva estandarizada. Por ejemplo para  $R= 90\%$ ,  $Z_R = 1.28$

Sea  $N_T= 1 \times 10^6$   $R= 90\%$   $Z_R = 1.28$

$\text{Log (ESAL's diseño)} = \log 1 \times 10^6 + 1.28 \times 0.49 = 6.6272$

$\text{ESAL's diseño} = 4.238 \times 10^6$

Esto significa que el pavimento va a diseñarse para  $4.238 \times 10^6$  ESAL's en lugar de los  $1 \times 10^6$ . La diferencia entre estos valores es un coeficiente de seguridad cuyo propósito es tener en cuenta la incertidumbre y variabilidad en el diseño, la construcción y distribución de cargas.

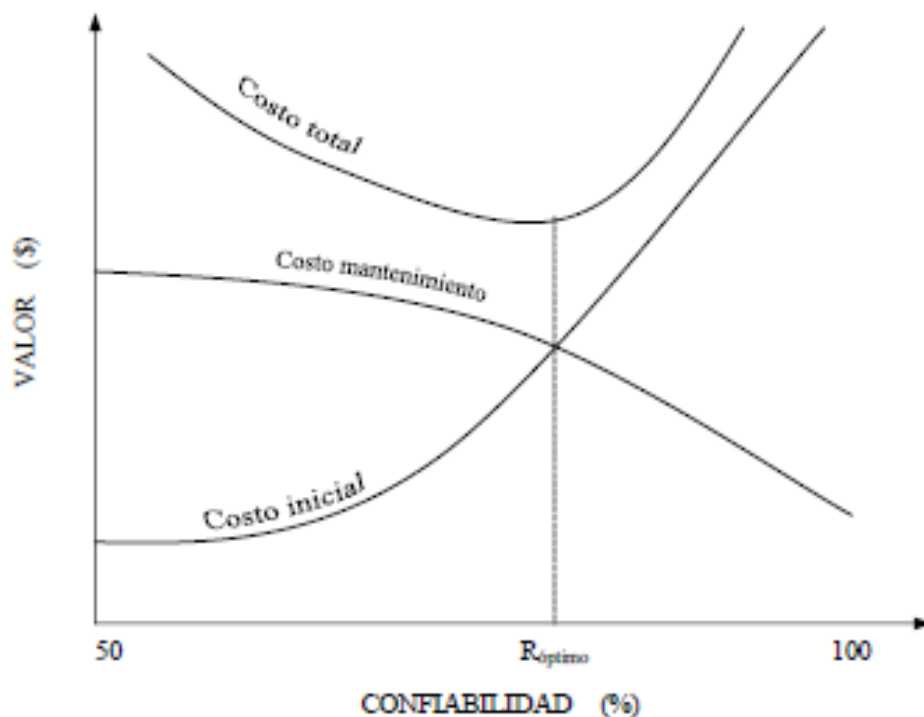
Para la selección del nivel de confiabilidad debe tenerse en cuenta dos aspectos:

**16.8.1. Grado de importancia de la carretera.** Tiene que ver con el uso esperado de la carretera. Así, para carreteras principales el nivel de confiabilidad es alto, ya que un subdimensionamiento del espesor del pavimento traerá como consecuencia que éste alcance los niveles mínimos de serviciabilidad antes de lo previsto, debido al rápido deterioro que experimentará la estructura. En la siguiente tabla se dan los niveles de confiabilidad aconsejados por la AASHTO:

**Cuadro 7: Valores recomendados para la confiabilidad dependiendo de su calificación funcional**

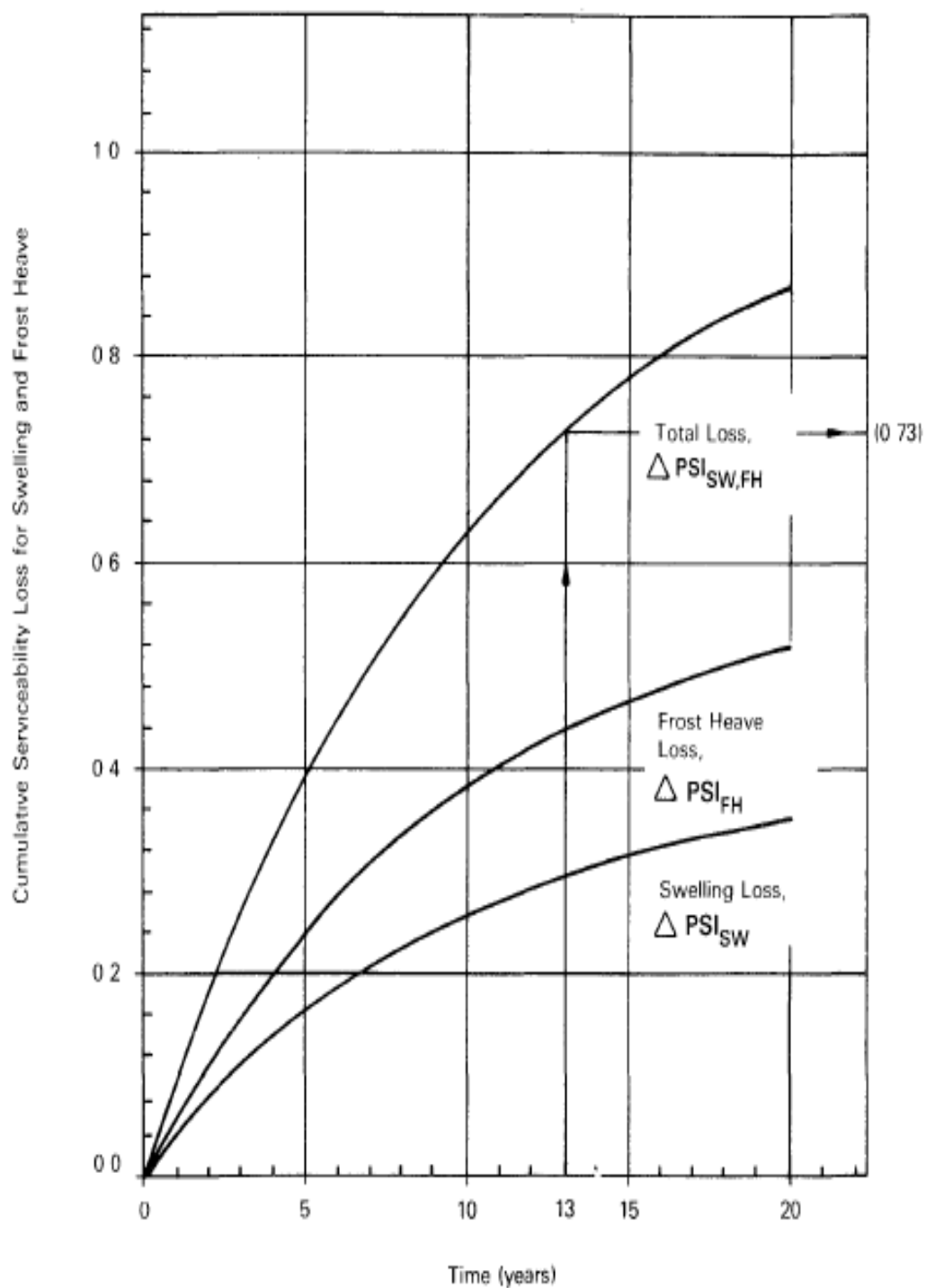
Clasificación funcional	Zona urbana	Zona rural
Rutas interestatales	85 – 99.99	80 – 99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 99
Colectoras	80 – 95	75 – 95
Locales	50 – 80	50 – 80

**16.8.2. Optimizar el espesor de pavimento.** Se debe determinar el nivel de confiabilidad óptimo que me asegure el costo total más bajo, es decir, que balancee apropiadamente el costo inicial y los costos de mantenimiento. Si el espesor es mayor de lo necesario, el pavimento prestará un buen servicio, con bajos costos de mantenimiento, pero el costo de inversión será alto. Todo lo contrario sucede cuando el espesor es menor de lo necesario.

**Ilustración 25: Criterios de comportamiento**

**16.9. Efectos ambientales.** El ambiente puede afectar el desempeño de los pavimentos en varias maneras. La temperatura y la humedad afecta en cuanto a la durabilidad, resistencia y capacidad soporte de un pavimento y su subrasante. Otro impacto generado por el ambiente es cuando éste recae sobre la subrasante, considerando hinchazones en el subgrado, desintegración, etc. Otros efectos que inciden, son envejecimiento, la deshidratación y la deterioración de los materiales a causad del intemperismo. Todos estos factores son considerados como términos inherentes que influencian el desempeño de los pavimentos.

Ilustración 26: Gráfico que representa los efectos del ambiente contra la serviciabilidad de los materiales



## 16.10. Criterio de desempeño

**16.10.1. Serviciabilidad.** El término de serviciabilidad de un pavimento es definido como la habilidad de servir para un para servir a un tipo de tránsito que está destinado a utilizar el pavimento. El Índice de Serviciabilidad Presente conocido como PSI por sus siglas en inglés (Present Serviceability Index) tiene un rango de valores entre 0 a 5, siendo 0 una carretera imposible de transitar y 5 como una carretera perfecta. La filosofía básica de diseño se centra en el concepto de serviciabilidad – desempeño., que consiste en el volumen total del tránsito específico y el nivel mínimo de serviciabilidad deseado al final de la vida útil del pavimento.

La selección del índice de serviciabilidad terminal o final, se basa en la condición final del pavimento antes de entrar al proceso de rehabilitación, colocar otra capa superficial o, en caso sea necesario, reconstrucción. La norma sugiere utilizar un valor de 2.5 para carreteras con un alto volumen de tránsito, 2.0 para aquellas carreteras con un bajo volumen de tránsito.

**Cuadro 8: Nivel de serviciabilidad y porcentaje de rechazo de parte de los usuarios**

Pt	Porcentaje de usuarios considerando el pavimento como inaceptable
3.00	12
2.50	55
2.00	85

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

$$\Delta PSI = P_0 - P_t$$

Los factores que influyen mayormente en la pérdida de serviciabilidad de un pavimento son: tránsito, medio ambiente y edad del pavimento. Los efectos que causan éstos factores en el comportamiento del pavimento han sido considerados en este método. El factor edad (tiempo) no está claramente definido. Sin embargo, en la mayoría de los casos es un factor negativo neto que contribuye a la reducción de la serviciabilidad. El efecto del medio ambiente considera situaciones donde se encuentran arcillas expansivas o levantamientos por helada. Así, el cambio total en el PSI en cualquier



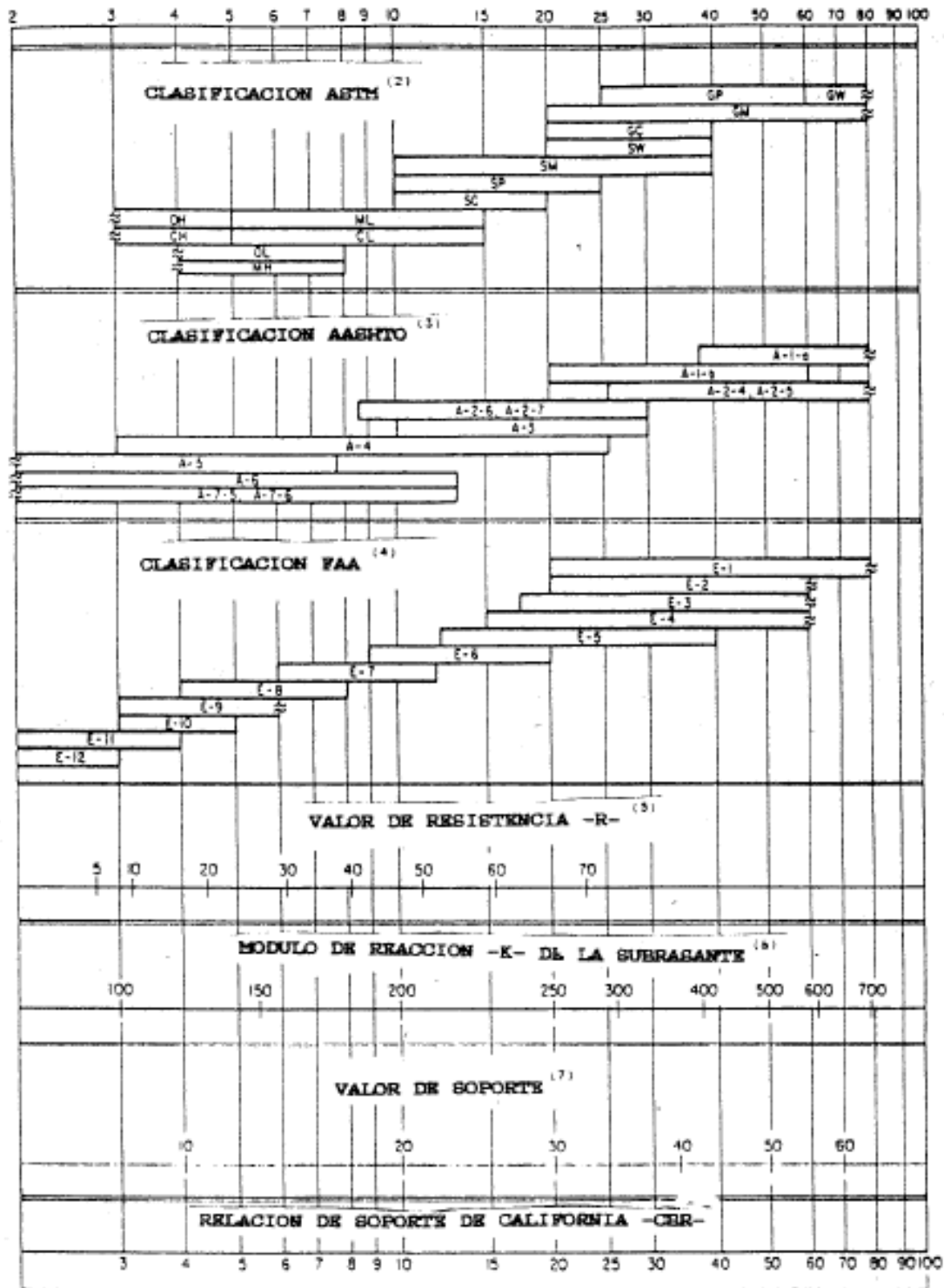
momento puede ser obtenido sumando los efectos dañinos del tráfico, arcillas expansivas y/o levantamientos por helada.

### **16.11. Propiedades de los materiales**

**16.11.1. Módulo de reacción de la subrasante (K).** Este factor representa las propiedades mecánicas del suelo que considera un posible asentamiento de la subrasante cuando si le es aplicado un esfuerzo de compresión. Numéricamente, es igual a la carga en libras por pulgada cuadrada sobre un área de carga, dividido por la deflexión en pulgadas para esa carga. Los valores de k son expresados como libras por pulgada cuadrada por pulgada (psi)

Puesto que la prueba de carga sobre placa, requiere tiempo y es costosa, el valor de k es estimado generalmente por correlación con otros ensayos simples, tal como la Razón de Soporte de California (CBR, por sus cifras en inglés) o las pruebas de valores R. El resultado es válido porque no se requiere la determinación exacta del valor k; las variaciones normales para un valor estimado no afectarán apreciablemente los requerimientos de espesores del pavimento.

Ilustración 27: Relación aproximada entre los valores K y otras propiedades del suelo



**16.11.2. Módulo elástico del concreto.** El módulo elástico es una propiedad esencial de cualquier material dentro del diseño, ya sea del concreto o del suelo. Para estos materiales que son susceptibles deformaciones constantes debido a que se encuentra sometidos a cargas constantes, es posible que esta propiedad no se vea reflejada como un comportamiento del material bajo estrés. Por lo tanto, el módulo de resiliencia del suelo se refiere a un pavimento en condiciones de carga. La resistencia del material es importante en conjunto con la rigidez y futuros procedimientos con bases mecanicistas pueden reflejar a la resistencia y la rigidez del material como una caracterización propia del material.

El módulo de elasticidad para cualquier tipo de material puede ser estimado mediante el uso de una correlación desarrollada por el Instituto Americano del Concreto para cementos portland de peso normal.

$$E_c = 57,000 (f'_c)^{0.5}$$

Donde

$E_c$  = al módulo elástico del concreto portland representado en PSI

$f'_c$  = Resistencia a compresión del concreto portland representado en PSI

**16.11.3. Módulo de ruptura del concreto.** Es un parámetro muy importante como variable de entrada para el diseño de pavimentos rígidos, ya que va a controlar el agrietamiento por fatiga del pavimento, originado por las cargas repetitivas de camiones. Se le conoce también como resistencia a la tracción del concreto por flexión.

El módulo de rotura requerido por el procedimiento de diseño es el valor medio determinado después de 28 días utilizando el ensayo de carga en los tercios. De esta manera, se obtiene en el tercio medio una zona sometida a un momento flector constante igual a  $PL/3$  y la rotura se producirá en cualquier punto de este tercio medio con la única condición que exista allí una debilidad. Este ensayo es recomendable frente al ensayo de carga en el punto medio, en el cuál la rotura se producirá indefectiblemente en dicho punto (punto de aplicación de la carga) donde el momento flector es máximo.

La relación para encontrar este valor se propone de la siguiente manera:

$$S'_c = 0.7 \times \sqrt{f'_c}$$

**16.11.4. Diseño de drenajes para pavimentos rígidos.** El tratamiento para el drenaje en pavimentos rígidos se base en el uso del coeficiente de drenaje  $C_d$  en la ecuación de desempeño de propuesta por la norma AASHTO. La norma presenta una tabla en la que propone un coeficiente de drenaje basada en la calidad de drene y porcentaje de tiempo durante el cual el pavimento será expuesto a niveles de saturación.

**Cuadro 9: Coeficientes de drenaje basados en porcentaje de exposición anual a humedad y calidad de drenaje**

<b>Porcentaje de tiempo en el cual el pavimento será expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación.</b>				
<b>Calidad de drenaje</b>	<b>Menor a 1%</b>	<b>1 – 5%</b>	<b>5 – 25%</b>	<b>Mayor a 25%</b>
Excelente	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Decente	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Pobre	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy pobre	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

**16.11.5. Transferencia de carga.** El coeficiente J de transferencia de carga J, es un factor utilizado para el diseño de pavimentos rígidos para distribuir de manera adecuada la carga a través de las discontinuidades, como juntas y grietas. Dispositivos de transferencia de carga, agregados, doveles y hombros conectados influyen en el valor de este factor.

## **17. Métodos de elementos finitos.**

**17.1. Introducción.** Las limitaciones que posee la mente son tantas que no son capaces de captar el comportamiento del complejo mundo que nos rodea en una sola operación global. Por eso mismo, una forma común con la que los ingenieros y científicos proceden, consiste en separar los sistemas en componentes individuales, o elementos, que tienen un comportamiento que pueda conocerse sin dificultad, y a continuación

reconstruir el sistema original para estudiarlo a partir de dichos componentes. (Zienkiewicz, 2007)

En algunos casos se obtiene un modelo adecuado utilizando un número finito de componentes bien definidos. A tales casos los denominaremos discretos. En otros, la subdivisión prosigue indefinidamente y el problema solo puede definirse haciendo uso de la ficción matemática de infinitésimo. Ello nos conduce a ecuaciones diferenciales o expresiones equivalentes con un número infinito de elementos implicados. A estos sistemas se les llama *continuos*. (Zienkiewicz, 2007)

Con los avances tecnológicos, los computadores tienen una capacidad finita, por lo que los problemas continuos solo se resuelven de manera exacta por medio de manipulaciones matemáticas. En este aspecto, las técnicas matemáticas disponibles suelen limitar las posibilidades a casos extremadamente simplificados. Para este problema, a manera que el tiempo ha transcurrido los ingenieros y matemáticos han ido proponiendo métodos de *discretización*. Para estos, se hace necesario efectuar alguna aproximación de tal naturaleza que quepa esperar que la misma se acerque, tan estrechamente como se quiera, a la solución continua verdadera, a medida que crezca el número de variables discretas. (Zienkiewicz, 2007)

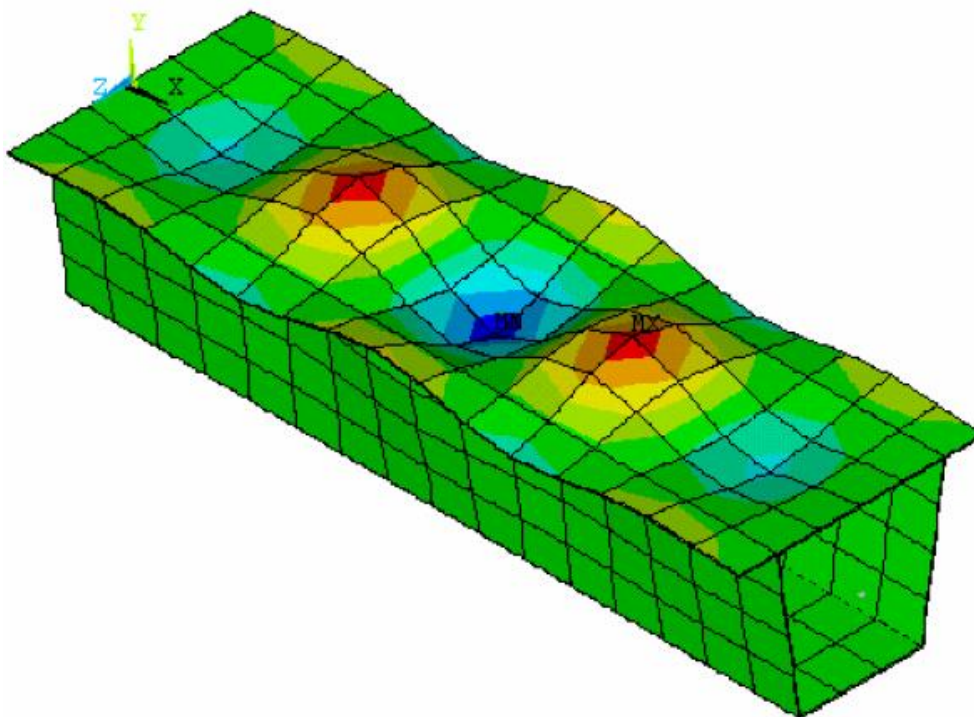
La discretización de problemas continuos ha sido abordada de manera diferente por matemáticos e ingenieros. Los primeros han desarrollado técnicas generales aplicables directamente a las ecuaciones diferenciales que rigen el problema, tales aproximaciones por diferencias finitas, diferentes métodos de residuos ponderados, o técnicas aproximadas para determinar puntos estacionarios de “funcionales” definidos en forma apropiada. Los ingenieros, por otra parte, suelen enfrentarse al problema más intuitivamente creando una analogía entre elementos discretos reales y porciones finitas de un dominio continuo. (Zienkiewicz, 2007)

Fue de la posición de *analogía directa*, adoptada por los ingenieros, de donde nació la expresión *elemento finito*. Al parecer fue Clough el que uso este nombre por primera vez el cual supone el uso preciso de la *metodología general aplicable a los sistemas discretos*. Esto, tanto desde el punto de vista conceptual como del numérico, es de la mayor importancia. El primero permite una mejor comprensión del problema; el segundo el uso de un criterio unificado para abordar una gran variedad de problemas y desarrollar procedimientos generales de cálculo. (Zienkiewicz, 2007)

El método de elementos finitos (MEF) ha tomado gran parte de las soluciones de los problemas ingenieriles, físicos, etc., ya que nos da la facilidad de resolver problemas que hasta hace poco tiempo se hacen difíciles o imposibles de resolver por los métodos matemáticos tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, ensayarlos y realizar mejoras de forma iterativa, lo que significaba una elevada cifra económica y por consecuencia costo en tiempo de desarrollo. (Zienkiewicz, 2007)

El MEF da la posibilidad de elaborar un modelo de cálculo matemático del sistema real, más fácil y económico de modificar que su prototipo. No obstante, sigue siendo un método que solo genera un cálculo aproximado debido a las hipótesis que se asumen en el método. (Zienkiewicz, 2007)

### **Ilustración 28: Modelado de elemento finito**



Fuente:(Zienkiewicz, 2007)

La estructura básica de este método es conocida desde hace bastante tiempo, sin embargo el que tenga una formulación matemática ha venido únicamente en los últimos tiempos. Debido a los avances informáticos que han surgido, en los últimos años este método ha sufrido un gran desarrollo. A causa de todos estos avances en la tecnología, se han creado un sinnúmero de programas que permiten realizar cálculos con elementos finitos; a pesar de esta facilidad, es totalmente necesario que el usuario tenga un profundo

conocimiento no solo del material con el que se trabaja, sino también de los principios del MEF. Sólo de esta manera se puede garantizar que los resultados que se obtengan del análisis son plausibles con la realidad. (Zienkiewicz, 2007)

**17.2. Breve historia del método de los elementos finitos.** Aunque el nombre del *Método de Elementos Finitos* se ha establecido recientemente, el concepto ha venido usándose desde hace varios siglos. El empleo de métodos de discretizado espacial y temporal y la aproximación numérica para encontrar soluciones a problemas ingenieriles o físicos es conocido desde antiguo. El concepto de “elementos finitos” parte de esa idea. (Carnicero, 2003)

Para encontrar vestigios de este tipo de cálculos podríamos remontarnos a la época de la construcción de las pirámides egipcias. Los egipcios empleaban métodos de discretizado para determinar el volumen de las pirámides. Arquímedes (287-212 a.C.) empleaba el mismo método para calcular el volumen de todo tipo de sólidos o la superficie de las áreas. En oriente también aparecen métodos de aproximación para realizar cálculos. Así el matemático chino Lui Hui (300 d.C) empleaba un polígono regular de 3072 lados para calcular longitudes de circunferencias con lo que conseguía una aproximación al número Pi de 3.1416. (Carnicero, 2003)

El desarrollo de los elementos finitos tal y como se conocen hoy en día ha estado ligado al cálculo estructural fundamentalmente en el campo aeroespacial. En los años 40 Courant propone la utilización de funciones polinómicas para la formulación de problemas elásticos en subregiones triangulares, como un método especial del método variacional de Rayleigh-Ritz para aproximar soluciones. (Carnicero, 2003)

Fueron Turner, Clough, Martin y Topp quienes presentaron el MEF en la forma aceptada hoy en día. En su trabajo introdujeron la aplicación de elementos finitos simples (barras y placas triangulares con cargas en su plano) al análisis de estructuras aeronáuticas, utilizando los conceptos de discretizado y funciones de forma. (Carnicero, 2003)

El trabajo de revisión de orden presenta algunas de las contribuciones matemáticas importantes al MEF. Los libros de Przemieniecki y de Zienkiewicz y Holister presentan el *Método de Elementos Finitos* en su aplicación al análisis estructural. El libro de Zienkiewicz y Cheung o Zienkiewicz y Taylor presenta una interpretación amplia del MEF y su aplicación a cualquier problema de campos. En él se demuestra que las ecuaciones de los elementos finitos pueden obtenerse utilizando un método de

aproximación de pesos residuales, tal como el método de Galerkin o el de mínimos cuadrados. Esta visión del problema difundió un gran interés entre los matemáticos para la solución de ecuaciones diferenciales lineales y no lineales mediante el MEF, que ha producido una gran cantidad de publicaciones hasta tal punto que hoy en día el MEF está considerado como una de las herramientas más potentes y probadas para la solución de problemas de ingeniería y ciencia aplicada. (Carnicero, 2003)

Actualmente el método se encuentra en una fase de gran expansión: es ampliamente utilizado en la industria y continúan apareciendo cientos de trabajos de investigación en este campo. Los ordenadores han aportado el medio eficaz de resolver la multitud de ecuaciones que se plantean en el MEF, cuyo desarrollo práctico ha ido caminando parejo de las innovaciones obtenidas en el campo de la arquitectura de los ordenadores. Entre éstas, además de permitir la descentralización de los programas de EF, ha contribuido a favorecer su uso a través de sofisticados paquetes gráficos que facilitan el modelado y la síntesis de resultados. Hoy en día ya se concibe la conexión inteligente entre las técnicas de análisis estructural, las técnicas de diseño (CAD), y las técnicas de fabricación. (Carnicero, 2003)

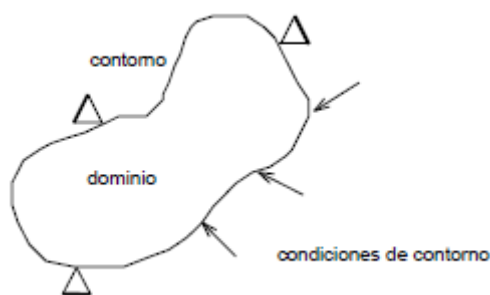
**17.3. Conceptos generales.** El concepto general con el que se aplica el método de elementos finitos es el de dividir un continuo en un conjunto de pequeños elementos que están interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta manera se logra pasar de un sistema continuo con infinitos grados de libertad, el cual está ligado a un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no. (Carnicero, 2003)

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

- Dominio: espacio geométrico donde se va a analizar el sistema
- Condiciones de contorno: Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor, etc.
- Incógnitas: Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema, desplazamientos, tensiones, temperaturas, etc. (Zienkiewicz, 2007)



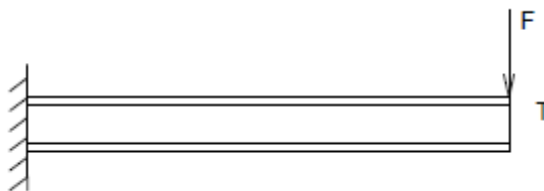
### Ilustración 29: Partes de un sistema a analizar



Este método propone, para la solución de un problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio es dividido mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total sea aproximado al juntar todos los elementos en los que se subdivide. Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre sí los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. En el caso de elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesen: tensiones, deformaciones, etc. a estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo. (Carnicero, 2003)

Por ejemplo si el sistema a estudiar es una viga en voladizo con una carga puntual en el extremo y una distribución de temperaturas tal y como se muestra en la siguiente figura:

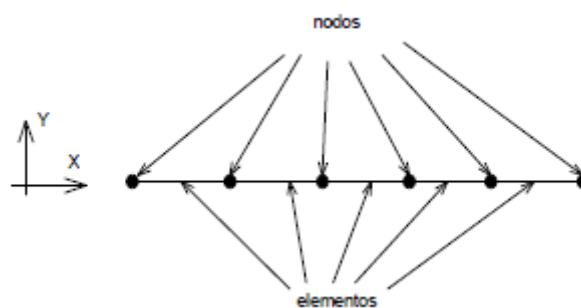
### Ilustración 30: Ejemplo de viga en voladizo



Fuente: Carnicero, 2003

El discretizado del dominio puede ser:

### Ilustración 31 Dominio de viga en voladizo



Fuente: Carnicero, 2003

Los grados de libertad de cada nodo serán:

- Desplazamiento en dirección x
- Desplazamiento en dirección y
- Giro según z
- Temperatura

El sistema, debido a las condiciones de contorno: empotramiento, fuerza puntual y temperatura, evoluciona hasta un estado final. En este estado final, conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema podemos determinar cualquier otra incógnita deseada: tensiones, deformaciones, etc. También sería posible obtener la evolución temporal de cualquiera de los grados de libertad. (Carnicero, 2003)

Planteando la ecuación diferencial que rige el comportamiento del continuo para el elemento, se llega a fórmulas que relacionan el comportamiento en el interior del mismo con el valor que tomen los grados de libertad nodales. Este paso se realiza por medio de unas funciones llamadas de interpolación, ya que éstas “interpolan” el valor de la variable nodal dentro del elemento. (Carnicero, 2003)

El problema se formula en forma matricial debido a la facilidad de manipulación de las matrices mediante ordenador. Conocidas las matrices que definen el comportamiento del elemento (en el caso estructural serán las llamadas matrices de rigidez, amortiguamiento y masa, aunque esta terminología ha sido aceptada en otros campos de conocimiento) se ensamblan y se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas, lineales o no, que resolviéndolas nos proporcionan los valores de los grados de libertad en los nodos del sistema. (Carnicero, 2003)

**17.3.1. Ecuaciones de los elementos.** El siguiente paso consiste en desarrollar ecuaciones para aproximar la solución de cada elemento y consta de dos pasos. Primero, se debe elegir una función apropiada con coeficientes desconocidos que aproximara la solución. Segundo, se evalúan los coeficientes de modo que la función aproxime la solución de manera óptima. (Chapra, S., 2011)

**17.3.2. Elección de las funciones aproximadas.** Debido a que son fáciles de manipular matemáticamente, a menudo se utilizan polinomios para este propósito. En el caso unidimensional, la alternativa más sencilla es un polinomio de primer grado o línea recta. (Chapra, S., 2011)

$$u(x) = a_0 + a_1x \quad (1)$$

Donde  $u(x)$  = la variable dependiente,  $a_0$  y  $a_1$  = constantes y  $x$  = la variable independiente. Esta función debe pasar a través de los valores de  $u(x)$  en los puntos extremos del elemento en  $x_1$  y  $x_2$ . Por lo tanto,

$$u_1 = a_0 + a_1x_1 \quad (2)$$

$$u_2 = a_0 + a_1x_2 \quad (3)$$

Donde  $U_1 = U(X_1)$  y  $U_2 = U(X_2)$ . De estas ecuaciones, usando la regla de Cramer, se obtiene:

$$a_0 = \frac{u_1x_2 - u_2x_1}{x_2 - x_1} \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{u_2 - u_1}{x_2 - x_1} \quad (5)$$

Estos resultado se sustituyen en la ecuación (1) la cual , después de reagrupar términos, se escribe como:

$$u = N_1u_1 + N_2u_2 \quad (6)$$

Donde:

$$N_1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \quad (7)$$

Y

$$N_2 = \frac{x - x_1}{x_1 - x_2} \quad (8)$$

La ecuación (6) se conoce como una función de aproximación, o de forma y  $N_1$  y  $N_2$  se denominan funciones de interpolación. Una inspección cuidadosa revela que la

ecuación (6) es, en realidad, el polinomio de interpolación de primer grado de Lagrange. Esta ecuación ofrece un medio para predecir valores intermedios (es decir, para interpolar) entre valores dados  $U_1$  y  $U_2$  en los nodos. (Chapra, S., 2011)

El hecho de que se trata de ecuaciones lineales facilita las operaciones como la diferenciación y la integración. Tales manipulaciones serán importantes en secciones posteriores. La derivada de la ecuación (6) es:

$$\frac{du}{dx} = \frac{dN_1}{dx} u_1 + \frac{dN_2}{dx} u_2 \quad (9)$$

De acuerdo con las ecuaciones (7) y (8), las derivadas de la  $N$  se calculan como sigue

$$\frac{dN_1}{dx} = -\frac{1}{x_2 - x_1} \quad (10)$$

$$\frac{dN_2}{dx} = \frac{1}{x_2 - x_1} \quad (11)$$

Y, por lo tanto, la derivada de  $u$  es:

$$\frac{dN_1}{dx} = -\frac{1}{x_2 - x_1} (-u_1 + u_2) \quad (12)$$

En otras palabras, es una diferencia válida que representa la pendiente de la línea recta que une los nodos.

La integral se expresa como:

$$\int_{x_1}^{x_2} u \, dx = \int_{x_1}^{x_2} N_1 u_1 + N_2 u_2 \, dx \quad (13)$$

Cada uno de los términos de lado derecho es simplemente la integral de un triángulo rectángulo con base  $x_2 - x_1$  y altura  $u$ . Es decir:

$$\int_{x_1}^{x_2} N u \, dx = \frac{1}{2} (x_2 - x_1) u \quad (14)$$

Así, la integral completa es:

$$\int_{x_1}^{x_2} u \, dx = \frac{u_1 + u_2}{2} (x_2 - x_1) \quad (15)$$

En otras palabras, esto es simplemente la regla del trapecio.

### 17.3.3. Obtención de un ajuste óptimo de la fundación a la solución.

Una vez que se ha elegido la función de interpolación, se debe desarrollar la ecuación que rige el comportamiento del elemento. Esta ecuación representa un ajuste de la

función a la solución de la ecuación diferencial de que se trate. Existen varios métodos para este propósito; entre los más comunes están el método directo, el método de los residuos ponderados y el método variacional. Los resultados de todos estos métodos son análogos al ajuste de curvas. Sin embargo, en lugar de ajustar funciones a datos, estos métodos especifican relaciones entre las incógnitas de la ecuación (6) que satisfacen de manera óptima las Ecuaciones en Derivadas Parciales. (Chapra, S., 2011)

Matemáticamente, las ecuaciones del elemento resultante a menudo consisten en un sistema de ecuaciones algebraicas lineales que puede expresarse en forma matricial:

$$[K][u] = [F]$$

Donde  $[K]$  = una propiedad del elemento o matriz de rigidez,  $[u]$  = vector columna de las incógnitas en los nodos y  $[F]$  = vector columna determinado por el efecto de cualquier influencia externa aplica a los nodos. Observe que, en algunos casos, las ecuaciones pueden ser no lineales. Sin embargo, en los ejemplos elementales descritos aquí, si como en muchos problemas prácticos, los sistemas son lineales. (Chapra, S., 2011)

## 18. Análisis de flexión en una placa infinita

A diferencia de una viga, donde solo puede solicitarse en una dirección, en una placa se puede solicitar en dos direcciones. La deformación  $\varepsilon_x$  cuando los esfuerzos actúan en dos direcciones se puede estimar con base en la ley de Hooke. (Román, 2008)

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \mu \frac{\sigma_y}{E} \quad (4.1)$$

Donde:

$\mu$  = Módulo de Poisson

$\sigma_x$  y  $\sigma_y$  = tensiones según direcciones "x" y "y".

E = módulo de elasticidad del concreto

En este cálculo se supone que se tiene una fundación que sigue las hipótesis de Winkler.

El primer término del lado derecho de la ecuación 4.1 indica la deformación en la dirección x que viene a causa de los esfuerzos en esa dirección, mientras que el segundo término indica los esfuerzos en la otra dirección. Por consiguiente se formula:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \mu \frac{\sigma_x}{E} \quad (4.2)$$

Cuando la placa se flexiona en la dirección  $x$ ,  $\varepsilon_y$  podría llegar a ser igual a cero debido que la placa a lo largo del borde tiene su movimiento muy restringido y cerca del borde no se presentan deformaciones. Asumiendo cero  $\varepsilon_y$  se obtiene lo siguiente

$$\sigma_y = \mu \sigma_x \quad (4.3)$$

Sustituyendo la ecuación 4.3 en la 4.1 y despejando para  $\sigma_x$  se obtiene:

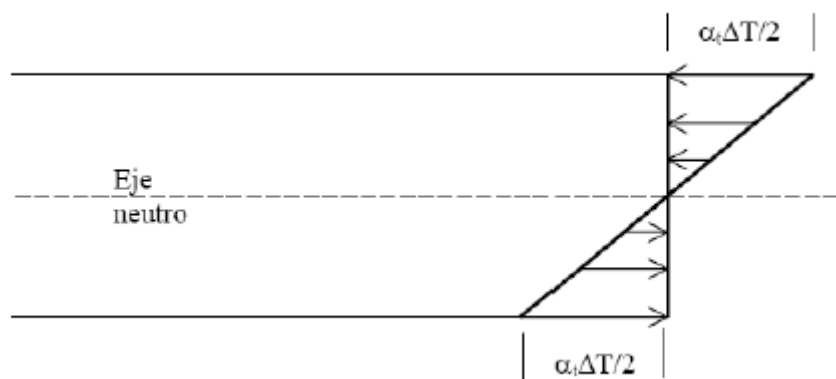
$$\sigma_x = \frac{\varepsilon E}{(1-\mu^2)} \quad (4.4)$$

La ecuación 4.4 permite calcular los esfuerzos generados por la flexión en la dirección  $x$ , mientras que la ecuación 4.3 lo hace con los esfuerzos perpendiculares a la dirección de la flexión. (Román, 2008)

Cuando la flexión ocurre en ambas direcciones, como es el caso cuando las losas se alabea por temperatura, los esfuerzos en ambas direcciones se pueden sumar para obtener el esfuerzo total. El máximo esfuerzo en una losa de dimensiones infinitas debido al alabeo se puede calcular suponiendo que la losa está contenida en el plano  $xy$ . (Román, 2008)

Teniendo un gradiente de temperatura  $\Delta_t$  entre las superficies superior e inferior de la losa y un coeficiente de expansión del concreto  $\alpha_t$ , si la losa se mueve libremente y la temperatura de la superficie es mayor que la del soporte, entonces la fibra superior se expande en una magnitud igual a  $(\alpha_t \Delta_t/2)$  y la fibra inferior se encoge en la misma magnitud tal como se muestra en la figura 4.1 (Román, 2008)

**Ilustración 32: Distribución del gradiente térmico**



Fuente: Román, 2008

Si tenemos una losa restringida, para prevenir movimientos es necesario aplicar una deformación por compresión en la fibra superior y una de tracción con un valor de

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\alpha_t \Delta t}{2} \quad (4.5)$$

De la ecuación 4.4, el esfuerzo en la dirección x debido a la flexión en esa misma dirección es:

$$\sigma_x = \frac{\alpha_t E \Delta t}{2(1-\mu^2)} \quad (4.6)$$

Por simetría y teniendo en cuenta la ecuación 4.3 el esfuerzo en la dirección x debido a la flexión en la dirección y es:

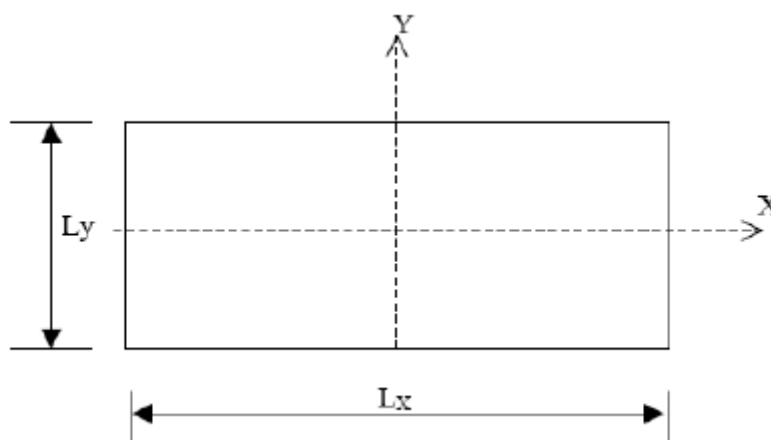
$$\sigma_y = \frac{\mu \alpha_t E \Delta t}{2(1-\mu^2)} \quad (4.7)$$

El esfuerzo total es la suma de la ecuación 4.6 y 4.7

$$\sigma_x = \frac{\alpha_t E \Delta t}{2(1-\mu^2)} (1 + \mu) = \frac{\alpha_t E \Delta t}{2(1-\mu)} \quad (4.8)$$

El análisis anterior se basa en la suposición de que la distribución de la temperatura es lineal en todo el espesor de la losa. Es una aproximación a la realidad debido que la distribución de la temperatura no es del todo lineal en todo el espesor de la losa. (Román, 2008)

### Ilustración 33 Losa con dimensiones finitas



Fuente: Román, 2008

El esfuerzo total en la dirección x se puede expresar de la siguiente manera:

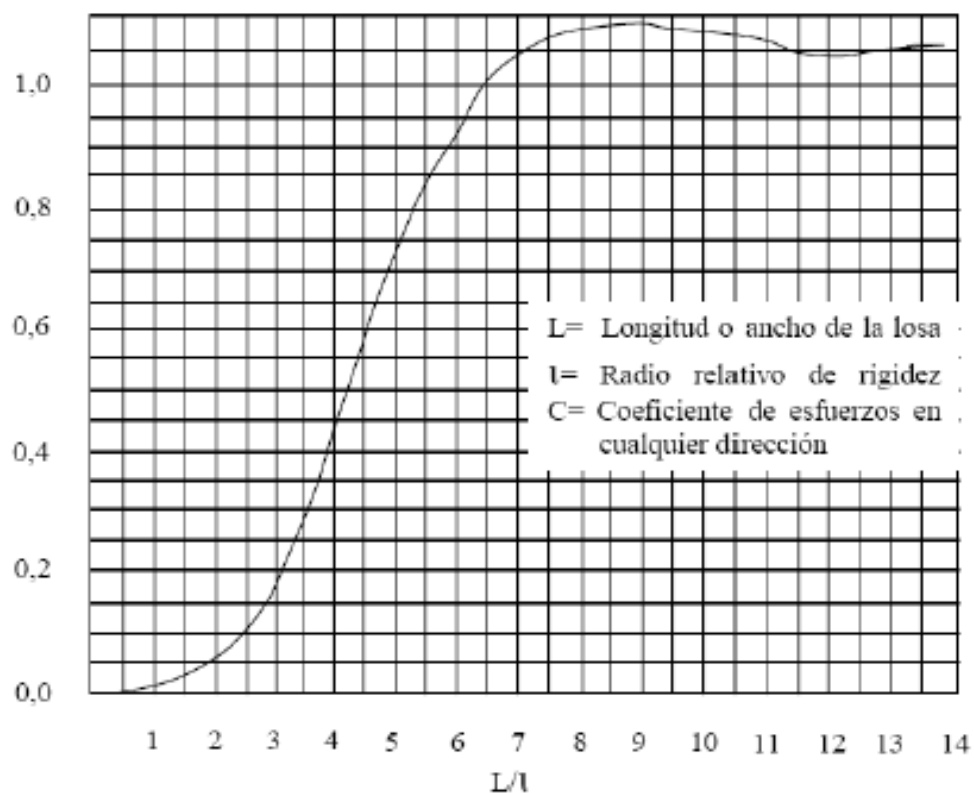
$$\sigma_x = \frac{C_x E \alpha_t \Delta t}{2(1-\mu^2)} + \frac{C_y \mu E \alpha_t \Delta t}{2(1-\mu^2)} - \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1-\mu^2)} (C_x + \mu C_y) \quad (4.9)$$

En la ecuación 4.9  $C_x$  y  $C_y$  son dos factores de corrección para losas finitas. El primer término de esta ecuación es el esfuerzo debido a la flexión en la dirección x y el segundo es el esfuerzo generado en la dirección y. De manera similar el esfuerzo en la dirección y es:

$$\sigma_y = \frac{\alpha_t E \Delta t}{2(1-\mu^2)} (C_y + \mu C_x) \quad (4.10)$$

Con base al análisis de Westergaard, Bradbury, en el año 1938, se desarrolló un ábaco o monograma para determinar los valores de  $C_x$  y  $C_y$ . Este se muestra en la Figura 4.3. (Román, 2008)

**Ilustración 34: Factor de corrección de esfuerzos en una losa finita**



Fuente: Román, 2008

El factor de corrección  $C_x$  depende del cociente entre la longitud de la losa en la dirección x –  $L_x$  y el radio relativo de rigidez de la losa  $\lambda$ . El factor  $C_y$  depende de la relación entre la longitud de la losa en la dirección y –  $L_y$  – y el radio relativo de rigidez de la losa  $\lambda$ . (Román, 2008)



$$I = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)k}} \quad (4.11)$$

Donde E es el Módulo de Elasticidad del concreto, h el espesor de la losa y  $\mu$  el Módulo de Poisson y k es el Módulo de reacción de la subrasante.

La ecuación 4.9 y 4.10 nos permiten obtener un valor máximo de los esfuerzos en el centro de la losa. Los esfuerzos en el centro de la losa se pueden determinar con la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{CE\alpha_t\Delta t}{2} \quad (4.12)$$

En esta ecuación  $\sigma$  puede ser  $\sigma_x$  o  $\sigma_y$  dependiendo de si C es  $C_x$  o  $C_y$ . Hay que resaltar que la ecuación 4.12 es similar a las ecuaciones 4.9 y 4.10 cuando el Módulo Poisson en el borde es cero. Se puede observar en la figura 4.3 que el factor de corrección C se incrementa cuando lo hace la relación L/l, llega al valor de uno (1) cuando  $L = 6.7 l$  y alcanza el máximo valor de 1,084 cuando  $L = 8,5 l$  y decrece hasta uno cuando la relación L/l tiende a infinito. (Román, 2008)

El hecho de que C pueda tener un valor que es mayor a la unidad se puede explicar por el hecho de que en losas cuya longitud supere  $6.7 l$  la reacción de la subrasante reversa ligeramente la curvatura que el alabeo por temperatura produce. (Román, 2008)

La relación entre C y L/l sigue la ecuación 4.13 hasta cuando la relación L/l es de 8.5. Para efectos prácticos este es el rango de aplicación de C. La ecuación 4.13 tiene un coeficiente de correlación R de 0.989.

$$y = 81.547x^6 + 385.01x^5 - 654.61x^4 + 523.7x^3 - 207.1x^2 + 41.375x \quad (4.13)$$

## 19. Descripción del método constructivo de losas cortas

El método constructivo de losas cortas en pavimentos de concreto hidráulico brinda otra alternativa técnica para la construcción de pavimentos rígidos, estableciendo como base fundamental para la concepción del método, la reducción de esfuerzos de flexión en las losas de la estructura del pavimento. También busca el menor número de repeticiones de carga por eje, basados en un análisis de fatiga del concreto, reduciendo

el agrietamiento, evitar la falla por bombeo en las losas y el problema en las juntas durante el período de diseño. (Román, 2008)

Debe considerarse la posibilidad de evaluar losas de concreto hidráulico con refuerzo de acero o bien simples (sin refuerzo). Para la realización del análisis de elementos finitos se contemplan la evaluación de diferentes variables, principalmente estructurales, materiales y medio ambiente. (Román, 2008)

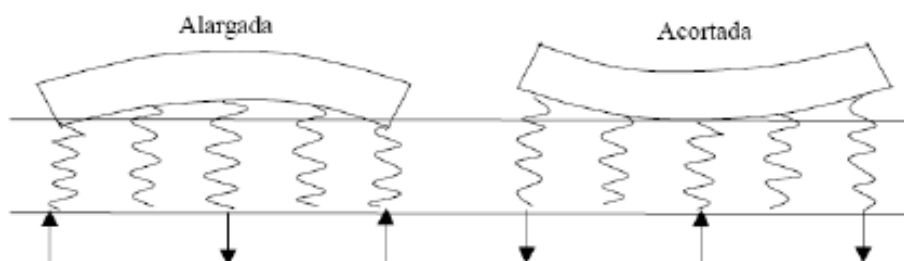
Con base en estas variables se determinan las Características del Comportamiento Mecánico de las losas, en función de la ubicación de la aplicación de la carga destacando los cambios generados con el menor dimensionamiento de la siguiente manera:

Inicialmente la deformación por alabeo, de forma general se establece que durante el día cuando la temperatura en la parte superior de la losa es más alta que en la inferior, la superficie superior tiende a expandirse con respecto al eje neutro mientras que la inferior tiende a contraerse. (Román, 2008)

Sin embargo, el peso de la losa restringe tanto la expansión como la contracción; entonces, se inducen esfuerzos de compresión en la parte superior y de tracción en la inferior. En la noche cuando la temperatura en la parte superior de la losa es más baja que la de la inferior y así se inducen esfuerzos de tensión en la parte superior y de compresión en la inferior. (Román, 2008)

El análisis de los esfuerzos de alabeo se puede hacer con la teoría de placa sobre una fundación Winkler o líquida. Donde la fundación Winkler está caracterizada por una placa a la que están pegados una serie de resortes tal y como se muestra en la figura 1. (Román, 2008)

### Ilustración 35 Alabeo en losas cortas y largas debido al gradiente térmico



Fuente: Román, 2008

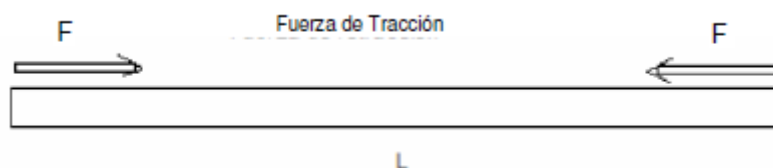
Cuando la temperatura en la parte superior de la losa es más alta que la inferior, la losa se vuelve convexa. En esa posición los resortes de los extremos de la losa están sometidos a compresión y empujan la losa hacia arriba, mientras que los que están en el interior de la losa están sometidos a tracción y tiran de la losa hacia abajo. El resultado de la anterior situación es que la parte superior de la losa está en compresión y la inferior en tracción. (Román, 2008)

Cuando la temperatura en la cara expuesta es más baja que la de la de apoyo, la losa asume una forma cóncava. En esta posición los resortes exteriores tiran de la losa hacia abajo y los resortes interiores empujan la losa hacia arriba, el resultado es que se desarrollan esfuerzos de tracción en la superficie superior y de compresión en la cara inferior. (Román, 2008)

Para poder realizar un verdadero análisis del comportamiento de la losa es necesario establecer la forma de fuerzas actuantes de alabeo que generalmente son consecuencia de cambios en gradientes térmicos y aplicación de cargas. (Román, 2008)

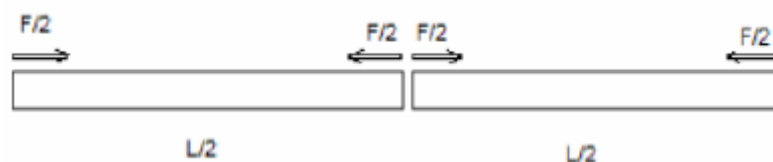
Entonces, analizando la forma en que actúan las fuerzas en la parte superior de la losa tenemos el comportamiento mostrado en la figura 2 y 3:

#### Ilustración 36: Forma inicial en que actúan las fuerzas de alabeo en losas



Fuente: Román, 2008

#### Ilustración 37 Forma en que actúan las fuerzas de alabeo en el nuevo dimensionamiento

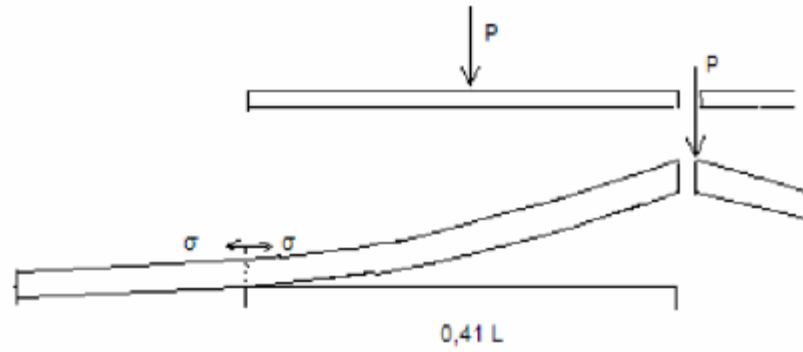


Fuente: Román, 2008

Por medio de análisis y pruebas realizadas en laboratorios se ha determinado el comportamiento mecánico de las losas y se pudo establecer que el punto de concentración de esfuerzos y corte, se ubica en proporción a la longitud de las losas a 0.41 veces su longitud, generando por medio de las fallas en las mismas, nuevos bloques

de pavimento, provocando el rompimiento de la configuración original de la losa, Ver Figura 4 (Román, 2008)

**Ilustración 38 Ubicación del punto de falla a corte provocada por la deformación de alabeo**



Fuente: Román, 2008



## V. DESARROLLO DEL DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO POR MÉTODO AASHTO

Para el desarrollo de este modelo se utilizan las consideraciones presentadas por la norma AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos. Para el estudio de tránsito se utilizó un ejercicio presentado por SIECA (Secretaria de Integración Económica de Centroamérica) en el Manual Centroamericano para el Diseño de Pavimentos.

A continuación se presentarán los cálculos realizados bajo la metodología previamente presentada.

El estudio de tráfico presenta un estudio previsto para 15 años donde se propone un factor de distribución de carril ( $D_L$ ) de 0.5 y un factor de distribución de dirección de ( $D_D$ ) 0.9 con un diferencial de índice de serviciabilidad de 2.0. Este ejercicio nos presenta cantidades de vehículos previstas por lo que al realizar

Se utilizan los cuadros presentados por la norma AASHTO para la representación de ejes equivalentes según las tablas 8 y 9. Es necesario tener presente un estudio de tránsito específico para poder realizar este desarrollo de una manera más exacta y presentar un diseño más adecuado a lo requerido en la realidad.

**Cuadro 10: Ejes equivalentes para pavimentos rígidos con índice de serviciabilidad final de 2.5**

Carga p/eje (Kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.012	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	0.039	0.035	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
10	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080
12	0.203	0.189	0.181	0.176	0.175	0.174	0.174	0.173	0.173
14	0.376	0.360	0.347	0.341	0.338	0.337	0.336	0.336	0.336
16	0.634	0.623	0.610	0.604	0.601	0.599	0.599	0.599	0.598
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.51	1.52	1.55	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59
22	2.21	2.20	2.28	2.34	2.38	2.40	2.41	2.41	2.41
24	3.16	3.10	3.22	3.36	3.45	3.50	3.53	3.54	3.55
26	4.41	4.26	4.42	4.67	4.85	4.95	5.01	5.04	5.05
28	6.05	5.76	5.92	6.29	6.61	6.81	6.92	6.98	7.01
30	8.16	7.67	7.79	8.28	8.79	9.14	9.35	9.46	9.52
32	10.8	10.1	10.1	10.7	11.4	12.0	12.3	12.6	12.7
34	14.1	13.0	12.9	13.6	14.6	15.4	16.0	16.4	16.5
36	18.2	16.7	16.4	17.1	18.3	19.5	20.4	21.0	21.3
38	23.1	21.1	20.6	21.3	22.7	24.3	25.6	26.4	27.0
40	29.1	26.5	25.7	26.3	27.9	29.9	31.6	32.9	33.7
42	36.2	32.9	31.7	32.2	34.0	36.3	38.7	40.4	41.6
44	44.6	40.4	38.8	39.2	41.0	43.8	46.7	49.1	50.8
46	54.5	49.3	47.1	47.3	49.2	52.3	55.9	59.0	61.4
48	66.1	59.7	56.9	56.8	58.7	62.1	66.3	70.3	73.4
50	79.4	71.7	68.2	67.8	69.6	73.3	78.1	83.0	87.1

**Cuadro 11: Ejes Equivalentes para pavimentos rígidos con índice de serviciabilidad final de 2.5**

Carga p/eje (Kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
6	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
8	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
10	0.015	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
12	0.031	0.028	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
14	0.057	0.052	0.049	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
16	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080
18	0.155	0.143	0.136	0.133	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131
20	0.234	0.220	0.211	0.206	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203
22	0.340	0.325	0.313	0.308	0.305	0.304	0.303	0.303	0.303
24	0.475	0.462	0.450	0.444	0.441	0.440	0.439	0.439	0.439
26	0.644	0.637	0.627	0.622	0.620	0.619	0.618	0.618	0.618
28	0.855	0.854	0.852	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849	0.849
30	1.11	1.12	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
32	1.43	1.44	1.47	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51	1.51
34	1.82	1.82	1.87	1.92	1.95	1.96	1.97	1.97	1.97
36	2.29	2.27	2.35	2.43	2.48	2.51	2.52	2.52	2.53
38	2.85	2.80	2.91	3.03	3.12	3.16	3.18	3.20	3.20
40	3.52	3.42	3.55	3.74	3.87	3.94	3.98	4.00	4.01
42	4.32	4.16	4.30	4.55	4.74	4.86	4.91	4.95	4.96
44	5.26	5.01	5.16	5.48	5.75	5.92	6.01	6.06	6.09
46	6.36	6.01	6.14	6.53	6.90	7.14	7.28	7.36	7.40
48	7.64	7.16	7.27	7.73	8.21	8.55	8.75	8.86	8.92
50	9.11	8.50	8.55	9.07	9.68	10.14	10.42	10.58	10.66
52	10.8	10.0	10.0	10.6	11.3	11.9	12.3	12.5	12.7
54	12.8	11.8	11.7	12.3	13.2	13.9	14.5	14.8	14.9
56	15.0	13.8	13.6	14.2	15.2	16.2	16.8	17.3	17.5
58	17.5	16.0	15.7	16.3	17.5	18.6	19.5	20.1	20.4
60	20.3	18.5	18.1	18.7	20.0	21.4	22.5	23.2	23.6
62	23.5	21.4	20.8	21.4	22.8	24.4	25.7	26.7	27.3
64	27.0	24.6	23.8	24.4	25.8	27.7	29.3	30.5	31.3
66	31.0	28.1	27.1	27.6	29.2	31.3	33.2	34.7	35.7
68	35.4	32.1	30.9	31.3	32.9	35.2	37.5	39.3	40.5
70	40.3	36.5	35.0	35.3	37.0	39.5	42.1	44.3	45.9
72	45.7	41.4	39.6	39.8	41.5	44.2	47.2	49.8	51.7
74	51.7	46.7	44.6	44.7	46.4	49.3	52.7	55.7	58.0
76	58.3	52.6	50.2	50.1	51.8	54.9	58.6	62.1	64.8
78	65.5	59.1	56.3	56.1	57.7	60.9	65.0	69.0	72.3
80	73.4	66.2	62.9	62.5	64.2	67.5	71.9	76.4	80.2
82	82.0	73.9	70.2	69.6	71.2	74.7	79.4	84.4	88.8
84	91.4	82.4	78.1	77.3	78.9	82.4	87.4	93.0	98.1
86	102.	92.	87.	86.	87.	91.	96.	102.	108.
88	113.	102.	96.	95.	96.	100.	105.	112.	119.
90	125.	112.	106.	105.	106.	110.	115.	123.	130.

**Cuadro 12: Ejercicio de estudio de tránsito**

TIPO DE VEHICULO	CANTIDAD DE VEHICULOS DIARIOS "A"	FACTORES DE CRECIMIENTO "B"	TRANSITO DE DISEÑO "C"	ESAL'S FACTOR "D"	ESAL'S DE DISEÑO "E"
VEHICULOS SENCILLOS		4%			
AUTOS	500	20.02	3,653,650.00	0.0002	730.73
AUTOBUSES	125	20.02	913,412.50	1.1005	1,005,210.46
PICK-UPS	250	17.29	1,577,712.50	0.0004	631.09
CAMIONES		2%			
VEHICULOS 2 EJES 4 RUEDAS	25	17.29	157,771.25	0.0132	2,082.58
camiones de volteo (1 eje simple y 1 tandem)	80	17.29	504,868.00	1.972	995,599.70
CAMIONES TIPO TRAILER		6%			
SEMI REMOLQUE (3EJES)	450	21.58	3,544,515.00	1.876	6,649,510.14
SEMI REMOLQUE (4EJES)	45	21.58	354,451.50	2.763	979,349.49
SEMI REMOLQUE (5EJES)	25	21.58	196,917.50	3.65	718,748.88
		2%			
CAMIÓN ACOPLADO (5 EJES)	10	17.29	63,108.50	3.65	230,346.03
CAMIÓN ACOPLADO (6 EJES)	5	17.29	31,554.25	4.537	143,161.63
<b>TOTAL DE VEHICULOS</b>	<b>1515</b>			<b>TOTAL=</b>	<b>10,725,370.71</b>

Mediante el uso de los factores de distribución de dirección y de distribución de carril se obtiene el siguiente valor de ESAL's por carril de tránsito.

<b>ESAL's por carril de transito:</b>	<b>4,826,416.82</b>
---------------------------------------	---------------------

Utilizando la cantidad de vehículos junto con los valores de los coeficientes de distribución se puede obtener el valor del tránsito a futuro dentro del periodo de diseño.

$$\log W_{18} = D_D \times D_L \times w_{18} = \log(0.9 \times 0.5 \times 1515) = 2.83$$

Mediante el uso del porcentaje de confiabilidad que se propone en este ejercicio, 95% se puede obtener el valor de Desviación Estándar ( $Z_R$ ) de la tabla que propone la norma AASHTO. Para el valor del Error Estándar de Tránsito ( $S_0$ ), se utiliza 0.39, valor propuesto por la norma en casos en que se desconozca el error estándar del tráfico previsto. Es importante mencionar que no la norma aconseja no tomar consideraciones conservadoras, debido a que la norma contempla dichas consideraciones.



**Cuadro 13: Desviación estándar según porcentaje de confianza escogido**

<b>Reliability, R (percent)</b>	<b>Standard Normal Deviate, <math>Z_R</math></b>
50	-0 000
60	-0 253
70	-0 524
75	-0 674
80	-0 841
85	-1 037
90	-1 282
91	-1 340
92	-1 405
93	-1 476
94	-1 555
95	-1 645
96	-1 751
97	-1 881
98	-2 054
99	-2 327
99 9	-3 090
99 99	-3 750

Se determina la serviciabilidad deseada para el pavimento. Como fue mencionado al principio se consideró un inicial de 4.5 y un final de 2.5,

Luego se realiza el cálculo de las propiedades del concreto, Módulo de Elasticidad y Módulo de ruptura. Para luego considerar el valor del coeficiente de transferencia de carga, la norma AASHTO presenta un rango de valores a considerar para este coeficiente cuando el pavimento no presenta ningún dispositivo de transferencia de carga, los valores se encuentran entre 3.6 a 4.4. Para efectos de este proyecto se consideró 4.4. Luego se elige un coeficiente de drenaje de la tabla presentada anteriormente, del cual se utilizó 1.15 considerando una excelente capacidad de drenaje en un pavimento sometido a humedad un 25% del tiempo en un año.

Mediante el cálculo utilizando la fórmula para diseño de pavimentos rígido por la Norma AASHTO 1993.

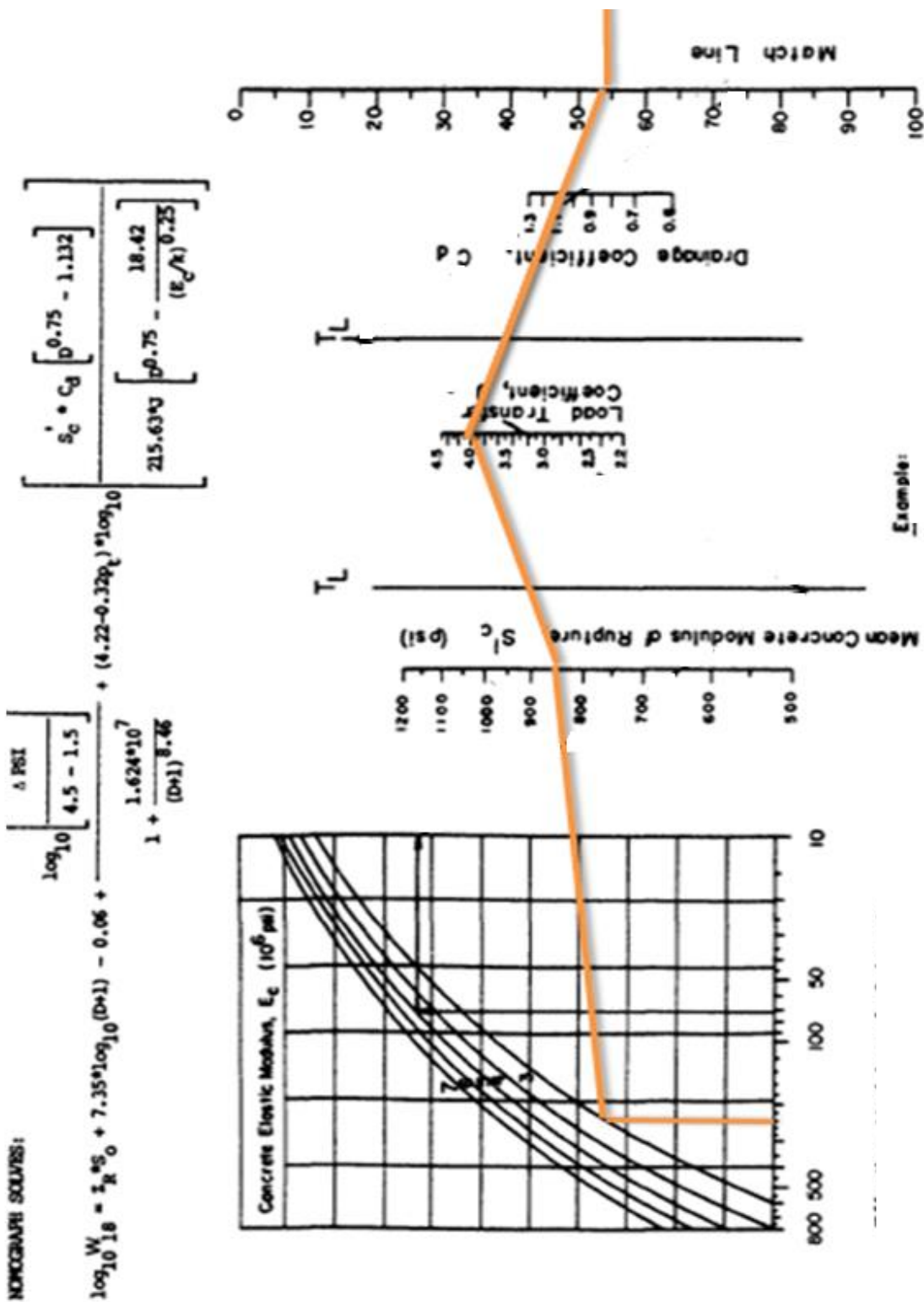
$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32$$

$$\times p_t) \times \log_{10} \left[ \frac{s'_c \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[ D^{0.75} \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}} \right]} \right]$$

Se realizan iteraciones de manera que se alcance un balance entre ambos términos de la relación presentada y obtener un espesor de losa para el pavimento. . Se obtuvo un valor de 10.75 pulgadas que es equivalente a aproximadamente 27.30 centímetros.

Se realiza un chequeo mediante el uso de gráficos para comprobar dicho valor. Es necesario mencionar que se aproxima el valor y que las gráficas utilizan valores promedios.

Ilustración 39: Proceso de diseño mediante método gráfico



## VI. PROGRAMA SAFE

Es un programa desarrollado por la empresa CSI, Computer and Structures, Inc. En Berkeley, California, EEUU. Se presenta en varias versiones (Standard y P/T). Es un programa especializado que automatiza el análisis y diseño de simple a complejas plateas y cimentaciones de concreto usando avanzados sistemas de modelación. El programa puede analizar y diseñar losas o plateas de formas arbitrarias y de espesor variable, de paneles desnivelados, con aberturas, vigas de borde y discontinuidades. Las cimentaciones pueden ser combinaciones de plateas, franjas de cimentación o cimentaciones corridas aisladas. (Hernández, H. 2011)

En análisis está basado en el método de elementos finitos, una moderna y consistente teoría el cual contempla la variación de las propiedades por los efectos de los momentos torsores. El enmallado es automático y está basado en parámetros especificados por el usuario. Las cimentaciones son modeladas como placas gruesas sobre cimentaciones elásticas, donde solamente la rigidez a la compresión del suelo es automáticamente discretizados basados en el módulo de la reacción de la sub-base que es especificada para cimentación. (Hernández, H. 2011)

Proporciona las disposiciones del refuerzo y evalúa los efectos de corte por punzonamiento alrededor de la base de la columna. Entre sus opciones, se puede incluir características del agrietamiento en el modelo de elemento finito, basados en el refuerzo proporcionado a la losa. Además, una opción comprensiva de exportación está disponible en el ETABS que automáticamente crea modelos completos de cualquier piso o cimentación para su diseño inmediato en el SAFE. (Hernández, H. 2011)

Al momento de modelar, se realiza el diseño de cimentaciones o fundaciones con la forma real, (sin aproximar la Geometría). Cimientos aislados (Circulares, rectangulares, irregulares, etc), de borde, de esquina, combinados, sobre pilotes plateas con diferentes espesores, sobre distintos terrenos (en un mismo sistema de cimentaciones), con agujeros etc. Se pueden definir las condiciones de frontera que el usuario indique (Naturales o Impuestas). Refinamiento automático de mallas. Exportación al AutoCAD de la plana general de fundaciones. Cuantificación instantánea de materiales a utilizar. Análisis estructural normal o Intensivo Diseño en Concreto. (Hernández, H. 2011)

## 1. Desarrollo

Se utilizó el programa SAFE para modelar y diseñar varias losa de pavimento rígido, las cuales se simularon como una zapata donde la columna va tener un área transversal que representa el área de contacto de la llanta del eje Tándem, se toma como ejemplo un espesor de losa diseñado por el método AASHTO, se parte de este espesor y se modelan tres losas, las especificaciones que se toman para modelar una losa estándar o tradicional como especifica AASHTO son las siguientes

**Cuadro 14: Propiedades de la losa**

LOSA		
Peralte	0.27	m
Largo	3.6	m
Ancho	3.6	m
Módulo de subgrado	11,772	kN/m

**Cuadro 15: Carga aplicada**

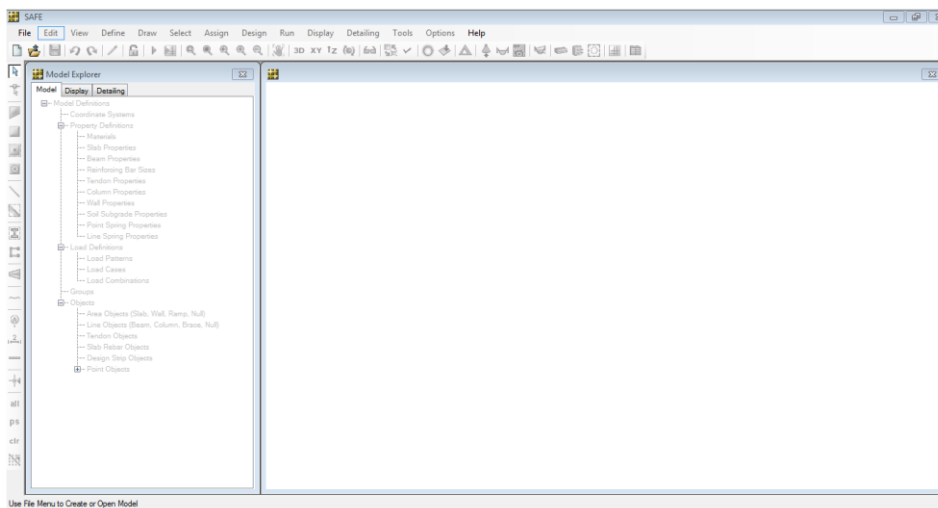
CARGA		
Largo	0.4	m
Ancho	0.25	m
Carga	80	kN

**Cuadro 16: Propiedades del concreto**

CONCRETO		
Peso	23,563	kN/m <sup>3</sup>
Modulo de elasticidad	24855.57	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.2	
Coefficiente de expansión térmica	0.0000009	1/C
Modulo de corte	10,356.49	N/mm <sup>2</sup>
f <sub>c</sub>	27.57	MPa

**1.1. Diseño de losa de 3.6 m x 3.6 m, h = 27 cm.** Se inicia el diseño utilizando el programa SAFE, el cual da una serie de opciones para inicializar la modelación. Se selecciona “Combined Footing” que corresponde a una zapata combinada, para representar una losa con dos cargas Y se colocan al centro de la losa.

**Ilustración 40: Pantalla de inicio de SAFE**



Lo principal en la modelación de cualquier losa siempre es definir con qué tipo de unidad se va a trabajar, ya que esto puede generar problemas en el diseño. La cualidad de SAFE es que en cualquier momento se pueden cambiar el sistema métrico con el que se trabaja, esto ayuda a poder interpretar de manera más eficiente los resultados que se obtienen en el programa de lo contrario se tendría que repetir la modelación debido a falta de entendimiento de los resultados.

Ilustración 41: Definir sistema de unidades

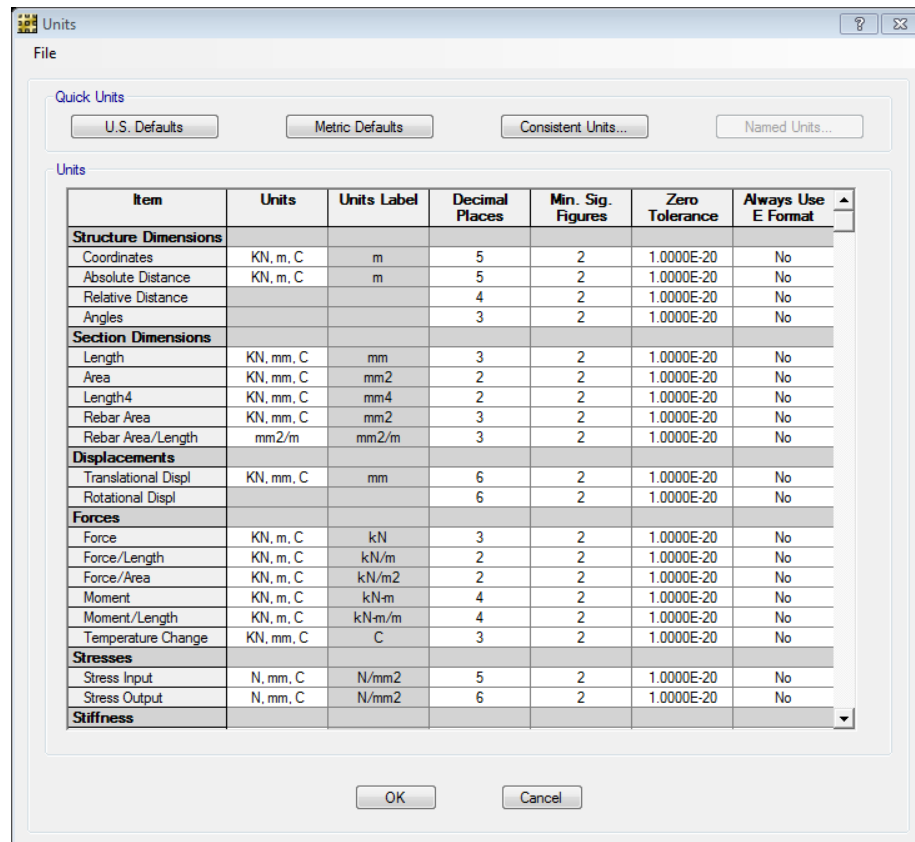
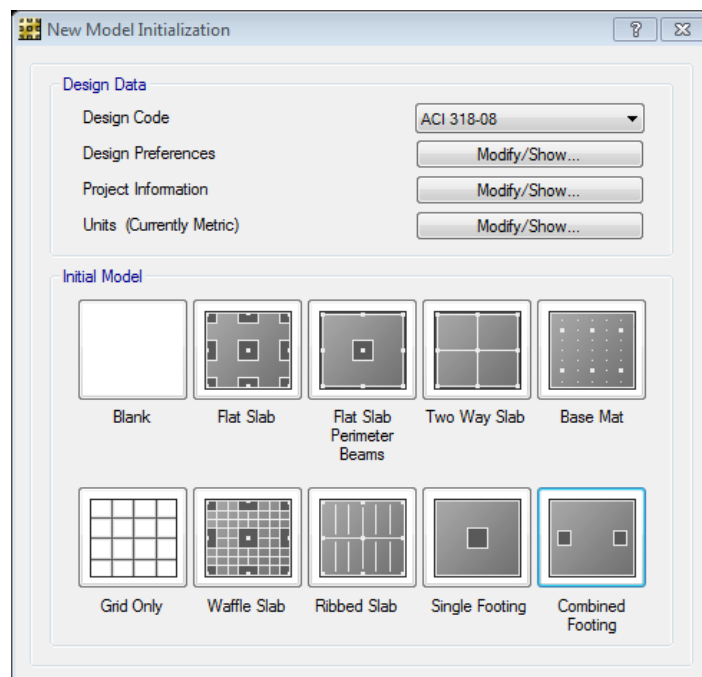
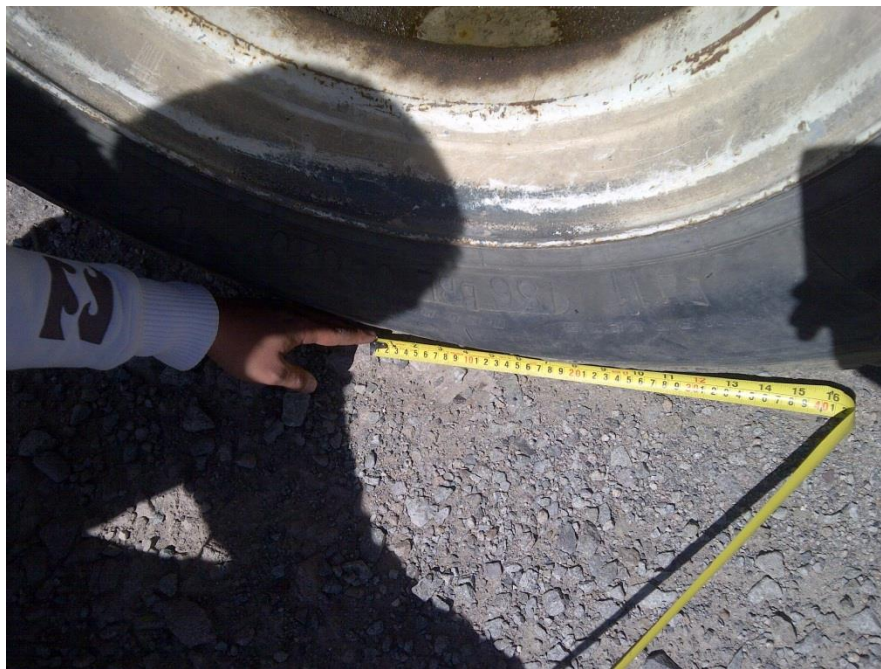


Ilustración 42: Selección tipo de elemento a diseñar



Luego de seleccionar “Combined Footing” (Zapata Combinada) se comienza por dimensionar la losa, la cual se hace de 3.60 m por 3.6 m esto es debido a que AASHTO lo indica. Luego se coloca la carga que es de 80 kN que es lo que nos indica 18 kips (AASHTO 1993), debido a que las dos llantas están sobre la misma losa esta carga se divide la carga de 80 kN en dos. Luego se especifica el área de acción de la carga que en este caso sería el área de contacto de la llanta con la losa, que son 0.40 m x 0.25 m esto de un solo camión de eje delantero sencillo y trasero dual como se ve en la siguiente Ilustración.

**Ilustración 43: Dimensiones del área de contacto de una llanta**



En las propiedades se ingresa el espesor de la losa, la ubicación de las dos llantas, las dimensiones de la losa, todas las dimensiones empiezan desde el origen, se coloca las cargas que se aplican a cada llanta, luego se introduce el valor del espesor de la losa, que en este caso son 27 cm, se ingresa el modulo de subgrado esta propiedad es del suelo, la cual representa la capacidad de carga de 10 Ton/m<sup>2</sup>, este es un valor que se asume para efectos de ejemplificación, en este valor va considerado un factor de seguridad, que en este caso es de 3.



Ilustración 44: Dimensionamiento de losa

**Plan Dimensions**

**Along X Direction**

Left Edge Distance: 0.5 m

Right Edge Distance: 0.5 m

**Along Y Direction**

Top Edge Distance: 1.8 m

Bottom Edge Distance: 1.8 m

**Load Spacing and Size**

X Direction  Y Direction

Spacing: 2.6 m

Load Size (square): 250 mm

**Load Values**

Load	Dead	Live	Unit
Load 1	P	41.19	40 kN
	Mx	0	0 kN-m
	My	0	0 kN-m
Load 2	P	41.19	40 kN
	Mx	0	0 kN-m
	My	0	0 kN-m

**Properties**

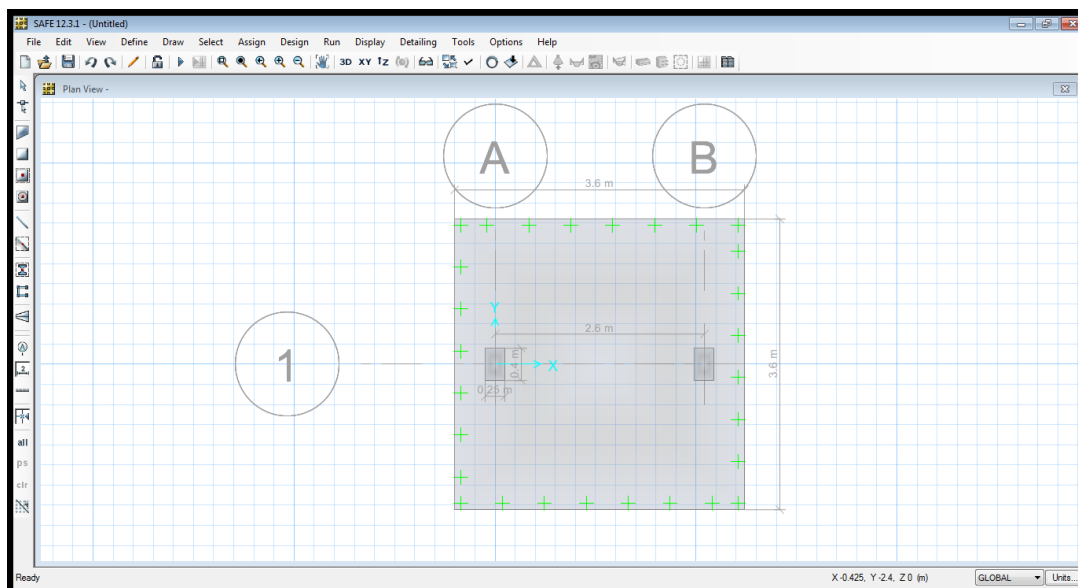
Footing Thickness: 270 mm

Subgrade Modulus: 11772 kN/m<sup>3</sup>

OK Cancel

Aceptamos después de ingresar todos los datos que nos piden, se genera la losa con las especificaciones que se pidieron anteriormente. Si se dibuja de una manera que no deseamos no hay problema para modificar cualquier característica que no cumpla con lo deseado.

Ilustración 45: Dimensiones de la losa



Antes de continuar con el modelado de la losa y con el afinamiento de sus características se debe definir la combinación de cargas, ya que puede ser que el programa no tenga ninguna definida y se necesita una combinación de la carga viva y la carga muerta.

**Ilustración 46: Combinación de cargas**

**Load Combination Data**

**General Data**

Load Combination Name: DEAD + LIVE

Combination Type: Linear Add

Notes: Modify/Show Notes...

Auto Combination: No

**Define Combination of Load Case/Combo Results**

	Load Name	Scale Factor
▶	DEAD	1.
	LIVE	1.
*		

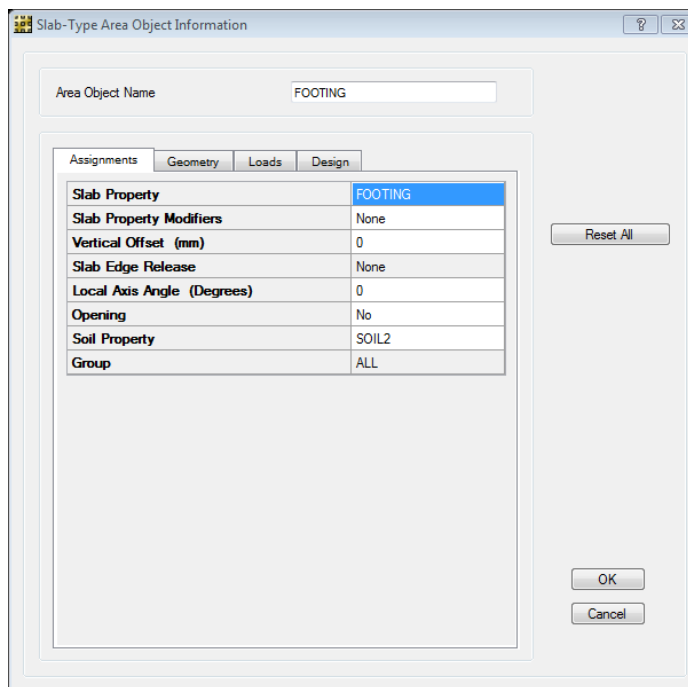
**Design Selection**

Strength (Ultimate)       Service - Normal

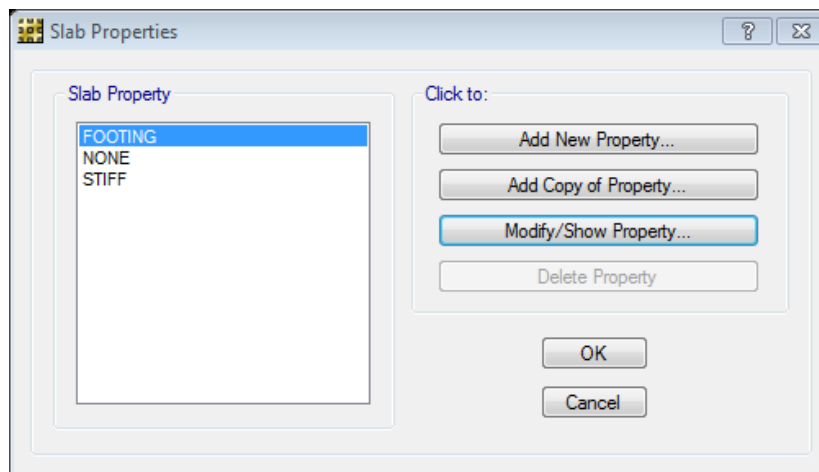
Service - Initial       Service - Long Term

OK      Cancel

Luego se ingresa las propiedades de la losa, para definir sus características, como el concreto que se va a utilizar, que tipo de losa ya que se puede considerar el cómo zapata o simplemente una placa.

**Ilustración 47: Características de la losa**

Al momento de especificar la losa, entramos a las propiedades donde se define el material que se va a utilizar que en este caso es concreto de 4000 psi, como lo indica (AASHTO) que es el mínimo para pavimentos principales.

**Ilustración 48: Propiedades de la losa**

Se selecciona el concreto y después se puede también modificar el espesor de la losa si así lo deseáramos, en este primer caso lo admite 270 mm. Si en dado caso se desea cambiar el espesor simplemente introducimos el nuevo espesor

**Ilustración 49: Datos de las propiedades de la losa**

Se define un nuevo concreto, que es el concreto con  $f'_c$  4,000 psi, después de generar el nuevo concreto se pueden modificar las propiedades del concreto si así se desea.

**Ilustración 50: Materiales de la losa**

Esta ventana muestra las propiedades necesarias para definir cualquier material; en este caso es el concreto, el programa calcula el módulo de corte partiendo de módulo de elasticidad, la relación de Poisson y el coeficiente de expansión térmica. Por último se ingresa la resistencia a la compresión del concreto en MPa.

### Ilustración 51: Propiedades de los materiales

The screenshot shows a dialog box titled "Material Property Data" with the following sections and values:

- General Data:**
  - Material Name: 4000Psi
  - Material Type: Concrete
  - Material Display Color: yellow
  - Material Notes: (empty)
- Material Weight:**
  - Weight per Unit Volume: 2.3563E+01 kN/m3
- Isotropic Property Data:**
  - Modulus of Elasticity, E: 24855.57828 N/mm2
  - Poisson's Ratio, U: 0.2
  - Coefficient of Thermal Expansion, A: 9.9E-06 1/C
  - Shear Modulus, G: 10356.49095 N/mm2
- Other Properties for Concrete Materials:**
  - Specified Concrete Compressive Strength, f<sub>c</sub>: 27.57903 N/mm2
  - Lightweight Concrete:
  - Shear Strength Reduction Factor: (empty)

Después de definir el concreto, se tiene que definir el segundo elemento importante en la modelación de pavimentos que es el suelo, este tiene una capacidad soporte de 10 Ton/m<sup>2</sup>.

### Ilustración 52: Propiedades de módulo de subgrado del suelo

The screenshot shows a dialog box titled "Soil Subgrade Properties" with the following elements:

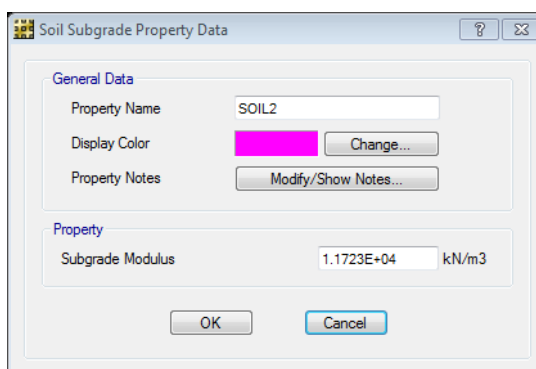
- Soil Subgrade Property:** A list box containing "NONE" and "SOIL2" (highlighted).
- Click to:**
  - Add New Property...
  - Add Copy of Property...
  - Modify/Show Property...
  - Delete Property
- Buttons:** OK, Cancel

Teniendo la capacidad soporte del suelo se puede obtener el modulo de subgrado del suelo que sale de la ecuación siguiente:

$$k_0 = 40(FS)q_0$$

Donde FS es el factor de seguridad, el cual es de 3 y  $q_0$  es la capacidad soporte del suelo.

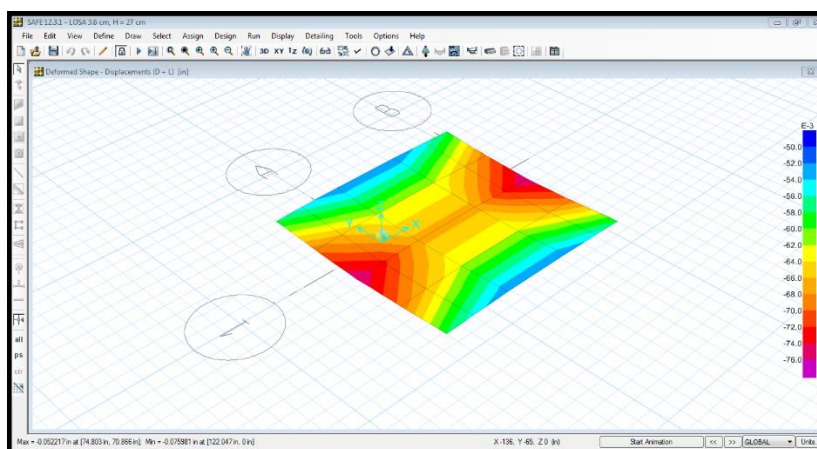
### Ilustración 53: Datos de las propiedades del suelo



Luego de haber definido la geometría de la losa, la geometría de la carga aplicada a esta, las propiedades del concreto y las propiedades del suelo, se procede a correr el programa basado en calculo por elementos finitos, utiliza las ecuaciones ya definidas para las deformaciones que despliega la siguiente grafica, que indica cómo se va deformando la losa.

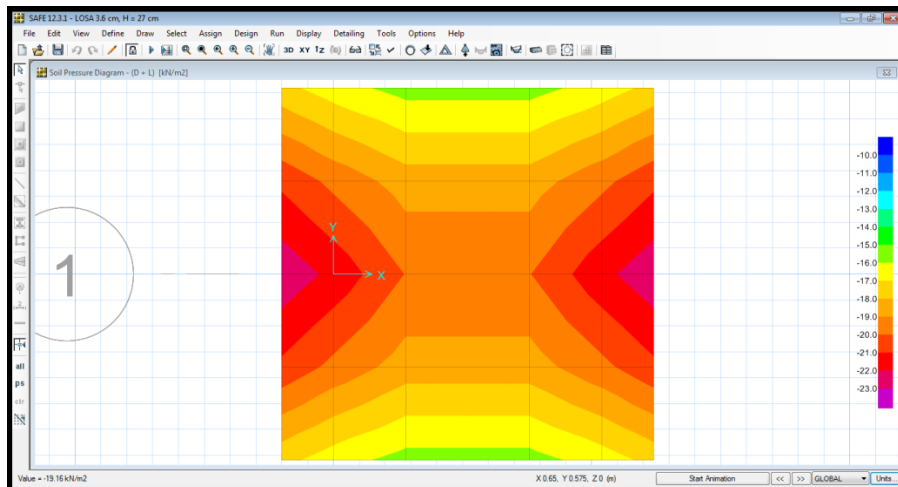
**1.1.1. Deformaciones en losa.** Se puede apreciar que la losa se deforma desde las cargas aplicadas, cóncavas hacia arriba, pero en el centro tenemos una deformación inversa, en el punto más crítico esta se deforma 0.075 in (1.95 mm) máximo en donde están ubicadas las llantas del eje, que es donde tiene la mayor concentración de carga, siendo éste el punto más crítico.

### Ilustración 54: Deformación de losa 27cm



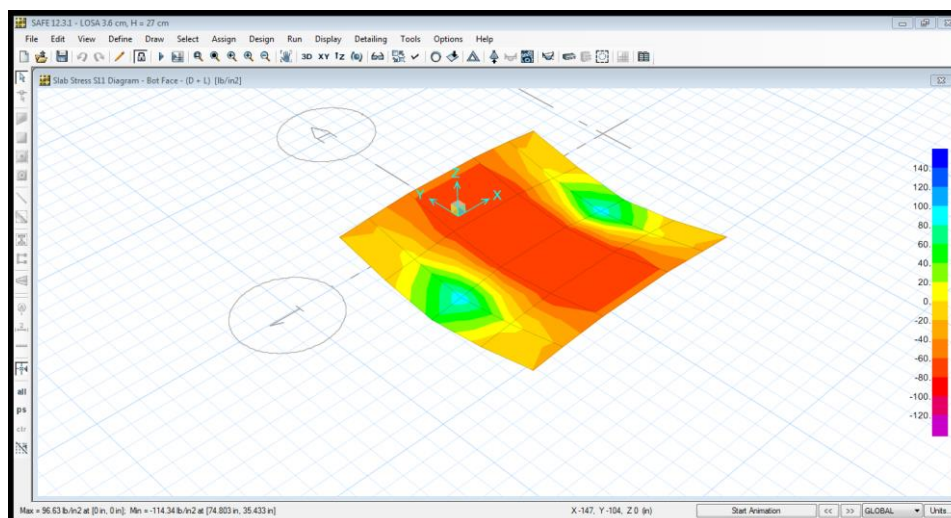
**1.1.2. Reacciones del suelo en la losa.** Esta gráfica representa la reacción que tiene el suelo con respecto de la fuerza que se aplica en la losa y ésta repercute en esta misma la cual es de 25.63 kN/m<sup>2</sup>.

**Ilustración 55: Reacciones del suelo en la losa de 27 cm**

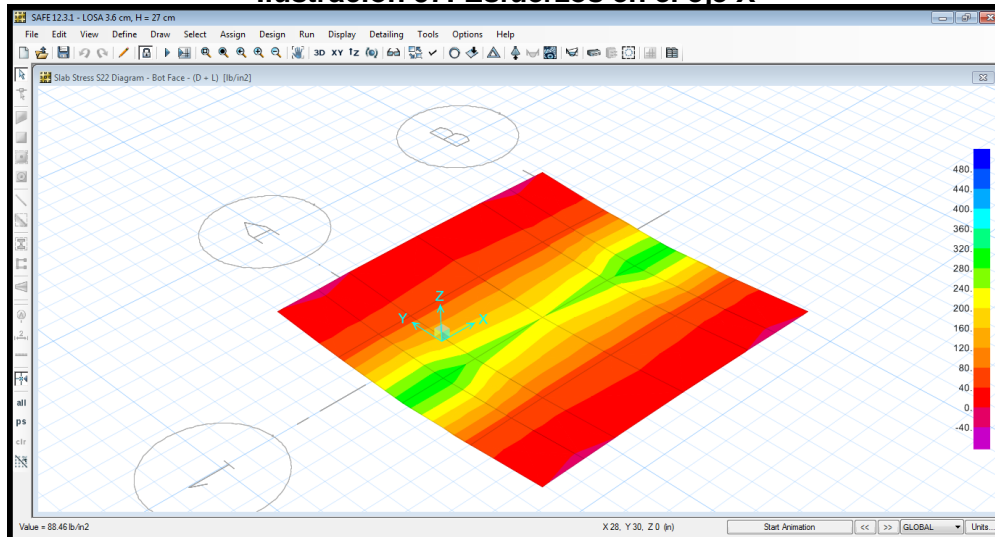


**1.1.3. Esfuerzos Internos en la losa.** Estos esfuerzos se generan en las dos direcciones en x y en y en la cual se observa que en la dirección x se tiene un esfuerzo mayor, el cual es de 318.14 psi y en el eje y el esfuerzo es de 104.15 psi. Estos esfuerzos tiene que ser controlados ya que son los indican si la losa lleva acero de refuerzo o no, esto se obtiene con una fórmula que nos indica la cantidad de esfuerzos que puede soportar el concreto, que en este caso es de 474.3 psi.

**Ilustración 56: Esfuerzos en el eje Y**



**Ilustración 57: Esfuerzos en el eje X**



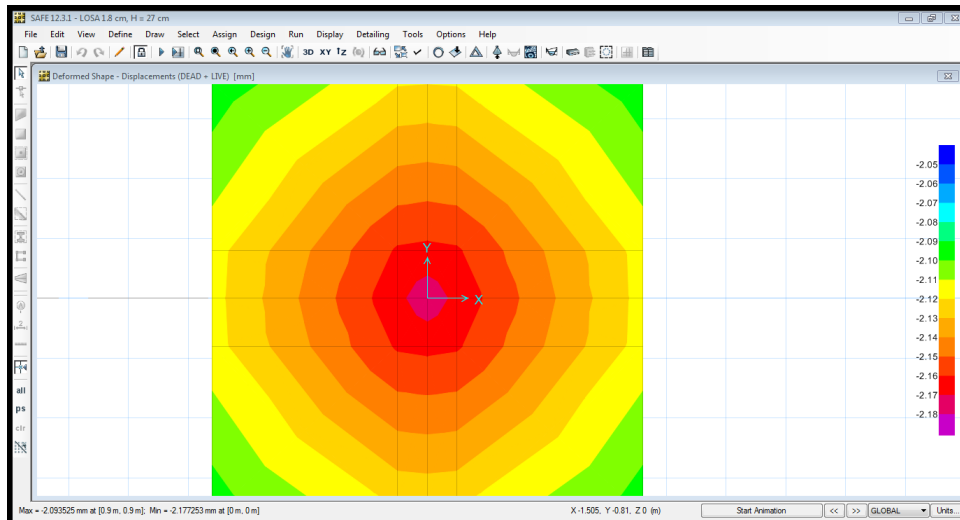
**1.2. Diseño de losa corta de 1.8 m x 1.8 m, h = 0.27 m.** Se modela una losa corta de 1.8 m<sup>2</sup> con el fin de poder comparar los esfuerzos encontrados en una losa convencional, esta losa siempre respeta los 3.6 m que pide como requerimiento AASHTO, la diferencia es que a esta losa se modula de diferente manera, haciendo mas pequeña las losas, pero siempre respetando los 3.6 m por carril. Se mantiene el espesor con el fin de poder compara la losa con la losa ya realizada.

**Ilustración 58: Dimensionamiento para losa de 15 cm**

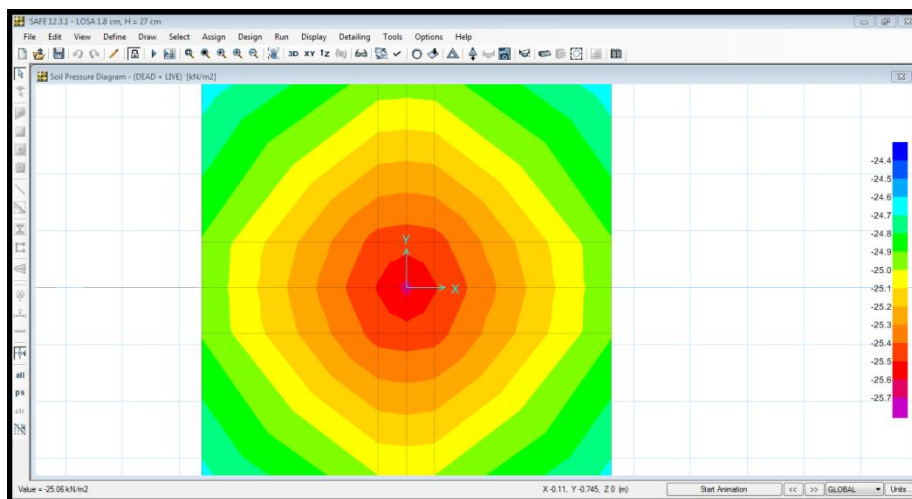


**1.2.1. Desplazamiento.** Podemos observar que se deforma 1.94 mm en su centro y teniendo deformaciones de 1.75 mm en sus esquinas.

**Ilustración 59: Deformación de losa corta de 27 cm**



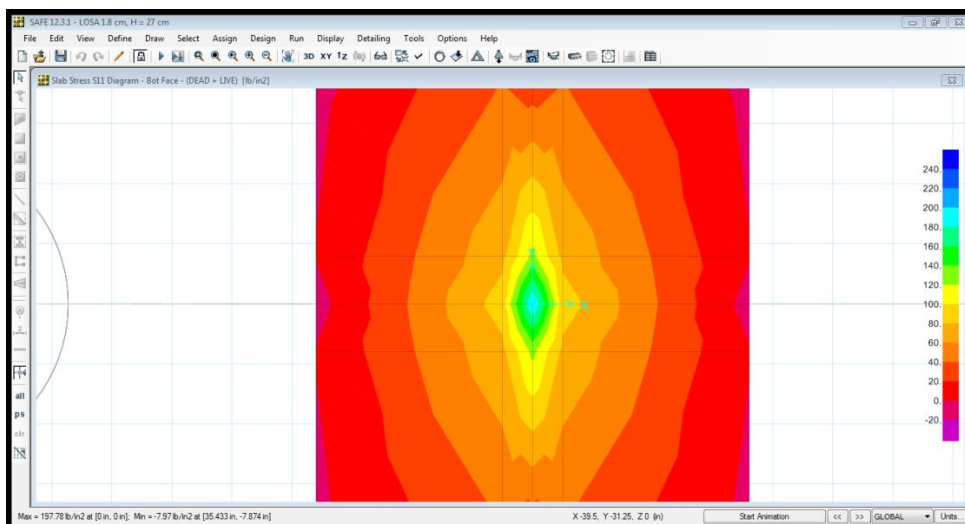
**1.2.2. Reacción del suelo en la losa corta de 27 cm.** La reacción del es de 22.89 kN/m<sup>2</sup> y una reacción en las orillas de 20.86 kN/m<sup>2</sup>, esto es sabiendo que es más que todo en las esquinas donde sufre la menor reacción.



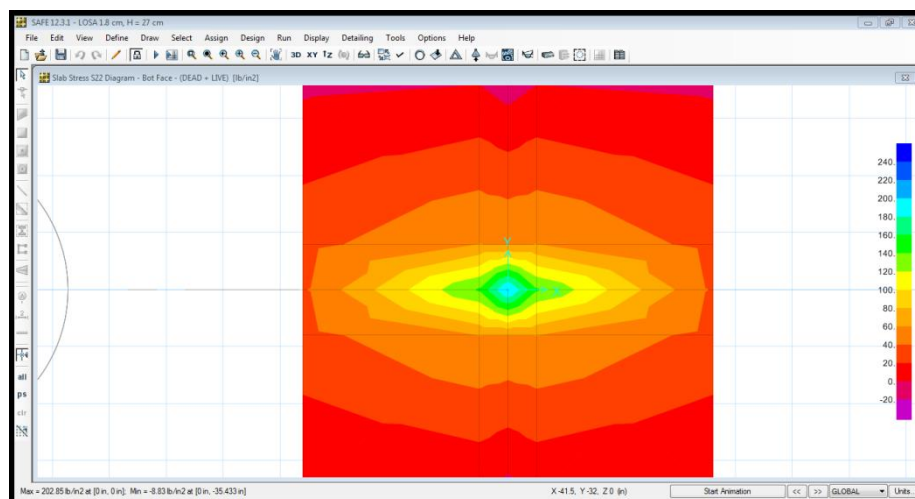
**1.2.3. Esfuerzos Internos de la losa.** Al igual que la losa anterior esta losa sufre esfuerzos internos de tensión, en su parte más baja, donde este esfuerzo es el que nos indica que si la losa debe utilizar refuerzo o no, por lo tanto se debe de considerar lo más cercano a él fuerzo permitido de 473 psi.

Los esfuerzos de esta losa andan entre los 197.78 psi a 202.85 psi en el eje x

**Ilustración 60: Esfuerzo interno Y**

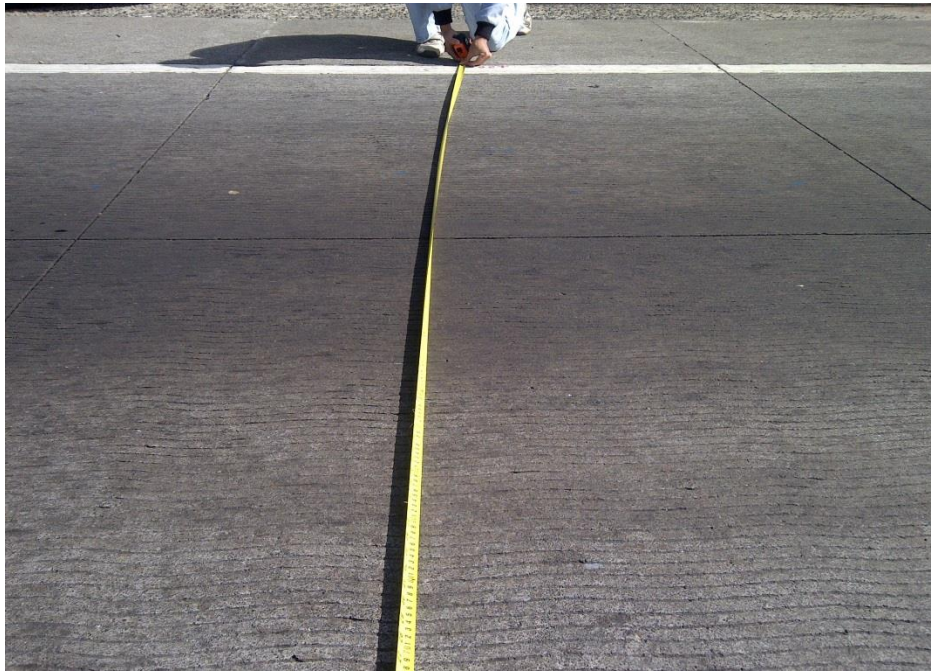


**Ilustración 61: Esfuerzo interno X**



**1.3. Diseño de losa de 1.8 m x 1.8 m , h = 20 cm.** Siguiendo el mismo procedimiento que en los casos anteriores se va cambiando el grosor de la losa, en este caso se utilizó una losa de 20 cm. Este tipo de losa se utilizó en la carretera Interamericana CA-1, camino a San Lucas, después de Ciudad San Cristóbal. Se modularon las losas de 1.8 m x 1.8 m, y con un espesor de losa de 20 cm. Estas dimensiones se pueden apreciar en las Ilustraciones siguientes.

**Ilustración 62: Ancho de carril de 3.6 m.**



Se puede observar que el carril de 3.6 m está dividido en dos, exactamente 1.8 m

**Ilustración 63: Deformación de losa corta de 27 cm**



**Ilustración 64: Espesor de losa 20 cm.**



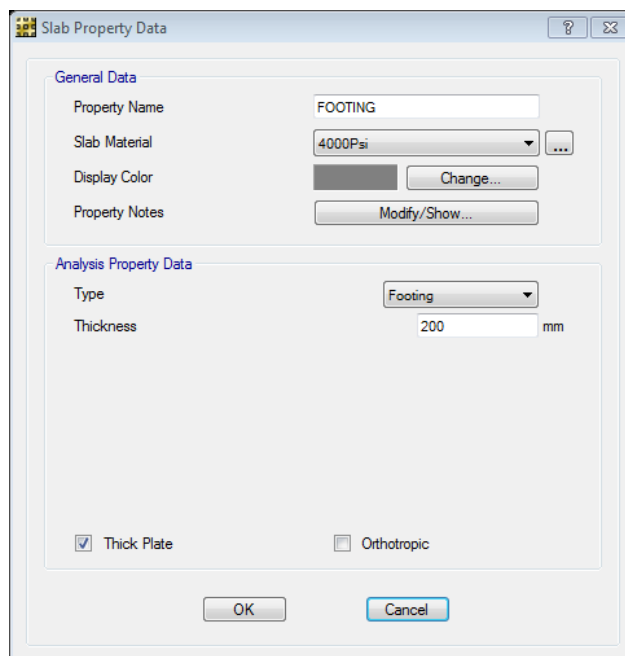
En la siguiente imagen se puede observar un camión pasa justo con sus llantas en losas diferentes, siendo losas de 1.8 m x 1.8 m, esto es la finalidad de las losas cortas.

**Ilustración 65: Camión sobre losas cortas**



Se aprecia perfectamente cómo los ejes caen directamente sólo en una losa, y que nunca van haber dos ejes en una misma losa.

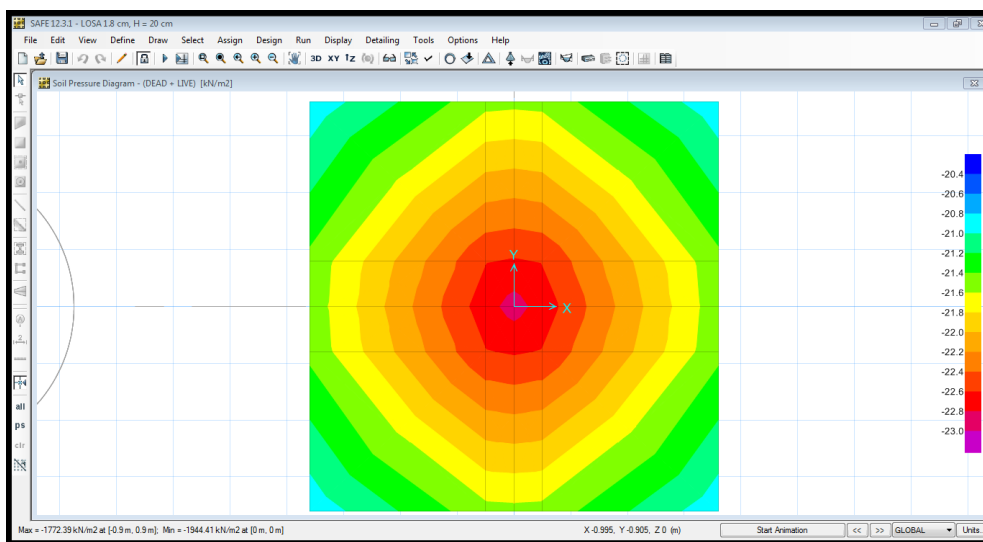
### Ilustración 66: Dimensionamiento para losa de 20 cm



En esta última losa se tiene una deformación de 1.943 mm esto es en su centro y en las esquinas tiene una deformación de 1.753 mm siempre conservando la diferencia de deformaciones teniendo la mayor en el centro y que es donde se concentran la carga y las menores en las esquinas.

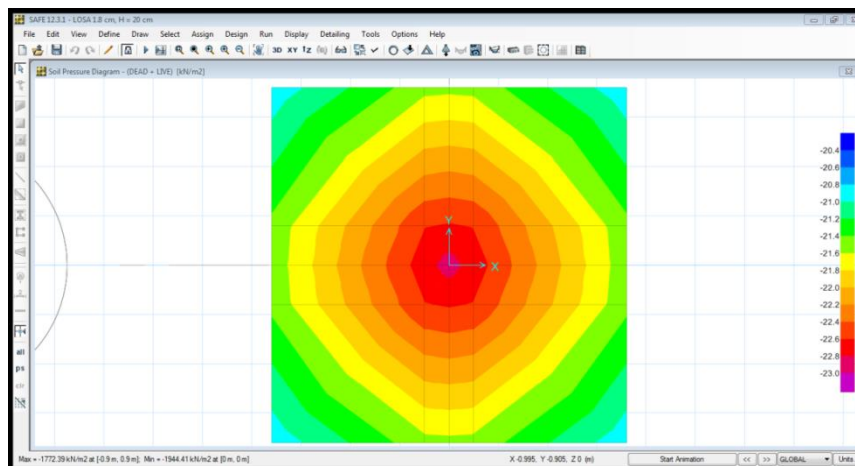
#### 1.3.1. Deformación de losa de 20 cm

### Ilustración 67: Deformación de losa de 20 cm



**1.3.2. Reacción de losa de 10 cm.** En esta losa se tiene una reacción de 22.89 kN/m<sup>2</sup> al centro de la losa, 20.80 kN/m<sup>2</sup> por lo que se puede ver que la diferencia de deformación va aumentando.

**Ilustración 68: Reacción del suelo en la losa de 20 cm**



#### 1.4. Análisis comparativo

**Cuadro 17: Esfuerzos en ejes X y Y de losas cortas**

Espesor		Carga Muerta		S11		S22	
				BASE		BASE	
27	cm	20.6	kN	197.78	psi	202.85	psi
25	cm	19.1	kN	224.59	psi	229.81	psi
20	cm	15.3	kN	325.73	psi	330.36	psi
17	cm	13	kN	427.76	psi	430.23	psi
16.5	cm	12.6	kN	449.57	psi	451.33	psi
16	cm	12.2	kN	473.2	psi	474.18	psi

**Cuadro 18: Deformaciones y reacciones del suelo de losas cortas**

Espesor		Deformación				Reacción del suelo	
		Max (in)	Min (in)	Max (mm)	Min (mm)	Max (kN/mm)	Min (Kn/mm)
27	cm	0.086	0.082	2.177	2.093	25.630	24.640
25	cm	0.0829	0.078	2.106	1.981	24.800	23.620
20	cm	0.0765	0.069	1.943	1.753	22.890	20.860
17	cm	0.0734	0.063	1.864	1.600	21.990	18.970
16.5	cm	0.0731	0.062	1.857	1.580	21.87	18.62
16	cm	0.0727	0.061	1.847	1.549	21.77	18.25

**Cuadro 19: Esfuerzos de losa de 3.6 m x 3.6 m**

Espesor		DEAD		S11		S22	
				BASE		BASE	
27	cm	41.19	kN	104.15	psi	318	psi

**Cuadro 20: Deformaciones y reacciones del suelo en losa de 3.6 m x 3.6 m**

Espesor		Deformación				Reacción del suelo	
		Max (in)	Min (in)	Max (mm)	Min (mm)	Max (kN/mm)	Min (Kn/mm)
27	cm	0.075	0.052	1.905	1.321	25.630	24.640

**Cuadro 21: Características de la losa corta**

<b>Características de la losa corta</b>		
Base	1.8	m
Ancho	1.8	m
Alto	0.270	m
Volumen	0.9	m <sup>3</sup>
Densidad	23,544.0	N/m <sup>3</sup>
Peso	20,596.3	N
	2,099.52	Kg

**Cuadro 22: Características de la losa tradicional**

<b>Características de la tradicional</b>		
Base	3.6	
Ancho	3.6	
Alto	0.270	
Volumen	3.5	m <sup>3</sup>
Densidad	23,544.0	N/m <sup>3</sup>
Peso	82,385.2	N
	8,398.08	Kg

**Cuadro 23: Propiedades de resistencia del concreto**

<b>CONCRETO</b>		
f'c	4000.0	Psi
Tensión	474.3	Psi



## 2. Comparación económica

### 2.1. Corte de Juntas

**Cuadro 24: Costo de cortar concreto en losa tradicional**

<b><i>LOSA TRADICIONAL</i></b>		
Un carril		
Longitud	1.00	km
	1,000.00	m
Largo de losa	3.60	m
Ancho de losa	3.60	m
Carriles	1.00	
Cantidad de cortes	277.78	
Longitud de corte	1,000.00	m
Longitud de corte longitudinal	1,000.00	m
Longitud total	2,000.00	m
Rendimiento de disco	700	ml
Cantidad de discos	2.86	
Costo por disco	\$165.00	
<b><i>COSTO TOTAL DE CORTE</i></b>	<b>\$471.43</b>	
	Q3,771.43	

**Cuadro 25: Costo de cortar concreto en losas cortas**

<b>LOSAS CORTAS</b>		
Un carril		
Longitud	1	km
	1000	m
Largo de losa	1.8	m
Ancho de losa	3.6	m
Carriles	1	
Cantidad de cortes	555.56	
Longitud de corte	2,000.00	m
Longitud de corte longitudinal	2,000.00	m
Longitud total	4,000.00	m
Rendimiento de disco	700	ml
Cantidad de discos	5.71	
Costo por disco	\$165.00	
<b>COSTO TOTAL DE CORTE</b>	<b>\$942.86</b>	
	Q7,542.86	
Relación de cortes contra losa tradicional	100%	

## 2.2. Costo de reducción de espesor de concreto

**Cuadro 26: Costo de concreto en 1 Km de losa tradicional de 1 carril**

<i>TRADICIONAL</i>		
Longitud	1.00	km
	1,000.00	M
Largo de losa	3.6	M
Ancho de losa	3.6	M
Espesor	0.27	m
Carriles	1.0	
Volumen	3.50	m3
Costo concreto m3	Q1,800.00	
Costo por losa	Q6,298.56	
Cantidad de losas		
Volumen carretera	972.00	m3
<i>Costo concreto para carretera</i>	Q1,749,600.00	
	\$218,700.00	

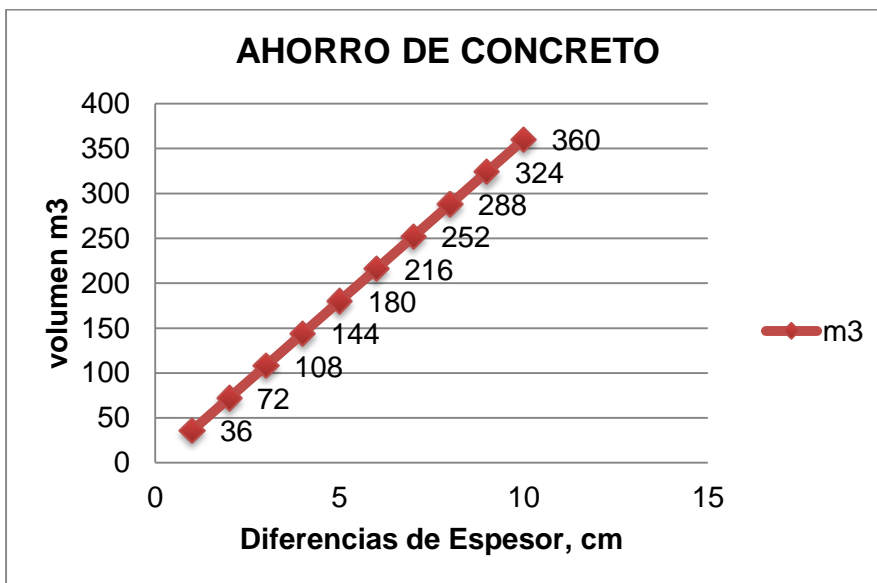
**Cuadro 27: Costo de concreto en 1 Km de losa corta 1 carril**

<b>LOSAS CORTAS 0.2 m</b>		
Longitud	1.00	km
	1,000.00	m
Largo de losa	1.8	m
Ancho de losa	3.6	m
Espesor	0.20	m
Carriles	1.0	
Volumen	1.30	m <sup>3</sup>
Costo concreto m <sup>3</sup>	Q1,800.00	
Costo por losa	Q2,332.80	
Cantidad de losas		
Volumen carretera	720.00	m <sup>3</sup>
Costo concreto para carretera	Q1,296,000.00	
	\$162,000.00	
<b>AHORRO POR REDUCCIÓN DE ESPESOR</b>	<b>26%</b>	

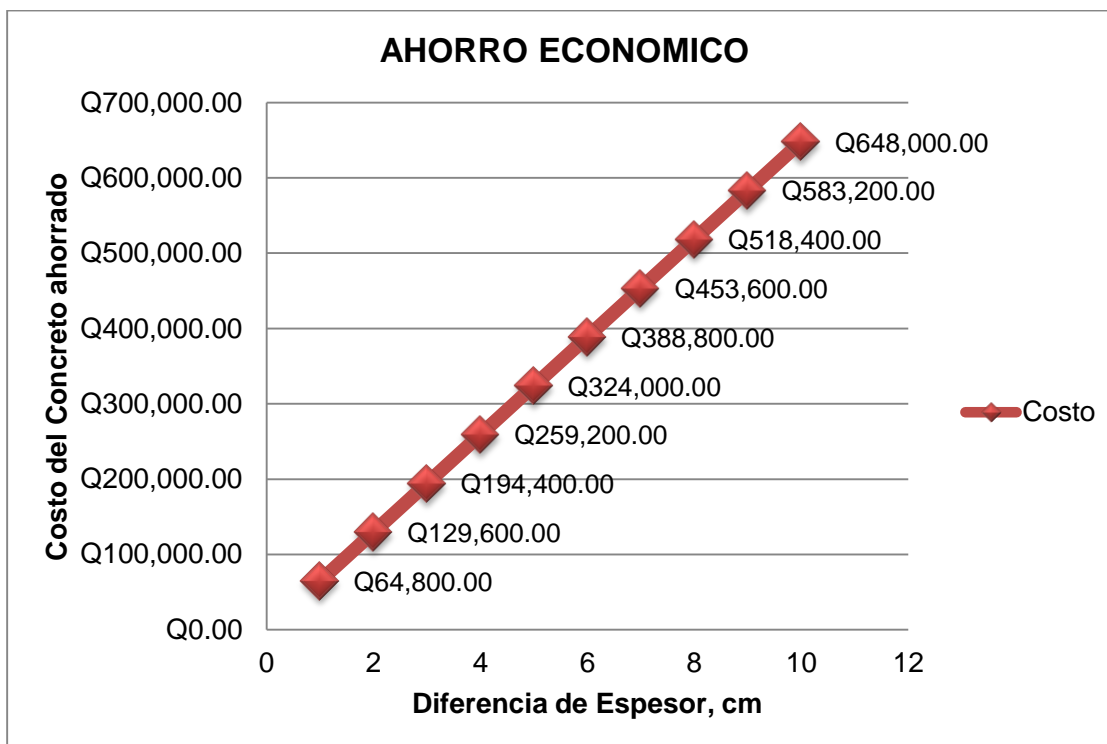
**Cuadro 28: Costo de concreto en 1 Km de losa corta 1 carril de 0.17 m**

<b>LOSAS CORTAS 0.17 m</b>		
Longitud	1.00	km
	1,000.00	m
Largo de losa	1.8	m
Ancho de losa	3.6	m
Espesor	0.17	m
Carriles	1.0	
Volumen	1.10	m <sup>3</sup>
Costo concreto m <sup>3</sup>	Q1,800.00	
Costo por losa	Q1,982.88	
Cantidad de losas		
Volumen carretera	612.00	m <sup>3</sup>
Costo concreto para carretera	Q1,101,600.00	
	\$137,700.00	
<b>AHORRO POR REDUCCIÓN DE ESPESOR</b>	<b>37%</b>	

**Ilustración 69: Costo de concreto en 1 Km de losa corta 1 carril de 0.17 m**



**Ilustración 70: Ahorro económico**



**Cuadro 29: Costo de colocar pasadores de acero**

<b>LOSA TRADICIONAL</b>		
Un carril		
Longitud	1.00	km
	1,000.00	m
Largo de losa	3.60	m
Ancho de losa	3.60	m
Carriles	1.00	
Cantidad de cortes	277.78	
Longitud de corte	1,000.00	m
Longitud de corte longitudinal	1,000.00	m
		<b>m</b>
Cantidad de barras de amarre	1333.333333	
Longitud de varillas para barras	1226.67	m
Cantidad de varillas	204.44	
Quintales	29.21	
Precio del hierro por quintal	Q400.00	
	Q11,682.54	
Cantidad de barras pasajuntas	2500	m
Longitud de varillas para barras	400.00	
Cantidad de varillas	66.67	
Quintales	340.14	
Precio del hierro por quintal	Q400.00	
	Q136,054.42	
<b>TOTAL EN HIERRO PARA CARRETERA</b>	<b>Q147,736.96</b>	
	<b>\$18,467.12</b>	

## VII. IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA AUTODESK INVENTOR PARA LA MODULACIÓN DE LOSAS CORTAS

### 1. Acerca del programa

El programa Autodesk Inventor pertenece a la gama de programas de CAD en 3D, el cual ofrece una gama completa y flexible de programas para diseño mecánico en 3D, simulación de productos, creación de herramientas, ingeniería a la carta y comunicación de diseños. Inventor cuenta con las herramientas para la creación de prototipos digitales, ya que permite producir un modelo 3D de gran precisión que puede contribuir al diseño, visualización y simulación de productos antes de ser construidos. Entre las ventajas que provee el programa están las siguientes:

- Diseño mecánico 3D
- Interoperabilidad con DWG: cuenta con la opción de integrar datos de AutoCAD y 3D en un solo modelo digital.
- Visualización del diseño y documentación de manufactura
- Automatización del diseño
- Simulación integrada y análisis de elementos finitos
- Herramientas y diseño de moldes

**Ilustración 71: Autodesk inventor**





## 2. Consideraciones de diseño

El programa Autodesk Inventor provee de una gran cantidad de opciones de diseño para cualquier tipo de productos o elementos. Con la implementación de este programa para el diseño y modulación de pavimentos convencionales y losas cortas, se busca ampliar las opciones gráficas y analíticas para los mismos. Debido que este programa se inclina notablemente hacia la rama de la mecánica, este no cuenta con opciones directas y consideraciones que, comparado con otros programas de la rama de Ingeniería Civil si cuentan; por lo que para la modulación tanto del pavimento convencional, como el de losa corta se asumieron y tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

**2.1. El suelo.** Cuando de pavimentos se trata, es de vital importancia tomar en cuenta la influencia que el suelo ejerce sobre la carpeta de rodadura, ya que en pavimentos rígidos (como es nuestro caso), tanto la carpeta de rodadura, como la base, subbase y demás, actúan como un bloque unificado para distribuir de una mejor manera las cargas de tráfico.

Debido que el programa no cuenta con una opción que englobe todas las características necesarias y precisas para la simulación del suelo, se optó por implementar la teoría de Westergaard, el cual propone simular el suelo a través de resortes. Esto es, encontrando de acuerdo a la capacidad de soporte propuesta del suelo, el Módulo de Subgrado del mismo, para después calcular un factor K equivalente que se le asignará a cada resorte conociendo el área tributaria del mismo.

Para asimilar de una mejor manera el comportamiento de una losa corta, en cuanto a deformación y estrés se refiere, se modeló una losa corta de dimensiones de 1.80 x 1.80m, variando su espesor entre 18 Y 27 cm. Debido que el programa computacional no posee una opción determinada para la simulación del suelo se procedió a la elaboración de una “cama de resortes” que tuviera un comportamiento similar. Dada los siguientes datos:

$$\sigma_s = 10 \text{ ton/m}^3 \Rightarrow 98.1 \text{ N/m}^2 \quad \text{capacidad de soporte del suelo}$$

$$FS = 3 \quad \text{Factor de seguridad}$$

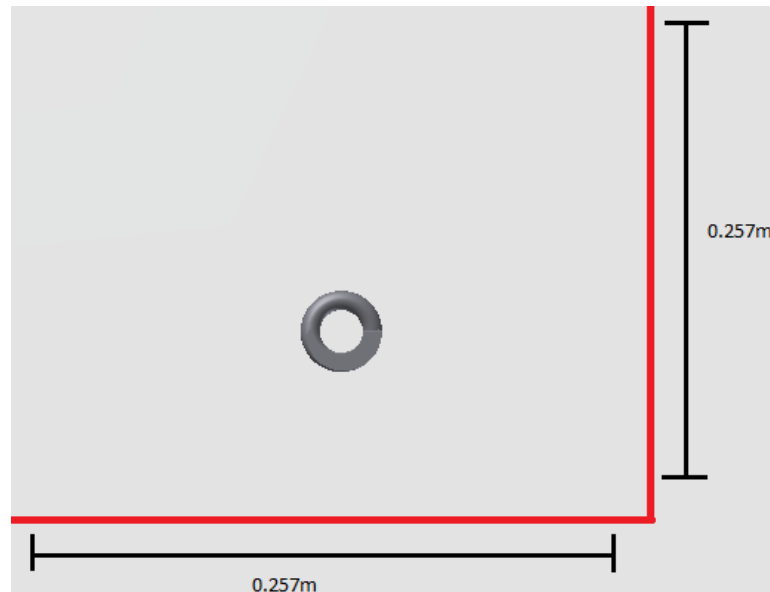
Se calcula el Módulo de subgrado del suelo

$$K_0 = 40(FS)(\sigma_s)$$

$$K_0 = 40 * 3 * 98.1 = 11772 \text{ N/m}^3$$

Para la elaboración de un resorte con comportamiento similar al del suelo se procedió a calcular un  $K_r$  que viene dado por la multiplicación de  $K_0$  por el área tributaria de cada resorte, que se designó de la siguiente manera

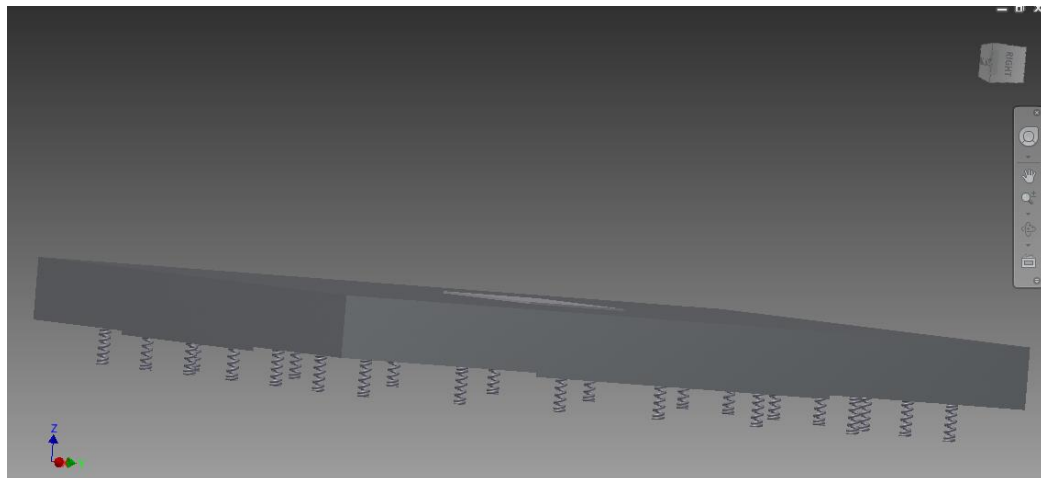
**Ilustración 72 Área tributaria del resorte**



$$A_r = (0.257m)(0.257m) = 0.066m^2$$

$$K_r = A_r * K_0 = 0.066m^2 * 11772 \frac{N}{m^3} = 777.52 \text{ N/m}$$

**Ilustración 73: Losa con cama de resortes**



**2.2. Área de contacto de neumáticos del vehículo.** La transferencia de la carga del vehículo se realiza directamente por los neumáticos. El programa no posee una opción que simule estas características, a causa de esto se crearon placas con espesor despreciable, dos de 40x30cm y una de 40x30 cm para la losa convencional y la losa corta, respectivamente; se optó por estas medidas en base a mediciones realizadas a los neumáticos de transporte pesado. La distancia de 2.6 entre eje viene dada por las especificaciones en AASHTO y mediciones realizadas en campo.

**Ilustración 74: Ejemplo medición de área de contacto**



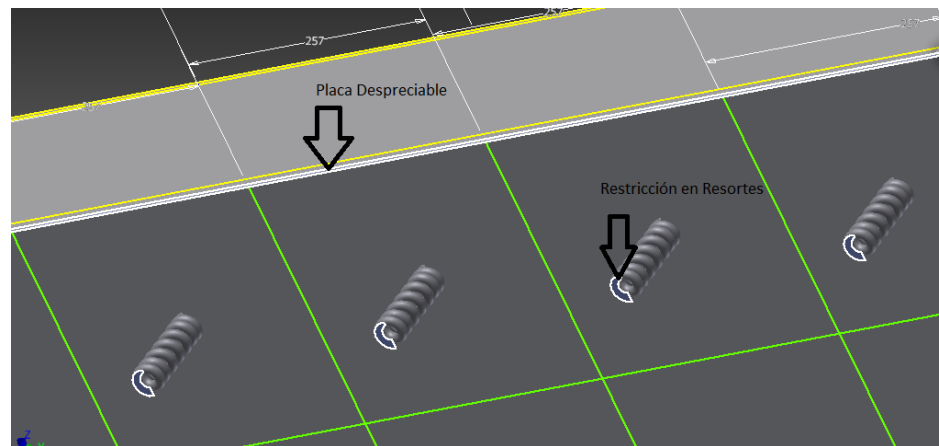
**Ilustración 75: Ejemplo de contacto de neumáticos de vehículo**



**2.3. Restricciones a la losa y resortes.** El programa Autodesk Inventor posee tres formas de restringir los elementos para evitar su movimiento: Empotrado, por fricción y de pivote. Teóricamente la elección más adecuada es la restricción por fricción, pero en este caso al utilizar esta opción el programa permite a las caras laterales deslizarse libremente sin contar con la opción de edición de coeficiente de fricción, lo que causa que el bloque completo de la losa se desplace uniformemente, alejando este comportamiento de la realidad.

La solución a este problema fue apoyar la losa a unas placas que estaban empotradas a la misma con espesor y dimensiones despreciables para que se comportara de una manera apegada a la realidad. Además de que cada resorte posee una restricción empotrada en su parte de soporte, para que no contara con desplazamiento vertical ni horizontal.

**Ilustración 76: Restricciones en losa y resortes**



**2.4. Aplicación de cargas.** Tanto para el modelo de un pavimento convencional, como para el modelo de losa corta se aplicaron dos únicas cargas:

- Carga viva:
  - Para losa convencional: 40 kN en cada placa (simula neumático), 80 kN peso total.
  - Para losa corta: 40 kN en la única placa.
- Carga muerta:
  - Peso propio losa convencional
  - Peso propio losa corta

La carga total aplicada fue la combinación de carga: Viva + Muerta.

## VIII. ELABORACIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

### 1. Modulación de losa convencional

La modulación de la siguiente losa convencional está controlada por la teoría AASHTO 1993, basada en un ejemplo didáctico de SIECA (Secretaría de Integración Económica de Centroamérica).

#### 1.1 Dimensiones de losa

- Largo: 3.60 m
- Ancho: 3.60 m
- Espesor: 27 cm

#### 1.2. Asignación de cargas

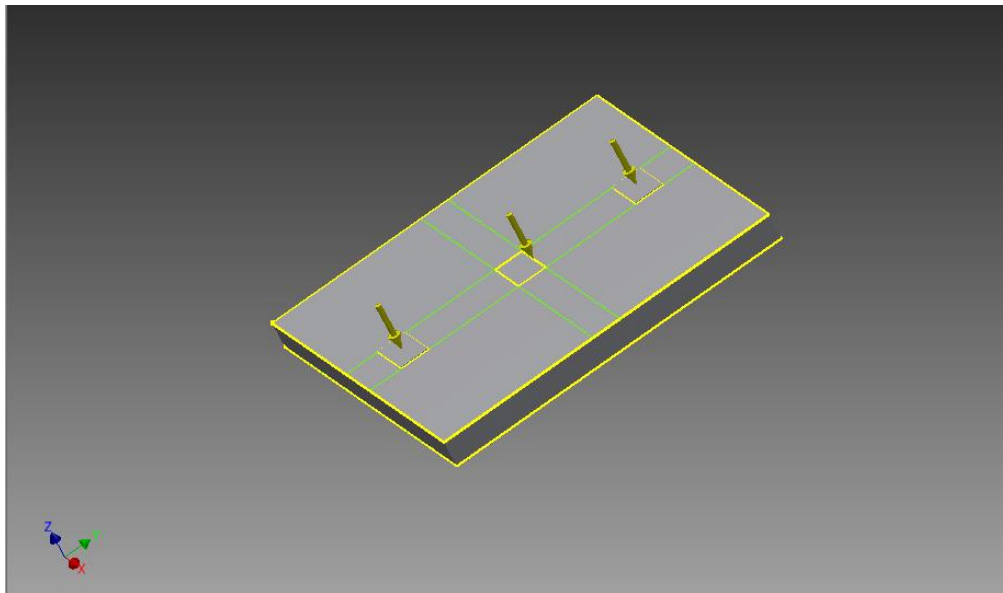
##### 1.2.1. Carga viva.

- 80 kN distribuidos en dos placas (simulando neumáticos)

##### 1.2.2. Carga muerta

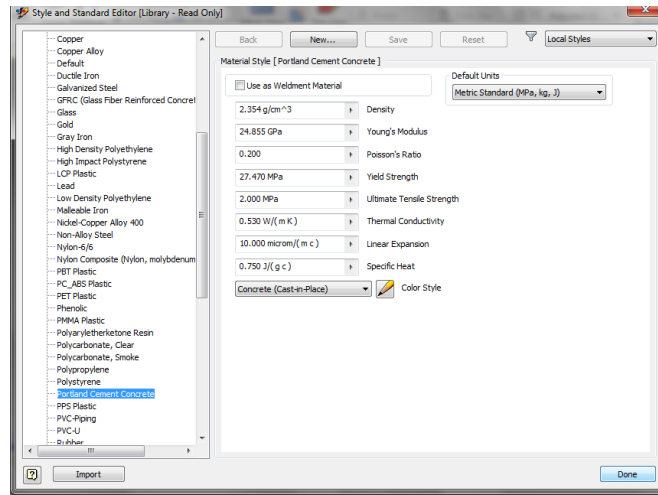
- Peso propio : 80.2 kN

**Ilustración 77: Vista losa convencional de 3.6 x 3.6m**



### 1.3. Características del material

Ilustración 78: Características del material



### 1.4. Resultados

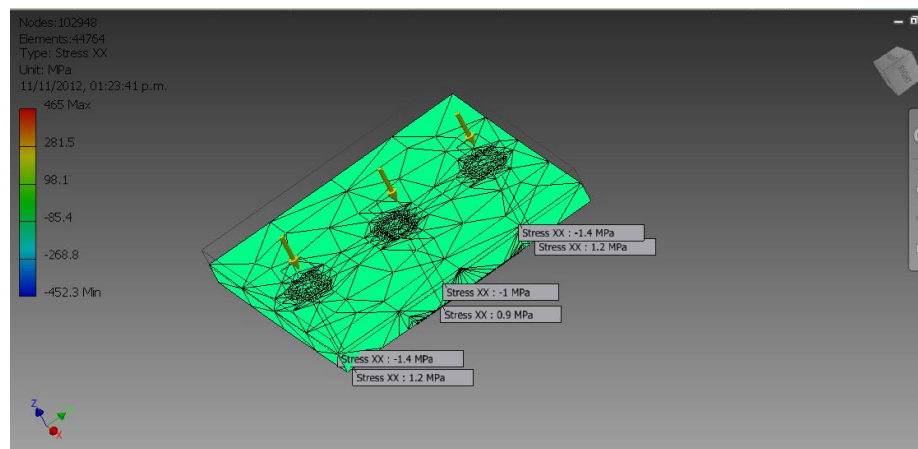
#### 1.4.1. Esfuerzo permisible

$$\sigma_t = 0.62\sqrt{f'c} \quad \text{Valor de } f'c \text{ en MPa de concreto 4000 psi}$$

$$\sigma_t = 0.62\sqrt{28} = 3.28 \text{ MPa}$$

#### 1.4.2. Esfuerzo XX

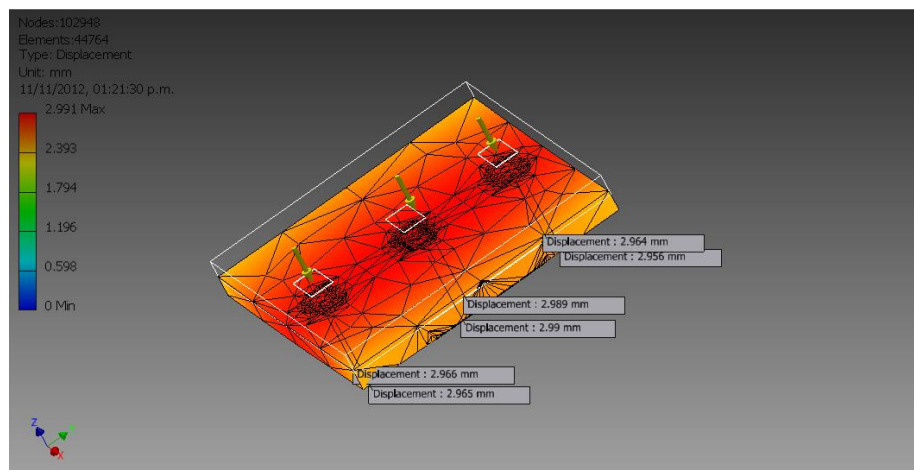
Ilustración 79: Esfuerzo XX losa convencional 27 cm.



El análisis de la losa nos muestra esfuerzos en el plano XX, donde se puede observar que el esfuerzo a compresión de la losa es en cada uno de los neumáticos es de -1.4 MPa y en el centro -1 MPa. Así también se observa que los esfuerzos a tensión son de 1.2 MPa en los neumáticos y en el centro 0.9 MPa.

### 1.4.3. Deformación

**Ilustración 80: Deformación losa convencional 27 cm**



La deformación máxima mostrada según el análisis ocurre en el centro de la losa, y es de 2.99mm. Mientras que en el área de los neumáticos es de 2.96 mm.

## 2. Modulaci3n de losa corta

Para fines comparativos se realiz3 la modulaci3n de una losa corta con las mismas dimensiones pero dos espesores distintos. Esto es, para observar el comportamiento al cambiar de dimensiones de una losa convencional a una losa corta utilizando el mismo espesor (27cm), para luego analizar la factibilidad del m3todo de losas cortas reduciendo su espesor.

Seg3n la teor3a mencionada anteriormente acerca del m3todo de losas cortas, est3 propone la reducci3n de dimensiones a manera que la carga utilizada anteriormente en el inciso C, se distribuya de una mejor manera. Observando tramos de carretera ya existentes se propone dimensiones de 1.80 x 1.80m.

**Ilustración 81: Dimensión carretera pueblo nuevo – El Cerinal**



**Ilustración 82: Distribución de carga de vehículo de losa 1.8 x 1.8m. (a)**



**Ilustración 83: Distribución de carga de vehículo de losa 1.8 x 1.8m. (b)**





Como se puede apreciar en la fotografía anterior, con losas cortas de 1.80 x 1.80 m la carga del vehículo se distribuye a la mitad, soportando únicamente la mitad de carga que se distribuye en una losa convencional. Por lo que para esta modulación se utilizaron las siguientes dimensiones.

## 2.1 Dimensiones de losa

- Largo: 1.80 m
- Ancho: 1.80 m
- Espesor: 27 cm

## 2.2. Asignación de cargas

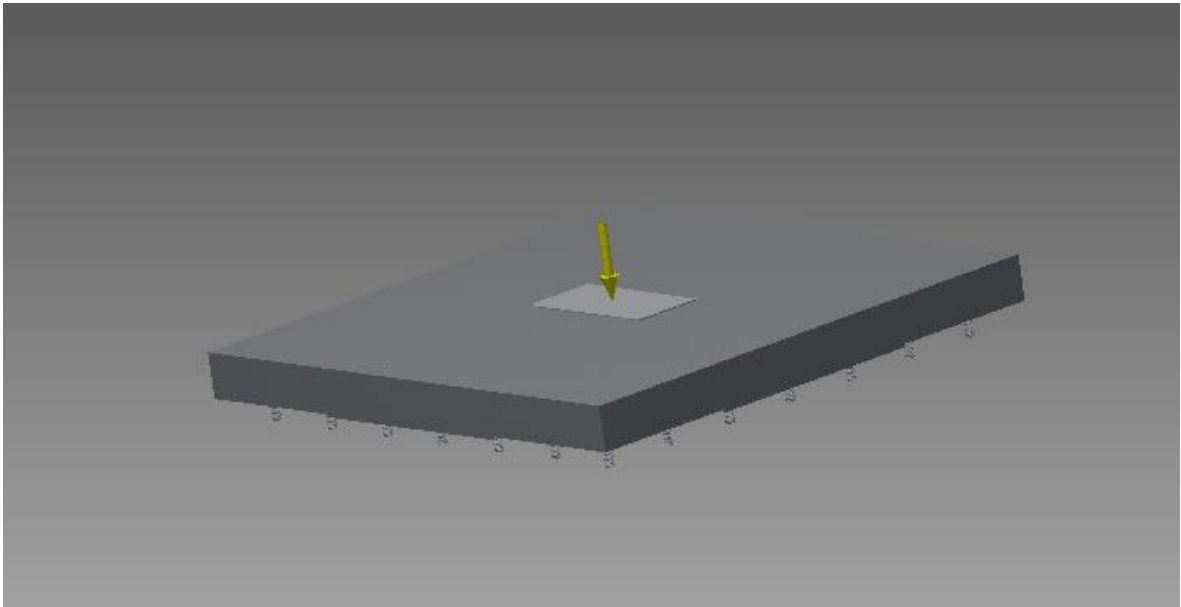
### 2.2.1. Carga viva.

- 40 kN aplicado al centro de la losa

### 2.2.2. Carga muerta

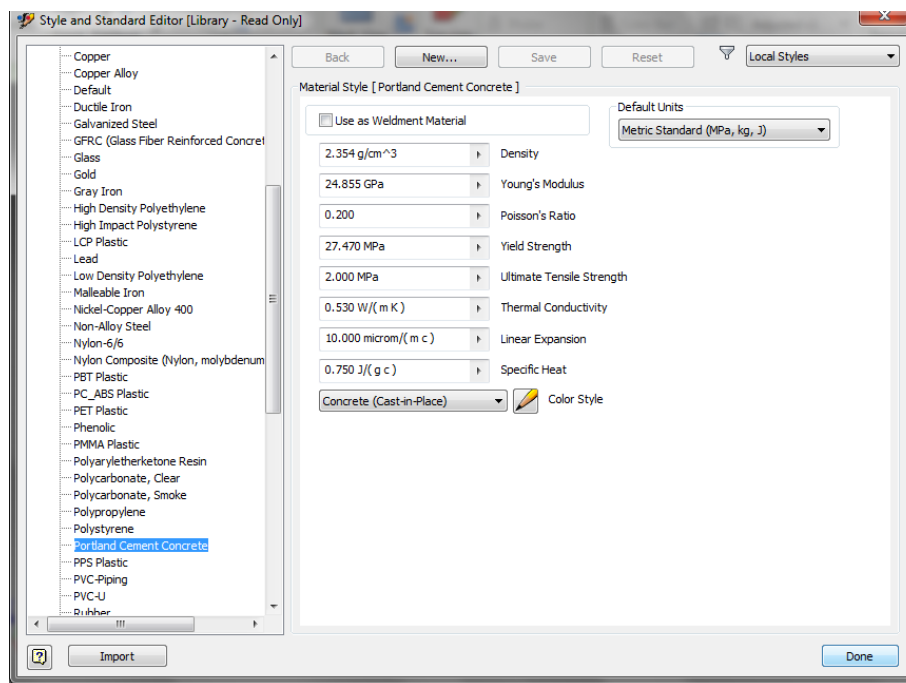
- Peso propio : 20 kN

### Ilustración 84: Asignación de cargas losa corta 27 cm.



## 2.3. Características del material

Ilustración 85: Características de material de losa corta 27 cm.



## 2.4. Resultados losa corta de 27 cm de espesor

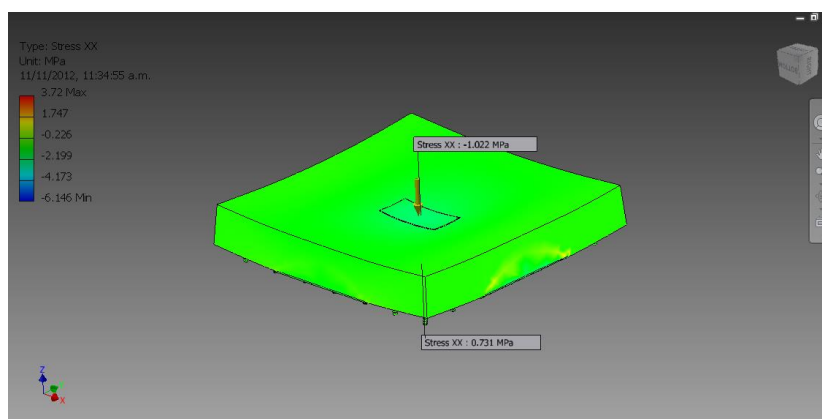
### 2.4.1. Esfuerzo permisible

$$\sigma_t = 0.62\sqrt{f'c} \quad \text{Valor de } f'c \text{ en MPa de concreto 4000 psi}$$

$$\sigma_t = 0.62\sqrt{28} = 3.28 \text{ MPa}$$

### 2.4.2. Esfuerzos XX

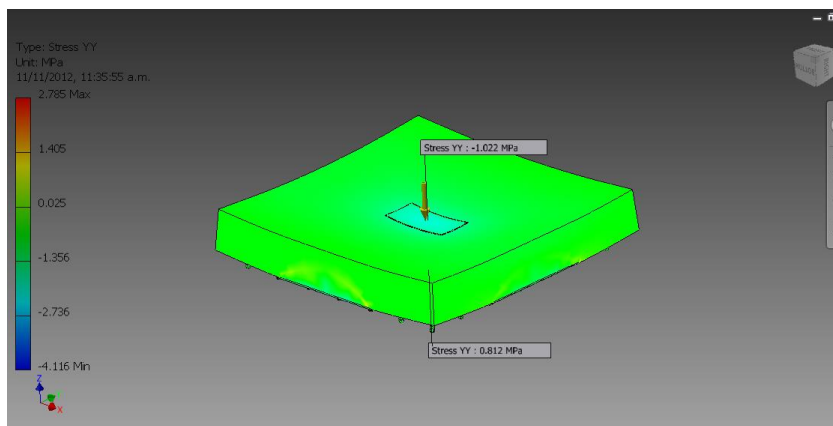
Ilustración 86: Esfuerzos XX losa corta de 27 cm



El análisis de la losa nos muestra esfuerzos en el plano XX, donde se puede observar que el esfuerzo a compresión de la losa es de  $-1.02$  MPa, mientras que el esfuerzo a tensión es de  $0.731$  MPa.

### 2.4.3. Esfuerzos YY

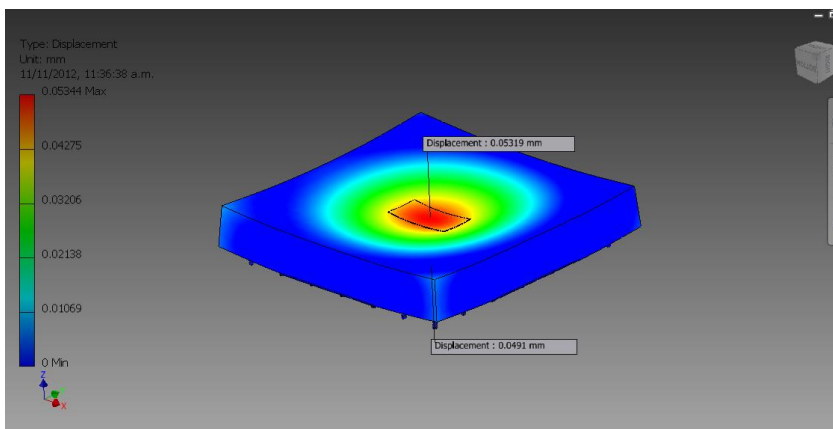
Ilustración 87: Esfuerzos YY losa corta de 27 cm



El análisis de la losa nos muestra los esfuerzos en el plano YY, donde se puede observar que el esfuerzo a compresión es de  $-1.02$  MPa, mientras que el esfuerzo a tensión es de  $0.812$  MPa.

### 2.4.4. Deformación

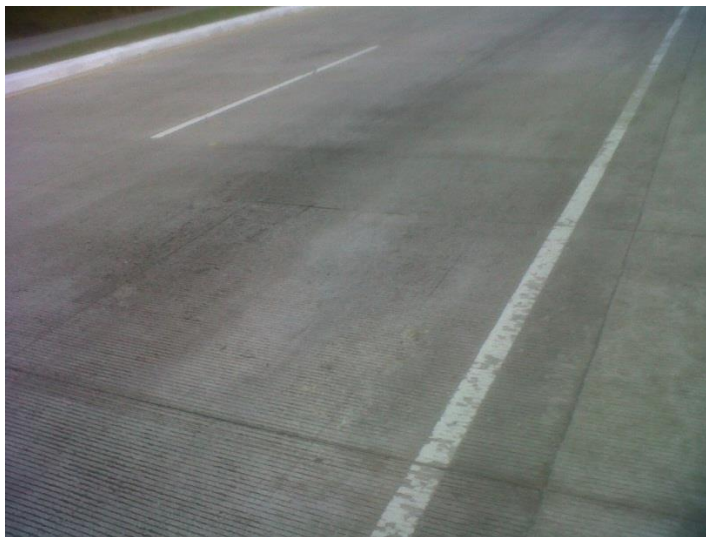
Ilustración 88: Deformación losa corta de 27 cm



La deformación máxima mostrada según el análisis ocurre en el centro de la losa, y es de  $0.0534$  mm.

**2.5. Resultados losa corta de 18 cm espesor.** Se aplicó la teoría de losas cortas, la cual busca reducir los espesores de pavimentos con respecto al diseño convencional. Para esto se hizo una recopilación de información acerca de los pavimentos ya existentes en Guatemala, en los cuales se aplicó dicha teoría. Se seleccionó el tramo de carretera de pavimento Pueblo Nuevo Viñas – Cerinal, Barberena, carretera interamericana CA-1, para tomarlo como ejemplo y basarnos en datos más cercanos a la realidad.

**Ilustración 89: Tramo carretera Pueblo Nuevo Viñas – El Cerinal**



**Ilustración 90: Espesor de pavimento pueblo Nueva Viñas – El Cerinal**



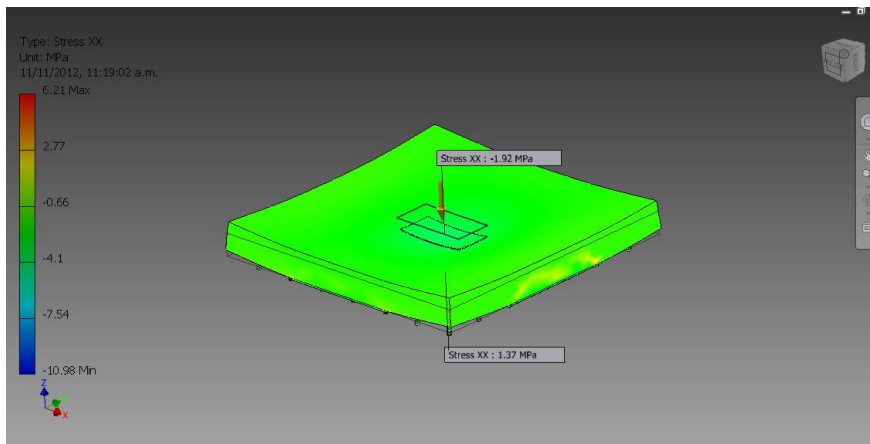
### 2.5.1. Esfuerzo Permisible

$$\sigma_t = 0.62\sqrt{f'c} \quad \text{Valor de } f'c \text{ en MPa de concreto 4000 psi}$$

$$\sigma_t = 0.62\sqrt{28} = 3.28 \text{ MPa}$$

### 2.5.2. Esfuerzos XX

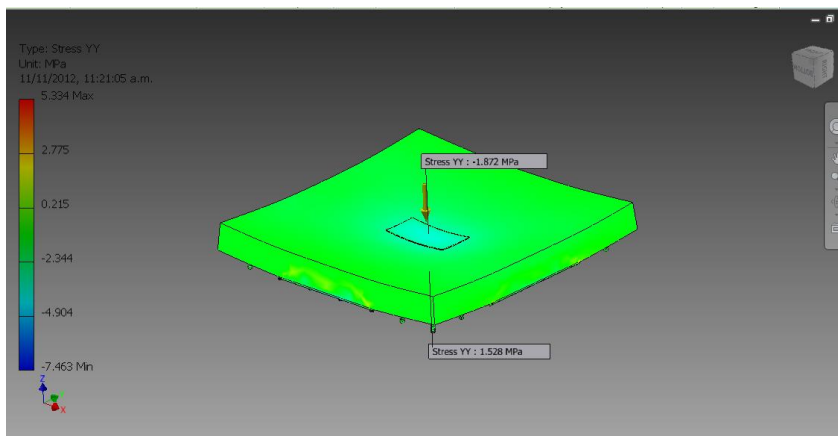
**Ilustración 91: Esfuerzos XX losa corta de 18 cm**



El análisis de la losa nos muestra esfuerzos en el plano XX, donde se puede observar que el esfuerzo a compresión de la losa es de  $-1.92$  MPa, mientras que el esfuerzo a tensión es de  $1.37$  MPa.

### 2.5.3. Esfuerzos YY

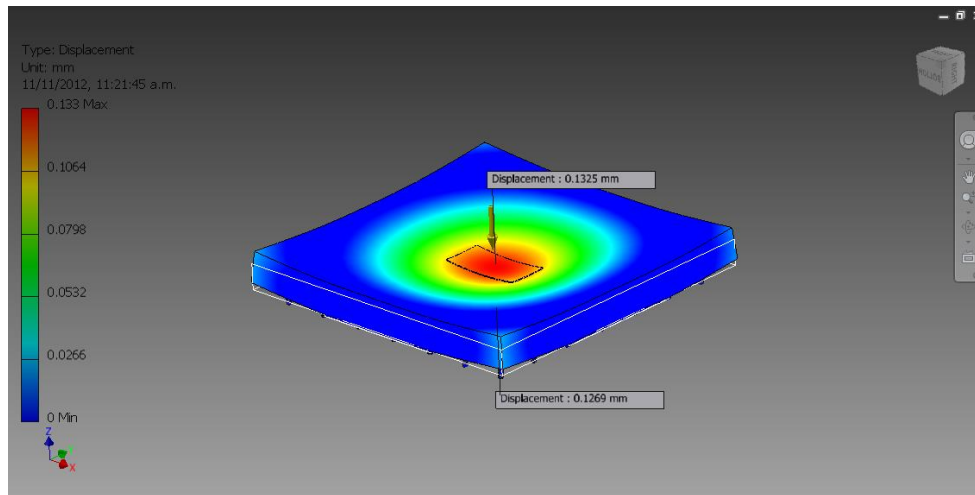
**Ilustración 92: Esfuerzos YY losa corta de 18 cm**



El análisis de la losa nos muestra los esfuerzos en el plano YY, donde se puede observar que el esfuerzo a compresión es de -1.872 MPa, mientras que el esfuerzo a tensión es de 1.528 MPa.

#### 2.5.4. Deformación

Ilustración 93: Deformación losa corta 18 cm



La deformación máxima mostrada según el análisis ocurre en el centro de la losa, y es de 0.133 mm.

## IX. DESCRIPCIÓN GENERAL DE COSTOS

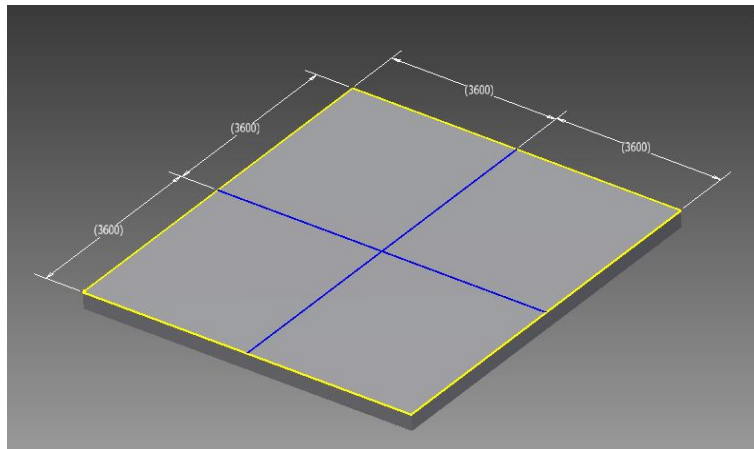
Para fines comparativos y con el objetivo de comprobar la factibilidad del método constructivo de losas cortas, se realizó un análisis económico general sobre los costos que implican la construcción de un tramo de 8 km de pavimento rígido, tomando en cuenta las dimensiones y modulaciones anteriormente expuestas, para la losa convencional y losa corta de 18 cm de espesor. En este análisis únicamente se tomaron en cuenta factores como cantidad

### 1. Costos generales pavimento convencional

#### 1.1. Datos generales

- 2 carriles
- Modulación de 3.6 x 3.6 m
- 3 cortes longitudinales
- Cortes transversales a cada 3.6m
- Espesor de 27 cm
- Concreto 4000 psi

#### Ilustración 94: Modulación de pavimento convencional



**1.2. Volumen de concreto.** Se calculó el volumen total de concreto en el tramo de 8 km, tomando en cuenta los dos carriles en un sentido.

**Cuadro 30: Volumen de concreto losa convencional (2 carriles)**

<b>Volumen de concreto losa convencional (2 carriles)</b>			
<b>Elemento</b>	<b>1er Carril (m3)</b>	<b>2do Carril (m3)</b>	
Ancho	3.6	3.6	
Largo	8000	8000	
Espesor	0.27	0.27	<b>Total</b>
Volumen	7776	7776	15552

**1.3. Cantidad de metros lineales de corte en juntas.** Se cuantificaron los metros lineales totales de cortes de juntas, tomando en cuenta 3 cortes longitudinales a lo largo de los 8 km, espaciados a 3.6m.

**Cuadro 31: Metros lineales de corte de juntas**

<b>Metros lineales de corte de juntas</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Cantidad de cortes por carril</b>	<b>Longitud</b>	<b>Total ml</b>
Corte longitudinal	2	8000	16000
Corte transversal	2222.22	7.2	15999.984

**1.4. Cuantificación de discos de corte de juntas.** Para el corte de las juntas se utilizan discos especiales de corte de concreto, para lo cual conociendo el rendimiento de estos, se procedió a calcular la cantidad aproximada de discos a utilizar.

**Cuadro 32: Cuantificación de discos de corte de juntas - losa convencional**

<b>Elemento</b>	<b>Rendimiento del disco (m)</b>	<b>Longitud total</b>	<b>Cantidad de discos</b>
Rendimiento del disco longitudinal	700	16000	23
Rendimiento del disco transversal	700	15999.984	23



**1.5. Cálculo de costos.** De acuerdo a la cuantificación anterior se procedió a calcular los costos totales, incluyendo concreto y los discos de corte.

**Cuadro 33: Presupuesto general losa convencional**

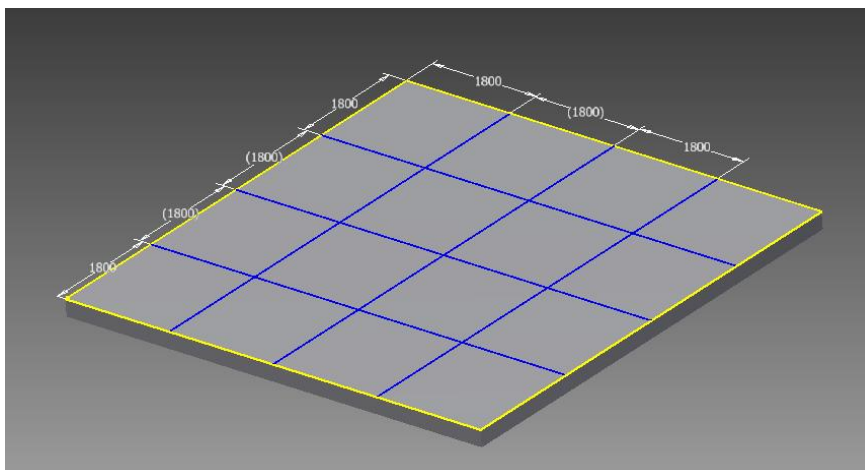
Presupuesto general losa convencional				
Elemento	Cantidad	Unidad	Precio	Total
Concreto	15552	m3	Q1,800.00	Q27,993,600.00
Discos para corte	46	Unidad	\$165.00	Q59,961.00
			<b>Total</b>	Q28,053,561.00

## 2. Costos Generales losa corta

### 2.1. Datos generales

- 2 carriles
- Modulación de 1.8 x 1.8 m
- 5 cortes longitudinales
- Cortes transversales a cada 1.8m
- Espesor de 27 cm
- Concreto 4000 psi

**Ilustración 95: Distribución carril losa corta**



**2.2. Volumen de concreto.** Se calculó el volumen total de concreto en el tramo de 8 km, tomando en cuenta los dos carriles en un sentido.

**Cuadro 34: Volumen de concreto losa corta 2 carriles**

<b>Volumen de concreto losa corta 2 carriles</b>			
<b>Elemento</b>	<b>1er Carril (m3)</b>	<b>2do Carril (m3)</b>	
Ancho	3.6	3.6	
Largo	8000	8000	
Espesor	0.18	0.18	<b>Total</b>
Volumen	5184	5184	10368

**2.3. Cantidad de metros lineales de corte de juntas.** Se cuantificaron los metros lineales totales de cortes de juntas, tomando en cuenta 5 cortes longitudinales a lo largo de los 8 km, espaciados a 1.8m

**Cuadro 35: Metros lineales de corte de juntas - losa corta**

<b>Metros lineales de corte</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Cantidad de cortes por carril</b>	<b>Longitud</b>	<b>Total</b>
Corte longitudinal	4	8000	32000
Corte transversal	4444.44	7.2	31999.97

**2.4. Cuantificación de discos de corte de juntas**

**Cuadro 36: Cuantificación de de discos de corte de juntas**

<b>Elemento</b>	<b>Rendimiento del disco (m)</b>	<b>Longitud total</b>	<b>Cantidad de discos</b>
Rendimiento del disco longitudinal	700	32000	46
Rendimiento del disco transversal	700	31999.97	46

**2.5. Cálculo de costos****Cuadro 37: Presupuesto general - losa corta**

<b>Presupuesto general losa convencional</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Total</b>
Concreto	10368	m3	Q1,800.00	Q18,662,400.00
Discos para corte	92	Unidad	\$165.00	Q119,922.00
			<b>Total</b>	Q18,782,322.00

## **X. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MÉTODO AASHTO**

El espesor de losa obtenido mediante este método incluye todas las consideraciones y requerimientos para el diseño de pavimentos rígidos presentados por la norma AASHTO.

Se observa que para un período de diseño de 15 años se presenta una cantidad de aproximadamente cuatro millones ochocientos de ESAL's por carril. Esto puede ser considerada como una carretera pavimentada de volumen bajo. Se introdujeron los valores pertinentes sobre los ejes equivalentes de cada uno de los tipos de vehículos a transitar en la estructura.

El espesor obtenido es de 10.75 pulgadas, es decir 27 cm. Valor que excede con alguno de los espesores presentes en pavimentos de las carreteras dentro del país. Por lo que se puede considerar como un diseño conservador. Es necesario desarrollar pruebas con esfuerzos reales para corroborar este diseño y monitorear el comportamiento de este modelo propuesto sin dispositivos de transferencia de carga o dovelas.

El objetivo de realizar lo mencionado con anterioridad es para desarrollar métodos alternativos o soluciones alternas para que tanto el diseño como la serviciabilidad de los pavimentos se cumplan y se obtenga una red de comunicación vial funcional.

## **XI. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVOS DE RESULTADOS DE PROGRAMA SAFE**

Las losas cortas son elementos que ya han empezado a mejorar el desarrollo de carreteras, ayudando a reducir costos y mejorar la calidad del producto final que es la red vial de Guatemala. La mejora de la calidad implica la durabilidad teniendo en cuenta el mantenimiento de las carreteras, por lo que una mejora del desarrollo y método constructivo de pavimentos, es un avance a nuestro país.

Para cumplir el objetivo de este trabajo que es implementar las bases teóricas para un modelado experimental y computacional de losas cortas, se utilizó el programa SAFE, el cual es un paquete computacional, donde se diseñan losas de todo tipo, ya sean losas tradicionales, simples, zapatas dobles o zapatas simples. En el desarrollo de una losa tradicional se utilizó una zapata combinada y en el modelado de la losa corta se utilizó una zapata simple, para la losa tradicional las dimensiones son de 3.6 m por 3.6 m y para la losa corta 1.8 m por 1.8 m, las dimensiones anteriores se seleccionaron debido a que un carril es de 3.6m, obligando a que sólo una llanta entre en cada losa al mismo tiempo esto es para la losa corta, ya que en la losa tradicional siempre entra el eje completo con sus dos llantas. La carga que se utilizó fue de 80 kN esto es lo que representa un ESAL, y ésta se distribuye en cada uno de las llantas teniendo al final 40 kN por llanta, esta carga se distribuyó en un área de 40 cm x 25 cm lo cual nos representa el área de contacto de una llanta promedio, la cual fue medida en varios vehículos. Para poder definir el suelo con un módulo de subgrado, se utilizó una capacidad de carga de 10 Ton/m<sup>2</sup>, un factor de seguridad de 3 y un asentamiento permisible de 25.4 mm, nos entrega un módulo de subgrado de 11,772 kN/m<sup>3</sup>. El concreto utilizado fue de 4,000 psi como lo piden las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, para losas de pavimentos principales. El valor del suelo, es arbitrario ya que existen muchas clases de suelo y se supuso una capacidad soporte promedio solo para efectos de ejemplificación. Para el espesor como se mencionó anteriormente se tomó un valor del espesor de un resultado que AASHTO propone y con base en ese se empezó con el desarrollo de las demás losas, se considera un espesor de 20 cm debido a que ya existen carreteras construidas con este espesor, y según los resultados que se obtuvieron

se genero una losa de 17 cm, donde mas adelante se analiza el por que se puede modelar un espesor así.

El proceso de la elaboración de la losa tradicional en el programa SAFE consiste en definir los materiales a utilizar, tanto del suelo como del pavimento rígido, que en este caso es el concreto, se especifica la coordenada de la carga distribuida en las llantas que van separadas una distancia de 2.6 m, la cual respetan la mayoría de fabricantes de vehículos pesados, esto tiene que ser de esta manera por que no se pueden construir carreteras para cada tipo de vehículo.

Se desarrollaron varias losas esto con el fin de encontrar hasta que espesor de losa se puede llegar sin que los esfuerzos de tensión requieran acero mínimo, el esfuerzo de tensión es calculado de la de la fórmula que se encuentra en AASHTO LRFD 2007 SI, sección C5.4.2.7, que es  $f_r = 0.62\sqrt{f'_c}$  esta fórmula es para el sistema internacional, y para el sistema inglés es  $f_r = 7.5\sqrt{f'_c}$ , la cual nos da una capacidad de resistir la tensión de 474.3 psi, se buscó llegar lo más cerca a este valor debido a que si los esfuerzos de tensión son menores, el mismo concreto de puede soportar esta tensión, por lo tanto no hay necesidad de colocar acero.

Se modelaron las losas en el programa SAFE, debido a la versatilidad de esta herramienta, se puede modificar con facilidad los espesores de las losas y volverlas a analizar de manera eficiente, las losas que se analizaron fueron las losas cortas, las cuales se comenzaron con un espesor igual al de la losa tradicional de 3.6 m x 3.6 m que es de 27 cm, partiendo de ésta se analizaron las losas reduciendo el espesor, después de correr el programa, se analizan los dos ejes de la losa tanto en x como en y, esto es debido a que la carga no se aplica de manera simétrica con respecto a los ejes, en el eje x las distancias son más cortas ya que la llanta tiene un ancho aproximado de 25 cm y en el eje y es de 40 cm, por lo que los esfuerzos son relativamente diferentes, comenzando por el espesor de 27 cm las tensiones en la losa fueron de 202.85 psi la mas critica que es en el eje x, esto representa un 42% de la capacidad del concreto de 4,000 psi. Luego se analizaron las demás losas, la de un espesor de 20 cm tiene esfuerzos de tensión de 330.36 psi en su eje x siendo el más crítico que representa un 70% de la capacidad del concreto. Se logra llegar hasta un espesor de 16.5 cm con esfuerzos de tensión de 451.33 psi representando este un 95% de la capacidad del concreto estando al límite estado el cual no se recomienda ya que todos estos modelos se tiene que comprobar en un laboratorio de resistencia de materiales. En la losa de 3.6 x3.6 y de 27 cm de espesor

los esfuerzos indican un 318 psi esto representando un 67% de la capacidad del concreto si se compran con la losa corta de que sólo utiliza un 43 % vemos significativamente la diferencia de esfuerzos generados por las dimensiones de la losa.

Una cualidad al momento de modelar las losas es que mientras se va reduciendo la losa se debe de ir cambiando la carga muerta que es el mismo peso de la losa, esto puede generar datos que no representan el comportamiento adecuado de la losa, dando valores mayores a los esfuerzos en la tensión, esto hace que se condicionen los espesores de las losas.

Las deformaciones como se puede apreciar en la Tabla 6 van disminuyendo conforme la losa va perdiendo peralte, esto puede parecer un poco fuera de lo común debido a que se espera que aumenten las deflexiones, por el poco espesor de losa, pero al igual que las losas reducen su peralte, la carga muerta va disminuyendo ya que el peso de la losa se reduce, esto genera losas más livianas, generando un ahorro en el concreto y es una ventaja para cualquier constructor, siempre todos estos análisis se deben de analizar en un laboratorio. Las deflexiones que se obtienen están en un rango entre 2.17 mm a 1.84 mm la deflexión mayor pertenece a la losa de 27 cm y la menor a la losa de 16 cm, las cuales sólo varían un 15%, lo permisible para estas deflexiones es de 25 mm, que ya están consideradas en el módulo de subgrado del suelo (k).

Como se puede observar en las gráficas los elementos se deforman debido a la carga rectangular de la llanta, al igual se puede apreciar como la deformación va aumentando mientras más nos acercamos al punto donde se aplica la carga, esto es un modelo bastante útil se pueden ver también las deformaciones en las esquinas que es donde suele fallar una losa. En la losa de 3.6 m<sup>2</sup> se puede observar cómo actúan las dos llantas en la losa generando cambios de esfuerzos efecto que no sucede en la losa corta.

Las juntas es un tema importante debido a que esta parte de la carretera es donde se controla la filtración de agua, estas tienen que estar 100% selladas de lo contrario generara debilitamiento en la base. Una ventaja de la losa tradicional es que no tiene tantas juntas en cambio una losa corta tiene aproximadamente el doble de juntas en este caso por la modelación así es. Para sellar estas juntas se usa un tipo de esponja flexible que se ingresa y aparte se sella con una sustancia derivada del petróleo (emulsión).

En el tema de las juntas, existen los pasadores de cortes que sólo se utilizan en las losas tradicionales, ya que el fin de las losas cortas es eliminar estos elementos en

este sentido las losas cortas tienen una gran ventaja ya que se elimina este costo y la reducción de trabajo en construcción de carretera.

Se realizó un estudio comparativo en los costos de los materiales para la construcción de un kilómetro de carretera, para empezar se analizó el costo de los discos que se utiliza para general las juntas la losa corta utiliza un 100% de la cantidad de discos que se utilizarían en una losa tradicional, en este caso es así, debido a la modulación de la losa que es de 3.6 m por 3.6 m, y la losa corta es de 1.8 m por 1.8 m. En el costo del concreto se puede observar que en un kilómetro de carretera de un solo carril de un ancho de 3.6 m el ahorro por centímetro reducido es de 36 metros cúbicos, así que si se construye una carretera de 27 cm y puedes observar según los resultados que se puede llegar a espesores de 17 cm nos ahorramos 360 m<sup>3</sup> de concreto lo cual representa un ahorro del 37% del costo del concreto.

En los costos del hierro se asumieron valores para poder ejemplificar el costo al igual que se asumen todo el hierro es corrugado, se colocan dovelas de 1 1/4 pulg de 46 cm de longitud a cada 30 cm estos es para las dovelas que van transversalmente a la carretera, y las barras de amarre van a ser de 1/2 pulg y de 92 cm de largo a cada 75 cm. Con esta información se calculo la cantidad de hierro y el costo estimado de Q400.00 el quintal de hierro. El costo total del acero a utilizar en en la losa tradicional representa un costo del 8%.

En esta ejemplificación económica 1 kilómetro de carretera tradicional tiene un costo de Q1 9000,00.00 aproximado y el costo de la losa corta de 1 kilómetro de longitud y del mismo ancho es de Q1,100,000.00, teniendo un ahorro de Q800,000.00 que representa un 41% de economía, esto es una diferencia de 10 cm en el espesor de la losa, teniendo una losa de 17 cm lo que se permite el análisis según los esfuerzos de tensión.



## **XII. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS COMPARATIVOS DE RESULTADOS**

### **1. Aspectos generales**

La construcción de pavimentos rígidos en nuestro país y en gran parte de países latinoamericanos se rigen por normas apegadas a las normas AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Official). Estas normas sufren constantemente de innovaciones y cambios, con el objetivo de mejora en cada proceso constructivo. En Guatemala la innovación de procesos y técnicas de construcción de pavimentos se ven afectados negativamente, ya que las normas locales que rigen dichos procesos y técnicas no son actualizadas de manera constante. Cabe mencionar que hoy en día, la Dirección General de Caminos, a través del Manual de Especificaciones Generales Para la Construcción de Carreteras y Puentes, se rige básicamente en las normas AASHTO 1993, normas que sufren un atraso con respecto las publicaciones recientes de AASHTO. Esto no permite que los procesos de construcción de pavimentos tengan un constante crecimiento e innovación.

El método constructivo de losas cortas ha tomado auge en los recientes años en Guatemala. A medida que transcurren los años se puede observar cómo ha aumentado la construcción de más carreteras y vías alternas con este método. Esto es debido que el concreto hidráulico posee características que brindan de una mayor durabilidad, proveyendo una mejor calidad de servicio al conductor. Así también, el método constructivo de losas cortas brinda un nivel más óptimo de diseño en las carreteras, ya que su dimensionamiento permite que las cargas se distribuyan de manera más eficiente, permitiendo la construcción de losas con espesores más pequeños que las convencionales.

Hoy en día, Guatemala no posee con normas reconocidas para el diseño de Losas Cortas, parte de las construcciones que se han llevado a cabo en nuestro país utilizando este concepto, son basados en la metodología de dimensionamiento de AASHTO 1993. Esto es debido que no se han realizado investigaciones exhaustivas sobre el comportamiento de este método, para así poder contar con una norma de diseño que rijá parámetros y condiciones que respalden esta forma de construcción.

## **2. Implementación del programa computacional como herramienta de diseño de pavimentos**

La necesidad de búsqueda de nuevas fuentes de diseño influye en la decisión de implementar el uso de nuevos programas computacionales, para que las opciones y fuentes de apoyo para la toma de decisiones sean más amplias. Esto es debido que a medida que pasa el tiempo los retos y exigencias de diseño aumentan y contar con más material de apoyo aumenta la eficacia y optimización de recursos.

Con base en los resultados obtenidos anteriormente se puede observar que debido que el programa Autodesk Inventor se inclina notablemente hacia el lado del diseño mecánico, se necesita que en el modelo computacional se asuman ciertos aspectos, para poder de una mejor manera asemejarlo a la realidad.

La aplicación del concepto del módulo de subgrado es un factor importante a resaltar, debido que las características del suelo y su comportamiento rigen también el comportamiento de la carpeta de rodadura. A causa de que el programa no cuenta con una opción directa para la simulación de las características del suelo, la elaboración de una cama de resortes se vuelve una opción adecuada. Sin embargo este aspecto pudo ser un factor de error relevante en los resultados obtenidos, esto es debido que en la realidad un suelo posee características que el resorte no posee. Además de que en nuestro diseño únicamente se utilizaron 49 y 98 resortes para las losas de 1.8 x 1.8 y 3.6 x 3.6m respectivamente, mientras que a medida que la cantidad de resortes aumenta y el área tributaria de carga para estos disminuye, se obtienen resultados más cercanos a la realidad.

Otro factor importante en la obtención de resultados plausibles en nuestro modelo es la aplicación de restricciones en sus elementos. En la realidad un pavimento rígido sufre contacto por fricción en sus caras laterales, sin embargo en la elaboración del modelo computacional, la losa además de estar apoyada a la cama de resortes, se apoyó sobre una placa de espesor despreciable en cada cara de la misma. Esto simula una especie de semi – empotramiento, pero con cierto grado de libertad de movimiento, que es un comportamiento relativamente cercano a la realidad. También se contaba con la opción de darle libertad de movimiento a las caras laterales de la losa, pero se encontró

con el problema de que ésta al aplicarle las cargas respectivas, sufría de una deformación uniforme, lo cual alejaba su comportamiento con la realidad.

La simulación del área de contacto de los neumáticos sobre la losa es un aspecto importante que debe ser tomado en cuenta. Esta área puede variar dependiendo del tipo de vehículo que este transitando, se utilizó un área de 40x30cm tomando en cuenta un neumático de un eje tándem tradicional. Estas placas se elaboraron con un espesor de 10mm, medida que se puede tomar como despreciable en comparación con las medidas de la losa y se podría decir que no se corre el riesgo de afectar el peso propio de la losa con el peso propio de cada placa. Los resultados pudieron verse afectados por este factor, pero no se consideraría como un factor determinante al momento de toma de decisiones al respecto.

Es de vital importancia que la aplicación de cargas se haga meticulosamente, ya que este si puede ser un factor de error determinante al no realizarlo de manera correcta. La mala aplicación de conceptos de factores de conversión o falla en los cálculos tanto de carga viva como muerta, pueden afectar los resultados que se obtengan en el análisis de esfuerzos y deformaciones. De la misma manera, la asignación de las características del material a utilizar.

### **3. Comparación entre losa convencional y losa corta con mismo espesor**

El modelado de la losa convencional se basa en el concepto de AASHTO 1993 para la modulación de pavimentos. El que haya dado como resultado un espesor de 27 cm, nos muestra que es un diseño para un pavimento que es transitado mayormente por vehículos con carga pesada. En Guatemala este tipo de pavimentos se suelen construir con dimensiones relativamente grandes, además de que se colocan pasadores entre las juntas para que la transferencia de carga sea continua entre cada módulo.

Se puede observar como al cambiar de una losa con dimensiones de 3.60 x 3.60m a una de 1.80 x 1.80m conservando su espesor, los esfuerzos y deformaciones reducen notablemente. Esto es, debido que al reducir las dimensiones del corte de juntas la carga que se aplicaba a la losa convencional de 80 kN, se reduce prácticamente a la mitad. Además de que al pasar la carga cerca de las orillas de la losa se corre con el riesgo de que esta sufra de agrietamiento por la generación de esfuerzos en el área.

Los resultados obtenidos nos muestran que para la losa convencional se obtienen esfuerzos máximos a compresión de -1.4 MPa y a tensión de 1.2 MPa, mientras que al reducir sus dimensiones se obtienen esfuerzos máximos a compresión de -1.02 MPa y máximos a tensión de 0.8112 MPa. Esto nos da una reducción de 0.38 MPa en esfuerzos de compresión y 0.39 MPa en esfuerzos de tensión, que es una ventaja favorable y demuestra que efectivamente la reducción en las dimensiones de la losa nos brinda una mejora en cuanto a la distribución de cargas de tráfico. Además de que los esfuerzos máximos obtenidos no sobrepasan el límite de esfuerzo permisible a tracción 3.28 MPa, lo cual nos indica que el concreto aplicado cuenta con la capacidad necesaria para absorber los esfuerzos a tensión, sin necesitar varillas de refuerzo que suplan con esa necesidad.

En cuanto a las deformaciones se puede observar que se reducen de 2.99 a 0.053 mm. Lo que nos muestra la ventaja con la que se cuenta al reducir las dimensiones de la losa, aun así conservando el mismo espesor.

#### **4. Comparación entre losas cortas de 27 y 18 cm.**

Luego de observar el comportamiento de la losa al reducir las dimensiones de la misma, en cuanto a deformaciones y esfuerzos se refiere, se puede observar que el conservar el mismo espesor el diseño se vuelve demasiado conservador. Debido que los esfuerzos no alcanzan el límite permisible, se procedió a la reducción del espesor, basado en la construcción de un pavimento ya existente. En nuestro caso se tomo como ejemplo el tramo de carretera Pueblo Nuevo Viñas – El Cerinal, donde se utilizó este concepto.

Comparando los métodos de losas cortas planteados en los capítulos anteriores, se puede observar que se puede reducir el espesor conservando las deformaciones y esfuerzos dentro del rango permisible. Reduciendo el espesor se obtuvieron deformaciones máximas de 0.133 mm, lo que significa un aumento de 0.077mm en la deformación, 0.9 MPa en esfuerzos máximos a compresión y 0.7 MPa en esfuerzos máximos a tensión.

Estos resultados muestran la factibilidad que el Método Constructivo de Losas Cortas posee, ya que a pesar de que se reduce el espesor 9 cm con respecto al convencional, los esfuerzos no sobrepasan el límite permisible de 3.28 MPa. Así también se comprueba que el método no necesita de acero de refuerzo, ya que el concreto es capaz de absorber los esfuerzos a tensión producidos por la carga vehicular.

Al comparar los diferentes métodos constructivos de pavimentos, podemos destacar que las losas cortas poseen varias ventajas con respecto al método convencional, basado en AASHTO 1993:

**4.1. No utiliza refuerzo ni barras de transferencia.** El método AASHTO exige que en el proceso constructivo de un pavimento, este cuente con dovelas o barras de transferencia, que funcionan como un medio de transferencia de carga hacia el módulo contiguo; en el Método de Losas Cortas este concepto no se emplea, ya que cada bloque de losa actúa de manera independiente con respecto del otro. Esto contribuye a que si por algún motivo una losa sufre de agrietamiento leve o severo, esta no transfiere y sobrecarga la siguiente, caso contrario es con el método tradicional, que cuando una losa sufre de agrietamiento y pierde su capacidad, la carga se transfiere a la siguiente y se corre el riesgo de que esta se agriete de la misma manera.

**4.2. Contribuye con la capacidad del suelo.** El poder contar con losas con espesores más pequeños contribuye a reducir el peso propio de las mismas, generando esfuerzos más pequeños hacia el suelo, por lo que se podría optimizar de una mejor manera las distintas capas de soporte. Así mismo esto permite que, debido a la mejor distribución de carga, que estas se disipen de manera más eficiente en el suelo, contribuyendo a que la necesidad de usar suelo cemento para aumentar la capacidad del suelo disminuya considerablemente.

**4.3. Reduce el alabeo.** El alabeo en pavimentos es su factor determinante para evitar agrietamientos y fisuras, ya que ante temperaturas extremas la losa cambia de concavidad constantemente, generando esfuerzos internos que contribuyen con la creación de contracciones no contempladas. En Losas Cortas, debido que las dimensiones y espesor son menores, los esfuerzos de alabeo son menores, evitando agrietamientos severos y notables en la carpeta de rodadura. Entre las desventajas que pudiera tener el método están las siguientes:

**4.4. Filtración.** Debido que el método de losas cortas no contempla el sellado de juntas, se corre el riesgo de que exista filtración por las mismas, algunos constructores suelen colocar un sello a fin de evitar este fenómeno, pero no se logra realizar en su

totalidad, ya que los sellos que se colocan no son los suficientemente herméticos y resistentes.

**4.5. Adherencia.** Este es un factor importante en la construcción de cualquier tipo de pavimento rígido, ya que como la carpeta de rodadura actúa en conjunto con las capas del suelo, sino se tiene una adecuada adherencia entre estos puede ser causa de filtración de agua y provocar bombeo; además de que si no actúan como un todo la transferencia de carga no es la adecuada, dando como consecuencia que la carpeta de rodadura absorba gran parte de los esfuerzos.

**4.6. Ahorro económico.** Con base en el análisis de costos generales, se puede observar como el aplicar el Método de Losas Cortas este induce a un ahorro notable en los costos de construcción. A pesar de que existen más factores a tomar en un análisis económico de los que se tomaron en esta investigación, se hace notar que la eficiencia del método es elevada.

Aunque el método de losas cortas aplica casi el doble de cortes que el método convencional, el análisis muestra un ahorro de aproximadamente Q.10.000,000.00, en un tramo de 8 km; ahorro que probablemente se incrementaría al incluir costos refuerzos, dovelas o barras de transferencia, sellos de juntas para la losa convencional. Para las condiciones económicas con las que el país cuenta, este factor es de vital importancia, debido que son fondos monetarios que serían reinvertidos y generar un mejor desarrollo vial para el país.

### **XIII. CONCLUSIONES**

Los pavimentos son sistemas estructurales presentes desde hace siglos, cuya teoría continúa afinándose y corroborando bajo resultados y comportamiento de estructuras existentes.

Los factores que afectan directamente a los pavimentos son; el clima, el tránsito y calidad de la subrasante.

El tipo de fallas existentes en pavimentos rígidos son; deformaciones, grietas y voladuras.

La norma AASHTO considera varios factores para el diseño de pavimentos, entre ellos se encuentra el tránsito, la serviciabilidad, el suelo, las propiedades de los materiales, el ambiente, el drene de agua, el nivel de confianza, el diseño de hombros y costos.

La norma AASHTO requiere de cinco categorías para el diseño de pavimentos rígidos; variables de diseño, criterio de desempeño, propiedades de los materiales para el diseño estructural, características estructurales y variables de refuerzo.

El modelo se puede considerar como un modelo conservador en comparación a modelos ya existentes en Guatemala.

No se cuenta con información suficiente para el diseño de las losas cortas esto es debido a que son adaptaciones de pavimentos rígidos antes diseñados, pero la información que se tiene específicamente de losas cortas es puramente teórica, ya que no se cuenta con información pública sobre datos del comportamiento de las losas en funcionamiento.

Por medio del programa SAFE se puede modelar una losa corta y analizar su comportamiento, obteniendo datos de deformación y esfuerzos de reacción como se indico en este trabajo. SAFE modela la losa con base en elementos finitos, método que se compone de una serie de ecuaciones relacionadas entre si que utilizan parámetros específicos para el análisis de la losa en este caso, haciendo que el elemento se comporte de la manera mas real posible.

La elaboración del modelo computacional de una losa tradicional con la herramienta SAFE, es de viable representando así sus esfuerzos y deformaciones, despliega graficas representando el comportamiento de la losa de manera precisa.

El análisis comparativo de las losas que se generaron fue bastante representativo ya que se cuentan con características y parámetros en común, dando valides a los resultados, siendo el parámetro principal de comparación los esfuerzos de tensión que se generan en las losas, ya que ésta es la característica del concreto que indica el uso de acero, material que no se utiliza en las losas cortas.

El análisis económico que se le aplicó a la cantidad de materiales a utilizar para la construcción de las dos tipos de losas demostró que una losa corta, nos permite menores espesores lo cual reduce el consumo de concreto y disminuye el costo, al igual que no se utiliza dovelas para transmitir las cargas que es otro costo extra que se adjudica a la losa tradicional.

La elección de utilizar pavimentos con concreto hidráulico provee de mayor consistencia y durabilidad a la carretera, factores que son de vital importancia para la construcción y funcionamiento de las mismas. A medida que los años pasan, el flujo de vehículos que transitan sobre las principales vías en el país aumenta, por lo que las vías alternas y principales se deben construir de forma optima.

La construcción de losas con dimensiones más pequeñas que las convencionales nos brinda la oportunidad de distribuir de mejor manera la carga aplicada, ya que con esto se evita que la carga de los vehículos actúe sobre una sola losa, provocando con el nuevo dimensionamiento que solo actúa  $\frac{1}{4}$  de la carga total del vehículo.

Las deformaciones y esfuerzos obtenidos en el análisis fueron muy aceptables y demuestran la eficiencia del método en cuanto a la distribución de cargas. Estas deformaciones quedaron muy por debajo de las permisibles.

La utilización del programa Autodesk Inventor como herramienta de diseño de pavimentos, nos da la oportunidad de disfrutar de una interfaz gráfica de los resultados de una manera profesional, además de que nos brinda resultados plausibles y verídicos, siempre y cuando se tomen en cuenta las consideraciones adecuadas para el modelado.

La metodología convencional de construcción de pavimentos nos provee un diseño bastante conservador, ya que como se observo en los resultados, los esfuerzos y deformaciones generados por la carga de tráfico están muy por debajo de los permisibles, ocasionando una sobrestimación en el diseño.



Contrario es el caso de la metodología de losas cortas, que nos permite realizar una optimización en cuanto a espesores y dimensiones en la losa, generando un ahorro notable en materiales y material soporte del suelo

El método de losas cortas en base al análisis general de costos realizado, nos da un ahorro monetario aproximado de Q. 1.150,000.00/km, que equivale a que es una ventaja determinante en el manejo de recursos.

## **XIV. RECOMENDACIONES**

Realizar un modelo real para respaldar el modelo presentado y de esta manera observar el comportamiento del pavimento

Llevar a cabo estudios de tránsitos específicos para obtener un diseño de pavimento más preciso para que de esta manera sea funcional, cumpla con su serviciabilidad y no sea sobredimensionado.

Hacer pruebas a todos los materiales para garantizar la calidad del diseño y cumpla con los parámetros presentados.

Realizar las pruebas pertinentes al tipo de suelo a utilizar para que no se tenga problemas de socavamiento o un mal valor de capacidad soporte del suelo.

Implementar un sistema de drenaje adecuado para que no se tengan problemas de infiltración al subgrado a tal punto que sature el material y presente problemas con sus propiedades.

Cumplir con todas las consideraciones que presenta la norma de manera que se realice un diseño adecuado y funcional.

Al momento de elaborar un modelo de algún elemento, en este caso una losa corta se debe tener en cuenta las propiedades del suelo que esto es uno de los factores más importantes del modelado de losas cortas, junto con el concreto, y sus propiedades.

Se debe tener en cuenta la ubicación específica de la carga, para que éste no genere esfuerzos que no se andan buscando, siempre verificar que está este donde se había propuesto y la ubicación donde hace mayor influencia en la resistencia de la losa.

El diseño de losas se debe calibrar con un diseño ya existente, para así poder tomar decisiones sobre el modelo realizado en un programa a base de elementos finitos.

Modelar pavimentos rígidos con paquetes computacionales es la forma mas económica para el análisis de un pavimento, siempre teniendo en cuenta que los resultados pueden tener una variación con la realidad, debido a esto se deben calibrar los programas y ser cada vez más eficientes en la representación real de cada objeto a analizar ya que todo diseño de carreteras es empírico.

Debido a las limitaciones económicas que Guatemala posee y tomando en cuenta que al construir una carretera principal o alterna la optimización de recursos es un factor de vital importancia, se recomienda tomar en cuenta la opción de construir pavimentos utilizando el Método Constructivo de Losas Cortas, ya que por medio de éste se logran optimizar recursos y tener una mayor durabilidad en su funcionamiento; además de que el mantenimiento requerido para el concreto hidráulico no es tan exigente.

El programa computacional Autodesk Inventor muestra un entorno muy cercano a la realidad al momento de realizar un análisis de esfuerzos, sin embargo cuando se trata del análisis de una losa, como es el caso, se recomienda tener otras fuentes de respaldo para tomar una decisión sobre la construcción de la misma, ya que las restricciones laterales que se le aplican a la losa limitan significativamente su comportamiento. Sin embargo los resultados que se obtengan son plausibles y aceptables.

El método de losas cortas es un método relativamente reciente y se carece de información concreta para su diseño, por lo que se recomienda realizar investigaciones exhaustivas sobre su comportamiento y desempeño en campo, durante un período de tiempo considerable; esto para establecer un método de diseño específico para el diseño de las mismas.

Debido que el programa Autodesk Inventor no es un programa puramente de diseño de pavimentos, se recomienda analizar nuevas consideraciones y soluciones a los problemas planteados anteriormente, esto para ampliar las opciones de diseño que hoy en día existen. Además este programa nos muestra una interfaz gráfica cercana a la realidad, de una manera más atractiva.

Ya que el método de losas cortas no involucra la utilización de sellos óptimos en las juntas, se recomienda la implementación del sellado de juntas o algún método alternativo que evite la filtración, para así disminuir el bombeo en las losas.

## XV. BIBLIOGRAFÍA

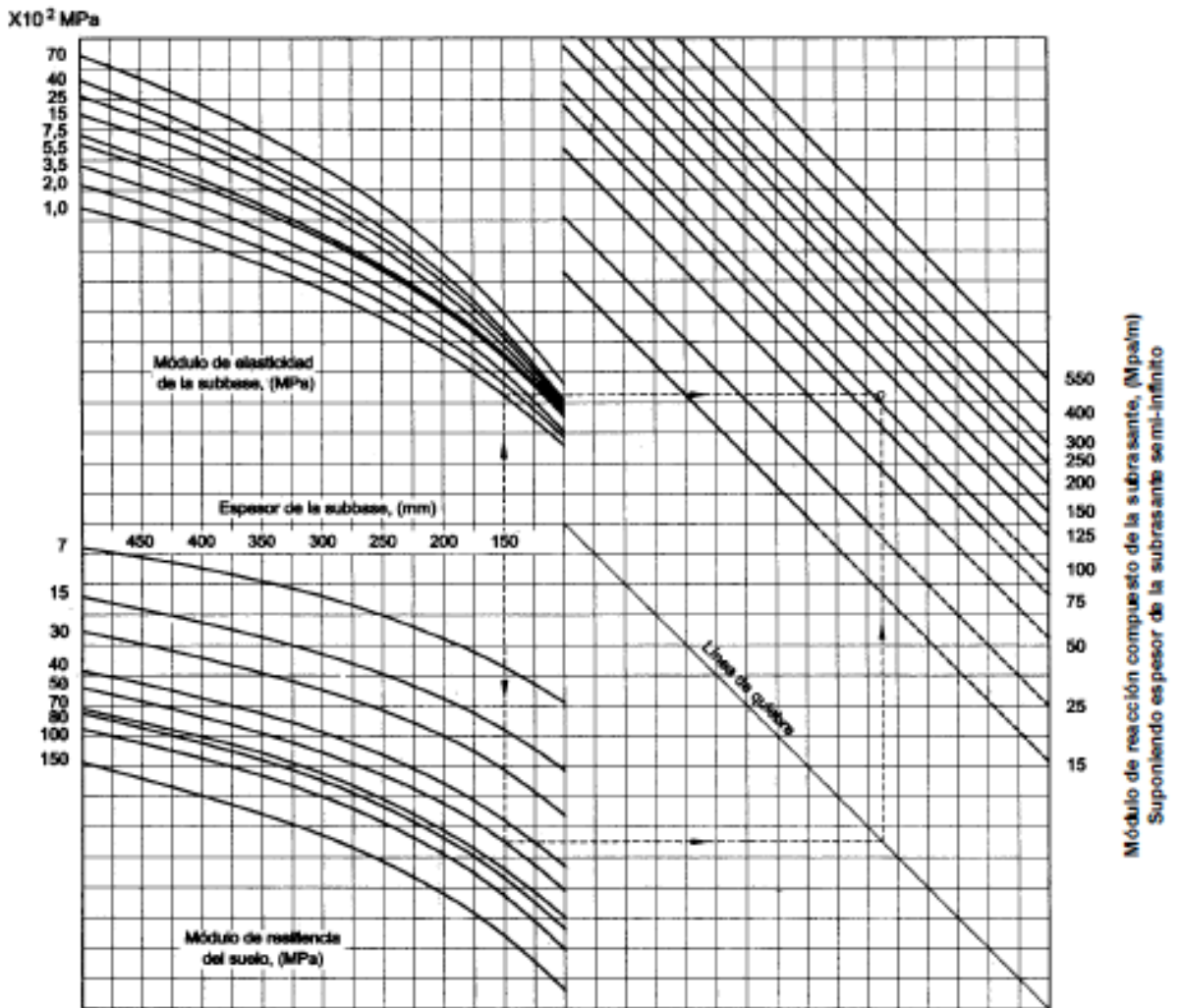
- AASHTO. (1998). *GDPS: Guide For Design Of Pavement Structures*, Division 500. Estado Unidos, 1998.
- AASHTO. (2001). *Guide for design of pavement structures*. Washington: American Association of State Highway Transportation Office.
- AASHTO. (2001). *Guide for design of pavement structures*. Washington: AASHTO.
- Ávila, R., L. R. (2008). *Método Constructivo de Losas Cortas en Pavimentos de Concreto Hidráulico*. (Tesis de Maestría, Universidad San Carlos de Guatemala). Recuperado de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0167\\_MT.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0167_MT.pdf) 138 pp
- Carnicero, A. (2003). *Introducción al Método de los Elementos Finitos*. Universidad Tecnológica Nacional. 25 pp
- Chapra, S.(2011). *Métodos numéricos para ingenieros*. Editorial MCGRAW-HILL Interamericana, Sexta edición, España.
- Chen, W. R. (2003). *The civil engineering handbook*. Estados Unidos: CRC PRESS.
- Covarrubias, JP (2,005). *“Pavimentos delgados de concreto”* [PDF] Recuperado en Noviembre de 2012, del sitio Web del Instituto Chileno: < [http://www.ich.cl/pavimentos\\_delgados](http://www.ich.cl/pavimentos_delgados)> 33 pp.
- Crespo V., C. *Vías de comunicación de caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos*. Tercera Edición. México. Editorial Limusa, 2005. 718pp.
- H.A., A. A. (2009). *Agregados y Aditivos para Concretos*. Managua: Universidad Nacional de Ingeniería Pedro Arauz Palacios.

- Hernández, H. (2011). SAFE; *Diseño de losas, vigas y fundaciones de concreto reforzado y post-tensado*. Recuperado el 18 de septiembre del 2012, <http://es.scribd.com/doc/86547154/Manual-de-SAFE-v12-Diciembre->
- Ingenieros consultores de CA, S.A. (2000). *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*, Dirección General de caminos. Recuperado el 5 de septiembre del 2012, en: <http://www.marn.gob.gt/documentos/guias/documentos/libro.pdf>
- Juarez, B. y. (2008). *Mecánica de Suelos: Tomo 2 Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos*. Mexico: Limusa.
- Kaenvit Vongchusiri, Neeraj Buch, Ph.D., *A parametric study to investigate the influence of pavement and load* [PDF] Recuperado en noviembre de 2007 del sitio Web del Department of Civil Engineering, Michigan State University, East Lansing, MI: [www.uctc.net/scripts/countdown.pl?561.pdf](http://www.uctc.net/scripts/countdown.pl?561.pdf)
- Londoño Naranjo, Cipriano Y Alvarez Pabón, Jorge Alberto. (2008). *Manual de Diseño Para Pavimentos de Concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Juntas. 114 pags.*
- Montejo, Alfonso. (2006). *Ingeniería de Pavimentos, Fundamentos, estudios básicos y diseño*. Guatemala. Bogotá: Universidad Católica de Colombia Ediciones y publicaciones. 300 pp
- Mora, S (2006) *Pavimento de concreto hidráulico* [PDF] Recuperado en Noviembre de 2012, Del sitio Web: [www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos\\_ferro/Seminario2006/3.%20Pavimento\\_Concreto\\_%20Ing\\_Mora.pdf](http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/Seminario2006/3.%20Pavimento_Concreto_%20Ing_Mora.pdf)
- Reyes L., FJ. (2003). *Diseño racional de Pavimentos*. Bogotá: CEJA,
- Sanchez S., F. (2010). *Esfuerzos en pavimentos*. Retrieved Septiembre 14, 2012, from Escuela de Ingeniería Copernico: [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%203.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%203.pdf)
- Secretaría de integración Económica de Centro América Manual Centroamericano Para El Diseño de Pavimentos. (Edición 2,002) Capítulos 2 al 8. 289 pp

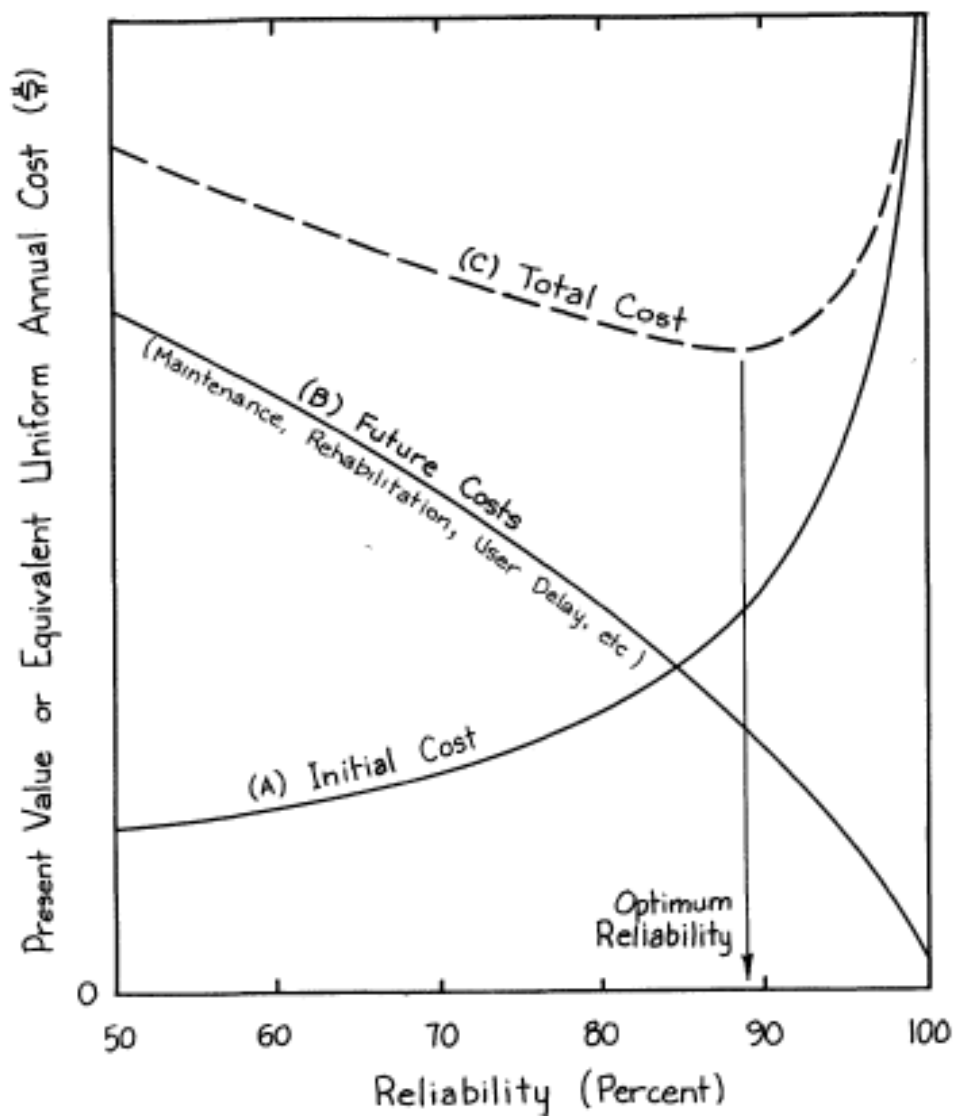
- Quiroz, Roberto. (2004). Pavimentos de concreto. Subdirección de Ingeniería, Pemex. No de documento GNT-SSNP-C005-2004. Especificaciones de pavimentos.
- Zienkiewicz, O. C. (2007). El método de los Elementos Finitos. Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A. 700 pp

# XVI. ANEXOS

Anexo 1: Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante suponiendo una profundidad infinita



## Anexo 2: Ejemplificación de costos equivalentes contra confiabilidad





**Anexo 3: Tabla para estimar el módulo efectivo de reacción del subrado**

Trial Subbase: Type \_\_\_\_\_ Depth to Rigid Foundation (feet) \_\_\_\_\_  
 Thickness (inches) \_\_\_\_\_ Projected Slab Thickness (inches) \_\_\_\_\_  
 Loss of Support, LS \_\_\_\_\_

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Month	Roadbed Modulus, $M_R$ (psi)	Subbase Modulus, $E_{SB}$ (psi)	Composite k-Value (pci) (Fig. 3.3)	k-Value (pci) on Rigid Foundation (Fig. 3.4)	Relative Damage, $u_r$ (Fig. 3.5)
Jan					
Feb					
Mar					
Apr					
May					
June					
July					
Aug					
Sept					
Oct					
Nov					
Dec					

Average:  $\bar{u}_r = \frac{\sum u_r}{n} = \underline{\hspace{2cm}}$

Summation  $\sum u_r = \underline{\hspace{2cm}}$

Effective Modulus of Subgrade Reaction,  $k$  (pci) = \_\_\_\_\_

Corrected for Loss of Support  $k$  (pci) = \_\_\_\_\_

**Anexo 4: Gráfico para estimar el daño relativo para un pavimento rígido en relación al espesor de losa y soporte debajo de este**

