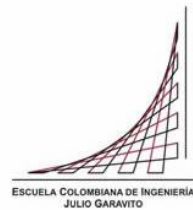


# **Maestría en Ingeniería Civil**

## **Mejoramiento de vías de bajos volúmenes de tránsito mediante el uso de losas de concreto simple optimizadas**

**Laura Jazmín Moreno Gómez**

**Bogotá, D.C., 16 de diciembre 2019**



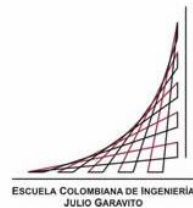
**Mejoramiento de vías de bajos volúmenes de tránsito mediante el uso de losas de concreto simple optimizadas**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Geotecnia**

**Sandra Ximena Campagnoli Martínez**

**Director**

**Bogotá, D.C., 16 de diciembre de 2019**



La tesis de maestría titulada “Mejoramiento de vías de bajos volúmenes de tránsito mediante el uso de losas de concreto simple optimizadas”, presentada por Laura Jazmín Moreno Gómez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

**Sandra Ximena Campagnoli Martínez**

Director de la tesis

**Fernando Estrada Sánchez**

Jurado

**Francisco Andrade Vargas**

Jurado

Bogotá, D.C., enero de 2020.

## **Dedicatoria**

A Dios por permitirme realizar esta maestría, haberme dado sabiduría y paciencia, a mis padres por apoyarme cada día de mi vida, por enseñarme que todo es posible con esfuerzo y perseverancia.

## **Agradecimientos**

A la Ingeniera Sandra Camagnoli, por su colaboración, conocimiento, acompañamiento y apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros de maestría que hicieron parte de este proceso de formación, por sus aportes en conocimiento e información.

A la empresa TCPavements, por permitirme realizar esta investigación y entregarme el software para las modelaciones.

A Opain S.A. por haberme brindando los espacios necesarios para finalizar esta maestría.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por brindarme una formación integral, por el acompañamiento durante todo el proceso de aprendizaje y elaboración de este trabajo de grado.

## Resumen

Las vías terciarias juegan un papel muy importante para Colombia, ya que mediante estas vías se puede llegar a las zonas más alejadas y marginales del país, estas conexiones permiten la integración nacional, regional y local, las cuales repercuten directamente en la economía de los municipios, y aun más de los hogares rurales, ya que mediante estas vías se permite el movimiento de personas, alimentos y mercancías que ayudan al desarrollo del país.

Actualmente esta malla vial se encuentra bajo la gestión de INVIAS, departamentos y los municipios, donde el Gobierno a lo largo de la historia ha intentado impulsar diferentes proyectos para realizar mejoras sobre esta infraestructura; actualmente estas vías son uno de los grandes focos nacionales, teniendo en cuenta que, de los 140.000 km de vías terciarias, solo el 6% se encuentra en buen estado.

Teniendo en cuenta que estas vías se encuentran en lugares de difícil acceso, y Colombia cuenta con diversos tipos de climas, pasando por bajas temperaturas hasta llegar a climas húmedos con temperaturas altas, es necesario plantear alternativas de pavimentación, donde se pueda utilizar los materiales de cada región, que sean poco sensibles al clima y que se pueda implementar equipos simples, herramientas de fácil consecución y usos de mano de obra con baja capacitación; es por esto, que dentro de esta monografía se propone implementar pavimentos de concreto denominado como losas optimizadas, los cuales en primer lugar, son menos sensibles a la capacidad de soporte del suelo teniendo en cuenta que los esfuerzos se distribuyen en áreas más grandes por lo tanto las solicitaciones que llegan al suelo son bajas. Y en segundo lugar al tener pavimentos de concreto las deformaciones de las losas son bajas, lo que permite la circulación de cargas pesadas sin que el pavimento se deforme.

Las losas optimizadas, es una tecnología desarrollada por El Ingeniero Chileno, Juan Pablo Covarrubias, donde propone reemplazar las metodologías de pavimento de concreto tradicional como AASHTO y PCA, por un sistema de losas con geometría optimizada que

permiten una distribución más eficiente de la carga para evitar los problemas de agrietamiento, donde el principio fundamental del método consiste en diseñar el tamaño de la losa para que no más de un set de ruedas del vehículo se encuentre en una determinada losa, minimizando así la tensión de tracción crítica; las dimensiones propuestas son de 1,80 m x 1,80m.

En el siguiente trabajo se realizaron 180 modelaciones, donde se tienen 3 cartas de diseño basadas cada una en un clima diferente (8°C a 15°C, 15°C a 25°C y 25°C a 32°C), dentro de cada carta se utilizaron los mismos parámetros para la estructura de pavimento como se presenta a continuación:

- Subrasante: Se escogieron 5 tipos de subrasante, pasando de suelos blandos con módulos bajos a suelos de buena calidad con módulos altos (30, 40, 50, 60 y 80 MPa).
- Subbase granular: Se estableció un espesor único de 15 cm, donde con los módulos de subrasante se calculó mediante la fórmula de Shell; el módulo que generaba el material de subbase (60, 80, 100, 120 y 160 MPa respectivamente).
- Transito: Se adoptaron 5 diferentes tránsitos en ejes equivalentes (50.000, 100.000, 300.000, 500.000 y 700.000 EE).
- Losa de concreto: Se establecieron 3 módulos de rotura del concreto (3.8, 4.1 y 4.3 MPa), y se dejaba iterando el espesor de la losa.

Mediante estas modelaciones se encontraron espesores entre 10 cm y 18 cm, siendo el factor del clima el que menos afecta al cálculo del espesor, teniendo en cuenta que al tener losas de menores dimensiones el alabeo es mucho menor, lo que genera una vida útil mayor a las losas convencionales (3.5 a 4 m), por otra parte, uno de los factores que más importancia tiene dentro del diseño, es la rigidez de la subbase y subrasante, ya que al tener espesores más delgados el material granular ayuda con las tensiones de punzonamiento, de acuerdo a la afirmación anterior, al realizar la comparación de los resultados de las modelaciones entre un material granular blando (subrasante: 30 MPa y Subbase: 60 MPa) vs un material granular de buenas características (subrasante: 80 MPa y Subbase: 160 MPa) se obtienen diferencias de aproximadamente 3 cm, lo que equivale a un 20% de diferencia.

Finalmente, al realizar la comparación en presupuesto entre una losa optimizada de dimensiones de 1.8 m x 1.8 para una vía de 3.6 m de ancho, de espesor variable entre 10, 15 y 18 cm vs una placa huella, con el espesor tipo de 15 cm, utilizando los mismos costos y características, se observa un ahorro de aproximadamente \$197.553.390/km, \$94.383.894/km y \$32.482.196/km respectivamente, siendo siempre inferior al presupuesto de una placa huella, generando que esta alternativa de pavimento se viable para la construcción de las vías de BVT.

Aun cuando en el presente estudio se realizaron modelaciones con diferentes parámetros de clima, material granular, concreto y tránsito, se recomienda realizar ensayos de laboratorio para caracterizar los materiales de subrasante, analizar los materiales de la cantera de donde se obtendrá el material granular de subbase y analizar el tránsito atraído que puede generar la construcción de la vía.

**Palabras claves:** Losas cortas, PCA, AASHTO, placa huella, Índice de regularidad superficial, módulo de rotura, alabeo, escalonamiento.



## ÍNDICE GENERAL

1	Capitulo. Introducción .....	16
1.1	Planteamiento del problema .....	20
1.1.1	Historia de las vías en Colombia.....	20
1.1.2	Infraestructura de carreteras en Colombia.....	21
1.2	Organización del trabajo.....	25
1.3	Objetivos. ....	26
1.3.1	Objetivo general. ....	26
1.3.2	Objetivos específicos.....	26
2	Capítulo Estado del Arte.....	27
2.1	Introducción.....	27
2.2	Pavimentos rígidos .....	29
2.2.1	Parámetros básicos de diseño.....	31
2.2.2	Método de la Portland Cement Association (PCA).....	33
2.2.3	Método AASHTO – 1993 .....	40
2.2.4	Placa huella.....	50
3	Capitulo – Metodología de losas optimizadas .....	52
3.1	Conceptos generales losas optimizadas.....	52
3.1.1	Tensión por carga.....	53
3.1.2	Alabeo .....	56
3.2	Bases teóricas losas optimizadas .....	58
3.2.1	Mecanismos de falla .....	65
3.2.2	Estructura equivalente .....	66
3.2.3	Cálculo de tensiones .....	68
3.2.4	Algoritmo de fatiga.....	70
3.2.5	Modelo de transferencia de carga.....	74
3.2.6	Modelo de escalonamiento y transferencia de carga a través de diferencial de energía. 75	
3.2.7	Modelo de IRI .....	76
3.3	Conceptos de diseño .....	76

3.3.1	Largo de la losa .....	76
3.3.2	Tipo de borde .....	77
3.3.3	IRI.....	79
3.3.4	Losas agrietadas .....	81
3.3.5	Confiabilidad.....	82
3.3.6	Transito .....	83
3.3.7	Suelo .....	83
3.3.8	Módulo de reacción de la subrasante .....	84
3.3.9	Propiedades del concreto .....	86
3.3.10	Clima .....	88
3.3.11	Consideraciones adicionales .....	89
3.4	Datos de ingresos al Software Optipave .....	90
3.4.1	Parámetros de diseño asociados al tipo de pavimento .....	90
3.4.2	Parámetros asociados al transito.....	94
3.4.3	Parámetros de concreto hidráulico .....	98
3.4.4	Propiedades del suelo .....	102
3.4.5	Clima .....	105
4	Capítulo – Diseño de losas optimizadas .....	106
4.1	Contenido de la guía y aspectos básicos en el diseño.....	107
4.2	Clima .....	108
4.3	Estimación del tránsito de diseño .....	108
4.4	Materiales que componen la estructura de pavimento .....	108
4.5	Modelaciones .....	109
4.6	Sistema constructivo losa optimizada .....	116
5	Capítulo – Resultado y Análisis.....	120
5.1	Análisis de los efectos de las capas de soporte.....	122
5.2	Análisis por temperatura.....	122
5.3	Análisis por transito .....	123
5.4	Comparación de costos de una losa optimizada vs una placa huella.....	124
6	Conclusiones y recomendaciones. ....	135
6.1	Conclusiones Generales.....	135
6.2	Conclusiones particulares.....	136

6.3	Recomendaciones .....	139
7	Bibliografía.....	140

## Índice de tablas

Tabla 1	Clasificación de la subrasante de acuerdo a su resistencia.....	31
Tabla 2	Efecto de la subbase granular sobre los valores de K.....	37
Tabla 3	Efecto de la subbase granular tratada con cemento sobre los valores de K.....	37
Tabla 4	Carga por Eje y Tipo de Vehículo.....	38
Tabla 5	Tasas anuales de crecimiento de tránsito .....	39
Tabla 6	Periodos de diseño a adoptar en función del tipo de carretera .....	41
Tabla 7.	Fórmulas simplificadas para el cálculo del factor de equivalencia de carga por eje (AASHTO) .....	43
Tabla 8.	Factores de equivalencia de carga por tipo de vehículo obtenidos a nivel nacional en el año de 1996. ....	44
Tabla 9.	Factor de distribución por carril .....	45
Tabla 10.	Niveles de confiabilidad a adoptar en función del tipo de carretera .....	46
Tabla 11.	Valores de Zr en función de la confiabilidad .....	46
Tabla 12.	Calidad de drenaje .....	48
Tabla 13.	Valores de coeficientes de drenaje Cd .....	48
Tabla 14.	Valores de coeficiente de transmisión de carga J.....	48
Tabla 15.	Perdida de soporte.....	49
Tabla 16.	relaciones recomendadas por AASHTO para el cálculo del módulo de elasticidad.....	49
Tabla 17:	Tipos de Borde y su efecto en términos de soporte y circulación del tráfico ....	77
Tabla 18:	Escala del valor del IRI URUGUAY .....	81
Tabla 19:	Resumen valores IRI.....	81
Tabla 20	Valores recomendados de porcentaje máximo admisible de losas agrietadas según clasificación de la vía .....	82
Tabla 21	Confiabilidad según la clasificación de la vía.....	83
Tabla 22	Valores recomendados de porcentaje máximo admisible de losas agrietadas según clasificación de la vía .....	92
Tabla 23	Parámetros de diseño .....	93
Tabla 24	Confiabilidad según la clasificación de la vía.....	93
Tabla 25	Transito ejes equivalentes.....	94
Tabla 26	Tasas de crecimiento .....	95
Tabla 27	Clasificación Federal Highway Administration .....	96
Tabla 28	Valores por defecto de las distancias entre el borde, línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos .....	97

Tabla 29 Resistencia que debe alcanzar el concreto .....	98
Tabla 30 Modulo de rotura del concreto.....	99
Tabla 31 Resistencia a la compresión .....	100
Tabla 32 Modulo de elasticidad del hormigón .....	101
Tabla 33 Valores típicos de los módulos de capas de pavimentos.....	103
Tabla 34 Módulo de subrasante.....	103
Tabla 35 Módulo de subbase.....	104
Tabla 36 Precipitación y temperatura de las capitales Colombianas.....	105
Tabla 37 Parámetros de diseño .....	107
Tabla 38 Precipitación y temperatura de las capitales Colombianas.....	108
Tabla 39 Transito ejes equivalentes.....	108
Tabla 40 Módulo de subrasante.....	109
Tabla 41 Carta 1, estación fría. ....	110
Tabla 42 Carta 2, estación templada .....	112
Tabla 43 Carta 3, estación caliente.....	114
Tabla 44 Costos proyecto tipo Placa Huella.....	126
Tabla 45 Costos losa optimizada espesor 15 cm .....	129
Tabla 46 Costos losa optimizada espesor 10 cm (mínimo) .....	131
Tabla 47 Costos losa optimizada espesor 18 cm (máximo) .....	133
Tabla 48 Resumen presupuesto placa huella vs losa optimizada .....	135
Tabla 49 Resumen espesores mínimos y máximos .....	137

## Índice de figuras

Figura 1 Localización de los proyectos (TCP Pavements) Fuente: (TCPavements, n.d.)	19
Figura 2: Estructura típica de un pavimento flexible.....	28
Figura 3: Estructura de pavimento rígido .....	29
Figura 4: Relaciones aproximadas entre los valore de resistencia y clasificación del suelo. Fuente: (Portland Cement Association, 1984).....	36
Figura 5: Esquematzación de los diferentes tipos de ejes y su carga máxima Fuente: (Ministerio de Transporte de Colombia, 2004) .....	38
Figura 6: Vista en planta y sección en un tramo recto. Fuede: (Instituto Nacional de vias, 2015) .....	52
Figura 7: Esquema del modelo Westergaard .....	55
Figura 8: Posición de carga para las ecuaciones de Westergaard.....	55
Figura 9: Alabeo .....	56
Figura 10: Comparación en planta de las losas tradicionales respecto de la losa optimizada. Fuente: (Mauricio Salgado Torres, 2014).....	57
Figura 11: Comparación en perfil de las losas tradicionales respecto de la losa corta. Fuente:(Mauricio Salgado Torres, 2014).....	57
Figura 12: Comparación en perfil de las losas tradicionales respecto de la losa corta. Fuente:(Mauricio Salgado Torres, 2014).....	58
Figura 13: Accelerated Pavement testing section Fuente : (Cervantes & Roesler, 2009)	60
Figura 14: Secciones para la prueba acelerada. Fuente:(Cervantes & Roesler, 2009) ...	60
Figura 15: Accelerated Transportation Loading Assemble. Fuente :(Cervantes & Roesler, 2009) .....	61
Figura 16: Comparación de la tensión de tracción de una losa cargada mecánica y térmicamente entre una de 4,5m y 2.25m, de longitud, Fuente:(Covarrubias, 2012). .....	63
Figura 17: Comparación entre la dimensión y espesor de losas para tensiones máximas equivalentes en la superficie. Fuente: (Covarrubias, 2012).....	64
Figura 18: Diagrama de flujo losas optimizadas. Fuente: (Covarrubias, 2011).....	66
Figura 19: Equivalencia de un sistema de dos capas (Izquierda) en un sistema equivalente de una capa (derecha). Fuente: (Covarrubias, 2011).....	67
Figura 20. Configuración de eje simple. Fuente: (Covarrubias, 2011).....	69
Figura 21. Configuración del eje doble. Fuente: (Covarrubias, 2011).....	69
Figura 22. Ubicación del eje simple en el cálculo de agrietamiento transversal. Fuente: (Covarrubias, 2011) .....	72
Figura 23. Simplificación del eje doble en el cálculo de agrietamiento transversal. Fuente: (Covarrubias, 2011) .....	72
Figura 24. Simplificación del eje triple en el cálculo de agrietamiento transversal. Fuente:(Covarrubias, 2011) .....	73
Figura 25. Ubicación del Eje Simple para determinar el agrietamiento de esquina. Fuente: (Covarrubias, 2011) .....	73

Figura 26. Simplificación del eje doble en el cálculo de agrietamiento de esquina. Fuente: (Covarrubias, 2011) .....	74
Figura 27. Diagrama de flujo del modelo de escalonamiento y transferencia de carga. Fuente: (Covarrubias, 2011) .....	75
Figura 28: Distribución lateral típica. Fuente: (Covarrubias, 2011) .....	78
Figura 29: Distribución lateral para un pavimento con solera o bordillo. Fuente: (Covarrubias, 2011) .....	78
Figura 30: Distribución lateral para un pavimento con sobreebanco. Fuente: (Covarrubias, 2011) .....	79
Figura 31: Escala del valor del IRI. Fuente: (Sanchez & de Solmniac, 1989) .....	80
Figura 32: Esquema de un sistema multicapas. Fuente: (Covarrubias, 2011) .....	85
Figura 33. Ensayo de flexión del concreto usando una viga en los tercios de la luz libre. Fuente: INV E-415-13 .....	87
Figura 34. Ensayo de flexión del concreto usando una viga carga en el centro de la luz. Fuente: INV E-414-13 .....	88
Figura 35: Datos ingresados de diseño. Fuente: Optipave .....	94
Figura 36: Datos ingresados de tránsito. Fuente: Optiave .....	98
Figura 37: Datos ingresados del concreto. Fuente: Optipave .....	102
Figura 38: Datos ingresados del suelo. Fuente: Optipave .....	105
Figura 39: Datos ingresados del clima .....	106
Figura 40: Espesores vs módulos de rotura de losa. Estación fría (8°C a 15°C). Fuente: Elaboración propia .....	111
Figura 41: Espesores vs módulos de rotura de losa. Estación templada (15°C a 25°C). Fuente: Elaboración propia .....	113
Figura 42: Espesores vs módulos de rotura de losa. Estación caliente (25°C a 32°C). Fuente: Elaboración propia .....	115
Figura 43: Espesores de losa para carta 1. Estación fría (8°C a 15°C). Fuente: Elaboración propia .....	120
Figura 44: Espesores de losa para carta 2. Estación templada (15°C a 25°C). Fuente: Elaboración propia .....	121
Figura 45: Espesores de losa para carta 3. Estación caliente (25°C a 32°C). Fuente: Elaboración propia .....	121
Figura 46: Estructura de placa huella .....	124
Figura 47: Estructura de losa optimizada .....	125

## **Índice de anexos**

Anexo 1. Modelaciones clima frio

Anexo 2. Modelaciones clima templad

Anexo 3. Modelaciones clima caliente

Anexo 4. Análisis de Precios Unitarios

Anexo 5. Metodología Losas Optimizadas

## 1 Capítulo. Introducción

Colombia es un país que cuenta con una gran diversidad de recursos, no solamente por sus cordilleras y ríos, si no por su variedad de climas, que hacen de este, un país lleno de riqueza natural, donde se pueden generar gran variedad de cultivos y diferentes formas de economía. Es por esto, que un factor determinante para el desarrollo económico de un país, implica la conexión de la población rural con municipios, distritos o departamentos, por lo cual es de vital importancia el desarrollo de la infraestructura vial, ya que, mediante este mecanismo, se permite el movimiento de personas, mercancías, insumos, alimentos, medicina, etc.

Mejorar la competitividad en Colombia, conlleva a realizar un esfuerzo por parte del estado para optimizar la relación que existe entre la disponibilidad de vías de comunicación terrestre y el nivel de desarrollo de la población. La facilidad de desplazamiento permite ampliar el mercado de productos, principalmente agrícolas, genera empleo, promueve la recreación, permite acceder a servicios médicos y también a una educación de mejor calidad. Las obras de infraestructura vial ayudan a reducir los costos en las actividades de integración de los mercados, lo cual estimula el comercio regional e internacional. La inversión en infraestructura vial es un eficaz instrumento de política para impulsar el crecimiento económico y reducir la pobreza (Acosta Ariza & Alarcon Romero, 2017).

Actualmente la intercomunicación terrestre entre la población rural, municipios, distritos o departamentos, es difícil, debido al mal estado en que se encuentran las vías, en muchas ocasiones son intransitables o tienen restricciones de tránsito. Algunas de estas vías tienen un deterioro acelerado causado por la falta de mantenimiento, clave importante para el sustento de una vía. También se puede mencionar que muchas de las vías que se encuentran actualmente con alguna capa de rodadura, ya sea asfáltica o de concreto, cumplieron con su vida útil, o tienen problemas severos causados por el agua, (el cual es el enemigo número uno de una estructura de pavimento si no se controla) donde no se tienen drenajes o estos se encuentran en mal estado, lo que ocasiona problemas estructurales. (Departamento Nacional de Planeación, 2016), Actualmente, se estima que en la red terciaria un 24%(33.600 kilómetros) de las vías se encuentran sin pavimentar, un



70% (unos 98.000 kilómetros) están en afirmado y tan solo un 6% (unos 8.400 kilómetros) esta pavimentado (La Nación, 2017a).

En cuanto a las vías terciarias que son fundamentales para desarrollo del país, actualmente se plantean proyectos por parte del gobierno y entidades encargadas de la red vial nacional para atenderlas con recursos asignados a una nueva etapa denominada “postconflicto”, prometiendo mejorar el bienestar, la competitividad económica del país a nivel internacional y el desarrollo socioeconómico.

Debido a que en las vías de bajos volúmenes de tránsito se encuentran materiales de baja calidad, se propone realizar pavimentos de concreto, los cuales son menos sensibles a la capacidad de soporte del suelo y a las condiciones climáticas que otros tipos de pavimentos. Cuando el pavimento está destinado a zonas en las que la temperatura es alta, los pavimentos de concreto tienen la ventaja de que no se deforman bajo la circulación de las cargas pesadas, adicional, estos pavimentos tienen una longevidad mayor y sus costos de mantenimiento son bajos, siempre y cuando, como sucede con cualquier obra, estén correctamente concebidos y bien construidos, pues de lo contrario pueden resultar pavimentos que demanden reparaciones costosas y difíciles de ejecutar (Instituto Nacional de Vías, 2008b)

Otro punto a favor de los pavimentos de concreto es la disponibilidad de la mano de obra, sobre todo durante la construcción de pavimentos para vías terciarias, que por sus características se pueden construir con medios muy sencillos, con equipos simples, herramientas de fácil consecución y con uso de mano de obra con baja capacitación.

El presente estudio, pretende dar como alternativa de diseño para las vías de bajos volúmenes, la tecnología desarrollada por El Ingeniero Juan Pablo Covarrubias T (JPCT), denominada “Thin Concrete Pavement”, la cual se basa en diseñar pavimentos de hormigón, donde propone reemplazar las losas de pavimentación tradicional (AASHTO-PCA) por un sistema de losas con geometría optimizada que permiten una distribución más eficiente de la carga para evitar los problemas de agrietamiento. Normalmente las dimensiones de las losas son de 3,5m o 4m de largo, dependiendo el ancho del carril, lo que implica que gran parte de la carga de un vehículo se concentre en ella generando

tensión, lo cual se evita con la metodología de losas optimizadas, donde el principio fundamental del método consiste en diseñar el tamaño de la losa para que no más de un set de ruedas del vehículo se encuentre en una determinada losa, minimizando así la tensión de tracción crítica.

La combinación de posición de las ruedas y la geometría de las losas permite reducir las tensiones superiores de la losa; lo que conlleva a:

- Disminución del espesor de la losa hasta en 10 cm respecto a los métodos tradicionales
- Este método no contempla las barras de transferencia de cargas, ya que, al tener juntas de contracción de menor ancho, permite una mayor transferencia de carga entre las losas.
- No requiere acciones de mantenimiento diferentes a la limpieza de las obras de drenaje y rocería de las zonas aledañas.
- Ofrece la posibilidad de utilizar la mano de obra y materiales de la zona.

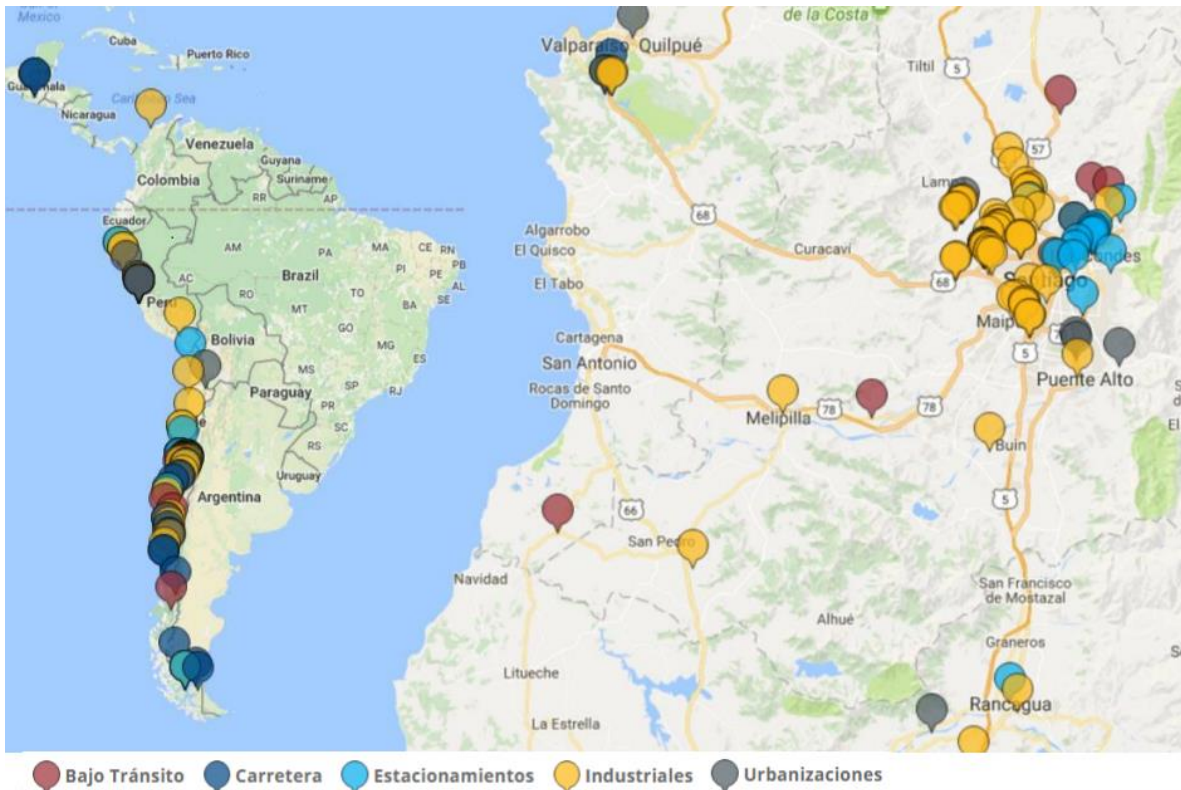
Las primeras construcciones se dieron en el año 2005, donde se realizaron varios tramos de prueba, desde el año 2007, donde el Ingeniero Juan Pablo Covarrubias T. creó la empresa TCPavements, se comenzó a diseñar los pavimentos mediante el programa Optipave.

Actualmente se han construido las siguientes vías en diferentes países:

- 2 vías en Australia, de tipo industrial, de un espesor entre 15 cm y 20 cm, sobre una base granular, para un tráfico de 5'000.000 de ejes equivalentes.
- 153 vías en Chile, para proyectos de bajo (7) y alto (12) volumen de tráfico, estacionamientos (22), industriales (75) y urbanizaciones (19); con espesores de pavimento entre 5 cm y 25 cm; con tráficos entre 500.000 y 190.000.000 de ejes equivalentes
- 9 vías en Colombia, para proyectos de urbanizaciones, con un volumen de tránsito de 500.000 ejes equivalentes, sobre una base granular

- 17 vías en Perú, para proyectos industriales, urbanizaciones y estacionamientos, con espesores que oscilan entre 5 cm y 20 cm, para un tránsito máximo de 5'000.000 de ejes equivalentes, sobre base granular.

A continuación, se presenta gráficamente la localización de los proyectos.



**Figura 1 Localización de los proyectos (TCP Pavements) Fuente: (TCPavements, n.d.)**

De acuerdo con la anterior figura, se observa que la mayor cantidad de proyectos se encuentran en Chile, es de resaltar que actualmente esta metodología cuenta con la aprobación del Ministerio de Obras Públicas de Chile, bajo la ORD: 9371, aprobación por el Ministerio de la Vivienda, bajo la ORD: 0078, Aceptado en el Nuevo Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación del Ministerio de Vivienda y Urbanismo 2016. Esta metodología se encuentra patentada en Chile bajo el número N°44820, en EEUU por la patente N° 7571581, y a nivel de la OMPI, organización mundial de propiedad intelectual a través de la solicitud PCT N° PCT/EP2006/064732, además de otros países de América y Asia

## 1.1 Planteamiento del problema

### 1.1.1 Historia de las vías en Colombia

Mediante la Ley 105 de 1993, se dictan disposiciones básicas sobre el transporte de carreteras en Colombia, se distribuyen competencias y recursos entre la Nación y las Entidades Territoriales, se reglamenta la planeación en el sector transporte y se dictan otras disposiciones. Luego en el año 2008, el congreso de Colombia mediante la ley 1228, decreta que las vías que conforman el Sistema Nacional de Carreteras se denominan arteriales o de primer orden, intermunicipales o de segundo orden y veredales o de tercer orden, y hasta el año 2013 mediante la 0

Adicional a la responsabilidad directa que la nación tiene en las vías terciarias, ha realizado inversiones sobre esta red, a través de diferentes modalidades:

- El Fondo Nacional de Caminos Vecinales creado por decreto 1650 de 1960 y reestructurado por los decretos 1300 de 1988 y 1474 de 1989 ejerció sus funciones hasta el año 2003
- Desde el año 2003 en puentes de vías secundarias y terciarias
- Construcción y mejoramiento de vías, con recursos decididos en audiencias públicas presidenciales, desde el año 2004 hasta el 2012
- Construcción, mejoramiento, rehabilitación y mantenimiento de vías, mediante el Programa de Inversión Rural (PIR), ejecutado por el INVÍAS entre el 2007 y 2009.
- En los años 2009 y 2010, como parte del Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2006 -2010, mediante la Ley 1151 del 24 de julio de 2007 “Estado Comunitario: Desarrollo para todos, el Gobierno llevo a cabo el Programa de mejoramiento y Mantenimiento Rutinario de Vías Terciarias (PROVIDER), como estrategia para generar empleo de mano de obra intensiva no calificada
- Ejecución de obras de emergencia utilizando recursos de la llamada ola invernal, durante 2010 y 2011, el Gobierno Nacional, realizo obras de

emergencia en diversos departamentos a través del Fondo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y su programa Colombia Humanitaria.

- El Plan 2.500 que incluyó vías departamentales y municipales.

Finalmente, el PND de 2014-2018 “Todos por un nuevo país”, resalta la importancia de una política de gestión de la red terciaria como una de las principales estrategias de soporte al desarrollo rural, a la construcción de paz y a la equidad, este gobierno le apuesta a la infraestructura en vías terciarias para el desarrollo del campo y la consolidación de la paz (Departamento de planeación nacional DNP, 2016)

### **1.1.2 Infraestructura de carreteras en Colombia**

Actualmente se estima que el Sistema Nacional de Carreteras tiene una longitud de 215.988 km, de los cuales 17.382 (8%) hacen parte de la llamada Red de Primer Orden, gestionada por el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI). La Red Vial de Segundo Orden suma 44.399 km (21%) y la Red de Tercer Orden, o rural, cuenta con 154.207 km (71%) –incluidos cerca de 12.500 km de caminos privados, los cuales están bajo la gestión de los departamentos, los distritos, los municipios e INVÍAS. (Ospina Ovalle, 2016)

De acuerdo al Informe Nacional de competitividad 2016-2017, donde se informa el estado de las áreas que se consideran críticas para la competitividad del país, como lo son: i) Educación, ii) salud, pensiones, iii) mercado laboral y formalización, v) Ciencia, tecnología e innovación, vi) Desempeño logístico: Infraestructura, transporte y logística, entre otros, ha determinado que Colombia, en términos de infraestructura vial, se encuentra en un nivel muy inferior respecto a los demás países de Suramérica, generando un atraso para la competitividad del país, teniendo en cuenta que el desempeño logístico es un factor fundamental para competir en los mercados nacionales e internacionales, pues comprende un conjunto de variables que permiten optimizar los tiempos y costos de movilizar productos desde la fase de suministro hasta el consumidor final (Consejo Privado de Competitividad, 2017): de acuerdo al informe realizado por el departamento Nacional de Planeación (DNP) y el Ministerio de transporte, en 2016, el estado de las vías del país refleja que solo

un 20% de ellas se encuentran pavimentadas. Lo anterior da un testimonio práctico acerca del atraso de la red vial nacional.

Las vías terciarias, normalmente atienden bajos volúmenes de tránsito – por lo que en este documento se hará referencia a ellas como vías de BVT, y comunican las zonas rurales de los municipios con la cabecera urbana.

Debido al mal estado en que se encuentran estas vías se generan aumento de los tiempos de viaje y baja comercialización de los productos de los municipios. Otro atraso que genera esta problemática está asociado al retraso de actividades como el acceso oportuno a servicios médicos, aumento en los costos de transporte de pasajeros y mercancías, lo cual a su vez aumenta los precios de los productos. (Departamento Nacional de Planeación, 2016).

Este complejo vial es de vital importancia ya que por allí los campesinos sacan sus productos para venderlos, lo que genera un movimiento en la economía. También es importante resaltar que, en época de invierno, las vías en las zonas campesinas se ven altamente afectadas, donde los fenómenos naturales como las remociones en masa o la inestabilidad de los taludes como las registradas en el año 2017 arrasaron con la poca infraestructura que había resistido la temporada invernal (La Nación, 2017b), Donde los departamentos de la región Andina, el Caribe Colombiano, el Piedemonte de la Orinoquia y a parte del pacífico fueron los más afectados por la ola invernal que se presentó durante los meses de abril y mayo (Caracol Radio, 2017). De acuerdo a lo anterior, estos desastres también provocan la inasistencia de los estudiantes a la escuela, lo que a largo plazo genera un problema mucho mayor, disminuyendo la oportunidad de aprendizaje de los niños campesinos (La Nación, 2017a).

El gran problema es que de los más de 170 mil kilómetros de vías de BVT que tiene el país, apenas unos cuantos han sido intervenidos en los últimos años. Además, en muchos municipios estas vías son verdaderas trochas lo que hace imposible el transporte de productos agrícolas (El Tiempo, 2017).

Pese a que entre el 2012 y el 2014 la inversión en vías regionales fue de 1,95 billones de pesos, la debilidad de la red vial terciaria es preocupante, pues es una de las razones de la pobreza en el campo y del bajo crecimiento de la economía agrícola. Este aspecto fue precisamente uno de los puntos del acuerdo de paz, aunque hacer la tarea tendrá sus complejidades (El Tiempo, 2017).

Es de resaltar que actualmente se estima que el 75% de estas vías se encuentran en mal estado o no se tiene certeza de la condición, ya que actualmente no existe un inventario actualizado y sistematizado (El Tiempo, 2017).

Colombia es un país que cuenta con una gran diversidad de recursos, por tal motivo, la infraestructura vial es un factor determinante en la economía ya que está implicada directamente en la formación de un mercado amplio y en la vinculación de las regiones aisladas de la geografía nacional, lo que conlleva a realizar un esfuerzo por parte del estado para optimizar la relación que existe entre la disponibilidad de vías de comunicación terrestre y el nivel de desarrollo de la población. La facilidad de desplazamiento permite ampliar el mercado de productos, principalmente agrícolas, genera empleo, promueve la recreación, permite acceder a servicios médicos y también a una educación de mejor calidad. Las obras de infraestructura vial ayudan a reducir los costos en las actividades de integración de los mercados, lo cual estimula el comercio regional e internacional. La inversión en infraestructura vial es un eficaz instrumento de política para impulsar el crecimiento económico y reducir la pobreza (Zamora Fandiño & Barrera Reyes, 2012).

Luego de más de 50 años de conflicto armado se firmó el acuerdo de paz con las Farc (Gobierno Nacional, 2016), donde en el numeral 1,3,1 Infraestructura y adecuación de tierras, se indica el propósito de lograr la integración regional y el acceso a los servicios sociales y a los mercados, incidir favorablemente sobre el precio de los alimentos como garantía del derecho a la alimentación y mejorar el ingreso de la población campesina. El gobierno nacional creará e implementará un Plan Nacional de Vías Terciarias, donde es importante resaltar la promoción y aplicación de diversas soluciones tecnológicas.

Acorde a lo anterior, actualmente Colombia está pasando por un cambio crucial, después de vivir un conflicto interno por más de 50 años, el Estado quiere activar la economía del país con el resurgimiento de la productividad de las zonas donde por consecuencias del conflicto, se presentó una desaceleración del crecimiento económico del país. De acuerdo con esto, es importante resaltar que las vías terciarias cumplen un papel fundamental para ayudar a crecer la economía del país y salir del atraso en que se encuentra. Con la ayuda de estas conexiones se acortarán distancias y tiempos de transporte, con el fin de generar e impulsar un desarrollo de las actividades agrícolas, mineras y porque no, turísticas. Es claro que con estas intercomunicaciones se podría llegar a reducir el nivel de pobreza con el cual se encuentran algunas regiones de nuestro país, especialmente aquellas que fueron olvidadas por el gobierno en época de conflicto armado.

El lunes 5 de junio de 2017 se firmó el acta de puesta en marcha del plan 51/50 que mejorara las vías terciarias de 51 municipios que fueron históricamente afectados por el conflicto armado. Este convenio que se firmó entre la Agencia de Renovación del Territorio y 29 municipios, hace parte del cumplimiento del primer punto del acuerdo de paz donde se construirá, para cada municipio, 50 kilómetros de vías terciarias según la priorización que determinen las partes firmantes del convenio, en la segunda etapa se intervendrán 136 municipios del posconflicto y finalmente el resto de municipios (914) (Departamento Nacional de Planeación, 2016).

De acuerdo con lo anterior, es necesario construir una compleja red de vías terciarias, que posibiliten el desarrollo del país, es por esto la búsqueda de diferentes tecnologías para ayudar a optimizar recursos, generando alternativas de pavimento durables, de calidad y fácil de mantener, con el fin de ayudar a cumplir la meta de un país que cree en el cambio, que está dispuesto a luchar por salir a delante, lo cual se vuelve en la esperanza de muchos colombianos de generar un país más equitativo y competitivo económicamente.

Es importante resaltar, que encontrar materiales de buena calidad como lo exige la norma INVIAS, en vías de bajos volúmenes de tránsito - BVT, es complicado, ya que se encuentran alejados de zonas aptas para la explotación de materiales, y esta



dependencia de los recursos, no es una solución viable, es por esto, que es crucial utilizar y construir las vías con los materiales de cada región, con el fin de evitar sobre costos de transporte e impactos ambientales desfavorables.

Para darle solución al problema de vías terciarias, el INVIAS propuso la construcción de pavimentos denominados Placa-huella, de acuerdo a las especificaciones de la Guía de Diseño de pavimentos con Placa Huella del INVIAS, para las cuales se diseñan con un volumen de tránsito bajo con muy pocos buses y camiones al día siendo los automóviles, los camperos y las motocicletas el mayor componente del flujo vehicular, a su vez se propone una subbase granular de 15 cm de espesor y de la calidad exigida en las Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías – INVIAS, sobre la cual se construirá la placa huella con un espesor de 15 cm de concreto para soportar los esfuerzos. Este pavimento está diseñado para 20 años de servicio y un ancho de vía de cinco (5) metros. (Departamento Nacional de Planeación, 2016).

## 1.2 Organización del trabajo

El presente trabajo se encuentra dividido en los siguientes capítulos:

**Capítulo 1. Introducción:** Se presenta un resumen general de lo contenido en el trabajo, el estado actual del problema que permite plantear las preguntas de investigación a las cuales se pretende dar respuesta con el cumplimiento de los objetivos del trabajo y adicionalmente se presenta un breve resumen de la metodología seguida.

**Capítulo 2. Estado del arte:** Se presenta el estado del arte de los pavimentos, los factores para tener en cuenta en el diseño de los pavimentos con cada metodología y finalmente se incluye el enfoque de los pavimentos de losas optimizadas

**Capítulo 3. Metodología de losas optimizadas:** Se presenta las bases teóricas de la metodología, los conceptos de diseño, los factores de influencia dentro del software y finalmente la descripción detallada de todos los parámetros que se

tendrán en cuenta dentro de las modelaciones, donde se varía el tránsito, suelo, clima y concreto.

**Capítulo 4. Diseño de losas optimizadas:** Se presentan los resultados obtenidos de las modelaciones con el programa Optipave para el cálculo del espesor de la losa variando los parámetros de tránsito, suelo, clima y concreto.

**Capítulo 5. Resultados y análisis:** Se presentan los resultados junto con los respectivos análisis de las modelaciones realizadas variando los parámetros de tránsito, suelo, clima y concreto. En este capítulo se analiza los factores más influyentes dentro del cálculo del espesor

**Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones:** Se presentan las conclusiones divididas en dos grupos; la primera son conclusiones generales de los diseños de pavimentos y la investigación. La segunda, corresponde a las conclusiones particulares basadas en las modelaciones realizadas para el presente trabajo.

### **1.3 Objetivos.**

#### **1.3.1 Objetivo general.**

Evaluar la aplicación de la técnica de losas de concreto optimizadas en vías de BVT.

#### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- Dimensionar estructuras de pavimentos en vías de BVT empleando la metodología de diseño de losas optimizadas.
- Generar una tabla resumen de diseño de losas optimizadas, variando el clima, Modulo de Rotura (MR), tránsito, material granular.
- Comparar los beneficios, limitaciones y los costos de la aplicación de losas de concreto optimizadas versus otras alternativas usadas como la placa huella.

## 2 Capítulo Estado del Arte

### 2.1 Introducción

En este capítulo presenta una revisión de la literatura relacionada con los aspectos de diseño y desempeño de pavimentos, analizando los principales aspectos técnicos y los parámetros de ingreso para el diseño, los cuales están vinculados al crecimiento de la población, donde se hace necesario construir vías durables y de bajo costo de mantenimiento, para el desarrollo económico y social del país.

Un pavimento es una estructura conformado por un conjunto de capas, que tiene como fin principal ofrecer una superficie de tránsito vehicular limpia, cómoda, segura, durable y económica, diseñada para soportar las acciones del tránsito y del clima. Sus funciones más relevantes son; soportar las cargas del tránsito y proteger la subrasante.

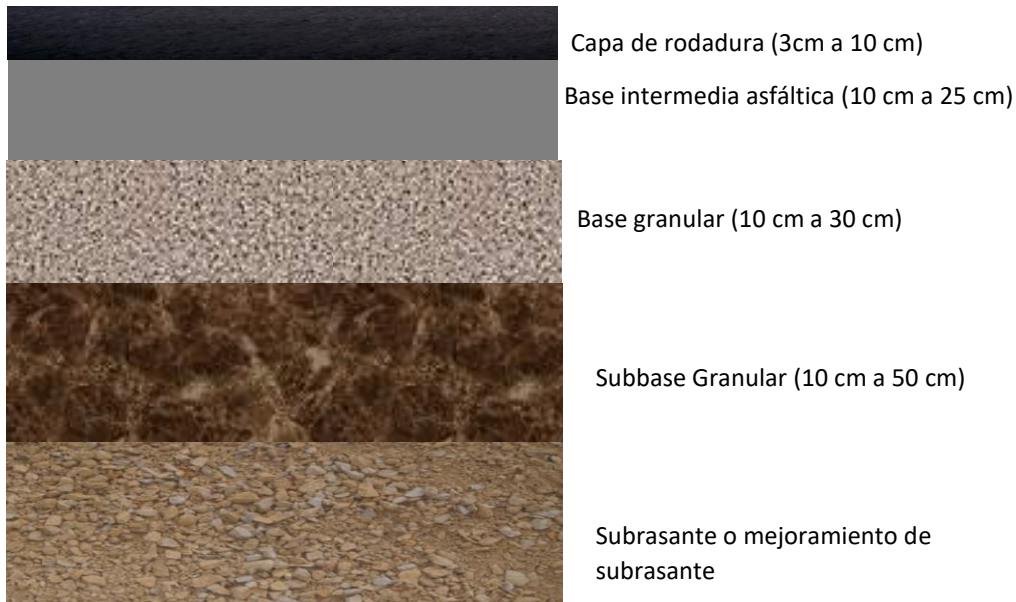
De acuerdo con su funcionamiento bajo las cargas de tránsito, los pavimentos se suelen dividir en:

- Pavimentos flexibles
- Pavimentos rígidos

Los pavimentos flexibles están conformados estructuralmente por capas de materiales granulares compactados (Subbase, bases, afirmado, subrasantes mejoradas o materiales de conformación) y una superficie de rodadura (construida normalmente a base de concreto asfáltico) la cual tiene la capacidad de deformarse sin rotura bajo la acción de una carga. Una de las principales características de este pavimento durante el tránsito de un vehículo, es que los esfuerzos se disminuyen a través del espesor de las capas subyacentes, hasta llegar a distribuirlo y atenuarlo en la subrasante, de tal forma que su resistencia mecánica sea capaz de resistirlo sin deformaciones excesivas.

Una estructura convencional de pavimento asfáltico, está compuesta de un espesor de capa de rodadura (entre 3 y 10 cm), sobre una base intermedia asfáltica (entre 10 y 25 cm), continuando con una capa de base granular (entre 10 y 30 cm), se

extenderá y compactará una subsase granular (10 y 50 cm), cimentada sobre una subrasante o un mejoramiento de la subrasante. (Hugo Alexander Rondón Quintana & Fredy Alberto Reyes Lizcano, 2015)

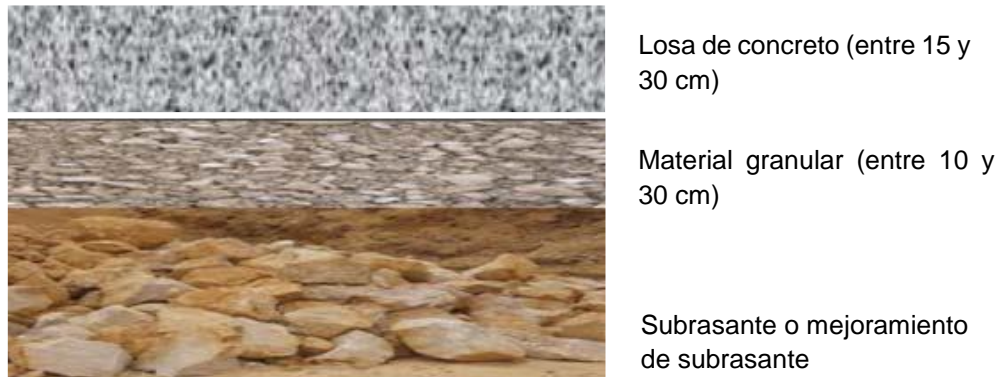


**Figura 2: Estructura típica de un pavimento flexible.**  
Fuente: Elaboración propia

Por su parte, los pavimentos rígidos están conformados por losas de concreto simple o reforzado, que absorbe casi la totalidad de los esfuerzos producidos por las repeticiones de carga del tránsito, por lo que los esfuerzos proyectados a los materiales granulares (bases o subbases granulares) sean menores. Este tipo de pavimentos los hace más competitivos sobre los suelos de baja capacidad de soporte, debido a que las fuerzas que se transmiten desde la superficie se aplican en áreas grandes, con lo que las solicitudes que llegan a la subrasante son mucho más bajas.

Una estructura de pavimento rígido está compuesta de una losa de concreto (entre 15 y 30 cm), continuando con una capa granular (entre 10 y 30 cm), cimentada sobre una subrasante o un mejoramiento de la subrasante, para un tránsito entre 1'000.000 EE a 17'000.000 EE (Hugo Alexander Rondón Quintana & Fredy Alberto Reyes Lizcano, 2015)

Este tipo de pavimento constituye la base del presente estudio, por lo que se detalla más adelante.



**Figura 3: Estructura de pavimento rígido**  
**Fuente: Elaboración propia**

## 2.2 Pavimentos rígidos

Desde la primera construcción de un pavimento rígido en Estados Unidos en 1890, han surgido varias dudas sobre su funcionamiento y sobre la posibilidad de establecer mejores métodos que permitan determinar el espesor y la calidad que deberían tener las diferentes capas que lo constituyen.

Hoy en día se conocen varios métodos de diseño, los cuales se han venido calibrando a través del tiempo, realizando ensayos a pavimentos existentes que permiten inferir el comportamiento que ellos han de tener en el tiempo.

Aunque los métodos de diseño son herramientas importantes, para definir las características con las que se va a construir un pavimento en particular, es necesario tener en cuenta la experiencia regional con el fin de realizar los ajustes, a que se diera lugar, debido a las simplificaciones y generalidades con las que se conciben los diferentes métodos de diseño. (Cipriano Alberto Londoño, 2001)

Las ventajas de los pavimentos de concreto pueden resumirse en los siguientes factores:

1. Economía: Aunque el costo inicial de un pavimento de concreto es normalmente mayor al de otras alternativas, el costo de mantenimiento es muy bajo.
2. Seguridad: Esta se basa principalmente en la rugosidad que ofrece la superficie del pavimento correctamente terminada, y en la mejor visibilidad nocturna proveniente de su color y texturizado.
3. Comportamiento satisfactorio: El concreto tiene alta resistencia a la flexión y al desgaste y distribución más uniforme de la carga con la consiguiente disminución de asentamientos locales y de esfuerzos sobre la subrasante.
4. Duración: La vida útil de un pavimento de concreto es sensiblemente mayor a la de otras alternativas. Son frecuentemente pavimentos con 30 años de servicio (a pesar de haber sido diseñados para un período de 20 años). (ICPC-, 1991)

Los métodos de diseño más usados en el mundo son el método de la PCA – Portland Cement Association 1984 y el de la AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials 1993, los cuales a su vez son muy diferentes, teniendo en cuenta que al utilizar la metodología PCA el pavimento ha cumplido su vida útil cuando se da la ruptura del concreto por fatiga a causa de la repetición de cargas, mientras que la metodología AASHTO la vida útil está asociada a una calificación, más o menos subjetiva, de las características del pavimento, que en el método se conoce como índice de servicio final, el cual puede ser 2.5 ó 3.5 u otro valor, por lo que el espesor va a depender del grado de deterioro al que se desea que llegue el pavimento, para proveer un manejo seguro y confortable a los usuarios. (Cipriano Alberto Londoño, 2001)

Tomando como base lo anterior, se afirma que esta es la razón por la cual cuando se diseña un pavimento de concreto con diferentes metodologías, los espesores para cada metodología varían significativamente, sin llegar a afirmar que existe una respuesta correcta o falsa. Por lo que es necesario que el diseñador tenga criterio a la hora de escoger el espesor correcto.

## **2.2.1 Parámetros básicos de diseño**

Los pavimentos se diseñan y se construyen adoptando ciertas características, para prestar un servicio durante un periodo de tiempo establecido, manteniendo condiciones de seguridad optimas, con un costo apropiado.

Pese a que actualmente existen varias metodologías de diseño de un pavimento de concreto, sus parámetros de ingreso siempre tienen en común factores como: la capacidad de soporte del suelo, el tránsito que circulará durante su vida útil, las condiciones climáticas y los materiales a utilizar durante su construcción.

### **2.2.1.1 Subrasante**

La subrasante es la cimentación de una vía por lo que debe tener las capacidades necesarias para soportar las cargas del tránsito, así como un comportamiento adecuado ante la acción del medio ambiente suministrando un apoyo uniforme a la estructura de pavimento. En términos generales esta variable se considera como la principal dentro del diseño, teniendo en cuenta que de esta capa depende, en gran parte, el espesor del pavimento. (Hugo Alexander Rondón Quintana & Fredy Alberto Reyes Lizcano, 2015)

Los diseñadores de pavimentos caracterizan la subrasante utilizando diferentes métodos, ya sea mediante la relación de soporte de California (CBR), el módulo de reacción de la subrasante (K) o del módulo resiliente ( $M_r$ ).

Tomando como base el Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito del INVIAS, se recomienda que para subrasantes con valores inferiores a 2% de CBR, se deberá sustituir los materiales o modificar sus características con la adición de productos tales como cemento, cal u otros que mejoren sus características físicas y químicas. Adicional a lo anterior, este manual clasifica la subrasante como se indica en la Tabla 1:

**Tabla 1 Clasificación de la subrasante de acuerdo a su resistencia.**

Clase o tipo	CBR (%)	Módulo resiliente (kg/cm <sup>2</sup> )
S1	<2	<200
S2	2 - 5	200 - 500
S3	5 - 10	500 – 1000
S4	10 - 20	1000 – 2000
S5	> 20	>2000

**Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2007)**

### 2.2.1.2 Transito

El tránsito es uno de los parámetros de diseño fundamentales, y aunque se pueden permitir ciertas imprecisiones en la determinación de esta variable, siempre será necesario conocerla para poder determinar los espesores de las capas que constituyen el pavimento. Dentro del procesamiento de los datos relacionados con el tránsito, es necesario distinguir los siguientes aspectos: (Instituto Nacional de Vías, 1998a)

- Tránsito promedio diario.
- Clasificación de vehículos.
- Factores de equivalencia de carga para cada tipo de vehículo.
- Distribución direccional.
- Distribución por carril
- Proyección de las variables en la vida de diseño.

Para los pavimentos de concreto, la variable transito se evalúa de diferentes formas, dependiendo la metodología de diseño, dentro de estas se encuentran:

Ejes equivalentes: Son los ejes equivalentes de una carga de referencia, normalmente de 8.2 toneladas para Colombia, que circula en el carril de diseño, durante el periodo de diseño. Para realizar estos cálculos, se utilizan las series históricas de tránsitos o los aforos. Adicionalmente, se analizan las tendencias para adoptar las tasas de crecimiento del tránsito con el objetivo de hacer su proyección



durante el periodo de diseño. Luego se continua con la composición del tránsito, los factores de equivalencia por tipo de vehículo, el factor distribución por sentido, el factor de distribución por carril y el factor de proyección. Con todos estos datos se determina el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño.

Espectro de carga: Para esta metodología se calcula el transito promedio diario, mediante conteos o series históricas, se adopta un factor direccional y se estiman las cargas máximas por ejes. Esta información expresada en términos del espectro de cargas donde se realiza la distribución de peso por los diferentes tipos de ejes, hasta el período final de diseño, es proyectada mediante la ecuación 1.

$$\text{Repeticiones Esperadas} = 365 \times F_d \sum \text{TPD}_i \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$F_d$  : Factor de distribución direccional

$\text{TPD}_i$  : Transito promedio diario para cada tipo de vehículo

Las dos metodologías se explican a detalle dentro de cada método de diseño de pavimento.

### **2.2.2 Método de la Portland Cement Association (PCA)**

El propósito fundamental de esta metodología es el de encontrar el espesor de losa mínimo, es decir, hallar los espesores mínimos de pavimento que se traduzcan en los menores costos anuales. Si se toma un espesor mayor que el necesario, el pavimento presentará buen comportamiento con bajos costos de mantenimiento, pero el costo inicial será muy elevado. Ahora, si, por el contrario, el espesor elegido es muy bajo, se requerirá un mantenimiento importante e interrupciones de tránsito prematuras y costosas, que excederán la compensación por el menor costo inicial. Por tanto, un criterio sano de ingeniería implica la elección de espesores de diseño que equilibren adecuadamente los costos iniciales y los de mantenimiento. (Alfonso Montejo Fonseca, 2010)

### 2.2.2.1 Consideraciones básicas

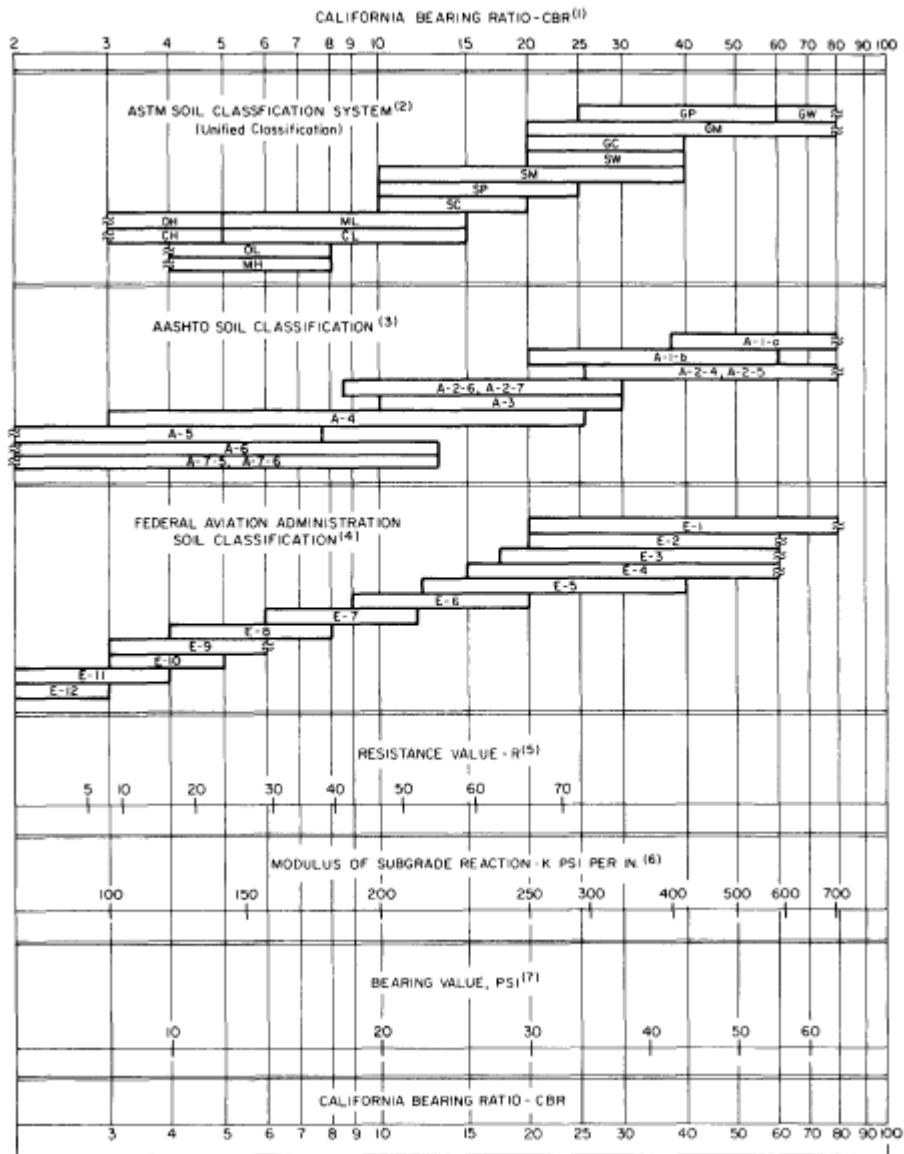
Lo primero que se debe evaluar dentro de esta metodología son las siguientes condiciones, las cuales tienen un valor relevante durante el diseño.

- El método PCA se puede aplicar para pavimentos de:
  - ✓ Concreto simple: Estos pavimentos se construyen sin acero de refuerzo ni dovelas de transferencia de carga en las juntas. La transferencia de carga se realiza por medio de la trabazón de agregados.
  - ✓ Concreto simple con barras de transferencia de carga: Estos pavimentos se construyen sin acero de refuerzo, sin embargo, se colocan varillas lisas en cada junta de construcción, que actúan como dispositivos de transferencia de carga.
  - ✓ Concreto reforzado: Estos pavimentos tienen acero de refuerzo y dovelas en las juntas de construcción.
  - ✓ Concreto con refuerzo continuo: Estos pavimentos se construyen sin juntas de construcción. Debido a su refuerzo relativamente pesado y continuo en dirección longitudinal, desarrollan fisuras transversales a intervalos muy cortos. Sin embargo, por la presencia del refuerzo, se desarrolla un alto grado de transferencia de carga en las caras de las fisuras.
- El grado de transferencia de carga proporcionado en las juntas transversales.
- El efecto de usar berma de concreto, adyacentes al pavimento.
- El efecto de usar subbase de concreto pobre, granulares y estabilizadas
- Planteamiento de dos criterios de análisis: fatiga y erosión.

Luego de seleccionar el tipo de pavimento a construir (simple con o sin dovelas, reforzado con juntas y dovelas, o continuamente reforzado), el tipo de subbase y tipo de berma, se deben adoptar los siguientes parámetros:

- ✓ Resistencia a la flexión del concreto (MR módulo de rotura): Esta resistencia se considera en el procedimiento de diseño por el criterio de fatiga, el cual controla el agrietamiento del pavimento bajo la acción repetida de las cargas de los vehículos. La resistencia a la flexión del concreto se determina por el ensayo de módulo de rotura sobre vigas de 150x150x750 mm, cargándolas en los tercios de la luz, para un periodo de 28 días (“resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios la luz libre” INV E-414-13 (ASTM C78))

Resistencia de la subrasante (K), en caso de tener un material granular sobre la subrasante, se deberá calcular el valor del K conjunto entre la subrasante y el material granular: La resistencia de la subrasante se mide en términos del módulo de reacción “K”, determinado por pruebas de placa directa. Pese a lo anterior, normalmente este valor se obtiene mediante correlaciones con pruebas de CBR mediante la Figura 4:



**Figura 4: Relaciones aproximadas entre los valores de resistencia y clasificación del suelo. Fuente: (Portland Cement Association, 1984)**

- ✓ Cuando se coloque una subbase granular con el objetivo de prevenir el fenómeno de bombeo, será necesario calcular el "K" combinado, que como consecuencia puede disminuir el espesor de la losa. Los valores de K combinado se pueden obtener de las tablas *Tabla 2* y *Tabla 3*

**Tabla 2 Efecto de la subbase granular sobre los valores de K**

Valor de K para Subrasante		Valor de K para Subbase Granular							
		100mm		150mm		225mm		300mm	
MPa/m	Lb/pulg <sup>3</sup>	MPa/m	Lb/pulg <sup>3</sup>	MPa/m	Lb/pulg <sup>3</sup>	MPa/m	Lb/pulg <sup>3</sup>	MPa/m	Lb/pulg <sup>3</sup>
20	73	23	85	26	96	32	117	38	140
40	147	45	165	49	180	57	210	66	245
60	220	64	235	66	245	76	280	90	330
80	295	87	320	90	330	100	370	117	430

**Fuente: (Portland Cement Association, 1984)**


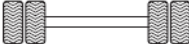
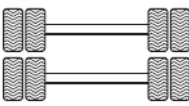
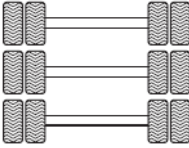
**Tabla 3 Efecto de la subbase granular tratada con cemento sobre los valores de K**

Valor de K para Subrasante		Valor de K para Subbase Granular tratada con cemento							
		100mm		150mm		200mm		300mm	
MPa/m	Lb/pulg <sup>3</sup>	MPa/m	Lb/pulg <sup>3</sup>	MPa/m	Lb/pulg <sup>3</sup>	MPa/m	Lb/pulg <sup>3</sup>	MPa/m	Lb/pulg <sup>3</sup>
20	73	60	220	80	300	105	400	135	500
40	147	100	370	130	500	185	680	230	850
60	220	140	520	190	700	245	900		

**Fuente: (Portland Cement Association, 1984)**

- ✓ El periodo de diseño: Normalmente se considera como sinónimo del término “periodo de análisis de tránsito”. Pero dado que es difícil predecir el tránsito con suficiente aproximación para un tiempo tan largo, normalmente los diseños para pavimentos de concreto se toman por un lapso de 20 años
- ✓ Tránsito: Los principales factores de tránsito que inciden en el diseño de un pavimento rígido, son el número y la magnitud de las cargas más pesada por eje, que se espera durante el periodo de diseño. Estos valores se obtienen bajo los siguientes estimativos:
  - Tránsito promedio diario (TPD)
  - Tránsito promedio diario en vehículos comerciales (TPDVC)
  - Carga por eje de los vehículos: Para Colombia se ha considerado emplear las cargas máximas permitidas por el Ministerio de

Transporte (Resolución 4100 del 28 de diciembre de 2004); en la Figura 5, se presenta el resumen de las cargas por eje adoptadas.

Descripción	Configuración	Peso, t
Eje simple direccional		6,0
Eje simple llanta doble		11,0
Eje tándem llanta doble		22,0
Eje tridem llanta doble		24,0

**Figura 5: Esquematación de los diferentes tipos de ejes y su carga máxima**

**Fuente: (Ministerio de Transporte de Colombia, 2004)**

Para la definición del espectro de carga, se tiene en cuenta las cargas por eje presentadas en la Tabla 4

**Tabla 4 Carga por Eje y Tipo de Vehículo**

PESO EN TONELADAS POR EJE DE CADA TIPO DE VEHÍCULO					
	Eje Simple 1	Eje Simple 2	Eje Tándem 1	Eje Tándem 2	Eje Tridem
Buses	6	6			
Camión C2-P	6	6			
Camión C2-G	6	11			
Camión C3	6		22		
Camión C4	6	11	22		
Camión C5	6		22	22	
Camión C>5	6		22		24

**Fuente: Elaboración propia**

- ✓ Proyección de tránsito: Se deben usar tasas de crecimiento anuales y factores de proyección. En la tabla Tabla 5, se presentan las relaciones entre las tasas anuales de crecimiento y los factores de proyección para periodos de 20 y 40 años.

**Tabla 5 Tasas anuales de crecimiento de tránsito**

Tasas de crecimiento anual de tránsito %	Factores de proyección	
	20 años	40 años
1	1.2	1.2
1 ½	1.2	1.3
2	1.2	1.5
2 ½	1.3	1.6
3	1.3	1.8
3 ½	1.4	2.0
4	1.5	2.2
4 ½	1.6	2.4
5	1.6	2.7
5 ½	1,7	2.9
6	1.8	3.2

**Fuente: (Portland Cement Association, 1984)**

En caso de diseño, el factor de proyección se multiplica por el TPD presente para obtener el TPD de diseño.

Factores de seguridad de carga: Dentro del método de diseño se exige que las cargas reales esperadas se multipliquen por unos factores de seguridad de cargas (F.S.C.), recomendándose las siguientes:

- Para tránsito pesado, F.S.C. =1.2
- Para tránsito medio, F.S.C.= 1.1
- Para tránsito bajo, F.S.C. =1.0

En resumen, los datos de entrada para el diseño por medio de la metodología de la PCA son los siguientes:

- ✓ Tipo de junta y berma
- ✓ Resistencia a la flexión del concreto a 28 días (MR)
- ✓ Valor K de la subrasante o del conjunto subrasante – subbase
- ✓ Factor de seguridad de carga (F.S.C)
- ✓ Distribución de carga por eje
- ✓ Numero esperado de repeticiones de las diversas cargas por eje en el carril de diseño y durante el periodo de diseño.

Para el cálculo del espesor de la losa, esta metodología realiza el análisis por:

- Fatiga: Para controlar el agrietamiento por el tránsito de los vehículos
- Erosión: Para controlar la erosión de la fundación y las bermas, el bombeo y el desnivel entre las losas.

### 2.2.3 Método AASHTO – 1993

Este método fue desarrollado en la publicación AASHTO “Guide for Design of Pavement Structures”. Para el método el espesor del pavimento de concreto se determina bajo la fórmula de diseño que se muestra en la Ecuación 2:

$$\log_{10} W_{82} = Z_r S_0 + 7.35 \log_{10} (D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log_{10} \frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5}}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.48}}} + (4.22 - 0.32 P_t) \times \log_{10} \left( \frac{M_r C_d x (0.09 D^{0.75} - 1.132)}{1.51 x J \left( 0.09 D^{0.75} - \frac{7.38}{(E_c / K)^{0.25}} \right)} \right)$$

Ecuación 2

De donde:

$W_{82}$ : Número de ejes equivalentes de 8.2 t (80 kN).

$Z_R$  : Desviación estándar normal

$S_0$  : Error estándar combinado de la predicción del tránsito y de la predicción del comportamiento

$D_i$  : Espesor de la capa i (pulg)

$\Delta PSI$  : Pérdida de serviciabilidad

$M_R$  : Resistencia media del concreto (MPa)

$C_d$  : Coeficiente de drenaje

$J$  : Coeficiente de transmisión de carga en las juntas



$E_c$  : Modulo de elasticidad del concreto (MPa)

$K$  : Modulo de reacción (MPa)

La esencia de este método es determinar el espesor  $D$  de la losa de un pavimento de concreto, para que este pueda soportar el paso de un numero  $W_{82}$  de ejes equivalentes de 82 kN, sin que se produzca una disminución en el índice de servicio -PSI.

El método se caracteriza y controla mediante las siguientes variables:

### 2.2.3.1 Variable Tiempo:

En lo que se refiere al periodo de diseño, se indica en general que este debe ser superior a 20 años, como se muestra en la tabla Tabla 6.

**Tabla 6 Periodos de diseño a adoptar en función del tipo de carretera**

Tipo de carretera	Periodo de diseño, años
Urbana de transito elevado	30 – 50
Interurbana de transito elevado	20 – 50
Pavimentos de baja intensidad de transito	15 – 25
De baja intensidad de transito pavimentos con grava	10 - 20

**Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)**

### 2.2.3.2 Tránsito:

En el método AASHTO los pavimentos se proyectan para que éstos resistan determinado número de cargas durante su vida útil. El tránsito está compuesto por vehículos de diferente peso y número de ejes que producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, lo cual origina distintas fallas en éste. Para tener en cuenta esta diferencia, el tránsito se transforma a un número de cargas por eje simple equivalente de 18 kips (80 kN) ó ESAL (Equivalent Single Axle Load), de tal manera que el efecto dañino de cualquier eje pueda ser representado por un número de cargas por eje simple.

La información de tráfico requerida por la ecuación de diseño utilizado en este método es: cargas por eje, configuración de ejes y número de aplicaciones.

A partir de los valores del tránsito promedio diario medidos en campo o tomados de base de datos históricas, se procede a estimar el volumen futuro de los segmentos en estudio, para ello es necesario determinar una tasa de crecimiento.

Normalmente para las proyecciones del tránsito en Colombia se realiza teniendo en cuenta la  $N = (N_o - N_c) * ((1+r)^n - 1) / r + N_c$  Ecuación 3, tomada del manual del INVIAS de Medios y Altos Volúmenes de tránsito:

$$N = (N_o - N_c) * ((1+r)^n - 1) / r + N_c \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

N : Es el número de ejes equivalentes de 8.2 t que circularán por el carril de diseño durante el período de diseño (n).

N<sub>o</sub> : Es el número de ejes equivalentes de 8.2 t que circularán por el carril de diseño en el año base o de puesta en servicio del pavimento.

N<sub>c</sub> : Es el número de ejes equivalentes de 8.2 t ya soportados por el carril de diseño del pavimento durante la construcción del mismo.

r : Es la tasa de crecimiento anual de tránsito de vehículos comerciales.

n : Número de años del período de diseño.

Tomando como base el Tránsito Diario consolidado, obtenido para el año 0, se lleva a cabo la estimación de las proyecciones para los puntos de aforo al año de diseño final.

Con el fin de evaluar el factor daño para la conversión de los vehículos comerciales a ejes equivalentes de 8.2 toneladas, se emplea el peso máximo bruto por tipo de vehículo (ver Tabla 4), un concepto desarrollado a partir de la información recolectada en el Ensayo Vial AASHO, que determina el correspondiente daño proporcionado al pavimento a partir de la relación que existe entre el peso que ejerce el eje con una carga cualquiera y el eje patrón. Se encontró en dicho ensayo que el daño que hacen los ejes en el pavimento no es linealmente proporcional a la carga, sino que es exponencial, teniendo un comportamiento como el dado por la Ecuación 4.

$$FE = \left( \frac{P_i}{P_e} \right)^n \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

Fe: Factor de equivalencia

Pi: Carga del eje

Pe: Carga en el eje patrón

n: Exponente (En pavimentos asfálticos oscila entre 3.8 y 4.2; en pavimentos de concreto oscila entre 4 y 4.5)

A continuación, se presenta el factor de equivalencia de carga por eje, las fórmulas que se muestran en la Tabla 7:

**Tabla 7. Fórmulas simplificadas para el cálculo del factor de equivalencia de carga por eje (AASHTO)**

<i>Tipo de Eje</i>	<i>Fórmula para el Cálculo del Factor de Equivalencia pavimentos asfálticos</i>	<i>Fórmula para el Cálculo del Factor de Equivalencia pavimentos rígidos</i>
SIMPLE DE RUEDA SIMPLE	$\left(\frac{\text{Carga del Eje (Tn)}}{6.6}\right)^4$	$\left(\frac{\text{Carga del Eje (Tn)}}{6.1}\right)^4$
SIMPLE DE RUEDA DOBLE	$\left(\frac{\text{Carga del Eje (Tn)}}{8.2}\right)^4$	$\left(\frac{\text{Carga del Eje (Tn)}}{8.3}\right)^{4.5}$
TÁNDEM	$\left(\frac{\text{Carga del Eje (Tn)}}{15}\right)^4$	$\left(\frac{\text{Carga del Eje (Tn)}}{13.5}\right)^{4.2}$
TRÍDEM	$\left(\frac{\text{Carga del Eje (Tn)}}{23}\right)^4$	$\left(\frac{\text{Carga del Eje (Tn)}}{18.8}\right)^{4.3}$

**Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)**

En la Tabla 8 se presentan los factores daño adoptados para pavimentos flexibles para la conversión de los vehículos comerciales a ejes equivalentes de 8.2 toneladas, los cuales corresponden a los estimados por la Universidad del Cauca en su investigación Nacional de Pavimentos del año de 1996 y valores propuestos por el INVIAS.

**Tabla 8. Factores de equivalencia de carga por tipo de vehículo obtenidos a nivel nacional en el año de 1996.**

Tipo de Vehículo		Factor de Equivalencia pavimentos flexibles
BUSES	Bus	0.40
	Bus Metropolitano	1.00
C2P	C2P	1.14
C2G	C2G	3.44
C3 Y C4	C3	3.76
	C2 S1	3.37
	C4	6.73
	C3 S1	2.22
	C2 S2	3.42
C5	C3 S2	4.40
> C5	>C5	4.72

**Fuente: Invias**

**Factor distribución:** Para el cálculo del tránsito equivalente por carril de diseño, se debe determinar la distribución porcentual de vehículos pesados de acuerdo con las características particulares de las condiciones de tránsito en la vía en estudio. Mediante observación, se determina la distribución direccional (Fd) de los vehículos, normalmente se utiliza 50%, asumiendo que es una calzada bidireccional y tránsito se divide en dos, aunque en ocasiones este puede variar entre 30% y 70%, dependiendo del número de carriles en cada dirección. Posteriormente, se corrige el número de vehículos comerciales en cada dirección por un factor de distribución

por carril (Fca) en función del número de carriles en cada sentido, para lo cual se recomienda la Tabla 9 sugerida por la AASHTO.

**Tabla 9. Factor de distribución por carril**

Número total de carriles en cada dirección	Factor de distribución para el carril de diseño (Fca)
1	1.0
2	0.90
3	0.75

**Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)**

De acuerdo con los parámetros mencionados anteriormente, el número de ejes equivalentes se determina mediante la Ecuación 5

$$N=365 \times F_c \times F_d \sum TPD_i \times C_i \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

- N : Número anual de ejes equivalentes de 8.2Ton
- F<sub>d</sub> : Factor de distribución direccional
- F<sub>c</sub> : Factor de distribución por carril
- TPI : Transito promedio diario para cada tipo de vehículo
- C<sub>i</sub> : Factor de equivalencia de carga por tipo de vehículo

Tomando como referencia los errores encontrados por la AASHTO, los numero de ejes equivalentes deben corregirse mediante una distribución normal para la diferencia entre el tránsito real y el estimado, a continuación, en la Ecuación 6, la expresión para proporcionar la confianza requerida en la variable tránsito.

$$N' = 10^{0.05 Z_r} * N$$

Ecuación 6

Dónde:

N': Es el tránsito equivalente corregido para proporcionar un determinado nivel de confianza.

Zr: El correspondiente a una distribución normal y a la confiabilidad deseada.

**Grado de importancia de la carretera:** Tiene que ver con el uso esperado de la carretera. De acuerdo con lo anterior, para carreteras principales el nivel de confiabilidad es alto, ya que si se estima un espesor menor 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 Tabla 10, se presentan los niveles de confiabilidad aconsejados por la AASHTO.

**Tabla 10. Niveles de confiabilidad a adoptar en función del tipo de carretera**

Tipo de camino	Zona urbana	Zona rural
Rutas interestatales y autopistas	85 – 99.9	80 -99.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 99
Colectoras	800 – 95	75 – 95
Locales	50 -80	50 -80

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

### 2.2.3.3 Desviación Normal Estándar

Con el valor de confiabilidad adoptado, se encuentra el valor de desviación estándar. Los valores de la desviación se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11. Valores de Zr en función de la confiabilidad**

Confiabilidad R %	Desviación normal estándar
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340

Confiabilidad R %	Desviación normal estándar
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

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

#### 2.2.3.4 Error estándar combinado $S_o$ :

La Guía AASHTO recomienda adoptar para  $S_o$  valores comprendidos dentro de los siguientes intervalos para pavimentos rígidos:

- 0.35 = Construcción nueva
- 0.40 = sobrecapas

#### 2.2.3.5 Índice de servicio

El índice de servicio inicial ( $P_o$ ) se establece como la condición original del pavimento inmediatamente después de su construcción o rehabilitación. AASHTO estableció para pavimentos rígidos un valor inicial deseable de 4.5, si es que no se tiene información disponible para el diseño.

El índice de servicio final ( $P_f$ ) se establece con el índice más bajo que pueda ser tolerado antes de que sea necesario efectuar una rehabilitación, un refuerzo o una reconstrucción. Normalmente se sugiere adoptar valores entre 2,0 y 2,5 dependiendo del tránsito.

#### 2.2.3.6 Coeficiente de drenaje

Este valor depende de la calidad del drenaje, que viene determinada por el tiempo que tardara el agua en ser evacuada del pavimento y el porcentaje de tiempo a lo largo del año durante el cual el pavimento está expuesto a niveles de humedad aproximándose a la saturación. Dicho porcentaje depende de la precipitación media

anual y de las condiciones de drenaje. En la Tabla 12 y Tabla 13 se presentan la clasificación del drenaje y los valores de coeficiente de drenaje.

**Tabla 12. Calidad de drenaje**

Calidad del drenaje	Tiempo que tarda el agua en ser evacuada
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Mediano	1 semana
Malo	1 mes
Muy Malo	El agua no se evacua

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

**Tabla 13. Valores de coeficientes de drenaje Cd**

Calidad del drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menos del 1%	1% - 5 %	5% - 25%	Mas del 25%
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
Mediano	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Malo	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Muy malo	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

### 2.2.3.7 Transferencia de cargas

El coeficiente de transferencia de cargas J, es un factor usado en pavimentos rígidos para tener en cuenta la capacidad de las losas para transferir cargas a través de las juntas y fisuras. La tabla Tabla 14 da recomendaciones sobre unos rangos de coeficientes J para distintas condiciones:

**Tabla 14. Valores de coeficiente de transmisión de carga J**

Tipo de pavimento	Hombro			
	Elemento de transmisión de carga			
	Concreto asfáltico		Concreto hidráulico	
	si	no	si	no
No reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 -4.2



Reforzado continuo	2.9 – 3.2	-	2.3 – 2.9	-
--------------------	-----------	---	-----------	---

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

### 2.2.3.8 Factor de perdida de soporte Ls

El factor LS, tiene en cuenta la pérdida de soporte que tiene lugar por efecto de erosión de la sub-base o por movimientos diferenciales verticales del suelo. Debido a este factor, se baja el coeficiente de reacción de la sub-rasante. En la tabla Tabla 15 se presentan los valores.

Tabla 15. Perdida de soporte

Tipos de subbase o base	Factor de perdida de soporte
Subbases granulares tratadas con cemento (Mr: de 7,000 a 14,000 Mpa)	0.00 a 1.00
Subbases granulares tratadas con cemento (Mr: de 3.500 a 7000 Mpa)	0.00 a 1.00
Bases asfálticas (Mr: de 2.500 a 7000 Mpa)	0.00 a 1.00
Subbases estabilizadas con asfalto (Mr: de 300 a 2000 Mpa)	0.00 a 1.00
Estabilización con cal (Mr: de 150 a 1000 Mpa)	1.00 a 3.00
Materiales granulares sin tratar (Mr: de 100 a 300 Mpa)	1.00 a 3.00
Suelos finos y subrasantes naturales (Mr: de 20 a 300 Mpa)	2.00 a 3.00

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

### 2.2.3.9 Módulo de elasticidad $E_c$ del concreto

En la Tabla 16 se presentan las relaciones recomendadas por la AASHTO para el cálculo del módulo de elasticidad:

Tabla 16. relaciones recomendadas por AASHTO para el cálculo del módulo de elasticidad.

Tipo de agregado y origen	Modulo de elascidad $E_c$ (MPa – kg/cm <sup>2</sup> )
Grueso – Ígneo	$E_c = 5.500\sqrt{f_c'} - E_c = 17.500\sqrt{f_c'}$
Grueso – Metamórfico	$E_c = 4.700\sqrt{f_c'} - E_c = 15.00\sqrt{f_c'}$
Grueso – Sedimentario	$E_c = 3.600\sqrt{f_c'} - E_c = 11.500\sqrt{f_c'}$
Sin Información	$E_c = 3.900\sqrt{f_c'} - E_c = 12.500\sqrt{f_c'}$

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

En donde  $F_c$  es la resistencia a la compresión del concreto y debe expresarse en MPa o kg/cm<sup>2</sup> para obtener el módulo en Mpa o Kg/cm<sup>2</sup>.

### **2.2.3.10 Módulo de reacción k de la superficie en la que se apoya el pavimento**

Para determinar el módulo de reacción se puede utilizar diferentes correlaciones con otros parámetros:

- ✓ Bases o subbases granulares: Se puede tomar el CBR, el valor R utilizado en California o el resultado del ensayo triaxial de Texas
- ✓ Bases tratadas con cemento: Resistencia a la compresión a 7 días
- ✓ Base asfáltica: resultado del ensayo de estabilidad Marshall

### **2.2.4 Placa huella**

Adicional a los pavimentos asfálticos y de concreto, El INVIAS propuso la metodología de pavimentos denominados Placa-huella como una solución para vías terciarias de carácter veredal, de acuerdo a la especificación de la Guía de Diseño de Pavimentos con Placa Huella (Instituto Nacional de vías, 2015), para las cuales se diseñan con un volumen de tránsito bajo con muy pocos buses y camiones al día siendo los automóviles, los camperos y las motocicletas el mayor componente del flujo vehicular.

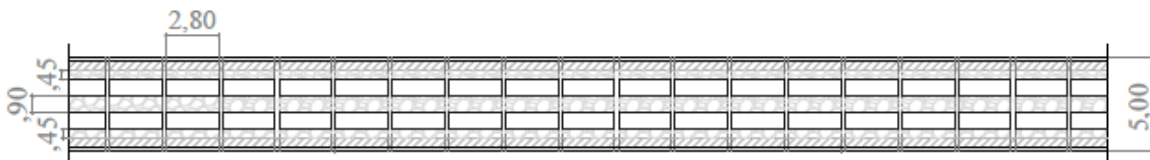
Teniendo en cuenta que este tipo de pavimento está diseñado para carga última, ya que son estructuras de concreto reforzado similares a la estructura de un edificio, la falla estructural (o ruptura) se produce por la aplicación de una carga que produzca esfuerzos que superen la resistencia última de los elementos de concreto reforzado, de acuerdo con lo anterior, la metodología asume como vehículo de diseño el camión C-3.

Se propone una subbase granular de 15 cm de espesor con la calidad exigida en las Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías – INVIAS; (Art 320). El espesor adoptado es suficiente para subbases granulares colocadas sobre suelos con CBR mayor o igual a tres por ciento (3%). sobre la subbase se construirá la placa huella con un espesor de 15 cm de concreto hidráulico reforzado con una malla en el tercio inferior de cada placa, en diámetro  $\frac{1}{2}$ " y estarán separadas cada 0.30 m. En el sentido longitudinal se deberá conservar

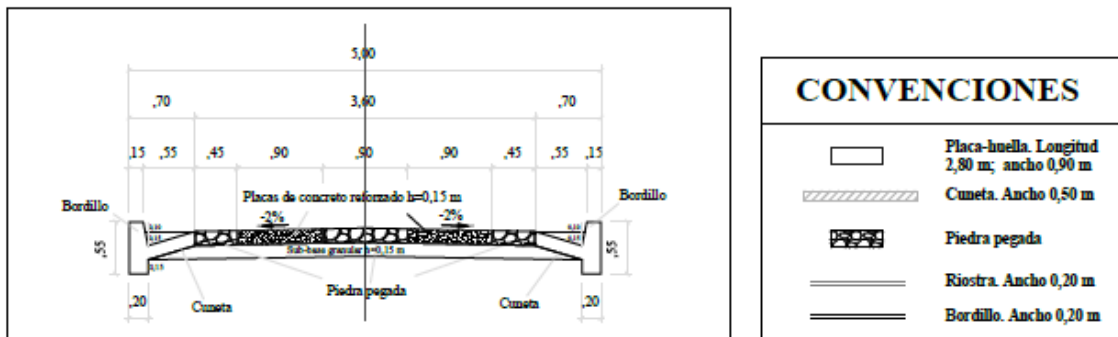
un recubrimiento de 5 cm mientras que para el sentido transversal se deberá considerar que las barras penetren 10 cm en las placas de concreto ciclópeo, con el fin de que el acero quede embebido en dicha placa (Instituto Nacional de vías, 2015).

El espesor único adoptado para la subbase granular y para las placas-huella obedece fundamentalmente a conveniencias constructivas más que a requerimientos para controlar los esfuerzos producidos por los vehículos, para una vida de servicio de 20 años con un ancho de vía de cinco (5) metros. (Instituto Nacional de vías, 2015).

Como se puede observar a continuación, las placas-huella son de 90 centímetros de ancho separadas por una franja central también de 90 centímetros en piedra pegada. Cuando un camión o un bus recorre la vía sin visualizar un vehículo que viaje en sentido contrario, el camión o el bus tendría que salirse de la placa-huella para acercarse al bordillo de la berma-cuneta. Esta maniobra implica que sus ruedas derechas crucen la franja exterior de piedra pegada y se estacionen sobre la berma-cuneta, siendo este el escenario indeseable, teniendo en cuenta que podría dañar la piedra pegada y cuneta



Vista en planta



Sección transversal

**Figura 6: Vista en planta y sección en un tramo recto. Fuente: (Instituto Nacional de vías, 2015)**

### **3 Capítulo – Metodología de losas optimizadas**

En este capítulo, se describe la metodología de diseño de losas optimizadas y las bases teóricas, ilustrando los parámetros de ingreso al programa OPTIPAVE; teniendo en cuenta que esta metodología es una invención Chilena, y por consiguiente la mayoría de los datos de diseño, se encuentran calibrados para esta región, es necesario realizar un análisis y adoptar parámetros que se encuentren acordes a las condiciones prevalecientes en Colombia, como lo son: Las características de suelo, clima, tráfico y materiales de suelo.

#### **3.1 Conceptos generales losas optimizadas**

Teniendo en cuenta que las losas optimizadas son un pavimento rígido, es indispensable tomar como base todos los análisis que se le generan a una losa de concreto. En general los pavimentos rígidos están conformados por losas de concreto simple o armado, que absorben casi la totalidad de los esfuerzos producidos por las repeticiones de carga del tránsito, lo cual hace que los esfuerzos proyectados a los materiales granulares (bases o subbases granulares) sean menores. Este tipo de pavimentos los hace más competitivos sobre los suelos de baja capacidad de soporte, debido a que las fuerzas que se transmiten desde la superficie se aplican en áreas mayores, con lo que las solicitudes que llegan a la subrasante son mucho más bajas.

Estos pavimentos ofrecen una alta resistencia al desgaste, por lo que en temperaturas altas no se presentan deformaciones (ahuellamientos).

Una de las grandes ventajas de los pavimentos de concreto, es que la normativa en Colombia permite una amplia gama de gravas y arenas, para lo cual se hace indispensable que cumpla con la granulometría (INVE-123-13), y el contenido de arcilla (INVE-124.13), de acuerdo con lo anterior se pueden utilizar materiales locales y ríos. Para su construcción, se puede utilizar mano de obra del sitio,

teniendo en cuenta que esta estructura se puede construir con medios muy sencillos, y equipos simples, esto permite la construcción de vías de difícil acceso.

Por otra parte, es importante analizar el comportamiento de un pavimento de hormigón, cuya función es soportar cargas debidas al tránsito, estas cargas producen esfuerzos que deben ser calculados para seleccionar el material y las dimensiones más apropiadas para la estructura.

Los deterioros más comunes sobre las placas de concreto son:

- Agrietamiento longitudinal
- Agrietamiento transversal
- Agrietamiento de esquina

Las causas de agrietamiento se pueden dividir en dos: Tensión por carga y alabeo

### **3.1.1 Tensión por carga**

Esta es causada por el tránsito, donde en el diseño de la AASHTO, se considera como optimo un largo de losa de 4.5 m (o dimensiones del ancho de carril), estas dimensiones hacen que el camión pise la losa en los bordes. Por lo que se puede afirmar que las tensiones por carga se encuentran en la junta longitudinal (borde de la losa con la berma), ó el paso de la rueda sobre la junta transversal (punto central o bajo la huella), estas tensiones son las que generar agrietamiento, teniendo en cuenta que el concreto no falla por compresión si no por tracción y en este caso por tracción inducida por flexión. De acuerdo con lo anterior, es necesario aplicar las hipótesis de Westergaard, para el cálculo del máximo esfuerzo y deflexión producida por un área circular en el borde, interior y esquina de la losa:

1. La losa de hormigón se considera como un sólido homogéneo, elástico e isótropo en equilibrio, partiendo de la teoría clásica de láminas delgadas de Love-Kirchhoff.
2. La reacción de la subrasante es solo vertical y proporcional a la deflexión de la losa, considerando el medio como infinitos soportes elásticos. La

resistencia de la subrasante se mide con k, al que Westergaard caracterizó como módulo de reacción de la subrasante, el cual es una medida de la rigidez del medio a partir de medir la fuerza que se aplica en un área por unidades de deflexión (presión/long<sup>3</sup>).

3. Se consideran tres posiciones de carga: carga en el interior, en la esquina, y en el borde, asumiendo la distribución de estas como uniforme sobre un área circular o semicircular de radio  $a$  llamada presión de contacto equivalente

$$\text{Interior: } \sigma_i = \frac{0.3162P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{l}{b} \right) + 1.069 \right] \text{ Esfuerzo de tension en el fondo de la losa}$$

Ecuación 7

$$\text{Borde: } \sigma_b = \frac{0.572P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{l}{b} \right) + 0.359 \right] \text{ Esfuerzo de tension en el fondo de la losa}$$

Ecuación 8

$$\text{Esquina: } \sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \text{ Esfuerzo de tension en la parte superior de la losa}$$

Ecuación 9

Donde:

$\sigma_i, \sigma_b, \sigma_e$  = esfuerzos maximos en las localizacion respectivas

P = Carga por rueda

h = Espesor losa

a = Radio del area cargada

l = Radio de rigidez relativa

b = Radio de la seccion resistente

La presencia del termino  $h^2$  en el denominador de las 3 formulas, sugiere que el espesor de la losa es critico en la reduccion de esfuerzos.

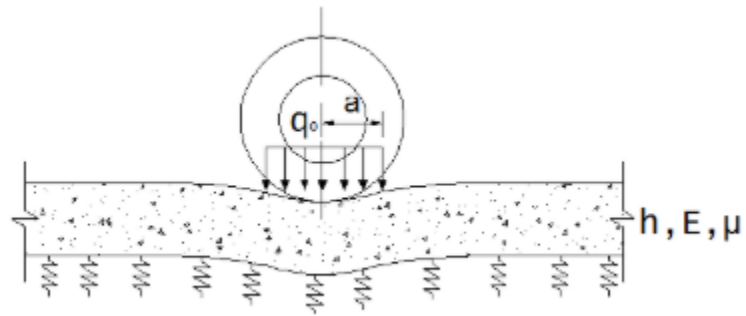


Figura 7: Esquema del modelo Westergaard

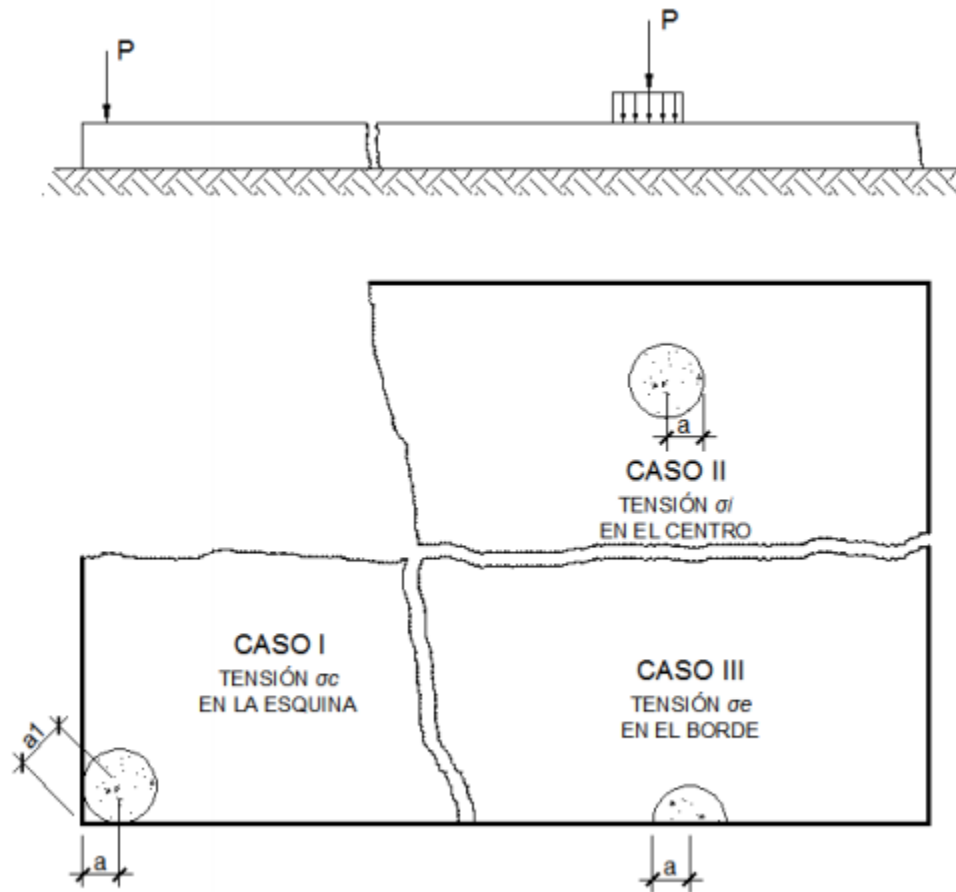
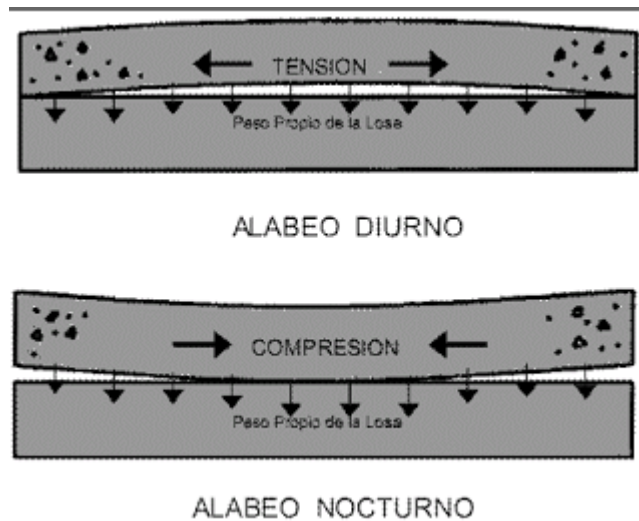


Figura 8: Posición de carga para las ecuaciones de Westergaard

La segunda es la tensión por alabeo causada por la temperatura, el cual es una suma de efectos, alabeo por construcción el cual se puede dividir en dos, uno por gradiente térmico y otro por gradiente hídrico.

### 3.1.2 Alabeo

El alabeo es una distorsión o deformación que sufre una losa tomando una forma curvada hacia arriba o hacia abajo, encorvando sus bordes, esto se ocasiona por las diferencias del contenido de humedad y temperatura entre la parte superior e inferior de la losa. El ciclo térmico crea un gradiente en la losa, lo que origina que en un día caluroso, la superficie del pavimento tenga mayor temperatura que su apoyo, obligando a las losas a levantarse en el centro y a apoyarse en los extremos, mientras que en la noche, este fenómeno se invierte, y ocasiona que la losa se apoye en el centro, mientras las esquinas se levantan, dando lugar a un borde o equina sin apoyo que puede agrietarse cuando se aplican cargas pesadas



**Figura 9: Alabeo**

Teniendo en cuenta, que en una losa de concreto convencional, los ejes delanteros y traseros cargan la losa cerca de las juntas transversales simultáneamente, y al tener tensiones de alabeo, estas cargas inducen a tensiones de tracción en la parte



superior del pavimento, lo que origina grietas de esquina. Pero si las secciones de las losas se recortan de tal forma que solo un set de llantas la cargue, estas tensiones se reducen drásticamente (Covarrubias, 2012).

De acuerdo con lo anterior, la metodología de losas optimizadas permite que solo un set de llantas cargue la losa, disminuyendo de esta forma las tensiones de tracción superior causadas por la carga simultánea, como se presenta a continuación en el siguiente gráfico.



**Figura 10: Comparación en planta de las losas tradicionales respecto de la losa optimizada. Fuente: (Mauricio Salgado Torres, 2014)**



**Figura 11: Comparación en perfil de las losas tradicionales respecto de la losa corta. Fuente:(Mauricio Salgado Torres, 2014)**

El ingeniero Juan Pablo Covarrubias, construyó un modelo de tensiones mediante el programa ISLAB2000, donde se muestra los beneficios de reducir las

dimensiones de las losas respecto a las tensiones, donde se observa que, al tener una rueda por losa, se produce una disminución de tensiones, siendo las dimensiones más óptimas entre 1.7 m y 2.5m, donde se presentan tensiones inferiores a 15 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que para losas de dimensiones mayores a 3 m se presenta un aumento en las tensiones, llegando a casi 25 kg/cm<sup>2</sup>. De acuerdo con esta gráfica, se puede afirmar que, al reducir las dimensiones de las losas, las tensiones se reducen a la mitad.



**Figura 12: Comparación en perfil de las losas tradicionales respecto de la losa corta. Fuente:(Mauricio Salgado Torres, 2014)**

Al permitir que solo un set de llantas cargue la losa, se reducen drásticamente las tensiones superiores de la losa, las cuales son la carga crítica aplicada sobre la esquina de la losa, es por esto que se puede afirmar que las tensiones dentro de la losa determinan la vida útil del pavimento, esto produce un menor agrietamiento de las losas y una mayor tolerancia a la carga por eje del camión.

### 3.2 Bases teóricas losas optimizadas

El Ingeniero Juan Pablo Covarrubias T. (JPCT), ha desarrollado una nueva metodología para diseñar pavimentos de hormigón, donde propone reemplazar las losas de pavimentación tradicional (AASHTO-PCA) por un sistema de losas con geometría optimizada que permiten una distribución más eficiente de la carga para evitar los problemas de agrietamiento. Normalmente las dimensiones de las losas

son de 3,5 m de ancho por 4 m de largo, lo que implica que gran parte de la carga de un vehículo se concentre en ella generando tensión, lo cual se evita con la metodología de losas optimizadas, donde no se admiten más de un set de ruedas de camión a la vez, y se reduce el espesor de losas optimizando el tamaño de estas, dada la geometría de los ejes de los camiones. Considera que no existe adherencia entre la base, o pavimento antiguo y la losa de hormigón.

El Ingeniero Juan Pablo Covarrubias T, realizó la investigación de optimizar la geometría de las losas en la Universidad de Illinois, donde, uno de los objetivos era desarrollar una relación entre el espesor de pavimento rígido y el número de repeticiones de carga por eje de diversa magnitud y arreglo, para comprobar dicho objetivo, se realizó un tramo de prueba en la universidad de Illinois, en el cual se cuenta con un laboratorio avanzado de ingeniería e investigación en transporte, que cumple con todos los requerimientos AASHTO. La prueba de carreteras AASHTO es una de las pruebas de pavimento a escala real más influyente (Huang, 2004).

El análisis se realizó mediante la estimación de esfuerzos y deformaciones máximas admisibles en una estructura de pavimento de concreto, de esta manera, para este caso se utilizó el programa de elementos finitos denominado ISLAB 2000, software que también fue empleado para el cálculo del diseño MEPDG 2008.

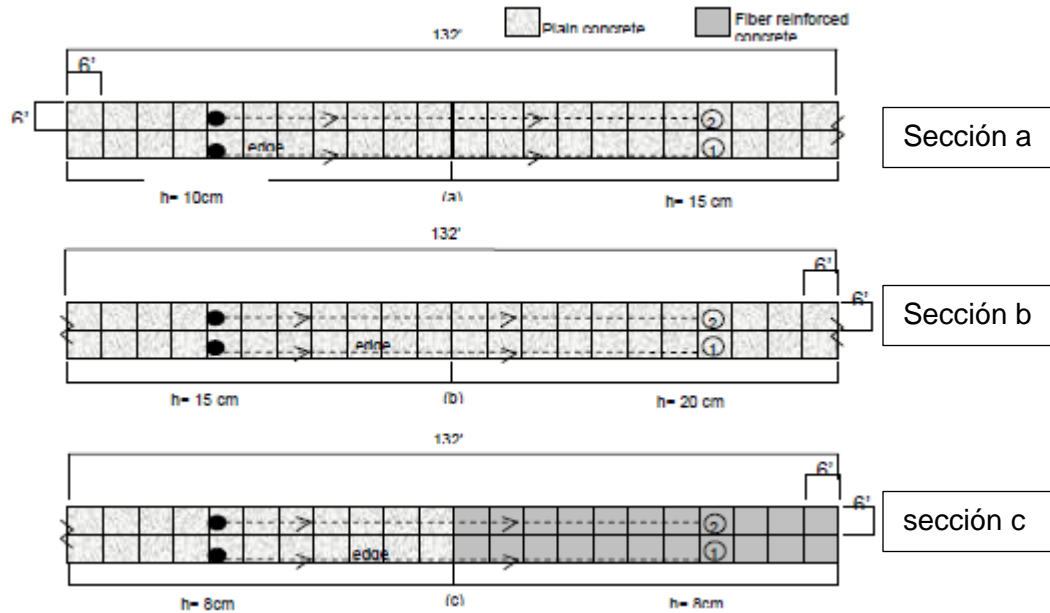
Durante la investigación de optimización de las dimensiones de la losa, se demostró que, al reducir las dimensiones de las losas, los esfuerzos en el pavimento se ven reducidos, donde dichos esfuerzos son una función de las condiciones ambientales y de carga. La prueba realizada en la universidad de Illinois, indicó que los esfuerzos disminuyeron modificando el tamaño de la losa, desde el más común 3.60 x 3.60 m, hasta aproximadamente 1.80 x1.80 m.

Se construyeron varios tramos de pruebas a gran escala, los cuales fueron probados bajo cargas aceleradas con espesores de concreto que variaban entre 8, 15 y 20 cm, algunos de estos tramos estaban cimentados sobre una base granular y otras sobre capas asfálticas sin adherir. Se realizaron tres secciones de prueba de 40 m de longitud cada uno durante el verano de 2007, para poner a prueba los efectos de espesor, rigidez de la base y el diseño de la mezcla de concreto.



**Figura 13: Accelerated Pavement testing section Fuente : (Cervantes & Roesler, 2009)**

En la Figura 14 se presenta la sección ensayada, la cual se compone de un total de 28 losas de dimensiones 1.82m x 1.82 m. Cada sección de prueba tiene dos unidades, cada una de 7 losas:



**Figura 14: Secciones para la prueba acelerada. Fuente:(Cervantes & Roesler, 2009)**

Las primeras 7 losas de la sección (a), tienen una estructura de 10 cm de concreto sobre una capa de asfalto de 21.5 cm. La segunda parte está compuesta de 15 cm de concreto sobre una capa de asfalto de 14 cm.

La sección (b), las losas están cimentadas sobre una base granular de 15 cm junto a un geotextil de separación, la variación está en el espesor de la losa de concreto (15 cm y 20 cm respectivamente)

La sección (c) compara dos secciones, la primera está constituida por una losa de concreto 8 cm, la segunda tiene un espesor de losa de 8 cm reforzado con fibra estructural, las dos secciones están sobre una base granular de 15 cm con un geotextil de separación.

Para asegurar un drenaje adecuado, la prueba de las secciones 2 y 3 tenía una pendiente transversal de 0.5% de sur a norte. Las longitudes de las secciones están de acuerdo con el dispositivo de ensayo acelerado llamado ATLAS (Accelerated Transportation Loading Assemble). El ATLAS es una “máquina de pista” en escala real (Wheel Tracker) que sirve para simular el efecto que tiene las cargas de los vehículos sobre los pavimentos; este equipo tiene 38 metros de largo, y puede ensayar una sección de 26 metros de largo por 20 metros de ancho a una velocidad constante. Es importante resaltar que las losas ensayadas no contaban con barras de transferencia de carga ni dovelas y las juntas no tenían sello (Cervantes & Roesler, 2009).

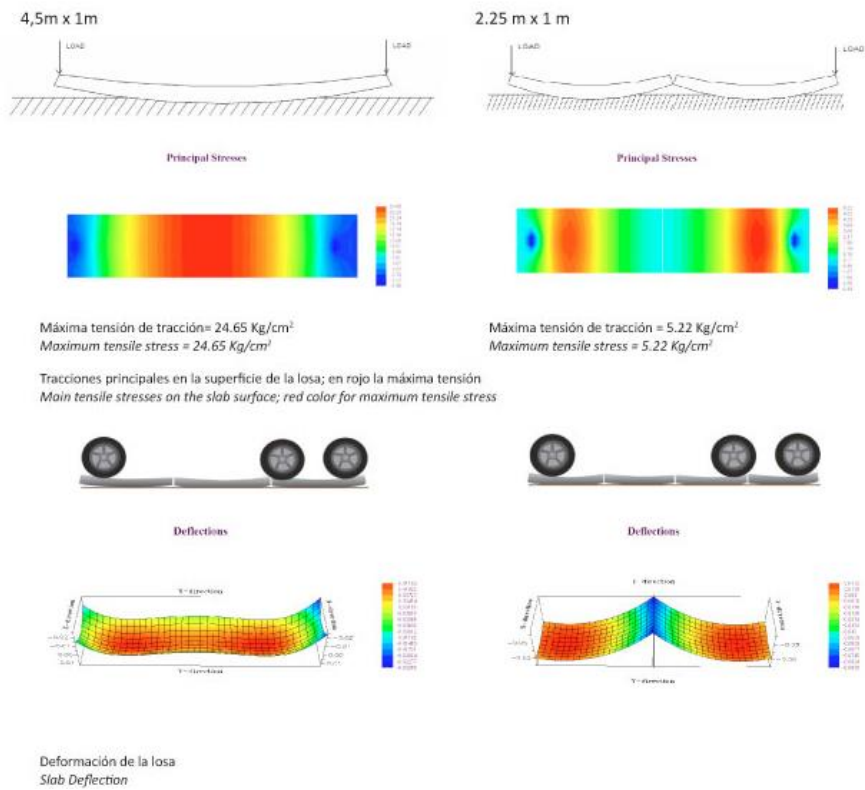


**Figura 15: Accelerated Transportation Loading Assemble.**

**Fuente :(Cervantes & Roesler, 2009)**

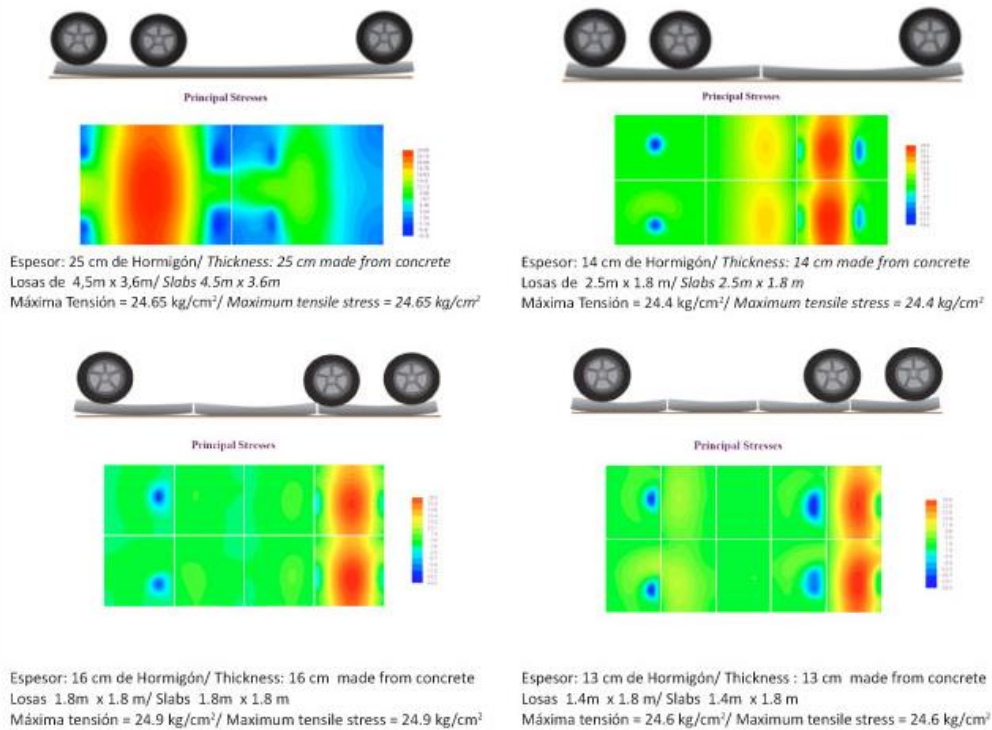
Estas pruebas demostraron que al disminuir las dimensiones de la losa y pese a que se tenía un bajo espesor, soportaron una cantidad considerable de ejes equivalentes antes de comenzar a agrietarse. Las losas de concreto con un espesor de 20 cm sobre bases granulares no mostraron agrietamiento a pesar de haber sido ensayadas a más de 50 millones de EE. Losas de 15 cm de espesor mostraron grietas a los 12 millones de ejes equivalentes en promedio, mientras que las losas de 8 cm de espesor resistieron 75.000 ejes equivalentes antes de las primeras grietas. Además, las pruebas realizadas demostraron que las losas de hormigón con fibra estructural pueden soportar hasta 20 veces más tráfico antes de comenzar a agrietarse, así como proporcionar una vida útil más larga una vez agrietadas (Covarrubias, 2012).

Los Ingenieros Covarrubia T y Andahur D. utilizaron el programa de diseño de elementos finitos ISLAB2000 para construir un modelo de tensiones que muestre el beneficio de reducir las dimensiones y el espesor de la losa. Para reducir la tensión de tracción superior causada por la carga simultánea de la losa por las ruedas de los ejes, es necesario dimensionar la losa de tal forma que solo un set de llantas la cargue. Como existen diferentes tipos de configuraciones de ejes de camiones, la geometría está diseñada para el tipo de camión que tenga el eje más crítico en la utilización de la carretera (camión C3). La reducción de los esfuerzos de tracción en la parte superior de la losa permite una vida útil más larga y una reducción en el espesor de la losa en relación con el diseño de pavimentos de hormigón convencional. Para la configuración de tensiones, se utilizó los siguientes parámetros, 55 MPa/m para el valor de módulo de reacción de la subrasante (k), un diferencial de temperatura de  $-14^{\circ}\text{C}$  entre la parte inferior y superior de la losa, modulo del hormigón de 28.439 MPa, relación de Poisson de 0.25, y el coeficiente de expansión térmica de  $1 \times 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}$  (Covarrubias, 2012).



**Figura 16: Comparación de la tensión de tracción de una losa cargada mecánica y térmicamente entre una de 4,5m y 2.25m, de longitud, Fuente:(Covarrubias, 2012).**





**Figura 17: Comparación entre la dimensión y espesor de losas para tensiones máximas equivalentes en la superficie. Fuente: (Covarrubias, 2012).**

A partir de las investigaciones se ha desarrollado un software de diseño mecánico-empírico llamado OptiPave, que optimiza el diseño geométrico y el espesor de las losas de hormigón considerando las condiciones particulares de cada proyecto; ya sea clima, tráfico, suelo, y materiales. Las tensiones críticas han sido calculadas utilizando el análisis de elementos finitos, para diferentes condiciones de cargas mecánicas y solicitaciones térmicas en distintas posiciones. El agrietamiento de las losas se determina calculando la fatiga del hormigón y los modelos utilizados por la guía de diseño AASHTO del año 2007 y mediante calibración en secciones de prueba a gran escala.

La nueva metodología diseña losas de hormigón que en promedio son 7 cm más delgadas para vías de alto tráfico en relación con el diseño tradicional de pavimentos AASHTO (1993). El método también permite diseñar de manera eficiente



pavimentos de hormigón para vías de menor volumen de tráfico que no son cubiertos con los actuales métodos de diseño de pavimento (Covarrubias, 2012).

El método creado por la empresa TCPavements es el resultado de años de estudios y pruebas, basado en las ecuaciones de daño por fatiga del proyecto NCHRP 1-37<sup>a</sup> (ME-PDG, AASHTO, EEUU) y con simulaciones de tensiones realizadas en ISLAB2000 (programa de elementos finitos). Este método logra diseñar pavimentos de losas optimizadas, obteniendo resultados óptimos, para esta nueva condición geométrica. El método incluye verificación para las condiciones del escalonamiento de las juntas transversales sin barras de traspaso de cargas y del agrietamiento de esquina. (Covarrubias, 2011).

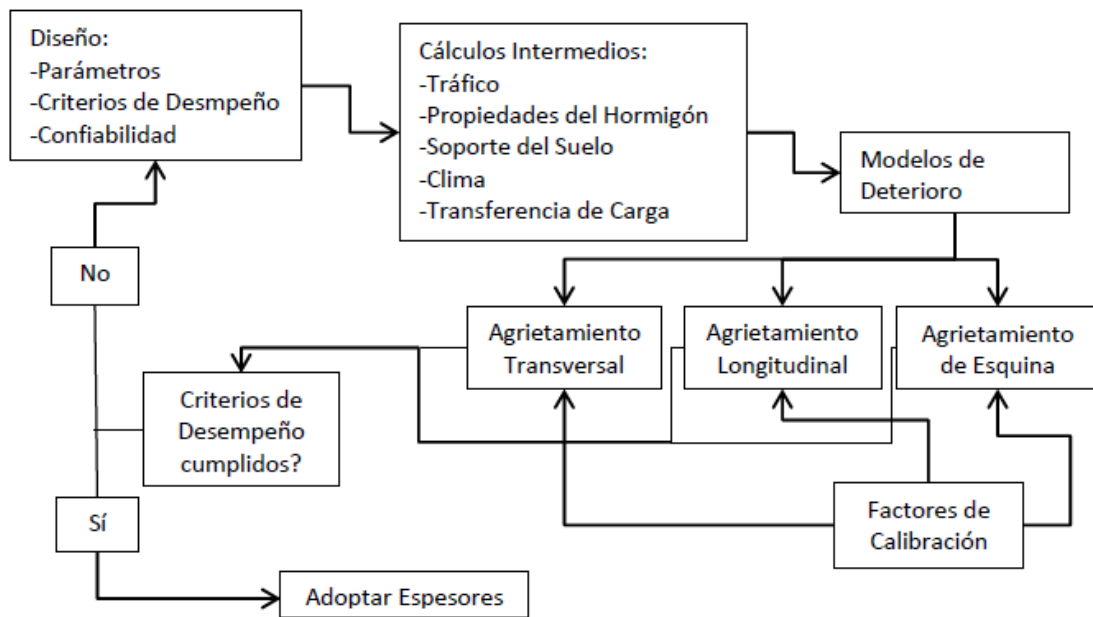
### **3.2.1 Mecanismos de falla**

Para el cálculo del espesor de la losa, el Software Optipave 2, programa de diseño de losas con geometría optimizada, considera los siguientes mecanismos de falla:

1. Agrietamiento transversal en el tercio central de la losa: Grieta que ocurre en el tercio central de una losa, producto de la fatiga que presenta el material.
2. Agrietamiento longitudinal: El agrietamiento longitudinal ocurre por tensiones en la fibra inferior de la losa, y se desarrolla en sentido longitudinal atravesando todo el largo de la losa. La ubicación con respecto al borde en donde se origina la falla depende de varios factores entre los que se encuentran: el ancho de la losa, la magnitud del alabeo de la losa, la configuración del paso de los vehículos (distancia con respecto al borde por el que pasan los vehículos), entre otros.
3. Agrietamiento en la Esquina: El agrietamiento de esquina ocurre en la fibra superior de la losa, cuya ubicación depende de varios factores. Este se evalúa en diferentes puntos ya que el origen de la falla no siempre ocurre en la misma ubicación. Debido a la importancia del eje tándem en el origen de este tipo de falla, es que se consideró el efecto de ejes simple y el efecto de ejes tándem.
4. Escalonamiento: El escalonamiento en la junta transversal es una diferencia de altura entre dos losas debido al movimiento del material de la base.

- Rugosidad (IRI): La rugosidad que tiene un pavimento es fundamental a la hora de evaluar el confort que siente un usuario al transitar por un pavimento. El parámetro más utilizado universalmente para medir el nivel de confort que siente un usuario es el índice de rugosidad Internacional (IRI).

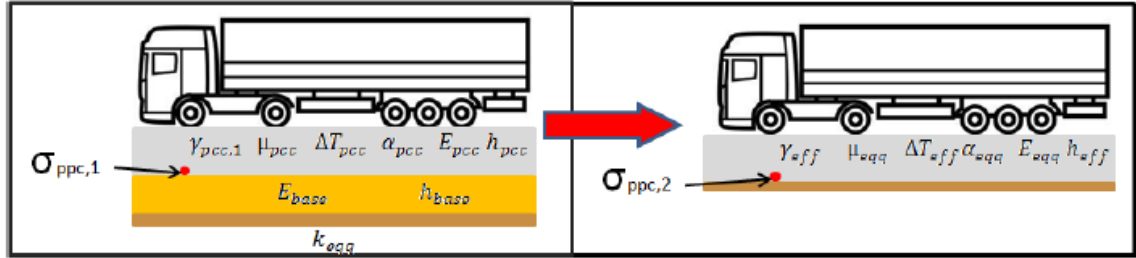
En la Figura 18 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta el diagrama de flujo del método de diseño Optipave.



**Figura 18: Diagrama de flujo losas optimizadas. Fuente: (Covarrubias, 2011)**

### 3.2.2 Estructura equivalente

Existe un número infinito de posibles combinaciones de variables de diseño, como tráfico, propiedades del hormigón, propiedades de los suelos y propiedades climáticas. La solución a esta problemática es el concepto de estructura equivalente ((Khazanovich, Lev &, 1994) (Khazanovich, 2001)) y el entrenamiento de redes neuronales. La metodología empleada se muestra a continuación:



**Figura 19: Equivalencia de un sistema de dos capas (Izquierda) en un sistema equivalente de una capa (derecha). Fuente: (Covarrubias, 2011)**

### 3.2.2.1 Radio de rigidez relativo

El radio de rigidez relativo (Westergaard, 1927) se obtiene de:

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_{pcc} \cdot h_{eff}^3}{12 \cdot (1 - \mu^3) \cdot k}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde

$l$  = Radio de rigidez relativo (cm)

$E_{pcc}$  = Modulo de elasticidad del hormigon ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$h_{eff}$  = Espesor efectivo (cm)

$\mu$  = Modulo de Poisson

$k$  = Modulo de reacción de la subrasante ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )

### 3.2.2.2 Gradiente de temperatura

Según (Korenev, B. G., and Chernigovskaya, 1962) el gradiente de temperatura adimensional de Korenev se obtiene de la siguiente fórmula:

$$\emptyset = \frac{2\alpha_{pcc}(1+\mu_{pcc})l^2k}{h_{eff}^2\gamma_{eff}} \Delta T_{eff} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$\emptyset$  = gradiente de temperatura adimensional de Korenev

$\alpha_{pcc}$  = Coeficiente de dilatación térmico (mm/mm/°C)

$\mu_{pcc}$  = Modulo de poisson del concreto

$l$  = Radio de rigidez relativo (mm)

$k$  = Modulo de reacción de la subrasante (MPa/mm)

$h_{eff}$  = Espesor efectivo (mm)

$\gamma_{eff}$  = Peso específico efectivo (N/mm<sup>3</sup>)

$\Delta T_{eff}$  = Diferencial de temperatura efectivo entre la parte inferior y superior de la losa (°C)

### 3.2.3 Cálculo de tensiones

Con el fin generar una base de datos de tensiones y deformaciones para los modelos de agrietamiento, escalonamiento y pérdida de transferencia de carga, se utilizan 6 diferentes combinaciones de geometría de losa utilizando 3 largos de losas:

- 1,4 m
- 1,8 m
- 2,3 m

Y 2 anchos diferentes:

- 1,8 m
- 2,1 m

#### 3.2.3.1 Configuración de los ejes

Se consideran los siguientes tipos de ejes y cargas:

- Tipo de eje: Eje Simple Rueda Doble y Eje Doble Rueda Doble
- Intervalos de Carga: 0, 3.000, 6.000, 12.000, 16.000, 25000 y 40.000 Kg

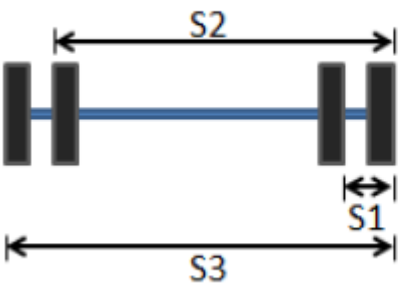
Tipo de Eje: Eje Simple Rueda Doble		
	Parámetro	
	S1	31 cm
	S2	182 cm
	S3	213 cm
	Presión Neumáticos	8,2 Kg/cm <sup>2</sup>
	Ancho Neumático	25 cm

Figura 20. Configuración de eje simple. Fuente: (Covarrubias, 2011)

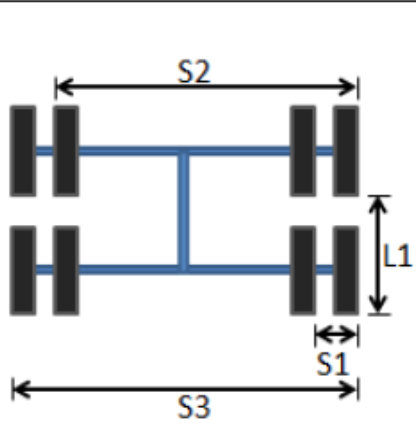
Tipo de Eje: Eje Doble Rueda Doble		
	Parámetro	
	S1	31 cm
	S2	182 cm
	S3	213 cm
	L1	145 cm
	Presión Neumáticos	8,2 Kg/cm <sup>2</sup>
	Ancho Neumático	25 m

Figura 21. Configuración del eje doble. Fuente: (Covarrubias, 2011)

### 3.2.3.2 Transferencia de carga

La transferencia de carga en una junta es de vital importancia en un pavimento de concreto ya que, a mayor valor de esta, la carga se distribuye en una mayor área con las losas vecinas. La transferencia de carga del pavimento proviene de la trabazón mecánica entre los agregados bajo la junta aserrada, en el caso de que el pavimento tenga barras de transferencia de carga estas aportan a generar traspaso de carga. Aprovechando que la distancia de los cortes de inducción de juntas es menor, se produce un menor ancho de las grietas inducidas y por ende una mayor

transferencia de carga. En el programa de elementos finitos se modelaron las siguientes transferencias de carga:

1. Borde: Se consideran tres transferencias de carga diferentes según el tipo de borde.
  - 0% (Borde Libre, Vereda)
  - 5% (Berma Granular/ Asfáltica)
  - 25% (Berma de Hormigón)
2. Junta Transversal:
  - Agrietamiento Transversal: Se evalúa únicamente 50% de transferencia de carga en la junta transversal, ya que el efecto es prácticamente nulo.
  - Agrietamiento Longitudinal y de Esquina: La transferencia de carga en la junta transversal se obtiene por medio del modelo de transferencia de carga. Debido a que la transferencia de carga varía según las condiciones climáticas en que se encuentre la losa, se utiliza una tasa de crecimiento en invierno y otra en verano.
3. Junta longitudinal: Se considera una transferencia de carga de 50% en la junta longitudinal, ya que su efecto es prácticamente nulo en magnitud de las tensiones generadas

### 3.2.4 Algoritmo de fatiga

El modelo de agrietamiento se basa en la suma de daño por fatiga (FD), a través de la relación mostrada en la ecuación 12:

$$CRK = \frac{1}{1+FD^{-1.68}} \quad \text{Ecuación 12}$$

El daño por fatiga en tanto se obtiene por el cociente entre el número de pasadas reales de una cierta carga dividido por el número de pasadas admisibles:

$$FD = \sum \frac{n_{i,j,k,l}}{N_{i,j,k,l}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

FD = Daño por fatiga total

$n_{i,j,k,l}$  = Numero de repeticiones de carga aplicadas para la condición

$i, j, k, l, m, n$

$N_{i,j,k,l}$  = Numero de repeticiones admisibles para la condición  $i, j, k, l, m, n$

$i$  = Tipo de eje

$j$  = Nivel de carga

$k$  = Diferencial de Temperatura

$l$  = Posición del eje

Para el cálculo de losas agrietadas al final con un 50% de confiabilidad, se obtiene con la Ecuación 14:

$$CRK_{50} = CRK_E + CRK_L - CRK_T - CRK_E * CRK_L - CRK_E * CRK_T - CRK_L * CRK_T + 2 * CRK_E * CRK_L * CRK_T$$

Ecuación 14

Donde

$CRK_{50}$  = % losas agrietadas totales, 50 % de confiabilidad

$CRK_E$  = % losas agrietadas en esquina

$CRK_L$  = % losas agrietadas longitudinales

$CRK_T$  = % losas agrietadas transversales

### **3.2.4.1 Modelo de Distribución del Tráfico para agrietamiento Transversal y de Esquina**

Los esfuerzos causados por la carga de tráfico en una losa de pavimento de hormigón dependen de la ubicación de la carga, entre otros factores. Si la carga se realiza en el interior de la losa, lejos de las esquinas, el nivel de tensión es generalmente bajo. Por lo tanto, las soluciones analíticas se han desarrollado para cargas aplicadas en las esquinas, bordes, y en el interior de las losas de pavimento de hormigón

El modelo de distribución de tráfico para agrietamiento transversal y de esquina considera cinco posiciones.

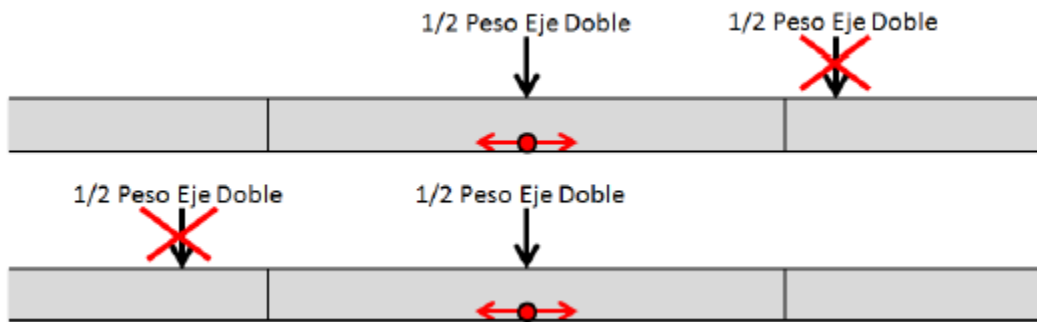
- 0 cm del borde
- 5 cm del borde
- 10 cm del borde
- 20 cm del borde
- A 60 cm del borde (borde libre o con berma) 70 cm (solera de borde) y 75 cm (Sobrealcance)

**Agrietamiento transversal:** El eje simple se modela en la posición crítica que es al centro de la losa, con el total del peso del eje como se muestra a continuación:



**Figura 22. Ubicación del eje simple en el cálculo de agrietamiento transversal. Fuente: (Covarrubias, 2011)**

La tensión crítica provocada por el eje doble se calcula ubicando la mitad de la carga en el centro de la losa y despreciando la segunda carga. Esta simulación se repite una vez en cada eje doble como se muestra a continuación:

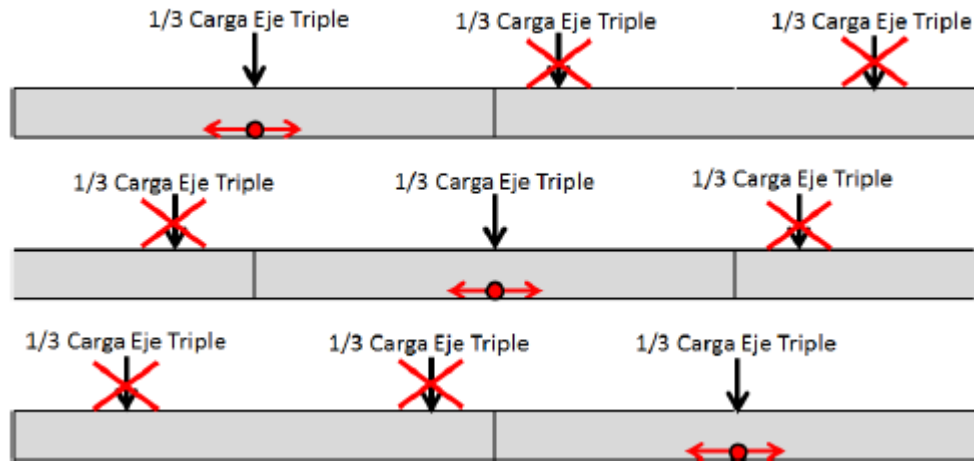


**Figura 23. Simplificación del eje doble en el cálculo de agrietamiento transversal. Fuente: (Covarrubias, 2011)**

La tensión crítica provocada por el eje triple es similar a la del eje doble, ubicando un tercio de la carga en el centro de la losa y despreciando las otras dos cargas.



Esta simulación se repite dos veces en cada eje triple como se muestra a continuación:



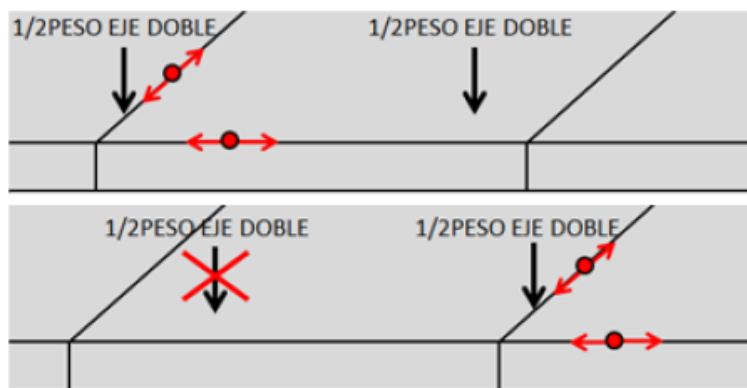
**Figura 24. Simplificación del eje triple en el cálculo de agrietamiento transversal. Fuente:(Covarrubias, 2011)**

**Agrietamiento de esquina:** Para ejes simples, la carga está situada en la junta transversal del pavimento, como se muestra en la siguiente imagen:



**Figura 25. Ubicación del Eje Simple para determinar el agrietamiento de esquina. Fuente: (Covarrubias, 2011)**

Para el eje doble, es necesario tener en cuenta la rueda delantera en la junta transversal y el eje trasero en la junta transversal, este último se considera como un eje simple.



**Figura 26. Simplificación del eje doble en el cálculo de agrietamiento de esquina. Fuente: (Covarrubias, 2011)**

### 3.2.5 Modelo de transferencia de carga

La transferencia de carga transversal se calcula con el modelo de transferencia de carga (Zoelhinger), dado por la  $cw = \text{Max} (L * \beta * (\alpha * (T_{constr} - T_{media}) + \epsilon_{conc})$   
Ecuación 15

$$cw = \text{Max} (L * \beta * (\alpha * (T_{constr} - T_{media}) + \epsilon_{conc}) \quad \text{Ecuación 15}$$

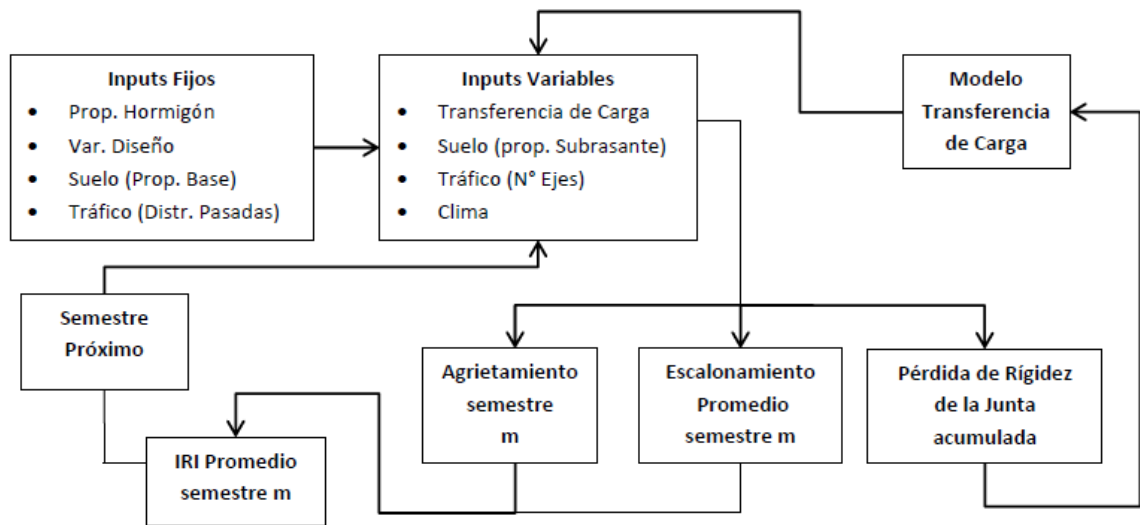
Dónde:

- cw: Ancho de grieta
- L: Espaciamiento de las juntas
- $\beta$ : coeficiente de fricción base-hormigón
- $\alpha$ : Coeficiente de dilatación térmico
- $T_{constr}$ : Temperatura de construcción del hormigón
- $T_{promedio}$ : Temperatura media
- $\epsilon_{conc}$ : Retracción hidráulica del concreto

Debido a que la apertura de las juntas es mayor en invierno que en verano, se calculó a partir de esta ecuación la apertura de las juntas en verano y en invierno, considerando una temperatura media de invierno y otra diferente durante el verano, por lo que se obtienen dos transferencias de carga diferentes según la estación.

### 3.2.6 Modelo de escalonamiento y transferencia de carga a través de diferencial de energía.

El modelo de escalonamiento usa modelos incrementales por semestre. El escalonamiento en cada semestre es la suma de escalonamiento del semestre anterior y el incremento del semestre analizado. Como se muestra en el siguiente esquema, el cálculo se realiza semestre a semestre, obteniéndose para un semestre  $m$ , agrietamiento, escalonamiento y una pérdida de rigidez de los agregados acumulada, el cual produce una pérdida en la transferencia de carga para el período siguiente. Finalmente se obtiene para cada semestre, el IRI promedio, que es función del agrietamiento y escalonamiento del pavimento.



**Figura 27. Diagrama de flujo del modelo de escalonamiento y transferencia de carga. Fuente: (Covarrubias, 2011)**

Las repeticiones de carga a las que están sometidos las juntas de los pavimentos generan un desgaste del árido. Este desgaste genera una pérdida de transferencia de carga. Este desgaste depende en gran medida de la apertura que tenga la junta ( $jw$ ).

$$\Delta S_i = 0$$

### 3.2.7 Modelo de IRI

El modelo de IRI fue calibrado y validado usando LTPP (FHWA 2009) y otros datos en terreno para asegurar que entrega resultados validos bajo cierta variedad de condiciones climáticas y de terreno. El modelo es:

$$IRI = IR_{II} + C1 CRK + C2 SPALL + C3 TFAULT + C4 SF \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde:

IRI = IRI predicho, pulg/milla

IR<sub>II</sub> = Rugosidad inicial, medido en términos de IRI, pulg/milla

CRK = Porcentaje de losas agrietadas

SPALL = Porcentaje de losas con Desconches

TFAULT = Escalonamiento promedio acumulado por milla, pulg.

SF = Factor de Sitio

C1 = 0,013

C2 = 0,007

C3 = 0,0008

C4 = 0,003

S F = AGE (1+0.5556 FI) (1+P200)/1,000,000

Con,

AGE = Edad Pavimento, años.

FI = Índice de Congelamiento, °F-días.

P<sub>200</sub> = Porcentaje de material fino (material que pasa malla N° 200).

## 3.3 Conceptos de diseño

### 3.3.1 Largo de la losa

El largo de una losa, que es el equivalente al espaciamiento existente entre una junta transversal y la siguiente, depende de la ubicación de construcción del pavimento y las técnicas, equipos y materiales utilizados durante la construcción. Si la pavimentación se realiza en un área propensa a alabeos de magnitudes altas, es

conveniente realizar juntas transversales menos espaciadas. El largo de la losa debe ser de entre 1,4 y 2,3 m y en caso de tener tráfico en más de una dirección (intersecciones o pavimentos industriales), se debe reducir a no más de 1,75m para evitar que más de un set de ruedas cargue la losa de forma diagonal. (Covarrubias, 2011).

### 3.3.2 Tipo de borde

El tipo de borde se refiere a la condición de borde del pavimento, lo cual tiene dos efectos, primero define el soporte lateral que entrega la berma al pavimento en términos de transferencia de carga y por otro lado aleja el tráfico del borde. Se definieron cuatro tipos de borde que se muestran en la Tabla 17

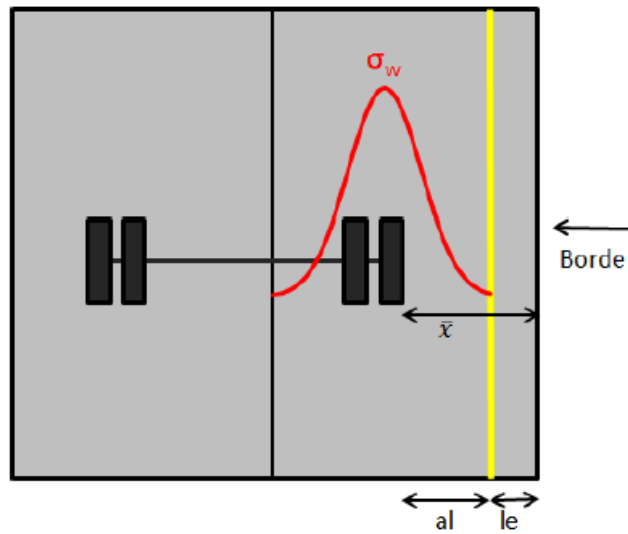
**Tabla 17: Tipos de Borde y su efecto en términos de soporte y circulación del tráfico**

Tipo de Borde	Soporte a la Estructura	¿Aleja el tráfico del Borde?
Borde Libre	Nulo	No
Berma Granular/ Asfáltica	Muy Leve	No
Berma de Hormigón	Leve	No
Vereda	Mediano	Sí

**Fuente: (Covarrubias, 2011).**

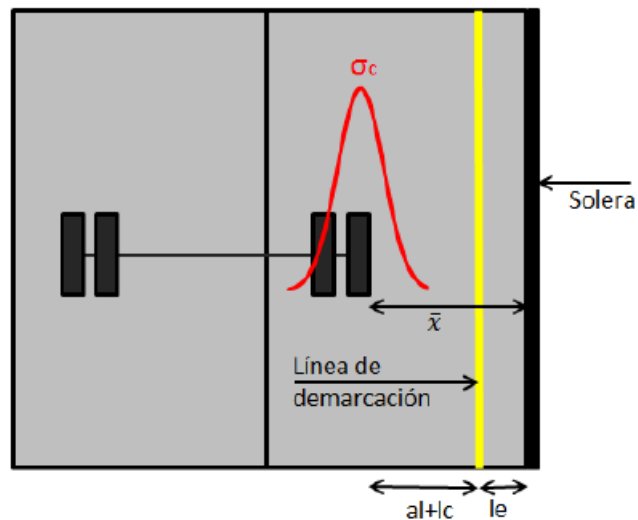
Como se mencionó en el capítulo 3.1.1 “Tensión por carga”, al considerar que el vehículo pasa por las esquinas de las losas, ocasiona tensiones que originan grietas y fisuras. Por lo tanto, cuando se aleja el tránsito de la losa exterior del pavimento, mejora notablemente el desempeño de esta ya que aumenta la distancia entre la línea de demarcación externa con el borde del pavimento.

De acuerdo con lo anterior, el efecto que produce la ubicación con respecto al borde del pavimento es significativo, por lo tanto, es importante modelar el pavimento, con distintas posiciones de los vehículos, con respecto al borde del pavimento.



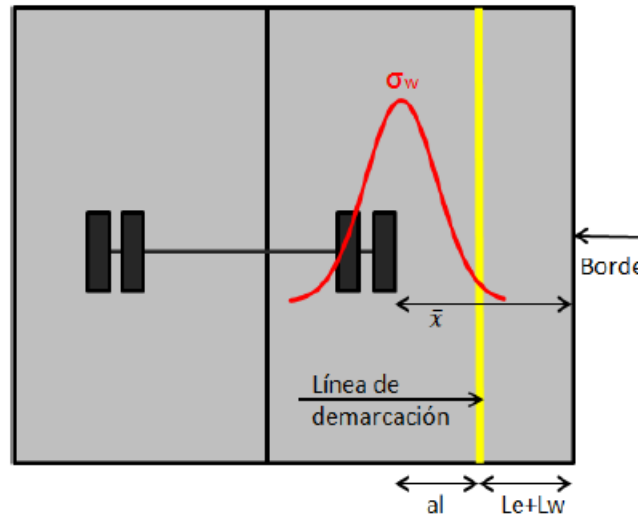
**Figura 28: Distribución lateral típica. Fuente: (Covarrubias, 2011).**

Al utilizar losas con sobreancho o soleras (bordillos) en el borde, aumenta de forma significativa la distancia en que los vehículos se desplazan con respecto al borde del pavimento, comparado a los otros tipos de borde. La solera aumenta la distancia entre la línea de demarcación del pavimento y la rueda exterior del vehículo ( $a+l_c$ ) y además disminuye la desviación estándar de la distribución del tráfico.



**Figura 29: Distribución lateral para un pavimento con solera o bordillo. Fuente: (Covarrubias, 2011).**

El efecto del sobreebancho en una losa es similar al de la solera, al aumentar la distancia media del borde. Esto ocurre debido a un aumento en la distancia entre el borde del pavimento y la línea de demarcación ( $L_e+L_w$ )



**Figura 30: Distribución lateral para un pavimento con sobreebancho.**  
**Fuente: (Covarrubias, 2011).**

### 3.3.3 IRI

La regularidad superficial, depende primordialmente del perfil longitudinal de la superficie de la carretera, pero también de las características mecánicas de los vehículos y de la velocidad de circulación de estos (Sanchez & de Solmniac, 1989). Este parámetro ha sido ampliamente usado para evaluar las condiciones superficiales de las carreteras, toda vez que la regularidad de la rodadura para la circulación vehicular ofrece condiciones de seguridad y comodidad para los usuarios de estas, reduce costos de mantenimiento de los vehículos, y contribuye a incrementar la vida útil de los pavimentos.

Tomando como base "The Little book of profiling by Michael Sayers & Steven Karamihas" donde se ilustra la escala de valores del IRI y las características, se observa en la Figura 31 que el valor máximo admisible para un pavimento nuevo es de 3 m/km, mientras que, para un pavimento antiguo, su valor máximo es de 5.5 m/km

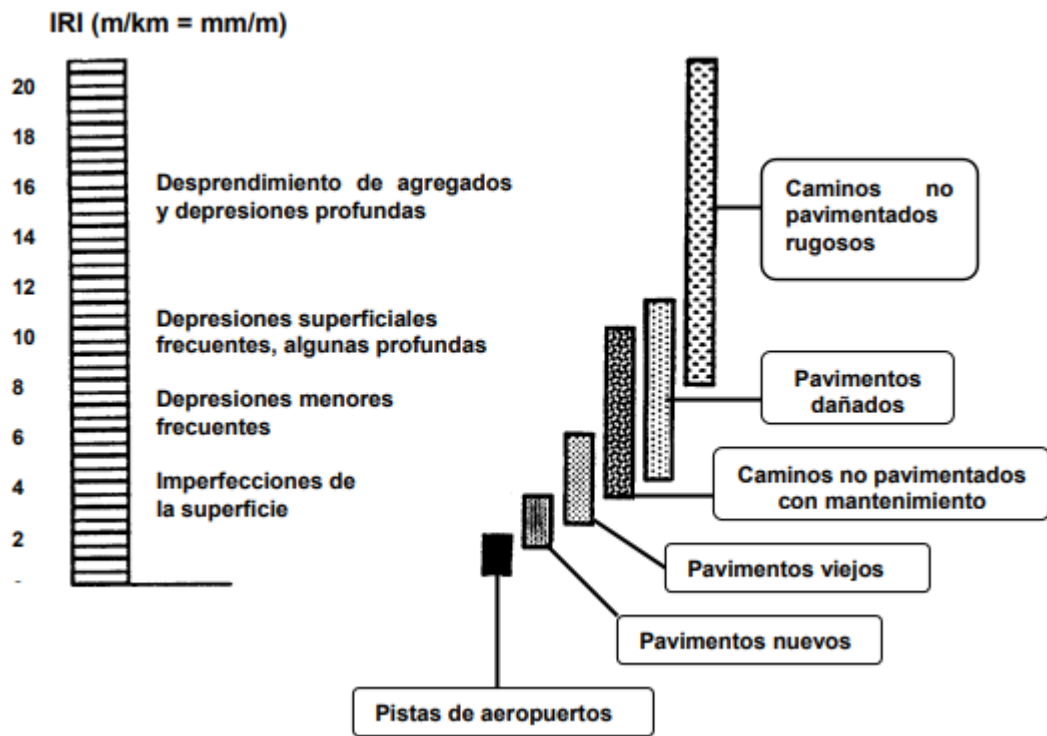


Figura 31: Escala del valor del IRI. Fuente: (Sanchez & de Solmniac, 1989)

Al realizar un análisis de los niveles permitidos a nivel global del IRI, la Federal Highway Administración ha reportado para los Estados Unidos, los rangos típicos del IRI evaluados en diferentes tramos de carreteras, los cuales están entre 0.8 a 4.7 m/Km. Donde se establece que los tramos de pavimentos con valores menores de 2.4 m/Km son considerados como superficies en buen estado y confortables, mientras que los valores mayores o iguales de 4.7 m/Km son considerados como rugosos y no confortables (Sanchez & de Solmniac, 1989)

En España, la Orden Circular 308/89C y E de 1989, tienen un valor de 2.5 m/Km como umbral para recibir una vía.

En Chile, se considera un valor del IRI entre 0 y 3 m/Km como una vía buena, entre 3 y 4 como uno regular y para un IRI mayor a 4 m/Km como un pavimento malo. Mientras que en Honduras su clasificación es la siguiente: para IRI < 3.5 m/Km se



considera el camino como bueno, entre 3.5 y 6 m/km como regular y finalmente cuando el IRI es mayor que 6m/Km. indica que el camino es malo.

En Uruguay hacen una diferencia de valores de IRI para pavimentos asfálticos y de concreto hidráulico que se presenta en la Tabla 18.

**Tabla 18: Escala del valor del IRI URUGUAY**

Condición del camino	Pavimento asfáltico IRI (m/km)	Pavimento hidráulico IRI (m/km)
Muy bueno	< 3.2	< 2.8
Bueno	3.2 – 3.9	2.8 – 3.5
Regular	4.0 – 4.6	3.6 – 4.3
Malo	> 4.6	>4.3

**Fuente: (Arriaga, Garnica, & Rico, 1998)**

Al realizar el análisis de los valores de IRI en Colombia de las concesiones de primera, segunda y tercera generación, se tienen los valores presentados en la Tabla 19.

**Tabla 19: Resumen valores IRI**

Elemento	Unidad de medida	Generación	Rango de calificación			
			Muy bueno	Bueno	Regular	Malo
IRI	m/Km	Primera	2 - 3.5	3.5 - 4.5	4.5 - 6.5	6.5 - 12
		Segunda	2 - 3.5	3.5 - 4.5	4.5 - 6.5	6.5 - 12
		Tercera	1 - 2.5	2.5 - 3.5	3.5 - 5.5	>5.5

**Fuente: Elaboración propia**

El valor de IRI inicial y final, es indispensable ya que uno de los mecanismos de falla de la metodología de losas optimizadas está asociada a la regularidad superficial.

### 3.3.4 Losas agrietadas

Es el umbral de daño aceptado, dado un nivel de confiabilidad que se espera tenga el pavimento al final de su vida de diseño. El nivel de daño máximo admisible depende de la importancia de la vía, de acuerdo con la metodología de losa optimizadas, como se muestra en la Tabla 20.

**Tabla 20 Valores recomendados de porcentaje máximo admisible de losas agrietadas según clasificación de la vía**

Clasificación de la Vía	Porcentaje Máximo Admisible de Losas Agrietadas
Rutas Locales y Calles	30%-50%
Calles Principales y vías de mediano tráfico < 15*10 <sup>6</sup> ESALS	10%-30%
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto Tráfico > 15*10 <sup>6</sup> EE	10%

**Fuente: TCPavements**

### **3.3.5 Confiabilidad**

El grado de confiabilidad del diseño se controla por el factor de confiabilidad (M) que es función de un valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal ( $Z_r$ ) y de la desviación normal del error combinado ( $S_e$ ) de todos los parámetros que intervienen en el comportamiento del pavimento.

La desviación normal del error combinado ( $S_e$ ), es la dispersión de resultados entre el daño por fatiga calculado y el daño medido real. Incluye las dispersiones inherentes a todos los factores que influyen en el comportamiento del pavimento, entre los cuales tienen una participación preponderante los errores que pudieran darse en la predicción del tránsito solicitante y el grado de variabilidad que presentan los suelos de la subrasante. Con el propósito de minimizar los trabajos de mantenimiento durante la vida de servicio de la obra, el nivel de confianza del diseño debe crecer en la medida que aumenta el tránsito. (Covarrubias, 2011).

Este método permite asignar diferentes niveles de confiabilidad según el tipo de deterioro y se divide en:

- Confiabilidad porcentaje de losas agrietadas
- Confiabilidad IRI final de diseño
- Confiabilidad escalonamiento final promedio

En la tabla Tabla 21, se presentan los valores recomendados según la clasificación de la vía.

**Tabla 21 Confiabilidad según la clasificación de la vía**

Clasificación de la Vía	Urbanas	Rurales
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto Tráfico	85%-97%	80%-95%
Calles Principales y Vías de Mediano Tráfico	80%-95%	75%-90%
Calles de Bajo Tráfico	75%-85%	70%-80%
Pasaje	50%-75%	50%-75%

**Fuente: TCPavements**

### **3.3.6 Transito**

El método requiere determinar y definir lo siguiente:

- Tránsito en Ejes Equivalentes: Las solicitudes que deberá soportar la estructura se expresan como ejes equivalentes (EE) acumulados durante el periodo de vida de diseño.
- Tránsito por Espectro de Carga: El valor se expresa como porcentaje de los ejes equivalentes generados por cada tipo de eje. Adoptando una tasa de crecimiento anual promedio del tráfico.

El programa requiere tener los parámetros de tránsito y tasa de crecimiento.

### **3.3.7 Suelo**

Al tener losas de concreto con espesores menores a 12 cm, se requiere que la base sea más rígida y que ayude con las cargas bajo las ruedas, que producen tensiones de punzonamiento. Por lo que para estos espesores menores a 12 cm la subbase debe tener una rigidez suficiente para tomar estas cargas con  $CBR > 50\%$  (Covarrubias, 2012).

Adicional a lo anterior, y teniendo en cuenta que la metodología recomienda no sellar las juntas, es necesario tener una subbase granular que sea menos susceptible al agua y que reduzca al mínimo la probabilidad de bombeo y por ende escalonamiento. Por lo que el material de base granular fino que pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  debe ser menor al 8%.

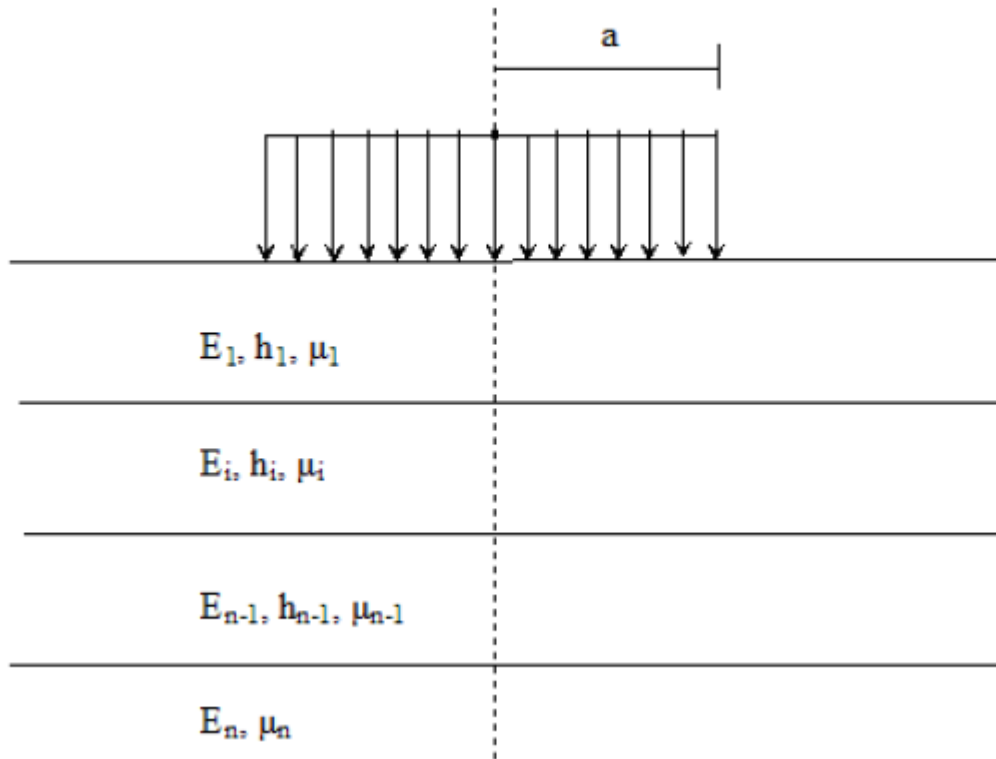
La metodología permite el ingreso de hasta 6 capas de material granular, caracterizadas por su módulo resiliente, relación de Poisson y espesor. Para la subrasante se debe ingresar el módulo durante el invierno y el programa lo calculara para verano de acuerdo con las temperaturas ingresadas.

### **3.3.8 Módulo de reacción de la subrasante**

El módulo de reacción de la subrasante,  $k$ (Mpa) es el parámetro que se utiliza para caracterizar la capacidad de soporte de la subrasante.

La metodología utiliza el cálculo del valor de  $k$  para un sistema multicapas, donde el módulo de reacción de este sistema se determina aplicando el método KSEM, el cual modela el ensayo de placa de carga.

Los datos de entrada son las características de los materiales y el espesor de cada capa (módulo de Elasticidad y relación de Poisson). El radio de carga circular es constante y equivalente al radio de la placa de carga. Es importante considerar que el método KSEM considera las características propias del material de cada capa, es decir, la relación de Poisson y los módulos de elasticidad, lo que genera un resultado del módulo de reacción estático.



**Figura 32: Esquema de un sistema multicapas. Fuente: (Covarrubias, 2011)**

Dónde:

- $E_i$  = Módulo de Elasticidad de la capa  $i$
- $h_i$  = Espesor de la capa  $i$
- $\mu_i$  = Relación de Poisson de la capa  $i$
- $a$  = Radio de la carga (38.1 cm)

El cálculo del módulo de reacción equivalente deriva de la deflexión en la superficie generada por una placa de carga rígida mediante la Ecuación 17 y Ecuación 18.

Para una Capa

$$k = \frac{1.273.E}{2(1-\mu^2)a} \quad \text{Ecuación 17}$$

Para dos o más capas:

$$k = \frac{0.0167087.E_n}{(1-\mu^2) \left[ \frac{(1-\frac{E_n}{E})}{\left[ 1 + \left( \frac{h_1+h_2+\dots+h_{n+1}}{38.1} \right)^2 \left( \frac{\hat{E}}{E_n} \right)^{2/3} \right]^{1/2}} + \frac{E_n}{E} \right]} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde

$$\hat{E} = E_1 \left[ \frac{h_1+h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right] \quad \text{Ecuación 19}$$

$\hat{E}$ = Modulo equivalente

$E_i$ = Modulo de elasticidad de la capa i

$h_i$  = Espesor de la capa i

$\mu$  = relación de poisson de la capa n

### 3.3.9 Propiedades del concreto

En estructuras que trabajan predominantemente a flexión, como lo es el caso de un pavimento de concreto, el diseño estructural está basado en la resistencia del concreto a tensión o flexión.

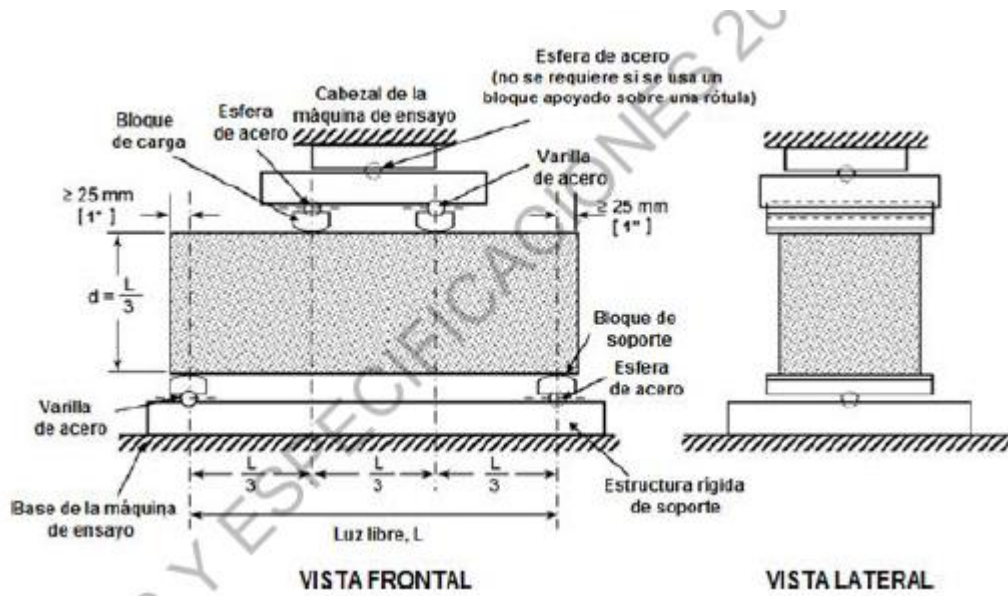
Actualmente, existen dos ensayos para determinar la resistencia del concreto a tensión por flexión; para los dos casos se utiliza la misma muestra, la cual es una viga de concreto de 6 x 6 pulgadas (150 x 150 mm) de sección transversal, y con una luz de mínimo tres veces el espesor. Esta resistencia se expresa como el módulo de rotura (MR) y se determina bajo las normas “resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios la luz libre” INV E-414-13 (ASTM C78) y “resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en el punto central” INV E-415-13 (ASTM C293).

Tomando como base las normas de resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada cargada a los tercios de luz libre INV E-414-13 y resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en el punto central INV E-415-13, para el ensayo de determinación del

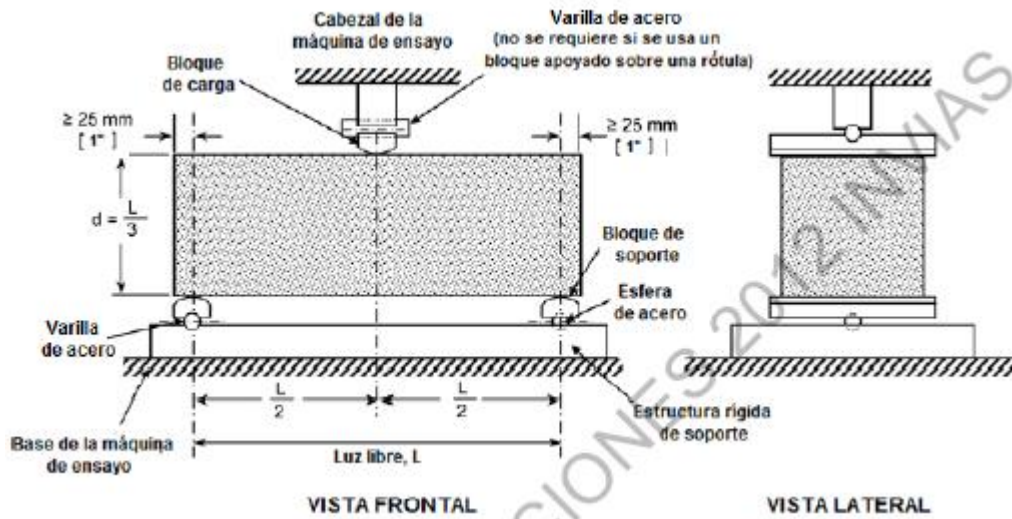
módulo de rotura, el espécimen debe cumplir con los requisitos de la norma que le sea aplicable entre las siguientes:

- Elaboración y curado del espécimen en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión INV E-402
- Obtención y ensayo de núcleos de concreto endurecido INV E-418
- Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto para ensayo INV E-420.

Además debe tener una luz libre entre apoyos igual a tres veces su altura; los lados deben formar ángulos rectos con las caras superior e inferior; todas las superficies deben ser lisas y libres de huellas, muescas, agujeros o inscripciones. (INVIAS, 2013)



**Figura 33. Ensayo de flexión del concreto usando una viga en los tercios de la luz libre. Fuente: INV E-415-13**



**Figura 34. Ensayo de flexión del concreto usando una viga carga en el centro de la luz. Fuente: INV E-414-13**

La resistencia del hormigón se evalúa a partir del ensayo de flexotracción a los 28 días. Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzada y se mide con base en el ensayo Resistencia a la flexión del concreto.

### 3.3.10 Clima

Teniendo en cuenta que el programa fue creado por Juan Pablo Covarrubias, de origen chileno, y que esta metodología ya se encuentra inmersa dentro del Ministerio de Obras Públicas (MOP) de Chile, el parámetro del clima dentro del software se encuentran las diferentes localidades del país. En caso de que ningún clima sea aplicable a la zona en que se construirá el pavimento y no se tenga información, se deberán utilizar los 4 climas genéricos:

- Húmedo- Heladizo
- Húmedo-no Heladizo
- Seco- Heladizo
- Seco-No Heladizo



Gradiente de construcción: El gradiente de construcción es una estimación del alabeo inicial que se produce en la losa debido a retracciones diferenciales entre la parte superior y la parte inferior de esta. Este gradiente se expresa como el gradiente térmico (°C) que existiría para tener la losa plana. El valor depende en gran parte de la época del año cuando se construye, y del clima de la zona. Debido a que no existe mucha información con respecto a este valor, se recomienda utilizar los siguientes, según la zona en que se construirá el pavimento (Covarrubias, 2011):

- Zonas Húmedas sin viento -5°C.
- Zonas Húmedas con viento y zonas secas sin viento -10°C
- Zonas Secas con viento y Altura -15° C
- Condiciones extremas de evaporación de agua -20°C

Es necesario tener las temperaturas medias de invierno y verano, las cuales correspondan a los 6 meses de mayor y menor temperatura. Adicional es necesario ingresar la cantidad de días con precipitación en el año.

El procedimiento es un método mecanicista - empírico, ya que ha sido calibrado con tramos de pruebas instrumentados, determinando las constantes de calibración

### **3.3.11 Consideraciones adicionales**

El modelo calcula las tensiones críticas que se producen en las losas del pavimento producto de la combinación de las cargas, efectos de temperatura y distintas condiciones de borde. Además, el método incluye la verificación para las condiciones del escalonamiento de las juntas transversales sin barras de traspaso de cargas y del agrietamiento de esquina.

El uso de losas de menores dimensiones y la consiguiente reducción del espesor, requiere modificaciones en el método de diseño para cumplir de forma satisfactoria la vida de servicio del pavimento. A continuación, se muestra una lista de modificaciones en las especificaciones técnicas que se deben llevar a cabo al utilizar este sistema:

1. Debido a un mayor número de juntas de contracción y por lo tanto un menor esfuerzo de contracción en estas, se recomienda el uso de sierras más delgadas de entre 2 y 2,5 mm, lo que permite omitir sellar la junta, al restringir el ingreso de material dañino para la junta.
2. Es necesario tener una base que tenga una cantidad limitada de material fino, lo que resulta en un muy bajo bombeo de finos y por lo tanto que el pavimento no sufra escalonamiento. Por lo que se recomienda para pavimentos de tráfico pesado, una base con menos de 8% de finos (Material que pasa la malla #200).
3. Para evitar la contaminación de la base con material fino, un geotextil debe ser colocado para que actúe como separador entre la base y el suelo de subrasante.
4. Juntas de contracción de menor ancho permiten una mayor transferencia de carga entre las losas, por lo que utilizar barras de transferencia de carga o barras de amarre no son parte del diseño estándar del sistema. Sin embargo, en juntas de construcción si son necesarias, ya sea en juntas transversales, en que aumentan la transferencia de carga en una junta fría o en juntas longitudinales en que se colocan barras de amarre para evitar la separación de las losas de hormigón. Con el mismo fin es que se hace necesario agregar pines laterales en el pavimento lo que evita movimientos laterales. Los pines pueden omitirse si se incorpora fibra estructural en el hormigón.

### **3.4 Datos de ingresos al Software Optipave**

A continuación, se presentan los valores adoptados para realizar las simulaciones de acuerdo con los parámetros de Colombia.

#### **3.4.1 Parámetros de diseño asociados al tipo de pavimento**

La capa de rodadura de una vía se evalúa por medio de diferentes características técnicas y funcionales, las cuales se obtienen a partir de criterios y especificaciones

de construcción. Es estado de una vía depende de la calidad inicial con que se le de en servicio y el deterioro que se va obteniendo a través del tiempo.

El periodo de diseño está definido como el periodo durante el cual está previsto, con un grado de confiabilidad, que no se requiera ningún mantenimiento estructural sobre la vía. Este periodo está comprendido desde el momento en que se entrega la vía, hasta que los deterioros producidos por el tránsito y el ambiente hacen que la vía pierda su funcionalidad. Teniendo en cuenta que por las vías de BVT se tendrá un tránsito inferior a 1'000.000 de ejes equivalentes, se considera un periodo de diseño de 20 años, siendo este equivalente a lo estipulado para el diseño de una placa huella, además de lo estipulado en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de transito del INVIAS.

Tomando como base lo indicado en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de transito del INVIAS, se considera un periodo de diseño de 20 años para todos los análisis, además de que el diseño de una placa huella es considerado a 20 años.

**Largo de losa:** El largo de losa es equivalente al espaciamiento existente entre una junta transversal y la siguiente, para los análisis siguientes y tomando las recomendaciones de la Guía de Diseño (Covarrubias, 2011), el largo de la losa será de 1.80m para evitar que más de un set de ruedas cargue la losa de forma diagonal.

**Tipo de Borde:** Tomando como base el diseño de placa huella, donde se contempla la construcción de cunetas y bordillo, para las modelaciones se adoptará bordillo como método de confinamiento lateral de las losas.

**IRI:** Para el parámetro de Índice de regularidad superficial, es necesario ingresar un valor de IRI inicial; el cual hace referencia al valor obtenido justo antes de la apertura de la vía, y un IRI final; el cual es el valor máximo admisible del pavimento, donde al superar este umbral, será necesario alguna intervención.

Actualmente no se tiene ningún umbral para las vías terciarias, pero al realizar el análisis de los valores presentados en el capítulo "3.1.2.6 IRI" de los diferentes umbrales que se tienen en otros países, y teniendo en cuenta los umbrales de las

concesiones de primera y segunda generación, donde se adopta un valor máximo para calificar la vía como muy bueno de 3 m/km, y un valor mínimo como regular de 4.5 m/km, para los análisis se adoptarán los siguientes valores:

IRI inicial: 3 m/km

IRI final: 4.5 m/Km

**Porcentaje de Losas Agrietadas:** Para el análisis, tomando como base que son vías de bajo volumen de tránsito, se adopta un valor de 50%

**Tabla 22 Valores recomendados de porcentaje máximo admisible de losas agrietadas según clasificación de la vía**

Clasificación de la Vía	Porcentaje Máximo Admisible de Losas Agrietadas
Rutas Locales y Calles	30%-50%
Calles Principales y vías de mediano tráfico < 15*10 <sup>6</sup> ESALS	10%-30%
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto Tráfico > 15*10 <sup>6</sup> EE	10%

Fuente: TCPavements

**Escalonamiento Promedio Final de Diseño:** Tomando como base el “Manual de inspección visual de pavimentos rígidos del INVIAS” el numeral 2.3.6 Escalonamiento de juntas longitudinales y transversales, donde se tiene en cuenta la diferencia de altura entre las placas adyacentes, los niveles de severidad se definen como: (INVIAS, 2006)

- Baja: Desnivel menor a 5 mm
- Media: Desnivel entre 5 mm y 10 mm
- Alta: Desnivel mayor a 10 mm

Para el análisis se adoptará un valor de Escalonamiento máximo admisible que deberá cumplir el pavimento de 8 mm.

**Tabla 23 Parámetros de diseño**

Parámetros de diseño del tipo de pavimento	
Vida de diseño	20 años
Largo de losa	1.80m
Tipo de borde	Bordillo
Umbrales Máximos admisibles de Diseño	
Porcentaje de losas Agrietadas	50%
IRI	4.5 m/Km
Escalonamiento promedio	8 mm

**Fuente: Elaboración del autor.**

**Confiabilidad:** Para el análisis, tomando como base que son vías rurales de bajo tráfico, se adopta una confiabilidad de 75%.

**Tabla 24 Confiabilidad según la clasificación de la vía**

Clasificación de la Vía	Urbanas	Rurales
Carreteras Interurbanas y Vías de Alto Tráfico	85%-97%	80%-95%
Calles Principales y Vías de Mediano Tráfico	80%-95%	75%-90%
Calles de Bajo Tráfico	75%-85%	70%-80%
Pasaje	50%-75%	50%-75%

**Fuente: TCPavements**

Proyecto	Diseño	Tráfico	Hormigón	Suelo	Clima	Resultados
Vida de Diseño	20					(años)
Largo de Losa	1,75					(m)
Espesor Losa	153,52					(mm)
	<input checked="" type="checkbox"/> Calcular Espesor					
Tipo de Borde	Solera					
Losa Exterior con Sobreancho	No					
Barras de Transferencia de Carga	No					
Interfaz Pavimento-Base	No Adherido					
IRI	3,5					(m/Km)
<b>Umbrales Máximos Admisibles de Diseño</b>				<b>Confiabilidad</b>		
Porcentaje de Losas Agrietadas	50 (%)			75 (%)		
IRI	4,5 (m/Km)			75 (%)		
Escalonamiento Promedio	8 (mm)			75 (%)		

**Figura 35: Datos ingresados de diseño. Fuente: Optipave**

### 3.4.2 Parámetros asociados al tránsito

Tomando en consideración que las vías son de bajo volumen de tránsito, se presentan modelaciones con los siguientes tránsitos en ejes equivalentes:

**Tabla 25 Tránsito ejes equivalentes**

Tránsito Ejes equivalentes
100.000
300.000
500.000
700.000

**Fuente: Elaboración del autor.**

Tasa de crecimiento: Tomando como base el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS”, donde se tienen valores de tasa de crecimiento según el análisis de series históricas del Instituto Nacional de Vías.

**Tabla 26 Tasas de crecimiento**

Nivel de tránsito	Numero de eje equivalentes de 80kN durante el periodo de diseño	Tasa de crecimiento
T1	< 150.000	2.0
T2	150.000 – 500.000	3.0

**Fuente: (Ministerio de transporte, Instituto Nacional de Vías, 2007)**

Teniendo en cuenta lo anterior se adoptará una tasa de crecimiento de 2% para el tránsito inferior a 150.000 ejes equivalentes y de 3% para el tránsito mayor a 150.000 ejes equivalentes.

Para la estimación del tránsito, es importante tener en cuenta los siguientes tres componentes:

- **Tránsito normal:** Es el que se produce en la zona de influencia del proyecto como consecuencia de la evolución previsible de sus parámetros característicos y coincide, por tanto, con el que circulará por la red si no se realizara el proyecto. Esta componente se determina a través del análisis de la serie histórica de tránsito, si esta existe, o de un conteo vehicular.
- **Tránsito atraído:** Es el que utilizará el proyecto, por las ventajas o beneficios que ofrece, y hoy hace uso de otra infraestructura. Esta componente se determina a través de encuestas de preferencia a usuarios y modelos de selección modal o de ruta.
- **Tránsito generado:** Es el que se origina por el proyecto mismo, debido a mejores condiciones de oferta. Generalmente se refiere al tránsito nuevo por efecto del desarrollo del área de influencia. Esta componente se determina a través del análisis socio-económico (Ministerio de transporte, Instituto Nacional de Vías, 2007).

**Clasificación del tipo de tráfico:** Se realiza de acuerdo con la clasificación de la Federal Highway Administration, la cual se presenta en la Tabla 27, en función del tipo de vehículos que transitan por el pavimento y que van en numeración desde 1

hasta 17. Tomando en cuenta que son vías con bajos volúmenes de tránsito, donde el predominio será de camiones de una unidad, el grupo a seleccionar es el número 14.

**Tabla 27 Clasificación Federal Highway Administration**

Porcentaje de Flujo de Buses	Tipo de Camiones		Grupo TTC
	Múltiples Remolques	Remolque Simple y de una unidad	
Nulo a Bajo (<2%)	Relativamente alto número de camiones con múltiples remolques (>10%)	Predominio de remolque simple	5
		Alto porcentaje de camiones de remolque simple, pero con algunos camiones de una unidad	8
		Tráfico de camiones mixto, con alto número de camiones con remolque simple	11
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	13
		Predominio de camiones de una unidad	15
	Número moderado de camiones con múltiples remolques (2 a 10%)	Predominio de remolque simple	3
		Tráfico de camiones mixto, con alto porcentaje de camiones con remolque simple	7
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual porcentaje de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	10
		Predominio de camiones de una unidad	15
Bajo a Moderado (entre 2 y 25%)	Bajo a Nulo (<2%)	Predominio de remolque simple	1
		Predominio de remolque simple con bajo número de camiones de una unidad	2
		Predominio de remolque simple con bajo a moderado número de camiones de una unidad	4
		Tráfico de camiones mixto, con mayor número de camiones con remolque simple	6
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	9
		Tráfico de camiones mixto, con mayor número de camiones de una unidad	12
		Predominio de camiones de una unidad	14
Ruta con alto tráfico de buses (>25%)	Bajo a Nulo (<2%)	Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	17

**Fuente: TCPavements**

**Distribución lateral del tránsito:** Es el efecto que produce la ubicación de la rueda respecto al borde del pavimento, teniendo en cuenta que, al utilizar losas con bordillo, aumenta de forma significativa la distancia en que los vehículos se desplazan con respecto al borde del pavimento, a continuación, se presentan los valores.



**Tabla 28 Valores por defecto de las distancias entre el borde, línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos**

Tipo de Borde	Distancia entre el borde y la línea de demarcación	Distancia entre la línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos	Distancia entre el borde y la rueda externa de demarcación
Borde Libre, Berma de Hormigón, berma granular/asfáltica	150 mm	450 mm	600 mm
Solera de Borde	150 mm	550 mm	700 mm
Losa con Sobreancho	300 mm	450 mm	750 mm


Tipo de Borde	Desviación Estándar por defecto de distar. Lateral de tráfico
Borde Libre, Berma de Hormigón, berma granular/asfáltica	250 mm
Solera de Borde	200 mm
Losa con Sobreancho	250 mm

**Fuente: TCPavements**

Teniendo en cuenta que se la vía se construirá con bordillo, de acuerdo con la recomendación de TCPavements se adopta un valor de 550 mm para la distancia entre la línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos, y un valor de 200 de desviación estándar.

A continuación, se presentan los valores a ingresar dentro del programa para el ítem de tránsito.

Proyecto	Diseño	Tráfico	Hormigón	Suelo	Clima	Resultados
Método de Análisis de Tráfico	Ejes Equivalentes					
Clasificación del Tipo de Tráfico	FHWA TTC 14 ?					
Tasa de Crecimiento Anual de Tráfico	3 (%)					
EE Totales en Pista de Diseño	300.000					
<b>Distribución Lateral del Tránsito</b>						
Distancia de la Huella a Línea de Demarcación	550 (mm)					
Desv. Estándar de la Distribución Lateral del Tráfico	200 (mm)					
<b>Espectro de Carga</b>						
TMDA Inicial (Ambos Sentidos) Solo Vehículos Relevantes	1.000					
Porcentaje de Tráfico en Dirección de Diseño	50 (%)					
Porcentaje de Tráfico en Pista de Diseño	90 (%)					
Porcentaje de Tráfico en Verano	50 (%)					



**Figura 36: Datos ingresados de tránsito. Fuente: Optiave**

### 3.4.3 Parámetros de concreto hidráulico

#### 3.4.3.1 Resistencia del concreto

Teniendo en cuenta que la construcción de las vías de BVT será con metodologías manuales, donde el acceso de concreto de alta resistencia no es fácil de adquirir, y según el Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito del INVIAS, el módulo de rotura más bajo es 3.8 Mpa.

**Tabla 29 Resistencia que debe alcanzar el concreto**

Calidad del Concreto	Número de camiones por día			
	> 300	150 - 300	25 - 150	< 25
Resistencia (MPa)	4,5	4,2	4,0	3,8

**Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2007)**

De acuerdo con la siguiente tabla se propone realizar las modelaciones variando el módulo entre:

**Tabla 30 Modulo de rotura del concreto**

Mr (MPa)
3.8
4.1
4.3

**Fuente: Elaboración del autor.**

### **3.4.3.2 Confiabilidad de la mezcla del hormigón**

Las losas de concreto deben soportar los esfuerzos de compresión, tracción por flexión y abrasión. En cuanto a la resistencia a la abrasión se ha encontrado que cuando el concreto ofrece una resistencia a la compresión del orden de 250 kg/cm<sup>2</sup>, no se presenta abrasión en la superficie del concreto bajo el tránsito de los vehículos pesados. (Instituto Nacional de Vias, 2007).

Como se mencionó anteriormente, se considera la resistencia a la flexión, medida a 28 días, evaluada mediante su módulo de rotura, siguiendo el método de ensayo de la Norma INV E -414-13, sin embargo, el ensayo que controla ese esfuerzo es de difícil realización y motivo de grandes discusiones por la poca confiabilidad y gran dispersión en los valores que arroja el propio ensayo. (Instituto Nacional de Vias, 2007)

Teniendo en cuenta que son vías de bajos volúmenes de tránsito y es necesario utilizar materiales de la zona, se plantea mezclar el concreto en el sitio, en donde no existen los medios para ejercer un control de calidad similar al ejercido en las plantas de concreto. Sin embargo, si se tiene en cuenta que la inversión en un pavimento de concreto de dimensiones optimizadas es cuantiosa y que éste debe permanecer durante décadas en condiciones de servicio satisfactorias resulta obligatorio utilizar una mezcla de concreto que ofrezca garantía de durabilidad. Por la razón anterior, que no es otra que garantizar la durabilidad del concreto sometido a la intemperie y al desgaste producido por la fricción al paso de las llantas de los vehículos, la fabricación de los elementos estructurales del pavimento se debe realizar con concreto de calidad aceptable que en éste caso se asimila a una resistencia a la

flexión a los 28 días de 3.8 MPa, 4.1 MPa o 4.3 MPa, una vez identificada la fuente de agregados a utilizar en el proyecto es indispensable realizar, en laboratorio, el diseño de la mezcla de concreto incluyendo los ensayos de calidad a los agregados los cuales deben cumplir los requisitos para concreto estructural establecidos en las especificaciones vigentes del Instituto Nacional de Vías.

Tomando en cuenta lo anterior, y lo recomendado por TCPavements, se adopta un valor de confianza de la mezcla de 80%.

### **3.4.3.3 Desviación estándar diseño de concreto**

Es la desviación que tiene el proceso de fabricación del concreto. TCPavements recomienda 0.4 MPa

### **3.4.3.4 Aumento de resistencia 28-90 días**

Corresponde al incremento porcentual en la resistencia a la flexotracción que ocurre desde el día 28 al día 90 en las losas de hormigón. De acuerdo con las recomendaciones de TCPavements y teniendo en cuenta que en Colombia no se tiene información sobre el incremento de la resistencia en este periodo de tiempo, se adopta un 10%.

### **3.4.3.5 Resistencia a la compresión**

A medida que aumenta la resistencia a la compresión del concreto, también aumenta su resistencia a la flexión, sin embargo, la relación no es lineal sino parabólica. Una relación aproximada es la que presenta la ACI 318 (American Concrete Institute).

$$MR = k * \sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

MR: Modulo de rotura

K: constante que varía entre 2.0 y 2.7. El ACI recomienda 2.1

f'c: Resistencia a la compresión en Kg/cm<sup>2</sup>

## **Tabla 31 Resistencia a la compresión**

MR (Mpa)	MR (kg/cm2)	K	f'c(kg/cm2)	f'c(MPa)
3.8	38	2.1	327	32.06
4.1	41		381	37.36
4.3	43		419	41.08

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3.6 Módulo de elasticidad del hormigón

Es definido como el cambio de esfuerzos con respecto a la deformación elástica, considerándose como una medida de resistencia del material a las deformaciones.

Tomando los valores de resistencia a la compresión calculados anteriormente, y la formula recomendada por ACI 318.

$$E = 4700\sqrt{f'c} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

E: Modulo de Elasticidad del concreto (MPa)

f'c: Resistencia a la compresión en MPa

**Tabla 32 Modulo de elasticidad del hormigón**

f'c(MPa)	E (MPa)
32.06	26,600
37.36	28,700
41.08	30,100

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3.7 Peso específico del hormigón

Es el peso de la mezcla de hormigón por unidad de volumen. Para este trabajo y teniendo en cuenta que es un concreto no reforzado, se toma un valor de 2200 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.4.3.8 Relación de Poisson

Es la razón entre la deformación unitaria lateral y la deformación unitaria axial, causada por una carga en el sentido axial. El valor varía entre 0.1 y 0.25, para esta modelación se adopta un valor de 0.15.

### 3.4.3.9 Coeficiente de dilatación térmico

El coeficiente de expansión térmico es una medida de la expansión o contracción de un material al ser sometido a cambios de temperatura. Se utiliza un valor de  $1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  salvo que se determine el valor por ensayo de laboratorio.

Proyecto	Diseño	Tráfico	Hormigón	Suelo	Clima	Resultados
Tipo de Ensayo de Resistencia	Flexotracción					
Edad de Ensayo	28 Días					MOR a 90 días 4,55 (MPa)
Flexotracción	3,8					(MPa)
Confiabilidad Diseño de Hormigón	80					(%)
Desviación Estándar Diseño de Hormigón	0,4					(MPa)
Aumento de Resistencia 29 a 90 Días	1,1					
Modulo de Elasticidad del Hormigón	26.600					(MPa)
Peso Especifico del Hormigón	2.200					(Kg/m <sup>3</sup> )
Módulo de Poisson	0,15					
Coeficiente de Dilatación Térmico (10 <sup>6</sup> )	10					(1/ <sup>o</sup> C) ?
Retracción del Hormigón a los 365 Días	600					(microstrain)
Contenido de Aire	3					(%)
Relación Agua-Cemento	0,45					
Fibra Estructural	No					
Método de Ensayo de la Fibra	ASTM 1609					
Resistencia Residual	1					(MPa)




Figura 37: Datos ingresados del concreto. Fuente:Optipave

### 3.4.4 Propiedades del suelo

La selección de materiales para diseño de pavimentos está basada en una combinación de factores como calidad, disponibilidad, economía y experiencia previa de uso. Estos factores necesitan ser evaluados durante el diseño, en orden a seleccionar los materiales que mejor se adapten a las condiciones del proyecto.

Materiales SBG-1: Para la construcción de sub-bases granulares, los materiales serán agregados naturales clasificados, o podrán provenir de la trituración de rocas y gravas o estar constituidos por una mezcla de productos de ambas procedencias (Instituto Nacional de Vías, 1998b). Las partículas de agregados serán duras,

resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, blandas o desintegrables y sin materia orgánica u otras sustancias perjudiciales.

Tomando como base los valores típicos de los módulos de capas de pavimentos de la “Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras” del Instituto Nacional de Vías, la cual indica que el módulo de una subbase granular se encuentra entre 70 MPa y 140 MPa como se presenta a continuación (Instituto Nacional de Vías, 2008a)

**Tabla 33 Valores típicos de los módulos de capas de pavimentos**

MATERIAL	RANGO GENERAL (MPa)	VALOR TÍPICO (MPa)
Concreto asfáltico <sup>(*)</sup>	1,000-4,000	2,500
Base estabilizada con asfalto <sup>(*)</sup>	700-3,500	1,700
Grava cemento	2,000-7,000	4,000
Suelo cemento	350-700	500
Suelo cal	200-400	300
Base granular	140-280	210
Subbase granular	70-140	100
Subrasante granular	50-140	80
Subrasante fina	20-50	35

Fuente: (Instituto Nacional de Vías, 2008a)

Teniendo en cuenta que se tienen bajos volúmenes de tránsito, se adopta un espesor único de 15 cm, y la calidad exigida en las Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías. “Sub Base granular” Art 320. Dicho espesor obedece a razones constructivas como son el contribuir a lograr la homogeneidad de la superficie de apoyo de la losa, la compactación requerida cuando los suelos de apoyo sean de precaria calidad y a disponer de una superficie de trabajo limpia (Instituto Nacional de vías, 2015).

Los módulos para la subrasante se adoptarán los siguientes, tomando como base los rangos expuestos anteriormente en la Tabla 34, y asumiendo que se pueden encontrar subrasantes granulares y subrasantes finas.

**Tabla 34 Módulo de subrasante**

Modulo (MPa)
30
40

50
60
80

**Fuente: Elaboración del autor.**

Tomando en cuenta los módulos de subrasante adoptados anteriormente y el espesor seleccionado para la subbase granular de 15 cm, se procede a utilizar la fórmula que recomienda SHELL para determinar el módulo de una capa granular ( $MR_i$ ), a partir del espesor de dicha capa ( $h_i$ ) en mm, y el módulo de la subrasante ( $MR_{i+1}$ ) en  $kg/cm^2$ .

$$MR_i = 0.206 * h^{0.45} * MR_{i+1}$$

Ecuación 22

Donde:

$MR_i$ : Modulo resiliente de la capa granular ( $Kg/cm^2$ )

h: Espesor del material granular (mm)

$MR_{i+1}$ : Modulo resiliente de la subrasante ( $Kg/cm^2$ )

**Tabla 35 Módulo de subbase**

Modulo Subrasante (MPa)	Modulo Subrasante (kg/cm2)	Modulo Subbase (kg/cm2)	Modulo Subbase (MPa)
30	306	601	60
40	408	801	80
50	510	1001	100
60	612	1202	120
80	816	1602	160

**Fuente: Elaboración del autor.**




Proyecto | Diseño | Tráfico | Hormigón | **Suelo** | Clima | Resultados

N° de Capas: 1  
 Tipo de Ensayo: CBR

	Tipo de Suelo	Módulo Resiliente Invierno (MPa)	Módulo Resiliente Verano (MPa)	Módulo de Poisson	Espesor (mm)
Base	A-1-b	120	120	0,4	150
2° Capa	A-1-a				
3° Capa	A-1-a				
4° Capa	A-1-a				
5° Capa	A-1-a				
6° Capa	A-1-a				
Subrasante	A-1-a	80	96	0,45	

Resistencia a la erosión (Capa Bajo el Pavimento): 3 ?  
 Coeficiente de Fricción Pavimento-Base: 0,65  
 Material Fino Bajo Malla N° 200 (Capa Bajo el Pavimento): 8 (%)

Ayuda



**Figura 38: Datos ingresados del suelo. Fuente: Optipave**

### 3.4.5 Clima

Uno de los parámetros de entrada del Software OPTipave es el clima, y el clima en Colombia está determinado por aspectos geográficos y atmosféricos tales como precipitación, intensidad, radiación solar, temperatura, sistemas de vientos, altitud, continentalidad y humedad atmosférica. Esto genera un amplio mosaico de climas y microclimas, que van desde los más calurosos (30°C en las costas y llanuras) hasta los más fríos, en las cordilleras. De acuerdo con lo anterior, se adoptarán 3 climas diferentes.

**Tabla 36 Precipitación y temperatura de las capitales Colombianas.**

Nombre estación	Temperatura Media de invierno (°C)	Temperatura media de verano (°C)	Número de días del año con precipitación	Región
Fría	8	15	200	Andina
Templada	15	25	200	Pacifico
Caliente	25	32	200	Caribe

**Fuente: Elaboración del autor.**

Proyecto	Diseño	Tráfico	Hormigón	Suelo	Clima	Resultados
País	Genérico					▼
Zona	Humedo No-heladizo					▼
Gradiente Equivalente de Construcción	-10					(°C) ?
Temperatura Media de Invierno	15					(°C)
Temperatura Media de Verano	25					(°C)
Temperatura de Fraguado del Hormigón	45					(°C)
Número de Días al Año con Precipitaciones	200					
Indice de Congelamiento de la Base	0					(%)

**Figura 39: Datos ingresados del clima**

#### **4 Capítulo – Diseño de losas optimizadas**

Los procedimientos para el diseño de las estructuras de pavimento presentados en este documento son aplicables para vías de bajos volúmenes de tránsito, con los parámetros expuestos en el capítulo 3.

Los diseños están basados en la metodología de losas optimizadas, utilizando el software Optipave diseñado para el cálculo de las estructuras de pavimento, el cual tiene el propósito de proteger la subrasante por medio de la provisión de capas de diferentes materiales con el fin de alcanzar el nivel de servicio deseado. Para ello, se consideraron factores de tránsito, parámetros del suelo, propiedades del hormigo y condiciones climáticas.

El propósito de este trabajo de grado es presentar los cálculos de las estructuras de pavimento de losas optimizadas para vías de bajos volúmenes, que pueda soportar el tránsito con un alto nivel de confianza para el período de diseño en las condiciones ambientales dadas y un aceptable nivel de servicio, mediante la utilización de un catálogo que se presenta en el siguiente capítulo.

#### 4.1 Contenido de la guía y aspectos básicos en el diseño

En esta guía se presentan 3 capítulos, aparte del presente. Cada capítulo será tratado separadamente, pero deben ser considerados todos los capítulos antes que pueda adoptar el diseño del pavimento.

Se tendrán como datos constantes en todas las simulaciones los siguientes:

**Tabla 37 Parámetros de diseño**

Parámetros de diseño del tipo de pavimento	
Vida de diseño	20 años
Largo de losa	1.80 m
Tipo de borde	Bordillo
Umbrales Máximos admisibles de Diseño	
Porcentaje de losas Agrietadas	50%
IRI inicial	3 m/Km
IRI final	4.5 m/Km
Escalonamiento promedio	8 mm

**Fuente: Elaboración del autor.**

Las soluciones dadas en el catálogo tienen una confiabilidad global del 75% y ésta en función del tipo de deterioro (losas agrietadas, IRI final de diseño y escalonamiento final), los cuales están en función de la clasificación de la vía de acuerdo con la Tabla 24.

El uso del catálogo se considera adecuado para proporcionar el diseño básico requerido. Sin embargo, condiciones especiales pueden exigir un análisis más detallado a ser realizado por medio de otros métodos.

Para el utilizar el catálogo, será necesario realizar los siguientes pasos, con el fin de encontrar el espesor adecuado, de acuerdo con las características de cada zona.

## 4.2 Clima

De acuerdo con las características descritas en el capítulo 3.4.5, se ha dividido en 3 regiones climáticas, con el fin de que la variable clima se involucre en forma apropiada en el diseño de estructuras de pavimento. Para cada una de estas regiones climáticas se ha elaborado una carta de diseño

**Tabla 38 Precipitación y temperatura de las capitales Colombianas.**

Carta de diseño	Nombre estación	Temperatura Media de invierno (°C)	Temperatura media de verano (°C)	Número de días del año con precipitación	Región
Carta 1	Fría	8	15	200	Andina
Carta 2	Templada	15	25	200	Pacífico
Carta 3	Caliente	25	32	200	Caribe

Fuente: Elaboración del autor.

## 4.3 Estimación del tránsito de diseño

El cálculo de la estimación del tránsito tiene como objetivo la cuantificación del número acumulado de ejes simples equivalentes de 8.2 toneladas (N) que circularán por el carril de diseño durante el período de diseño (20 años).

Para el diseño de estudio, se adoptaron 4 niveles de tránsito para el año 1, con las tasas de crecimiento de la Tabla 39, los cuales se encuentran dentro de cada carta.

**Tabla 39 Transito ejes equivalentes**

Transito	Transito Ejes equivalentes	Tasa de crecimiento
T1	$50.000 < N_{8,2} \leq 100.000$	2%
T2	$100.000 < N_{8,2} \leq 300.000$	3%
T3	$300.000 < N_{8,2} \leq 500.000$	3%
T4	$700.000 < N_{8,2} \leq 700.000$	3%

Fuente: Elaboración del autor.

## 4.4 Materiales que componen la estructura de pavimento

Según el módulo resiliente de la subrasante encontrado, se clasifica de acuerdo con las categorías indicadas en la Tabla 40. Estas categorías se encuentran en la fila de las cartas.

**Tabla 40 Módulo de subrasante**

Categoría	Modulo Subrasante (MPa)	Modulo Subbase (MPa)	Losa MR (Mpa)	E (Mpa)
S1	30	60	3.8	26.600
			4.1	28.700
			4.3	30.100
S2	40	80	3.8	26.600
			4.1	28.700
			4.3	30.100
S3	50	100	3.8	26.600
			4.1	28.700
			4.3	30.100
S4	60	120	3.8	26.600
			4.1	28.700
			4.3	30.100
S5	80	160	3.8	26.600
			4.1	28.700
			4.3	30.100

**Fuente: Elaboración del autor.**

#### **4.5 Modelaciones**

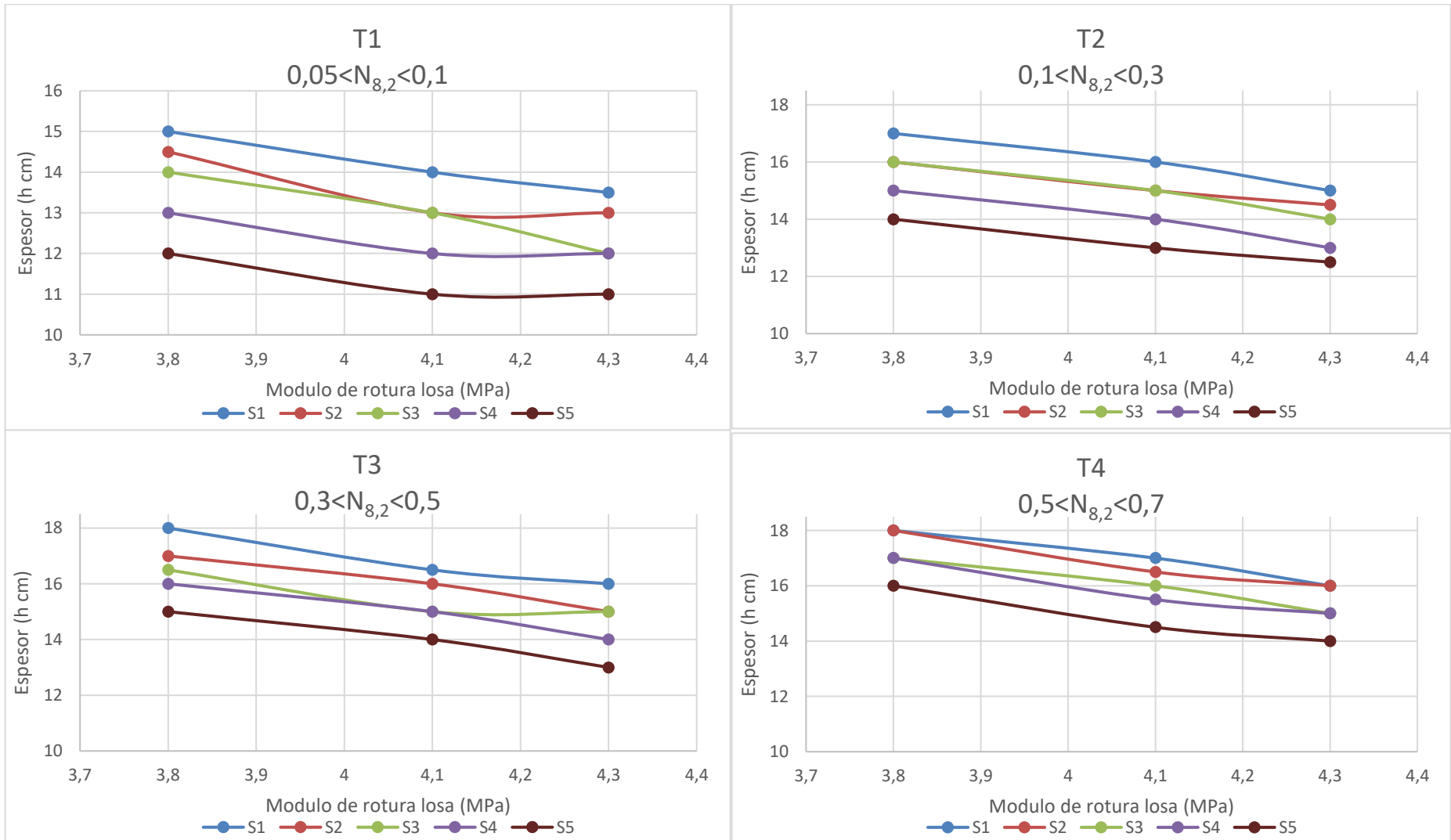
A continuación, se presentan las cartas de diseño para las modelaciones realizadas, variando el tránsito, suelo, concreto y clima.

Tabla 41 Carta 1, estación fría.

Mr (Mpa) N <sub>a,2</sub> (nº)	S1 Subrasante 30 Mpa Subbase 60 Mpa			S2 Subrasante 40 Mpa Subbase 80 Mpa			S3 Subrasante 50 Mpa Subbase 100 Mpa			S4 Subrasante 60 Mpa Subbase 120 Mpa			S5 Subrasante 80 Mpa Subbase 160 Mpa		
	T1 0,05 < N <sub>a,2</sub> ≤ 0,1	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MP SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm
T2 0,1 < N <sub>a,2</sub> ≤ 0,3	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MP SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 80MPa 15 cm
T3 0,3 < N <sub>a,2</sub> ≤ 0,5	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MP SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 80MPa 15 cm
T4 0,5 < N <sub>a,2</sub> ≤ 0,7	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 30MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MP SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 40MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 50MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 60MPa 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm	PCC Mr: 4.3MP SBG SBR: 80MPa 15 cm

Fuente: Elaboración del autor.

De acuerdo con la **Tabla 41**, para una estación fría (8°C a 15°C), variando los valores de módulo de subrasante, subbase granular y tránsito, a continuación, se presentan las gráficas de los espesores encontrados vs los módulos de rotura de losa.



**Figura 40: Espesores vs módulos de rotura de losa. Estación fría (8°C a 15°C). Fuente: Elaboración propia**

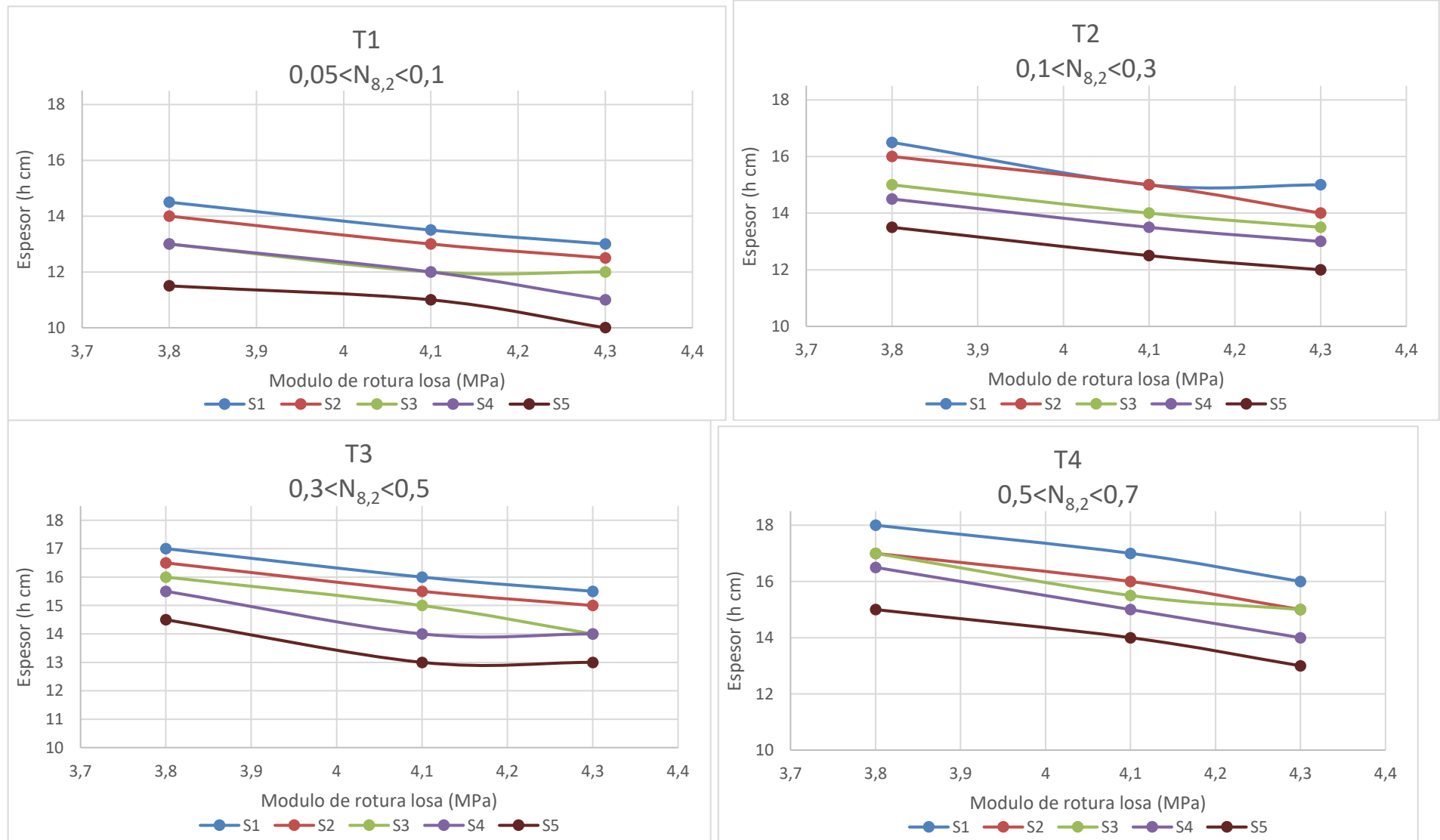
**Tabla 42 Carta 2, estación templada**

Mr (Mpa) N <sub>a,2</sub> (10)	S1 Subrasante 30 Mpa Subbase 60 Mpa			S2 Subrasante 40 Mpa Subbase 80 Mpa			S3 Subrasante 50 Mpa Subbase 100 Mpa			S4 Subrasante 60 Mpa Subbase 120 Mpa			S5 Subrasante 80 Mpa Subbase 160 Mpa		
T1 0,05 < N <sub>a,2</sub> < 0,1	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 14,5 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 13,5 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 13 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 14 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 13 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 12,5 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 13 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 12 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 12 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 13 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 12 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 11 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 11,5 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 11 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 10 cm
T2 0,1 < N <sub>a,2</sub> < 0,3	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 16,5 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 15 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 16 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 15 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 14 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 14 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 13,5 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 14,5 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 13,5 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 13 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 13,5 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 12,5 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 12 cm
T3 0,3 < N <sub>a,2</sub> < 0,5	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 17 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 16 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 15,5 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 16,5 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 15,5 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 16 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 15 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 14 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 15,5 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 14 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 14 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 14,5 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 13 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 13 cm
T4 0,5 < N <sub>a,2</sub> < 0,7	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 18 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 17 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 30MPa 15 cm 16 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 17 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 16 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 40MPa 15 cm 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 17 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 15,5 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 50MPa 15 cm 15 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 16,5 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 15 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 60MPa 15 cm 14 cm	PCC Mr: 3.8MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 15 cm	PCC Mr: 4.1MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 14 cm	PCC Mr: 4.3MPa SBG SBR: 80MPa 15 cm 13 cm

Fuente: Elaboración del autor.



De acuerdo con la **Tabla 42**, para una estación templada (15°C a 25°C), variando los valores de módulo de subrasante, subbase granular y tránsito, a continuación, se presentan las gráficas de los espesores encontrados vs los módulos de rotura de losa.



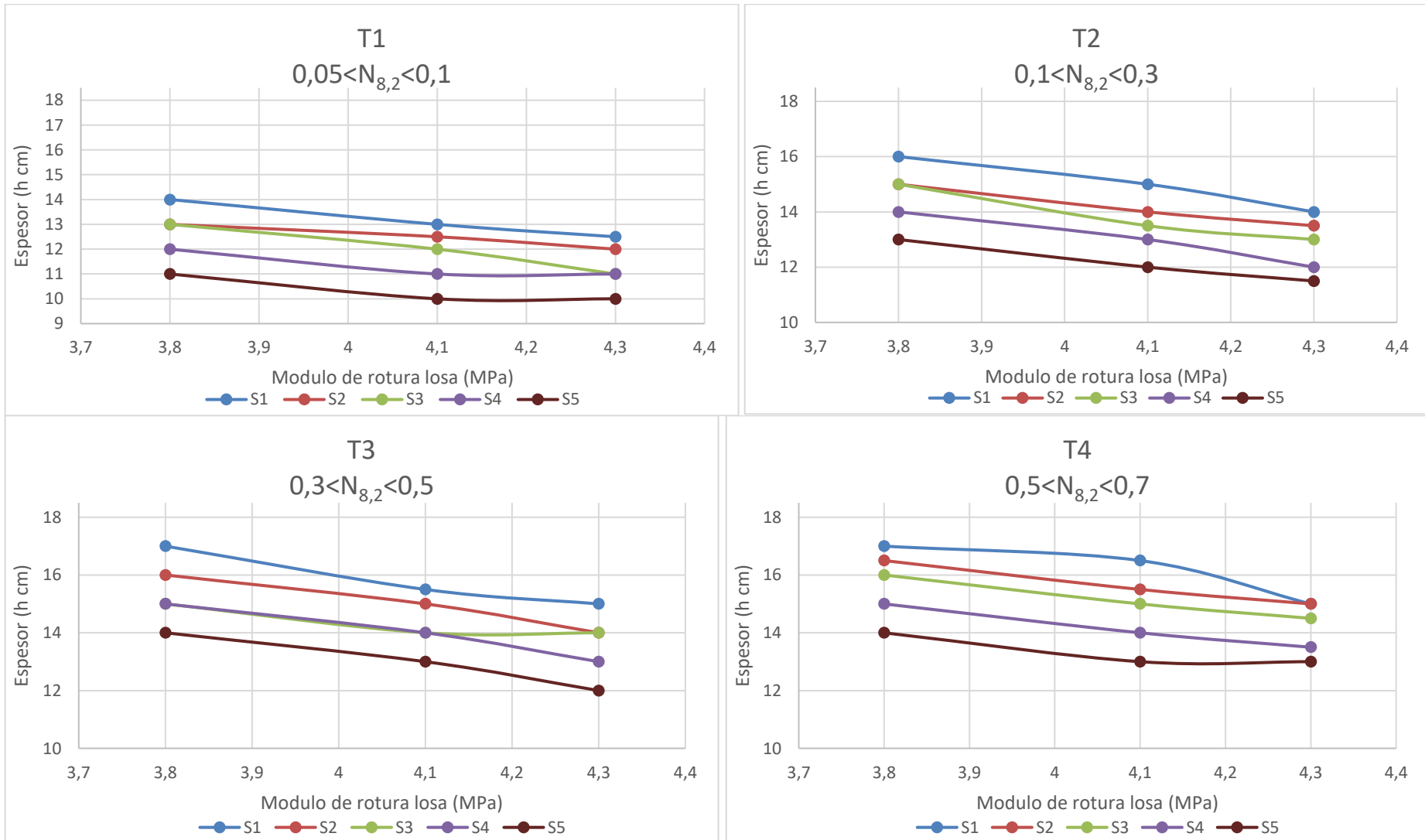
**Figura 41: Espesores vs módulos de rotura de losa. Estación templada (15°C a 25°C). Fuente: Elaboración propia**

Tabla 43 Carta 3, estación caliente

Mr (Mpa) N <sub>8,2</sub> (10)	S1 Subrasante 30 Mpa Subbase 60 Mpa			S2 Subrasante 40 Mpa Subbase 80 Mpa			S3 Subrasante 50 Mpa Subbase 100 Mpa			S4 Subrasante 60 Mpa Subbase 120 Mpa			S5 Subrasante 80 Mpa Subbase 160 Mpa		
T1 0,05 < N <sub>8,2</sub> ≤ 0,1	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 4.1MP SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 80MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 80MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 80MPa
T2 0,1 < N <sub>8,2</sub> ≤ 0,3	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 4.1MP SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 80MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 80MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 80MPa
T3 0,3 < N <sub>8,2</sub> ≤ 0,5	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 4.1MP SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 80MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 80MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 80MPa
T4 0,5 < N <sub>8,2</sub> ≤ 0,7	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 30MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 4.1MP SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 40MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 50MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 60MPa	PCC Mr: 3.8MPa SBG 15 cm SBR: 80MPa	PCC Mr: 4.1MPa SBG 15 cm SBR: 80MPa	PCC Mr: 4.3MP SBG 15 cm SBR: 80MPa

Fuente: Elaboración del autor.

De acuerdo con la **Tabla 43**, para una estación templada (25°C a 32°C), variando los valores de módulo de subrasante, subbase granular y tránsito, a continuación, se presentan las gráficas de los espesores encontrados vs los módulos de rotura de losa.



**Figura 42: Espesores vs módulos de rotura de losa. Estación caliente (25°C a 32°C). Fuente: Elaboración propia**

- Se aprecia que para un tránsito inferior a 100.000 EE para las tres cartas, los espesores varían entre 10 cm y 15 cm; para un tránsito entre 100.000 y 300.000 EE, se tienen espesores entre 11.5 y 17cm; para un tránsito entre 300.000 y 500.000 EE, espesores entre 12 y 18 cm; y para un tránsito entre 500.000 y 700.000 espesores entre 13 y 18 cm.
- De acuerdo con la Figura 40, Figura 41 y Figura 42, donde se presentan los espesores encontrados en función del módulo de rotura, se aprecia que para los tres climas analizados, en general se obtiene el mismo comportamiento, con el espesor decreciente a medida que el módulo de rotura aumenta, como era de esperarse. Sin embargo, en algunos casos, como por ejemplo para el suelo S3 (módulos de subrasante 50 MPa y Subbase 100 MPa), representado en las gráficas con la línea de color verde, la tendencia de la línea se aparta de la observada para las demás condiciones. Este patrón es constante en todas las modelaciones con los parámetros de suelo S3. No se tiene una razón coherente de estos resultados, que posiblemente pueden ser atribuibles al software de diseño.
- Como era de esperarse, el espesor mayor de losa (18 cm) se obtuvo para la combinación de: tránsito 700.000 EE, módulo de subrasante 30 MPa, módulo de subbase 60 MPa (espesor subbase 15cm) y módulo de rotura del concreto de 3.8 MPa para un clima frío.
- El espesor más bajo de losa (10 cm) se encuentra para la combinación de: tránsito 100.000 EE, módulo de subrasante 80 MPa, módulo de subbase 160 MPa (espesor subbase 15cm) y módulo de rotura del concreto de 4.3 MPa para un clima caliente.

#### 4.6 Sistema constructivo losa optimizada

**Elaboración de la mezcla:** El control del proporcionamiento de todos los materiales para elaborar la mezcla de concreto fresco, incluyendo el agua, deberá realizarse en peso, utilizando básculas previamente calibradas y aprobadas por el interventor. El

área donde se realicen las operaciones de pesado del cemento deberá estar sellada y contar con un sistema de filtración para evitar fugas del material hacia el medio ambiente.

El manejo de los agregados deberá garantizar que no se produzcan segregaciones o contaminaciones con materiales ajenos al concreto y/o sustancias perjudiciales. Antes de ser mezclados, los agregados deberán ser separados por lo menos en dos tamaños, para ser pesados.

La fabricación del concreto en obra por el constructor se podrá realizar siempre y cuando se disponga del equipamiento necesario para la dosificación, mezclado y transporte de las mezclas producidas asegurando su provisión y calidad. Se deberá asegurar la provisión de materias primas locales para la determinación de la dosificación necesaria para el concreto especificado y que estará basada en concreto de prueba, preparados y ensayados por un laboratorio oficial. Se deberá verificar además que el proceso de producción de las mezclas cumpla con los requisitos especificados para los concretos del proyecto cumpliendo con las tolerancias de medición de los materiales establecidas en la norma INVIAS.

**Transporte:** El transporte de los agregados y/o la mezcla se efectuará de preferencia en camiones, sean mezcladores o no, pero previendo cualquier pérdida de humedad o material; así mismo, se procederá a su lavado con agua a presión cuando se tengan residuos que puedan afectar el buen comportamiento del concreto.

En el caso de emplear camiones no mezcladores, éstos deberán contar con caja revestida de lámina, cubierta que evite la evaporación de la mezcla y mecanismos que depositen la mezcla en forma satisfactoria, sin segregaciones. La caja deberá estar perfectamente limpia antes de ser utilizada con nuevas mezclas. Cuando el concreto fresco se deposite en el lugar del colado con canales o tubos, se dispondrán éstos de tal manera que se prevenga cualquier segregación de los materiales. El ángulo de caída deberá ser lo suficientemente pronunciado para lograr el fácil movimiento de las revolturas, pero sin que se clasifiquen los agregados.

**Fundida:** La superficie sobre la que se colocará el concreto fresco deberá estar perfectamente limpia, ligeramente humedecida y libre de sustancias ajenas al concreto.

**Formaleta:** El borde de las losas de concreto queda restringido lateralmente por bordillos, por la pared lateral del pavimento existente o por moldes con el espesor del pavimento, que están perfectamente nivelados y lisos para evitar imperfecciones en la superficie del pavimento.

Los moldes que son utilizados pueden ser metálicos, de madera, una combinación de ambos materiales u otros. En su instalación deberán quedar adecuadamente fijados a la subbase del pavimento de manera de evitar su movimiento durante la colocación del concreto y deben ser capaces de no deformarse por el peso de la cercha mecánica ni por la presión lateral del concreto. Longitudinalmente los moldes son rectos, sin curvaturas, deflexiones, abolladuras, ni otros defectos y pudiendo tener una sección transversal trapezoidal o vertical, según lo defina el proyecto para la junta longitudinal y el borde externo del pavimento, según corresponda.

Los moldes deben quedar perfectamente conectados entre sí, tanto en altura como en eje longitudinal.

La colocación de moldes y el sistema de terminación deben asegurar el cumplimiento de niveles, cotas, pendientes, espesores y rugosidad superficial de recepción, según corresponda a la realidad del proyecto, según los requisitos que se han especificado para el pavimento.

**Rodillos vibratorios:** El concreto se compactará debidamente a todo lo ancho del pavimento mediante vibradores de superficie, vibradores de inmersión o por otros procedimientos que produzcan resultados equivalentes sin provocar segregación y cuidando que se obtenga una compactación homogénea de la mezcla. Los métodos de compactación del concreto que resulten con deficiencias, tales como segregación o formación de nidos de piedra, son descontinuados y corregidos por el constructor.

**Textura de la superficie:** El acabado superficial longitudinal del concreto recién colado podrá proporcionarse mediante llanas mecánicas, y a continuación, mediante el arrastre de tela de yute, fique o bandas de cuero húmedas. Posteriormente con un equipo de texturizado, se procederá a realizar el texturizado transversal mediante una rastra de alambre en forma de peine, con una separación entre dientes de 20

milímetros, ancho de dientes de 3 milímetros y con una profundidad de penetración máxima de 6 milímetros y mínima de 3 milímetros a todo lo ancho de la superficie pavimentada. Esta operación se realizará cuando el concreto esté lo suficientemente plástico para permitir el texturizado, pero lo suficientemente seco para evitar que el concreto fluya hacia los surcos formados por esta operación.

El acabado final deberá proporcionar una superficie de rodamiento con las características mínimas de seguridad (coeficiente de fricción) y de comodidad (índice de perfil) que se indican en seguida.

**Curado:** El curado deberá hacerse inmediatamente después del acabado final, cuando el concreto empiece a perder su brillo superficial. Esta operación se efectuará aplicando en la superficie una membrana de curado a razón de un litro por metro cuadrado (1 lt/m<sup>2</sup>), para obtener un espesor uniforme de aproximadamente un milímetro (1 mm), que deje una membrana impermeable y consistente de color claro que impida la evaporación del agua que contiene la mezcla del concreto fresco. Su aplicación debe realizarse con irrigadores mecánicos a presión ó por medio de aspersores manuales que garanticen la perfecta aplicación de la membrana.

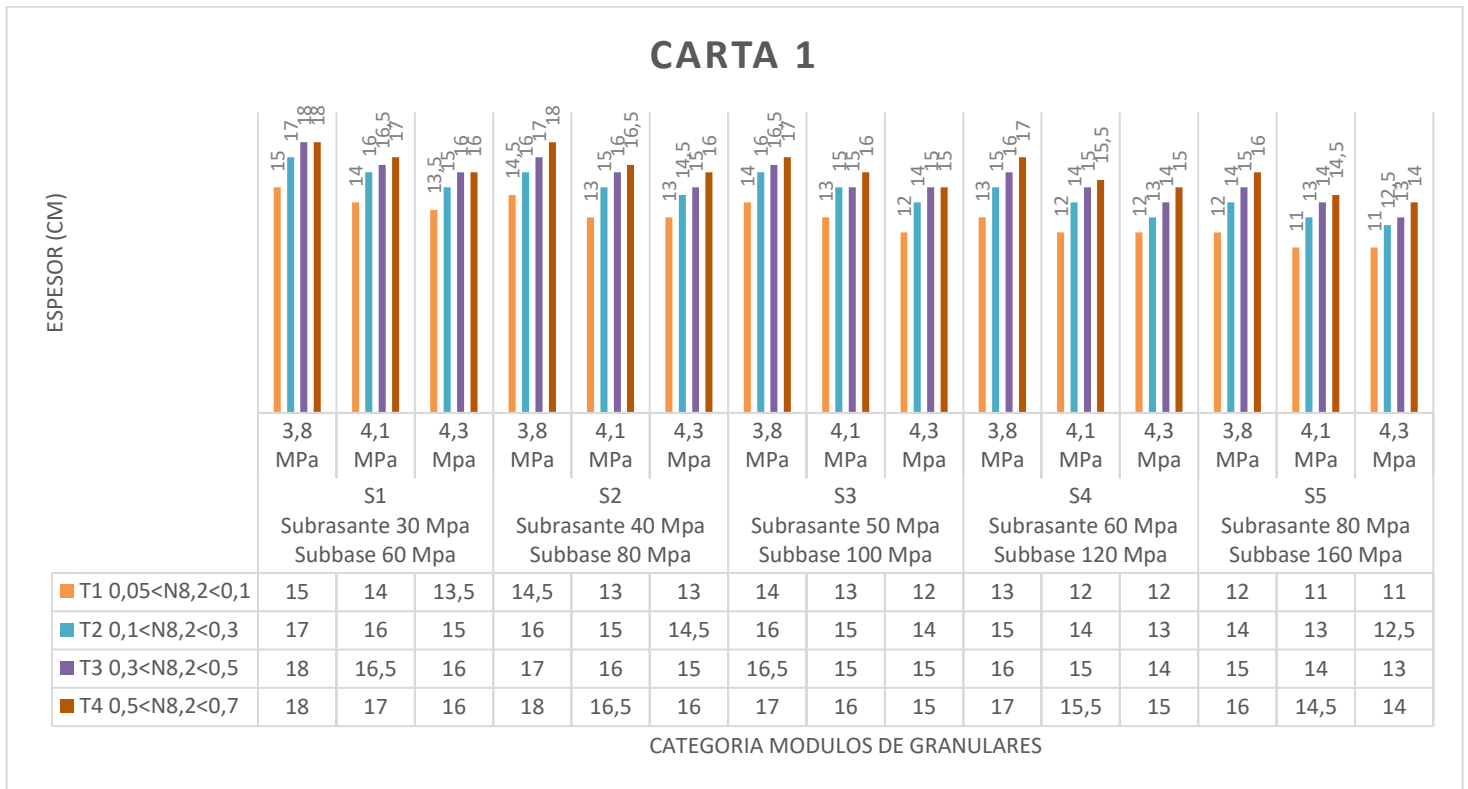
**Juntas:** Las juntas deberán ajustarse al alineamiento, dimensiones y características consignadas en el proyecto. Después del curado de las losas se procederá al corte de las juntas transversales y longitudinales con discos abrasivos si se realizan los cortes en seco, o con discos de diamante que se enfrían con agua. El corte de las juntas deberá comenzar por las transversales de contracción, e inmediatamente después continuar con las longitudinales. Este corte deberá realizarse cuando el concreto presente las condiciones de endurecimiento propicias para su ejecución y antes de que se produzcan agrietamientos no controlados. El contratista será el responsable de elegir el momento propicio para efectuar esta actividad sin que se presente pérdida de agregado en la junta o despostillamientos de la losa; sin embargo, una vez comenzado el corte deberá continuarse hasta finalizar todas las juntas. El inicio de los trabajos deberá iniciar entre las 4 ó 6 horas de haber colocado el concreto y deberá terminar antes de 12 horas después del colado.

## 5 Capítulo – Resultado y Análisis

La tecnología de losas optimizadas, tal y como se explicó en el capítulo 3, propone reemplazar el diseño de losas de concreto tradicional, por un sistema de losas con geometría optimizada que permiten una distribución más eficiente de la carga para evitar los problemas de agrietamiento.

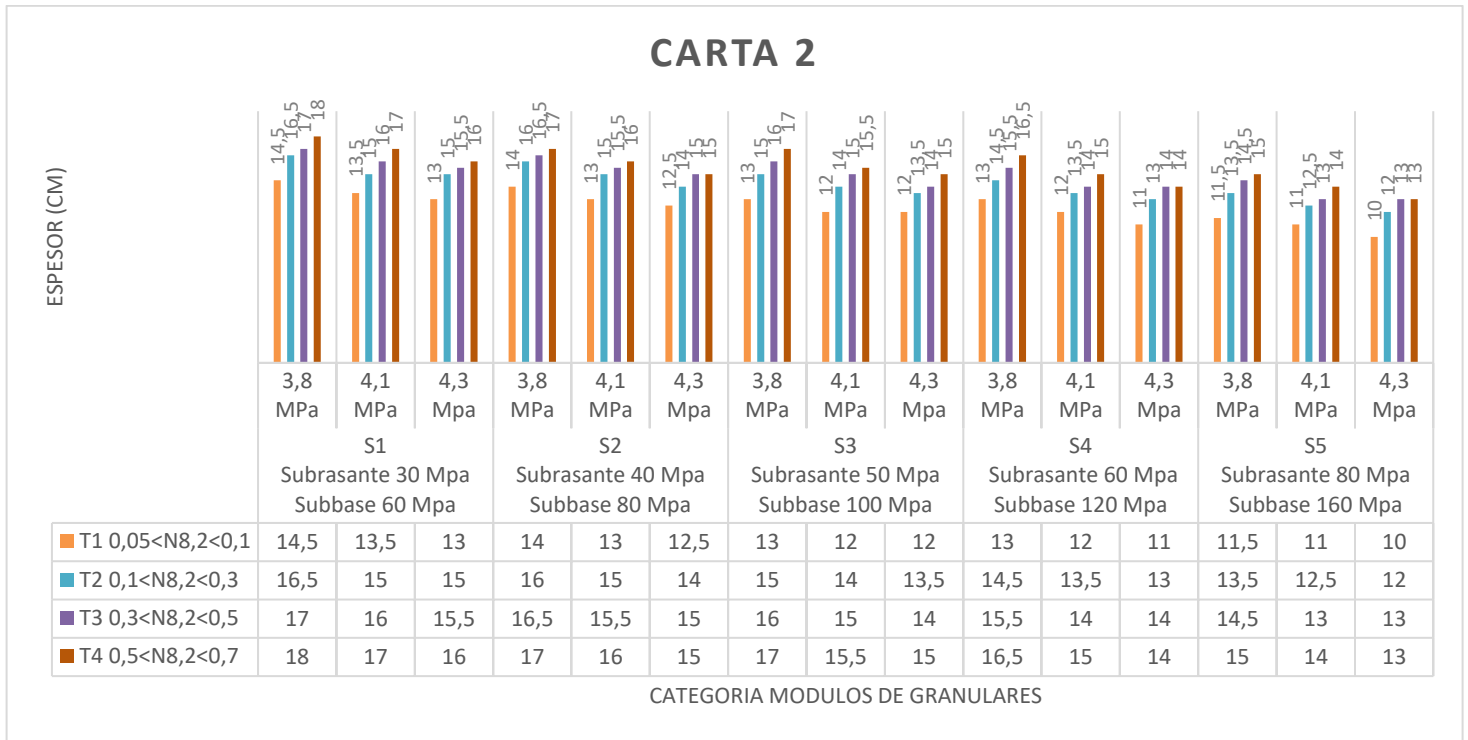
Se realizaron 3 cartas de diseño, modificando los parámetros de clima, subbase granular, subrasante, módulo de rotura de concreto y tránsito, obteniendo 180 modelaciones.

En la Figura 43, Figura 44 y Figura 45 se presenta la variación del espesor de la losa en función de los parámetros de tránsito, clima, módulo de rotura del concreto y rigidez de los granulares.

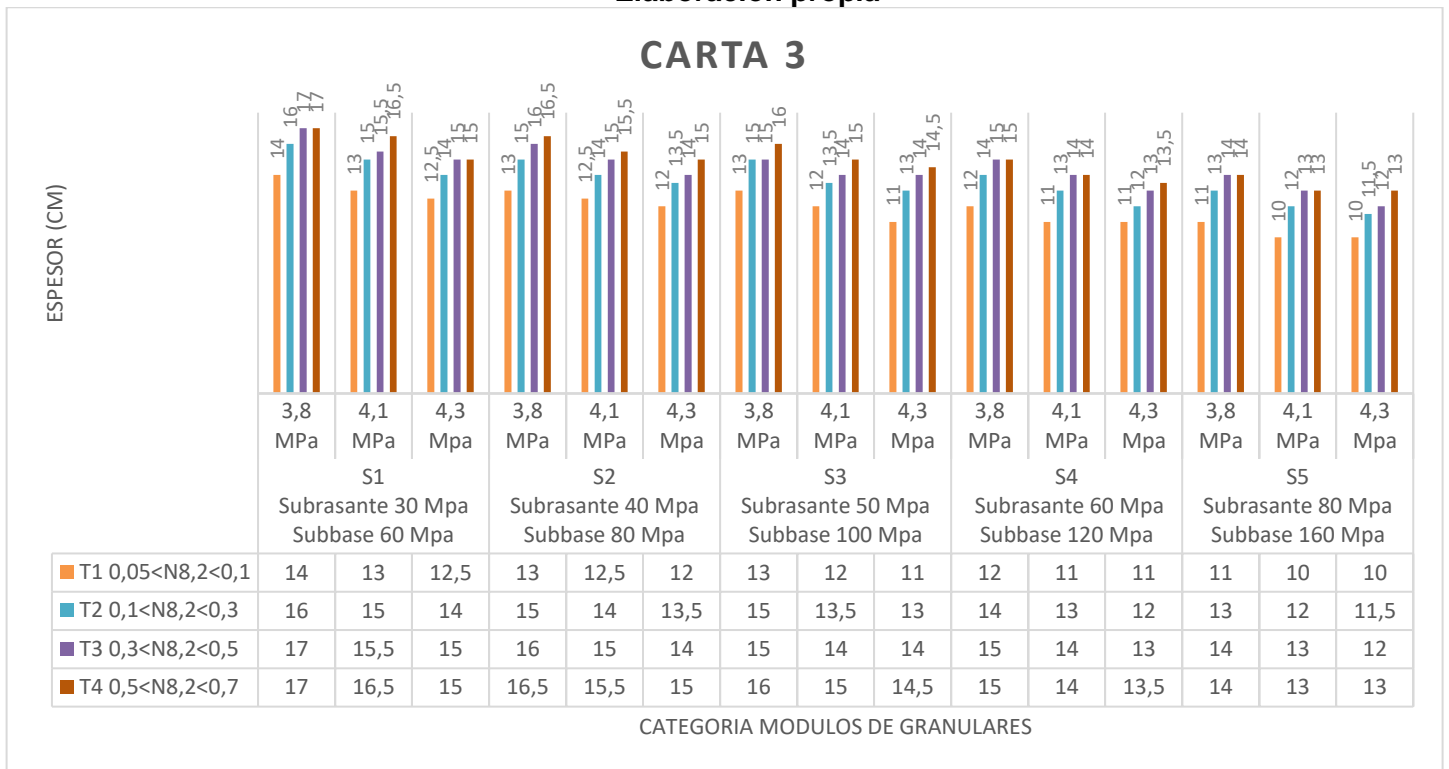


**Figura 43: Espesores de losa para carta 1. Estación fría (8°C a 15°C). Fuente: Elaboración propia**





**Figura 44: Espesores de losa para carta 2. Estación templada (15°C a 25°C). Fuente: Elaboración propia**



**Figura 45: Espesores de losa para carta 3. Estación caliente (25°C a 32°C). Fuente: Elaboración propia**

## 5.1 Análisis de los efectos de las capas de soporte

- La rigidez de la subbase y de la subrasante tienen un papel preponderante dentro del diseño del espesor de la losa corta, teniendo en cuenta que los espesores son menores con respecto a los obtenidos en las metodologías convencionales como la que se presenta en el Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías – INVIAS. Adicionalmente, la metodología de losas optimizadas recomienda no sellar las juntas, por lo cual es necesario tener una subbase granular que sea menos susceptible al agua y que reduzca al mínimo la probabilidad de bombeo y por ende escalonamiento.
- Para un mismo tránsito, al tener materiales de subrasante y de subbase de menor rigidez (30 y 60 MPa respectivamente), se obtienen los espesores más altos de las modelaciones, mientras que para materiales más rígidos (80 y 160 MPa respectivamente), los espesores de las modelaciones son los más bajos, teniendo una diferencia aproximadamente de 3 cm.

De acuerdo con lo anterior, se estima que al tener bajos módulos de subrasante y subbase, el espesor de la losa se ve afectado en un 22% aproximadamente, respecto a materiales más rígidos, lo cual es congruente respecto a las recomendaciones de la metodología, donde se estipula que para espesores menores a 12 cm, se requiere que los materiales granulares deben ser más rígidos, para ayudar con las cargas bajo las ruedas, que producen tensiones de punzonamiento.

## 5.2 Análisis por temperatura

Un factor importante dentro de pavimento de concreto es la temperatura, teniendo en cuenta el alabeo, el cual es una deformación que sufre la losa tomando una forma curvada ya sea hacia arriba o hacia abajo, encorvando sus bordes, esto es ocasionado por las diferencias del contenido de humedad y temperatura entre la

parte superior e inferior de la losa lo que origina que en un día caluroso, la superficie del pavimento tenga mayor temperatura que su apoyo, obligando a las losas a levantarse en el centro y a apoyarse en los extremos, mientras que en la noche, este fenómeno se invierte, y ocasiona que la losa se apoye en el centro, mientras las esquinas se levantan, dando lugar a un borde o equina sin apoyo que puede agrietarse cuando se aplican cargas pesadas.

En una losa de dimensiones convencionales de 4 m, este fenómeno ocasiona grietas de esquina, ya que la losa se carga en los cuatro bordes por un vehículo; la metodología de losas optimizadas solo permite que la losa de dimensión 1.80 m se cargue por un set de llantas, lo que da lugar a que las tensiones se reduzcan drásticamente; teniendo en cuenta lo anterior, esto produce un menor agrietamiento de las losas y una mayor tolerancia a la carga por eje del camión, ayudando a que estas losas sean menos susceptibles al fenómeno del alabeo.

De acuerdo con lo anterior, los resultados de las modelaciones arrojaron que la diferencia de espesor entre un clima frío vs un clima caliente, es de 1 cm aproximadamente, lo cual nos lleva a comprobar que, pese a que la metodología realiza un análisis por temperatura, los espesores no están siendo gobernados por el clima.

### **5.3 Análisis por tránsito**

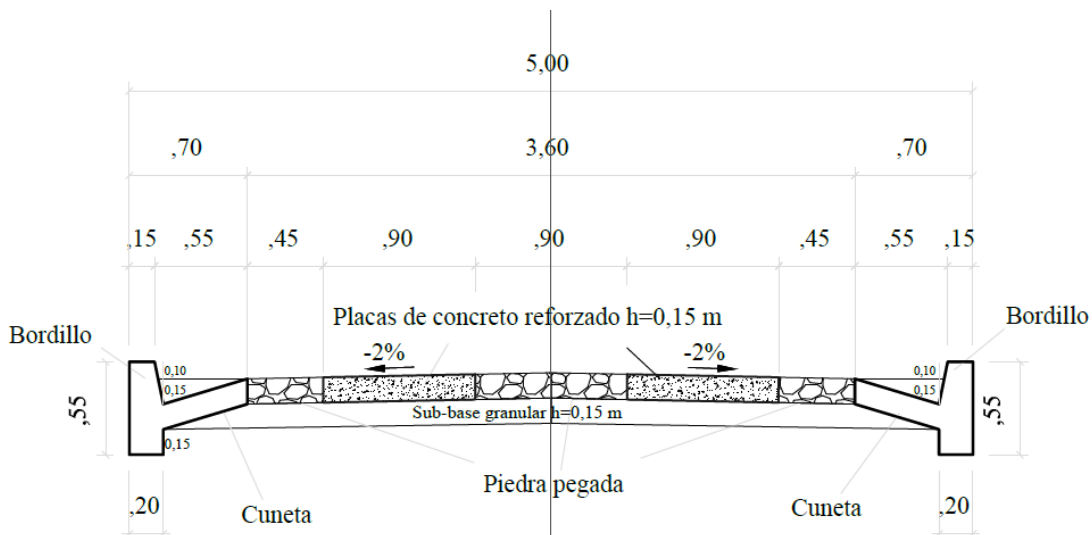
- En las Figura 43, Figura 44 y Figura 45, se presenta la comparación de los espesores agrupados por categoría de módulos de granular, comparándolos con los diferentes valores de tránsito utilizados para el análisis, apreciándose que la diferencia de los espesores entre un tránsito menor a 100.000 EE vs 700.000 ejes equivalentes es aproximadamente entre 3 y 4 cm.

De acuerdo con lo anterior, se estima que al tener un tránsito alto el espesor de la losa se ve afectado en un 25% aproximadamente con respecto a un tránsito bajo.

- Se observa que los espesores encontrados para un tránsito de 500.000 EE y 700.000 son similares, apreciándose en algunos casos particulares los mismos espesores o diferencias mínimas de 5 mm.

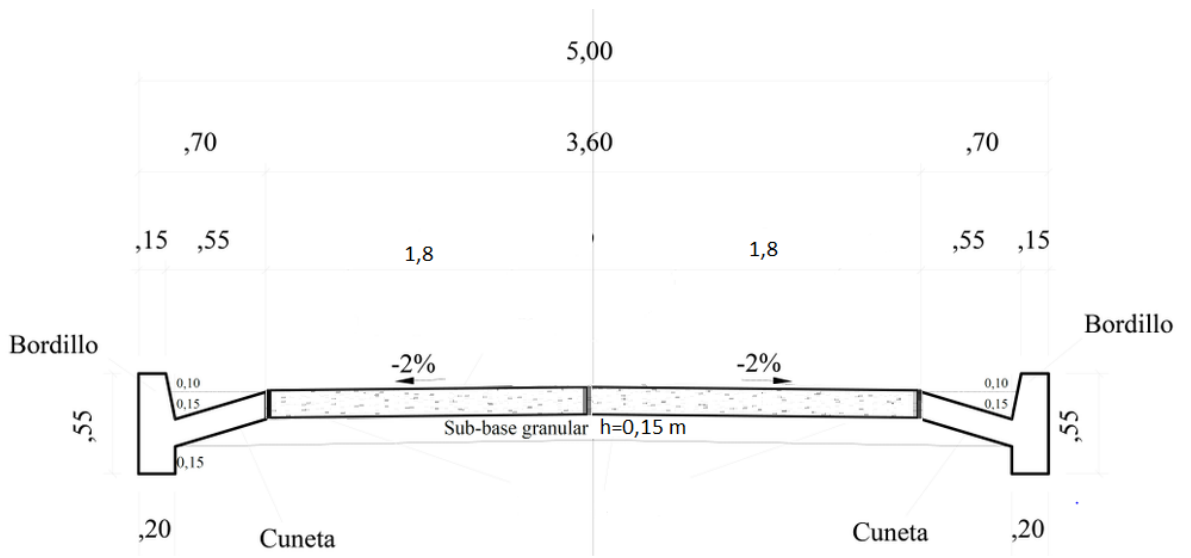
#### 5.4 Comparación de costos de una losa optimizada vs una placa huella

Teniendo en cuenta que el presente estudio se realiza con el fin de plantear una nueva alternativa de construcción para las vías de BVT, en el siguiente capítulo se realiza la comparación de costos de construcción de una placa huella de acuerdo con los valores del Departamento Nacional de Planeación para el proyecto tipo Placa Huella, a continuación, se presenta la estructura tipo para Placa Huella.





**Figura 46: Estructura de placa huella**  
**Fuente: (Instituto Nacional de vías, 2015).**

En las siguientes tablas se presentan los costos comparativos, adoptando los mismos costos que se utilizar para la placa huella; asumiendo un espesor de losa igual al espesor de una placa huella (15 cm), el espesor mínimo encontrado en las modelaciones (10 cm) y el espesor máximo (18 cm)



**Figura 47: Estructura de losa optimizada**  
**Fuente: Elaboración propia**

Tabla 44 Costos proyecto tipo Placa Huella

 <b>Proyectos TIPO</b> <i>Soluciones ágiles para un nuevo país</i>		<b>PROYECTO TIPO PLACA HUELLA</b> Tramo 1 km  <b>PRESUPUESTO</b>				
Capítulo/Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor parcial	Valor total
<b>1</b>	<b>Realizar obras preliminares</b>					<b>\$ 9.311.662,00</b>
1.1	Localización y replanteo	m <sup>2</sup>	5.483,90	\$ 1.698,00	\$ 9.311.662,00	
<b>2</b>	<b>Construir la placa huella</b>					<b>\$ 590.062.423,00</b>
2.1	Excavación mecánica en material común a nivel de subrasante (incluye retiro de sobrantes, transporte hasta escombrera y derecho de botadero)	m <sup>3</sup>	1645,17	\$ 30.402,00	\$ 50.016.458,00	
2.2	Conformación de la subrasante	m <sup>2</sup>	5483,90	\$ 3.272,00	\$ 17.943.321,00	
2.3	Subbase granular (incluye suministro, extendido, nivelación, humedecido y compactación).	m <sup>3</sup>	815,09	\$ 137.378,00	\$ 111.974.747,00	
2.4	Excavación manual H= 0,10 m y 0,20 m para riostras y dentellados (incluye retiro de sobrantes, transporte hasta escombrera y derecho de botadero)	m <sup>3</sup>	28,88	\$ 42.647,00	\$ 1.231.565,00	
2.5	Concreto de 210 kg/cm <sup>2</sup> (3.000 psi) espesor 0,15 m - Placas y dentellones	m <sup>3</sup>	382,50	\$ 329.903,00	\$ 126.186.949,00	
2.6	Concreto ciclópeo espesor 0,15 m	m <sup>3</sup>	253,21	\$ 224.196,00	\$ 56.767.772,00	
2.7	Concreto de 210 kg/cm <sup>2</sup> (3.000 psi) para vigas y viguetas de riostras	m <sup>3</sup>	70,52	\$ 313.759,00	\$ 22.124.716,00	
2.8	Acero de refuerzo 4.200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi) para placas, riostras y dentellones	kg	27.400,77	\$ 3.757,00	\$ 102.944.690,00	

**PRESUPUESTO**

Capítulo/Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor parcial	Valor total
2.9	Concreto de 210 kg/cm <sup>2</sup> (3.000 psi) cuneta dimensiones 0,98 m x 0,12 m y 0,20 m de altura de sardinel	m <sup>3</sup>	185,00	\$ 325.493,00	\$ 60.216.205,00	
2.10	Bordillo prefabricado de confinamiento 0,80 m * 0,15 m * 0,35 m (incluye suministro e instalación, mortero de 0,03 m de espesor y mortero de nivelación de 2.000 psi)	m	1.000,00	\$ 40.656,00	\$ 40.656.000,00	
<b>3</b>	<b>Construir de las obras de drenaje con cajas de recolección</b>					<b>\$ 31.277.797,00</b>
3.1	Excavación manual 1,50 m * 1,50 m * 2,75 m.	m <sup>3</sup>	61,88	\$ 39.637,00	\$ 2.452.539,00	
3.2	Concreto de baja resistencia 140 kg/cm <sup>2</sup> (2.000 psi) para cajas de recolección	m <sup>3</sup>	1,13	\$ 281.618,00	\$ 316.820,00	
3.3	Concreto para caja	m <sup>3</sup>	38,41	\$ 430.156,00	\$ 16.522.105,00	
3.4	Acero figurado de refuerzo de 4200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi ) para caja	kg	3.190,40	\$ 3.757,00	\$ 11.986.333,00	
<b>4</b>	<b>Construir las obras de drenaje con la tubería y cabezales</b>					<b>\$ 37.073.395,00</b>
4.1	Excavación manual 4,5 m * 2,1 m * 1,6 m para cabezales	m <sup>3</sup>	151,20	\$ 39.637,00	\$ 5.993.114,00	
4.2	Concreto resistencia 140 kg/cm <sup>2</sup> (1.500 psi) para solados en muros y cabezales	m <sup>3</sup>	5,14	\$ 204.358,00	\$ 1.050.107,00	
4.3	Concreto para estructura muros cabezales resistencia de 210 kg/cm <sup>2</sup> (3.000 psi)	m <sup>3</sup>	36,01	\$ 430.156,00	\$ 15.491.881,00	



**Proyectos TIPO**  
Soluciones ágiles para un nuevo país

PROYECTO TIPO PLACA HUELLA  
Tramo 1 km



PRESUPUESTO

Capítulo/Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor parcial	Valor total
4.4	Acero figurado de refuerzo de 4.200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi) para cabezal	kg	1.100,40	\$ 3.757,00	\$ 4.134.203,00	
4.5	Tubería de diámetro (36" = 0,9 m) una por cada 100 m para alcantarillas	m	10,00	\$ 1.040.409,00	\$ 10.404.090,00	
<b>Total costos directos</b>						<b>\$ 667.725.277,00</b>

<b>Los porcentajes presentados por concepto de AIU son indicativos, cada entidad territorial tiene la responsabilidad de ajustarlos y presentar el correspondiente análisis detallado, de acuerdo a sus condiciones particulares.</b>	Administración	19,00%	\$126.867.803,00
	Imprevistos	5,00%	\$33.386.264,00
	Utilidad	6,00%	\$40.063.517,00
	<b>SUBTOTAL AIU</b>	<b>30,00%</b>	<b>\$200.317.584,00</b>

<b>Costo total obra</b>	<b>\$868.042.861,00</b>
-------------------------	-------------------------

<b>Interventoría</b>	<b>\$52.044.365,00</b>
----------------------	------------------------

<b>Valor total del proyecto</b>	<b>\$920.087.226,00</b>
---------------------------------	-------------------------



**Tabla 45 Costos losa optimizada espesor 15 cm**

Capítulo/Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor parcial	Valor total	
<b>1</b>	<b>Realizar obras preliminares</b>						<b>\$ 7.855.084,00</b>
1.1	Localización y replanteo	m <sup>2</sup>	4.626,08	\$ 1.698,00	\$ 7.855.084,00		
<b>2</b>	<b>Construir la Losa optimizada</b>						<b>\$ 518.916.006,00</b>
2.1	Excavación mecánica en material común a nivel de subrasante (incluye retiro de sobrantes, transporte hasta escombrera y derecho de botadero)	m <sup>3</sup>	1387,82	\$ 30.402,00	\$ 45.271.922,00		
2.2	Conformación de la subrasante	m <sup>2</sup>	4626,08	\$ 3.272,00	\$ 15.136.534,00		
2.3	Subbase granular (incluye suministro, extendido, nivelación, humedecido y compactación).	m <sup>3</sup>	686,41	\$ 137.378,00	\$ 94.297.633,00		
2.5	Concreto de 350kg/cm <sup>2</sup> , espesor 0.15, incluye dilatación	m <sup>3</sup>	506,41	\$ 329.903,00	\$ 238.088.155,00		
2.8	Acero de refuerzo 4.200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi) para juntas de construcción	kg	6.720,67	\$ 3.757,00	\$ 25.249.557,00		
2.9	Concreto de 210 kg/cm <sup>2</sup> (3.000 psi) cuneta dimensiones 0,98 m x 0,12 m y 0,20 m de altura de sardinel	m <sup>3</sup>	185,00	\$ 325.493,00	\$ 60.216.205,00		
2.10	Bordillo prefabricado de confinamiento 0,80 m * 0,15 m * 0,35 m (incluye suministro e instalación, mortero de 0,03 m de espesor y mortero de nivelación de 2.000 psi)	m	1.000,00	\$ 40.656,00	\$ 40.656.000,00		
<b>3</b>	<b>Construir de las obras de drenaje con cajas de recolección</b>						<b>\$ 31.277.797,00</b>
3.1	Excavación manual 1,50 m * 1,50 m * 2,75 m.	m <sup>3</sup>	61,88	\$ 39.637,00	\$ 2.452.539,00		
3.2	Concreto de baja resistencia 140 kg/cm <sup>2</sup> (2.000 psi) para cajas de recolección	m <sup>3</sup>	1,13	\$ 281.618,00	\$ 316.820,00		
3.3	Concreto para caja	m <sup>3</sup>	38,41	\$ 430.156,00	\$ 16.522.105,00		

Capítulo/Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor parcial	Valor total
3.4	Acero figurado de refuerzo de 4200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi) para caja	kg	3.190,40	\$ 3.757,00	\$ 11.986.333,00	
<b>4</b>	<b>Construir las obras de drenaje con la tubería y cabezales</b>					<b>\$ 37.073.395,00</b>
4.1	Excavación manual 4,5 m * 2,1 m * 1,6 m para cabezales	m <sup>3</sup>	151,20	\$ 39.637,00	\$ 5.993.114,00	
4.2	Concreto resistencia 140 kg/cm <sup>2</sup> (1.500 psi) para solados en muros y cabezales	m <sup>3</sup>	5,14	\$ 204.358,00	\$ 1.050.107,00	
4.3	Concreto para estructura muros cabezales resistencia de 210 kg/cm <sup>2</sup> (3.000 psi)	m <sup>3</sup>	36,01	\$ 430.156,00	\$ 15.491.881,00	
4.4	Acero figurado de refuerzo de 4.200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi) para cabezal	kg	1.100,40	\$ 3.757,00	\$ 4.134.203,00	
4.5	Tubería de diámetro (36" = 0,9 m) una por cada 100 m para alcantarillas	m	10,00	\$ 1.040.409,00	\$ 10.404.090,00	
<b>Total costos directos</b>						<b>\$ 595.122.282,00</b>

<b>Los porcentajes presentados por concepto de AIU son indicativos, cada entidad territorial tiene la responsabilidad de ajustarlos y presentar el correspondiente análisis detallado, de acuerdo a sus condiciones particulares.</b>	Administración	<b>19,00%</b>	<b>\$98.994.171,00</b>
	Imprevistos	<b>5,00%</b>	<b>\$26.051.098,00</b>
	Utilidad	<b>6,00%</b>	<b>\$31.261.317,00</b>
	<b>SUBTOTAL AIU</b>	<b>30,00%</b>	<b>\$156.306.586,00</b>

<b>Costo total obra</b>	<b>\$773.658.967,00</b>
-------------------------	-------------------------

<b>Interventoría</b>	<b>\$52.044.365,00</b>
----------------------	------------------------

<b>Valor total del proyecto</b>	<b>\$825.703.332,00</b>
---------------------------------	-------------------------

**Tabla 46 Costos losa optimizada espesor 10 cm (mínimo)**

Capítulo/Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor parcial	Valor total	
<b>1</b>	<b>Realizar obras preliminares</b>						<b>\$ 7.855.084,00</b>
1.1	Localización y replanteo	m <sup>2</sup>	4.626,08	\$ 1.698,00	\$ 7.855.084,00		
<b>2</b>	<b>Construir la Losa optimizada</b>						<b>\$ 439.554.855,00</b>
2.1	Excavación mecánica en material común a nivel de subrasante (incluye retiro de sobrantes, transporte hasta escombrera y derecho de botadero)	m <sup>3</sup>	1219,02	\$ 30.402,00	\$ 45.271.922,00		
2.2	Conformación de la subrasante	m <sup>2</sup>	4626,08	\$ 3.272,00	\$ 15.136.534,00		
2.3	Subbase granular (incluye suministro, extendido, nivelación, humedecido y compactación).	m <sup>3</sup>	686,41	\$ 137.378,00	\$ 94.297.633,00		
2.5	Concreto de 350 kg/cm <sup>2</sup> , espesor 0,10 m – incluye corte de juntas	m <sup>3</sup>	337,61	\$ 329.903,00	\$ 158.727.004,00		
2.8	Acero de refuerzo 4.200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi) para juntas de construcción	kg	6.720,67	\$ 3.757,00	\$ 25.249.557,00		
2.9	Concreto de 210 kg/cm <sup>2</sup> (3.000 psi) cuneta dimensiones 0,98 m x 0,12 m y 0,20 m de altura de sardinel	m <sup>3</sup>	185,00	\$ 325.493,00	\$ 60.216.205,00		
2.10	Bordillo prefabricado de confinamiento 0,80 m * 0,15 m * 0,35 m (incluye suministro e instalación, mortero de 0,03 m de espesor y mortero de nivelación de 2.000 psi)	m	1.000,00	\$ 40.656,00	\$ 40.656.000,00		
<b>3</b>	<b>Construir de las obras de drenaje con cajas de recolección</b>						<b>\$ 31.277.797,00</b>
3.1	Excavación manual 1,50 m * 1,50 m * 2,75 m.	m <sup>3</sup>	61,88	\$ 39.637,00	\$ 2.452.539,00		
3.2	Concreto de baja resistencia 140 kg/cm <sup>2</sup> (2.000 psi) para cajas de recolección	m <sup>3</sup>	1,13	\$ 281.618,00	\$ 316.820,00		
3.3	Concreto para caja	m <sup>3</sup>	38,41	\$ 430.156,00	\$ 16.522.105,00		

Capítulo/Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor parcial	Valor total
3.4	Acero figurado de refuerzo de 4200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi ) para caja	kg	3.190,40	\$ 3.757,00	\$ 11.986.333,00	
<b>4</b>	<b>Construir las obras de drenaje con la tubería y cabezales</b>					<b>\$ 37.073.395,00</b>
4.1	Excavación manual 4,5 m * 2,1 m * 1,6 m para cabezales	m <sup>3</sup>	151,20	\$ 39.637,00	\$ 5.993.114,00	
4.2	Concreto resistencia 140 kg/cm <sup>2</sup> (1.500 psi) para solados en muros y cabezales	m <sup>3</sup>	5,14	\$ 204.358,00	\$ 1.050.107,00	
4.3	Concreto para estructura muros cabezales resistencia de 210 kg/cm <sup>2</sup> (3.000 psi)	m <sup>3</sup>	36,01	\$ 430.156,00	\$ 15.491.881,00	
4.4	Acero figurado de refuerzo de 4.200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi) para cabezal	kg	1.100,40	\$ 3.757,00	\$ 4.134.203,00	
4.5	Tubería de diámetro (36" = 0,9 m) una por cada 100 m para alcantarillas	m	10,00	\$ 1.040.409,00	\$ 10.404.090,00	
<b>Total costos directos</b>						<b>\$ 515.761.131,00</b>

<b>Los porcentajes presentados por concepto de AIU son indicativos, cada entidad territorial tiene la responsabilidad de ajustarlos y presentar el correspondiente análisis detallado, de acuerdo a sus condiciones particulares.</b>	Administración	<b>19,00%</b>	<b>\$98.994.171,00</b>
	Imprevistos	<b>5,00%</b>	<b>\$26.051.098,00</b>
	Utilidad	<b>6,00%</b>	<b>\$31.261.317,00</b>
	<b>SUBTOTAL AIU</b>	<b>30,00%</b>	<b>\$156.306.586,00</b>

<b>Costo total obra</b>	<b>\$670.489.471,00</b>
-------------------------	-------------------------

<b>Interventoría</b>	<b>\$52.044.365,00</b>
----------------------	------------------------

<b>Valor total del proyecto</b>	<b>\$722.533.836,00</b>
---------------------------------	-------------------------

**Tabla 47 Costos losa optimizada espesor 18 cm (máximo)**

Capítulo/Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor parcial	Valor total	
<b>1</b>	<b>Realizar obras preliminares</b>						<b>\$ 7.855.084,00</b>
1.1	Localización y replanteo	m <sup>2</sup>	4.626,08	\$ 1.698,00	\$ 7.855.084,00		
<b>2</b>	<b>Construir la Losa optimizada</b>						<b>\$ 566.532.697,00</b>
2.1	Excavación mecánica en material común a nivel de subrasante (incluye retiro de sobrantes, transporte hasta escombrera y derecho de botadero)	m <sup>3</sup>	1489,11	\$ 30.402,00	\$ 45.271.922,00		
2.2	Conformación de la subrasante	m <sup>2</sup>	4626,08	\$ 3.272,00	\$ 15.136.534,00		
2.3	Subbase granular (incluye suministro, extendido, nivelación, humedecido y compactación).	m <sup>3</sup>	686,41	\$ 137.378,00	\$ 94.297.633,00		
2.5	Concreto de 350 kg/cm <sup>2</sup> , espesor 0,18 m - incluye corte de juntas	m <sup>3</sup>	607,69	\$ 329.903,00	\$ 285.704.846,00		
2.8	Acero de refuerzo 4.200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi) para juntas de construcción	kg	6.720,67	\$ 3.757,00	\$ 25.249.557,00		
2.9	Concreto de 210 kg/cm <sup>2</sup> (3.000 psi) cuneta dimensiones 0,98 m x 0,12 m y 0,20 m de altura de sardinel	m <sup>3</sup>	185,00	\$ 325.493,00	\$ 60.216.205,00		
2.10	Bordillo prefabricado de confinamiento 0,80 m * 0,15 m * 0,35 m (incluye suministro e instalación, mortero de 0,03 m de espesor y mortero de nivelación de 2.000 psi)	m	1.000,00	\$ 40.656,00	\$ 40.656.000,00		
<b>3</b>	<b>Construir de las obras de drenaje con cajas de recolección</b>						<b>\$ 31.277.797,00</b>
3.1	Excavación manual 1,50 m * 1,50 m * 2,75 m.	m <sup>3</sup>	61,88	\$ 39.637,00	\$ 2.452.539,00		
3.2	Concreto de baja resistencia 140 kg/cm <sup>2</sup> (2.000 psi) para cajas de recolección	m <sup>3</sup>	1,13	\$ 281.618,00	\$ 316.820,00		
3.3	Concreto para caja	m <sup>3</sup>	38,41	\$ 430.156,00	\$ 16.522.105,00		

Capítulo/Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Valor parcial	Valor total
3.4	Acero figurado de refuerzo de 4200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi ) para caja	kg	3.190,40	\$ 3.757,00	\$ 11.986.333,00	
<b>4</b>	<b>Construir las obras de drenaje con la tubería y cabezales</b>					<b>\$ 37.073.395,00</b>
4.1	Excavación manual 4,5 m * 2,1 m * 1,6 m para cabezales	m <sup>3</sup>	151,20	\$ 39.637,00	\$ 5.993.114,00	
4.2	Concreto resistencia 140 kg/cm <sup>2</sup> (1.500 psi) para solados en muros y cabezales	m <sup>3</sup>	5,14	\$ 204.358,00	\$ 1.050.107,00	
4.3	Concreto para estructura muros cabezales resistencia de 210 kg/cm <sup>2</sup> (3.000 psi)	m <sup>3</sup>	36,01	\$ 430.156,00	\$ 15.491.881,00	
4.4	Acero figurado de refuerzo de 4.200 kg/cm <sup>2</sup> (60.000 psi) para cabezal	kg	1.100,40	\$ 3.757,00	\$ 4.134.203,00	
4.5	Tubería de diámetro (36" = 0,9 m) una por cada 100 m para alcantarillas	m	10,00	\$ 1.040.409,00	\$ 10.404.090,00	
<b>Total costos directos</b>						<b>\$ 642.738.973,00</b>

<b>Los porcentajes presentados por concepto de AIU son indicativos, cada entidad territorial tiene la responsabilidad de ajustarlos y presentar el correspondiente análisis detallado, de acuerdo a sus condiciones particulares.</b>	Administración	<b>19,00%</b>	<b>\$98.994.171,00</b>
	Imprevistos	<b>5,00%</b>	<b>\$26.051.098,00</b>
	Utilidad	<b>6,00%</b>	<b>\$31.261.317,00</b>
	<b>SUBTOTAL AIU</b>	<b>30,00%</b>	<b>\$156.306.586,00</b>

<b>Costo total obra</b>	<b>\$835.560.665,00</b>
-------------------------	-------------------------

<b>Interventoría</b>	<b>\$52.044.365,00</b>
----------------------	------------------------

<b>Valor total del proyecto</b>	<b>\$887.605.030,00</b>
---------------------------------	-------------------------

**Tabla 48 Resumen presupuesto placa huella vs losa optimizada**

Tipo pavimento	Espesor losa (cm)	Presupuesto
Placa huella	15	\$920.087.226
Losa optimizada	15	\$825.703.332
Losa optimizada (espesor mínimo)	10	\$722.333.836
Losa optimizada (espesor máximo)	18	\$887.605.030

Fuente: Elaboración del autor.

De acuerdo con la Tabla 48, se observa que al realizar una losa optimizada con las mismas características de una placa huella, teniendo en cuenta obras de drenaje, bordillos y precios, se observa un ahorro de \$94.383.894 /km, al compararla con el espesor mínimo encontrado (10 cm) se obtiene una diferencia de \$197.553.390, y finalmente al compararla con el espesor máximo encontrado en las modelaciones (18 cm), se obtiene un ahorro de \$32.482.196

## **6 Conclusiones y recomendaciones.**

En general del estudio se obtienen las conclusiones que se muestran a continuación.

### **6.1 Conclusiones Generales**

- Colombia es un país que cuenta con una gran diversidad de recursos, por tal motivo la infraestructura vial es un factor determinante en la economía, ya que estas obras ayudan a reducir los costos en las actividades de integración de los mercados, lo cual estimula el comercio regional e internacional. La facilidad de desplazamiento permite ampliar el mercado de productos, principalmente agrícolas, genera empleo, promueve la recreación, permite acceder a servicios médicos y también a una educación de mejor calidad.
- Teniendo en cuenta que actualmente la longitud de las vías de BVT asciende a cerca de 140 mil kilómetros, y que un 75% de estas se encuentran en mal estado, su mejoramiento y desarrollo constituyen un reto para el Gobierno, por lo que la búsqueda de diferentes tecnologías para ayudar a optimizar recursos,

generando alternativas de pavimento durables, de calidad y fácil de mantener, con el fin de ayudar con la economía del país, se constituye en una prioridad.

- Los métodos de diseño se deben entender como modelos que intentan predecir el comportamiento de unos materiales dados, que es necesario calibrar con base en la experiencia o con la observación de los pavimentos existentes, lo cual puede llevar a modificar los coeficientes, los exponentes, los factores de seguridad o la combinación de diferentes métodos para adecuarlos a las condiciones específicas de cada región.
- Muchas vías de BVT se encuentran alejadas de zonas aptas para la explotación de materiales, lo que hace necesario utilizar los materiales de cada región, con el fin de evitar sobre costos de transporte e impactos ambientales desfavorables. Los pavimentos de concreto representan una alternativa técnica, y pueden ser construidos con mano de obra propia de la región, con medios muy sencillos, con equipos simples, herramientas de fácil consecución y con uso de mano de obra con baja capacitación.
- El diseño de pavimentos de concreto de losas optimizadas es una tecnología novedosa que está siendo usada actualmente en países de Sur y Centro América como Chile, Perú, Honduras, Guatemala, Ecuador, Costa Rica, Colombia y Estados Unidos y se han desarrollado experiencias exitosas; por lo que el Gobierno debería analizar nuevas tecnologías que puedan llegar a ser más favorables económicamente y técnicamente para la implementación en Colombia, donde será necesario calibrar los modelos con valores de las diferentes regiones y poder llegar a normatizarla.

## **6.2 Conclusiones particulares**

- La tecnología de losas optimizadas propone reemplazar el diseño de losas de concreto tradicional, por un sistema de losas con geometría optimizada que permiten una distribución más eficiente de la carga para evitar los problemas de



agrietamiento. Para este estudio se realizaron 180 modelaciones, donde se obtuvieron 3 cartas de diseño, modificando los parámetros de clima, subbase granular, subrasante, módulo de rotura de concreto y tránsito.

- En la Tabla 49 se presentan los espesores mínimos y máximos encontrados para cada una de las cartas, siendo la carta 3 (clima cálido) la que presenta los espesores más bajos.

**Tabla 49 Resumen espesores mínimos y máximos**

Clima	Transito	Espesor mínimo (cm)	Espesor máximo (cm)
Carta 1 clima frio (8°C a 15°C)	T1 0,05<N8,2<0,1	11	15
	T2 0,1<N8,2<0,3	12,5	17
	T3 0,3<N8,2<0,5	13	18
	T4 0,5<N8,2<0,7	14	18
Carta 2 clima templado (15°C a 25°C)	T1 0,05<N8,2<0,1	10	14,5
	T2 0,1<N8,2<0,3	12	16,5
	T3 0,3<N8,2<0,5	13	17
	T4 0,5<N8,2<0,7	13	18
Carta 3 clima caliente (15°C a 25°C)	T1 0,05<N8,2<0,1	10	14
	T2 0,1<N8,2<0,3	11,5	16
	T3 0,3<N8,2<0,5	12	17
	T4 0,5<N8,2<0,7	13	17

**Fuente: Elaboración del autor.**

- De acuerdo con los resultados de las combinaciones de clima, suelo, módulo de rotura y tránsito, se observa que los espesores más bajos se encuentran en la combinación de un clima caliente, con materiales de subrasante (80 MPa) y subbase (160 MPa) de buenas características, un módulo de rotura alto (4.3 MPa), junto con un tránsito bajo (100.000 EE) llegando a obtener un espesor mínimo de 10 cm. Por el contrario, el espesor más alto se obtiene al tener un clima frio, materiales de baja rigidez de subrasante y subbase (30 y 60 MPa respectivamente), un módulo de rotura bajo (3.8 MPa) y un tránsito alto (700.000 EE), obteniendo un espesor de 18 cm, teniendo una diferencia de 8 cm, lo que equivale a un 80% de diferencia en espesores.

- Una de las problemáticas de los pavimentos de concreto es el bombeo, el cual es ocasionado cuando ingresa agua al material granular y este comienza a socavar, teniendo en cuenta que la metodología recomienda utilizar discos de corte más pequeños de los convencionales, y no sellar las juntas, es importante contar con un material granular que tenga un bajo porcentaje de finos, preferiblemente inferior al 8% tal y como lo recomienda la metodología.
- El alabeo es una de las fuentes de fisuramiento de una losa de concreto, el cual es una deformación que sufre la losa tomando una forma curvada ya sea hacia arriba o hacia abajo y se fisura al tener una carga sobre sus bordes, esto ocurre en una losa de dimensiones convencionales (4 m). Teniendo en cuenta que una losa de dimensiones optimizadas solo permite que se cargue con un set de llantas y al tener dimensiones más pequeñas (1.80 m) este fenómeno se reduce drásticamente, haciendo que las tensiones sean menores, de esta forma se prolonga la vida útil.

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta las modelaciones realizadas para los 3 diferentes climas, se observa que el espesor de la losa es poco susceptible al cambio de temperatura, observándose un cambio en 1 cm aproximadamente entre una temperatura fría a una temperatura caliente, siendo esto consecuente con la metodología, por lo tanto, el fenómeno de alabeo es mucho menor.

- Al realizar la comparación de presupuesto de una placa huella vs una losa corta con el espesor mínimo encontrado (10cm), espesor igual al de una placa huella (15 cm) y espesor máximo adoptando (18 cm), se observa un ahorro de aproximadamente \$197.553.390, \$94.383.894 y \$32.482.196 respectivamente, siendo siempre inferior al presupuesto de una placa huella, generando que esta alternativa de pavimento sea viable para la construcción de las vías de BVT. Adicional a lo anterior, es importante tener en cuenta que para la construcción de una placa huella se debe construir por etapas (cintas, vigas riostras, huella, piedra pegada, etc), lo que hace que la obra tome más tiempo, mientras que

para una losa optimizada se realiza la construcción de la losa en una sola etapa, lo que puede generar una mayor optimización de los costos.

### **6.3 Recomendaciones**

- Se recomienda realizar sobre un tramo de prueba un estudio de deterioro sobre un pavimento de dimensiones optimizadas en Colombia, realizando una validación de los deterioros y las causas, adicional realizar mediciones con un equipo deflectometro de impacto para validar la transferencia de carga en las juntas, centro de losa y esquinas, con el fin de validar el comportamiento de los pavimentos y de esta forma calibrar el modelo específico para Colombia.
- Se recomienda realizar un análisis detallado de los valores adoptados de criterios de desempeño de IRI inicial – final y escalonamiento, ya que al ser vías construidas manualmente y utilizando materiales in-situ, estos valores podría a llegar a ser más altos de los estimados en este trabajo de grado

## 7 Bibliografía.

- Acosta Ariza, M. A., & Alarcon Romero, P. A. (2017). *Las Vías Terciarias En Colombia, Una Oportunidad Para La Ingeniería Vial Y El Desarrollo Del País*. 1, 24.
- Alfonso Montejó Fonseca. (2010). *Ingeniería de Pavimentos* (Universidad Católica, Ed.).
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *AASHTO Guide for design of pavement structures*.
- Arriaga, M., Garnica, P., & Rico, A. (1998). Índice Internacional De Rugosidad En La Red Carretera De México. *Instituto Mexicano Del Transporte*, (108), 46.
- Baeza, P. D. R., & Covarrubias Vidal, J. P. (2016). Repavimentación camino La Pólvara, Ruta 60 CH en Chile, utilizando hormigón reforzado con fibra estructural y diseñado con sistema de losas de geometría optimizada. *XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*, 23. Buenos Aires, Argentina.
- Caracol Radio. (2017). Invierno afecta a más del 50% del territorio colombiano. *Nacional*. Retrieved from <http://caracol.com.co/radio/2017/05/15/nacional/14>
- Cervantes, V., & Roesler, J. (2009). *Performance of Concrete Pavements With Optimized Slab Geometry*.
- Cipriano Alberto Londoño. (2001). Diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos de concreto. In *Diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos de concreto* (Adriana Giraldo). Colombia: Editorial Piloto S.A.
- Consejo Privado de Competitividad. (2017). *Informe nacional de competitividad 2016-2017*. 360. <https://doi.org/ISSN 2016-1430>
- Covarrubias. (2011). *Documentación y Guía de Diseño*.
- Covarrubias, J. P. (2012). Diseño de losas de hormigón con geometría optimizada. *Revista de Ingeniería de Construcción*. Vol 27 No. 3 Santiago Dic 2012, Vol 27 N°3, 181 . 197. Retrieved from [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732012000300005](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732012000300005)
- Departamento de planeación nacional DNP. *Conpes 3857 lineamientos de política para la gestión de la red terciaria*. , (2016).
- Departamento Nacional de Planeación. *Proyecto Tipo. Mejoramiento de Vías Terciarias Mediante el Uso de Placa Huella*. , (2016).
- El Tiempo, economía y negocios. (2017, May 30). *Solo 25 por ciento de vías terciarias del país están en buen estado*. Retrieved from <http://www.eltiempo.com/economia/sectores/vias-terciarias-de-colombia-en-mal-estado-93430>

- Gobierno Nacional. ACUERDO FINAL PARA TERMINACIÓN DEL CONFLICTO Y LA CONSTRUCCIÓN DE UNA PAZ ESTABLE Y DURADERA. , 24-8-16 § (2016).
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (Second edi). Pearson Prentice Hall.
- Hugo Alexander Rondón Quintana, & Fredy Alberto Reyes Lizcano. (2015). *Pavimentos, materiales, construcción y diseño*. Bogotá.
- ICPC-, I. colombiano de P. de C.-. (1991). *Pavimentos de concreto, manual de diseño*.
- Instituto Nacional de vias. *Guía de diseño de Pavimentos con Placa - Huella*. , (2015).
- Instituto Nacional de Vias. (1998a). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. capítulo 6*.
- Instituto Nacional de Vias. (1998b). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. capítulo 6* (p. 5). p. 5. INVIAS.
- Instituto Nacional de Vias. (2007). *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*.
- Instituto Nacional de Vias. *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos flexibles*. , 2 § (2008).
- Instituto Nacional de Vias. *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. , (2008).
- INVIAS. (2006). Manual para la inspección visual de pavimentos rígidos. 201.230.195.242, 58. Retrieved from [ftp://201.230.195.242/MANUALES\\_OBRAS\\_INFRAESTRUCTURA\\_VIAL/MANUALES\\_DISEÑOS\\_CARRETERAS/10\\_MANUALES\\_INSPECCION\\_OBRAS\\_VIALES/Manual\\_Inspeccion\\_Visual\\_PUENTES\\_y\\_PONTONES.pdf](ftp://201.230.195.242/MANUALES_OBRAS_INFRAESTRUCTURA_VIAL/MANUALES_DISEÑOS_CARRETERAS/10_MANUALES_INSPECCION_OBRAS_VIALES/Manual_Inspeccion_Visual_PUENTES_y_PONTONES.pdf)
- INVIAS. (2013). *Sección 400 - Concreto Hidráulico*.
- Khazanovich, Lev &, L. (1994). *Structural analysis of multi-layered concrete pavement systems*.
- Khazanovich, L. (2001). *Development of Rapid Solutions for Prediction of Critical Continuously Reinforced Concrete Pavement Stresses*.
- Korenev, B. G., and Chernigovskaya, E. I. (1962). *Analysis of Plates on Elastic Foundation*.
- La Nación. (2017a). Vías terciarias, trochas de la paz. Retrieved from La Nación website: <https://www.lanacion.com.co/2017/06/07/vias-terciarias-trochas-de-la-paz/>
- La Nación. (2017b). Vías terciarias, trochas de la paz. Retrieved from <https://www.lanacion.com.co/2017/06/07/vias-terciarias-trochas-de-la-paz/>
- Mauricio Salgado Torres. (2014). Conclusiones de los Pavimentos de Losas Cortas Construidos en Latinoamérica. *Pre-XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*. Argentina: PRE-XVII Congreso Argentino de Vialidad y tránsito.

- Ministerio de transporte, Instituto Nacional de Vías, S. de apoyo tecnico. (2007). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito*. 1–10.
- Ministerio de Transporte de Colombia. (2004). *Resolucion\_4100\_2004.pdf* (pp. 1–9). pp. 1–9. Retrieved from <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=241>
- Ospina Ovalle, G. (2016). El papel de las vías secundarias y los caminos vecinales en el desarrollo de Colombia. *Revista de Ingeniería; Núm. 44 (2016): Revista de Ingeniería*, 20–27. Retrieved from <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/911>
- Portland Cement Association. (1984). *Thickness Design for Concrete highway and Street Pavements*.
- Sanchez, I., & de Solmniac, H. (1989). “El IRI : un indicador de la regularidad superficial.” *Revista de Ingeniería de Construcción*, 6, 1–16. Retrieved from <https://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/download/320/264>
- TCPavements. (n.d.). TCPavements. Retrieved from <http://www.tcpavements.cl/esp/home>
- Westergaard, H. M. (1927). *Theory of Concrete Pavement Design. Proceedings of the Highway Research Board*.
- Zamora Fandiño, N., & Barrera Reyes, O. L. (2012). Diagnóstico de la infraestructura vial actual en Colombia. Retrieved from <http://repository.ean.edu.co/handle/10882/3405>