



UNIVERSIDAD DE VALPARAISO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

Optimización del Diseño Estructural de Pavimentos
Flexibles en Función de una Zonificación Territorial
para Métodos Empíricos y Empíricos-Mecanicistas.

Por

Diego Andrés Díaz Orellana

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Sr. Mauricio Pinto Quintana

26 de Enero del 2017

*“Aprende a pararte después de cada error y saca lo mejor de ello”.
“Respetar y entregar lo mejor de ti, que todo tiene su recompensa”.*

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo a mis padres que me forjaron para ser lo que soy hoy, saber sacar lo bueno de los malos momentos que te puede entregar la vida y apreciar el más mínimo gesto que alguien te pueda entregar.

A mi hermana con la cual forje la paciencia pero por sobre todo la cordura para saber decir las cosas en su momento.

A los compañeros de carrera, los que terminamos y los que se fueron en el camino. Todos me entregaron alguna enseñanza, pero por sobre todo la humildad.

A mi cosa que en estos últimos años de carrera, me escucho y ayudo en momentos de duda, ese abrazo sincero que te entrega lo mejor de cada persona.

Y por último a mi cachorro, mi regalón, el taimado...mi hijo el cual me dio las fuerzas en cada momento no solo para darle lo mejor a él, sino que también inconscientemente con su llegada y distintas etapas de la vida me enseñó a saber que para entregar lo mejor a cada persona...uno es el que tiene que estar bien.

INDICE

LISTA DE TABLAS.....	6
LISTAS DE FIGURAS.....	7
CAPITULO I.....	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
OBJETIVOS.....	12
ALCANCES.....	13
METODOLOGIA.....	14
CAPITULO II.....	15
2. ANTECEDENTES.....	15
2.1 Método AASHTO.....	15
2.1.2 Tránsito.....	16
2.1.3 Confiabilidad y variabilidad de diseño.....	16
2.1.4 Temperatura.....	17
2.1.5 Caracterización de los materiales componentes del pavimento.....	18
2.1.6 Capacidad estructural del pavimento.....	19
2.2 Método Shell.....	21
2.2.1 Tránsito.....	22
2.2.2 Temperatura.....	22
2.2.3 Confiabilidad y variabilidad de diseño.....	23
2.2.4 Caracterización de los materiales componentes del pavimento.....	23
2.3 Método Sudafricano.....	26
2.3.1 Tránsito.....	27
2.3.2 Temperatura.....	27
2.3.3 Confiabilidad y variabilidad de diseño.....	28
2.3.4 Caracterización de los materiales componentes del pavimento.....	28
CAPITULO III.....	35
3. DATOS DE ENTRADA.....	35
3.1 Variable de Niveles de Tránsito.....	35
3.2 Temperatura de diseño.....	36
3.3 Porcentaje de %CBR en subrasante.....	37
3.4 Estructura Asfáltica.....	37
CAPITULO IV.....	38
4. VERIFICACION DE DISEÑO.....	38
4.1 Método de diseño AASHTO.....	39
4.1.1 Parámetros de entrada.....	39
4.1.2 Resultado de diseño de espesores.....	40

4.2	Método de diseño Shell.....	42
4.2.1	Parámetros de entrada.....	42
4.2.2	Resultados de diseño de espesores.....	44
4.3	Método de diseño Sudafricano.....	45
4.3.1	Parámetros de entrada.....	45
4.3.2	Resultados de diseño de espesores.....	48
CAPITULO V.....		50
5.	SENSIBILIDAD DE PARAMETROS DE DISEÑO.....	50
5.1	Método AASHTO.....	50
5.2	Método Shell.....	56
5.3	Método Sudafricano.....	61
CAPITULO VI.....		67
6.	COMPARACION DE DISEÑOS.....	67
6.1	Resultados obtenidos en Zona 1.....	67
6.2	Resultados obtenidos en la Zona 2.....	73
6.3	Resultados obtenidos en la Zona 3.....	78
CAPITULO VII.....		84
7.	PLANILLAS DE DISEÑO.....	84
CAPITULO VIII.....		89
CONCLUSIONES.....		89
COMENTARIOS.....		90
Bibliografía.....		91

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 - Categorías de carreteras Sudafricanas.....	26
Tabla 2.2 - Exponente de daño relativo de acuerdo al tipo de pavimento [1].	27
Tabla 2.3 - Categoría de carretera método de diseño Sudafricano [9].....	28
Tabla 2.4 - Características de materiales asfálticos estándar utilizado por el Manual Sudafricano [9].....	28
Tabla 2.5 - Características de materiales granulares estándar utilizado por el Manual Sudafricano [9].....	28
Tabla 2.6 - Características de materiales de subrasante estándar utilizado por el manual Sudafricano [9].	29
Tabla 2.7 - Propiedades específicas de materiales de subrasante estándar utilizado por el Manual Sudafricano [11].	29
Tabla 2.8 - Coeficientes de regresión para las condiciones terminales de falla [11].....	30
Tabla 2.9 - Propiedades específicas de materiales de subrasante estándar utilizado por el Manual Sudafricano [11].	30
Tabla 2.10 - Módulos elásticos sugeridos por Freeme.....	32
Tabla 2.11 - Módulos elásticos sugeridos por Jordaan.....	32
Tabla 2.12 - Coeficientes de regresión para las condiciones terminales de falla [11].....	34
Tabla 3.1 - Tránsito de Estudio.....	35
Tabla 3.2 – Zonificación de Temperaturas Medias Mensuales [2].	36
Tabla 3.3 - Parámetros de Diseño para estructura asfáltica.....	37
Tabla 4.1 - Nivel de confianza y valor del S_0 [2].....	39
Tabla 4.2 - Índice de confiabilidad recomendados [2].	39
Tabla 4.3 - Coeficientes estructurales para las capas de pavimento [2].	40
Tabla 4.4 - Valores de TMAPA para diseño de cada zona [2].....	40
Tabla 4.5 – Espesores de Asfalto (mm) para Método AASHTO en Zona 1.	41
Tabla 4.6 - Espesores de Asfalto (mm) para Método AASHTO en Zona 2.	41
Tabla 4.7 - Espesores de Asfalto (mm) para Método AASHTO en Zona 3.	41
Tabla 4.8 - Temperatura de diseño Método Shell [6].....	42
Tabla 4.9 - Parámetros de asfalto.....	43
Tabla 4.10 - Parámetros de la mezcla.....	43
Tabla 4.11 - Características de capas granulares [2].	43
Tabla 4.12 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SHELL en Zona 1.	44
Tabla 4.13 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SHELL en Zona 2.	45
Tabla 4.14 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SHELL en Zona 3.	45
Tabla 4.15 - Temperatura de diseño para método Sudafricano.....	46
Tabla 4.16 - Características de materiales utilizados para la subrasante [9].	46
Tabla 4.17 - Características de materiales utilizados en las capas base y subbase [9].	47
Tabla 4.18 - Módulos elásticos sugeridos por el Método Sudafricano [8].	47
Tabla 4.19 - Confiabilidad de diseño recomendada [10].	47
Tabla 4.20 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SUDAFRICANO en Zona 1.	48
Tabla 4.21 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SUDAFRICANO en Zona 2.	49
Tabla 4.22 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SUDAFRICANO en Zona 3.	49
Tabla 7.1 - Espesores mínimos (mm) para los diferentes métodos en Zona 1.....	84
Tabla 7.2 - Espesores mínimos (mm) para los diferentes métodos en Zona 2.....	85
Tabla 7.3 - Espesores mínimos (mm) para los diferentes métodos en Zona 3.....	85

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ilustración del diseño óptimo [3].	17
Figura 2.2 - Bases de diseño Método Shell [6].	21
Figura 2.3 - Monograma W del Manual Shell, factor ponderado de temperatura [1].	22
Figura 2.4 - Parámetros críticos Método Sudafricano [8].	26
Figura 5.1 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.	51
Figura 5.2 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.	51
Figura 5.3 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.	52
Figura 5.4 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.	52
Figura 5.5 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.	53
Figura 5.6 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.	53
Figura 5.7 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.	54
Figura 5.8 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.	54
Figura 5.9 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.	55
Figura 5.10 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.	56
Figura 5.11 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.	57
Figura 5.12 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.	57
Figura 5.13 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.	58
Figura 5.14 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.	58
Figura 5.15 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.	59
Figura 5.16 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.	59
Figura 5.17 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.	60
Figura 5.18 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.	60
Figura 5.19 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.	62
Figura 5.20 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.	62
Figura 5.21 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.	63
Figura 5.22 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.	63
Figura 5.23 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.	64

Figura 5.24 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.	64
Figura 5.25 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.	65
Figura 5.26 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.	65
Figura 5.27 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.	66
Figura 6.1 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.	68
Figura 6.2 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.	68
Figura 6.3 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.	69
Figura 6.4 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.	69
Figura 6.5 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.	70
Figura 6.6 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.	70
Figura 6.7 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.	71
Figura 6.8 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.	71
Figura 6.9 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.	72
Figura 6.10 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.	73
Figura 6.11 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.	73
Figura 6.12 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.	74
Figura 6.13 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.	74
Figura 6.14 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.	75
Figura 6.15 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.	75
Figura 6.16 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.	76
Figura 6.17 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.	76
Figura 6.18 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.	77
Figura 6.19 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.	78
Figura 6.20 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.	79
Figura 6.21 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.	79
Figura 6.22 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.	80
Figura 6.23 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.	80

Figura 6.24 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.	81
Figura 6.25 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.	81
Figura 6.26 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.	82
Figura 6.27 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.	82
Figura 7.1 - Cartilla de diseño de espesores asfálticos para zona 1.	86
Figura 7.2 - Cartilla de diseño de espesores asfálticos para zona 2.	87
Figura 7.3 - Cartilla de diseño de espesores asfálticos para zona 3.	88

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día todo diseño de pavimentos flexibles en el área de la vialidad en Chile se guía por el “Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas”, la cual se rige por la “Guía de diseño AASHTO of 93” basado en un método empírico.

Mundialmente en el diseño de pavimentos flexibles existen principalmente tres enfoques, éstos son el método empírico, mecanicista y el empírico-mecanicista. Todos estos enfatizan la diferencia de las características presentes en el pavimento entre inicio y el término de la vida de diseño, debido a la carga que genera el tránsito junto a factores ambientales. Estos generan la disminución de las características físicas y funcionales del pavimento, los que ocasionan la pérdida del confort y seguridad experimentada por el usuario de una determinada vía.

Por lo tanto, considerando que cada metodología aplica de diferente forma los parámetros antes mencionados se deduce que la estructuración del pavimento como la funcionalidad a lo largo de su vida útil de diseño puede variar considerablemente dependiendo de las características propias de la zona en estudio.

Particularmente se ha demostrado en diversos estudios que dentro de todos los factores de diseño, el factor temperatura es el parámetro que más afecta las propiedades del concreto asfáltico, este factor a diferencia del diseño de la Guía AASHTO 93, el Manual De Carreteras lo incluye dentro de su diseño, para esto recurre al factor Temperatura Media Anual Ponderada del Aire (TMAPA), este se calcula a través de las Temperaturas Medias Mensuales del Aire (TMMA). Por lo cual no entrega una confiabilidad de la variación que pueda existir con este parámetro y más aun considerando la diferencia de climas que existen a lo largo de nuestro país.

El método Shell de diseño de pavimentos flexibles empírico-mecanicista, se basa en modelos matemáticos que relacionan datos de entrada (como las cargas de tránsito, clima, propiedades de las capas que componen al pavimento, etcétera) con la respuesta del pavimento, tensiones y deformaciones. Estas respuestas en conjunto con observaciones realizadas en terreno, se utilizan para predecir el fin de la vida de diseño de la carpeta asfáltica. Este Método de Diseño al contar con un gran número de parámetros de entrada, se transforma en un tipo de diseño muy complejo, es por esto que el manual Shell adoptó el uso de una serie de cartillas de diseño. Las cartillas se construyeron mediante la combinación de distintos espesores, propiedades de los materiales que componen la estructura de pavimento, distintas cargas externas (como la temperatura) y números de ejes equivalentes estándar esperados durante la vida de diseño.

La temperatura de pavimentos puede afectar la estabilidad de la superficie. El diseñador siempre debe considerar las condiciones climáticas y evitar el uso de materiales sensibles a la temperatura y exceso de agua en condiciones adversas como lo enfatiza muy bien el método empírico-mecanicista Sudafricano, la cual divide sus zonas tanto por temperatura como por efectos de la humedad, evitando así la potencial sobreestimación de espesores en localidades que presentan bajas temperaturas de servicio.

Además complementando que el método empírico-mecanicista se enfoca en el comportamiento estructural de cada uno de los materiales que componen las distintas capas del pavimento y analiza la respuesta que tendrá frente a cargas aplicadas (ruedas) y distintas condiciones climáticas, lo que permite predecir la forma en que el pavimento puede fallar.

Por lo anterior, se propone realizar el diseño para estructuras de pavimentos flexibles con una vida útil de diseño como parámetro de comparación para los diferentes métodos mencionados, con la finalidad de determinar el método óptimo a emplear en cada zona de estudio definida a lo largo de Chile de acuerdo a rangos de temperaturas.

OBJETIVOS

General

- Proponer una optimización de diseño de pavimentos flexibles entre un método empírico y dos empírico-mecanicistas para distintas zonas del territorio chileno definidas de acuerdo a rangos de temperaturas medias anuales.

Específicos

- Diseñar las estructuras de pavimentos para los diferentes métodos de diseño en cada zona de estudio buscando la estructuración más óptima, variando los diferentes parámetros, tales como temperatura, CBR subrasante y nivel de tránsito.
- Establecer zonas características para la implementación de las diferentes metodologías, de acuerdo a rangos de temperaturas medias anuales correspondientes a cada lugar del territorio nacional.
- Proponer cartillas de diseño con espesores por capa requeridos bajo diferentes niveles de tránsito y CBR subrasante, en las distintas zonas establecidas.
- Analizar los diferentes diseños de estructura de pavimento bajo las diferentes metodologías con la finalidad de proponer el diseño más económico según la zona en estudio.

ALCANCES

Los alcances para este Trabajo de Título son:

- El diseño se efectuará a pavimentos flexibles utilizando como parámetro de comparación que todos cumplan la vida útil de 20 años.
- La cantidad de diseños estructurales va a estar controlado por los métodos de diseños, los cuales estarán subdivididos por las zonas de análisis que a su vez serán categorizados por niveles de tránsito, %CBR de la subrasante y espesores granulares.
- Las zonas de estudio van a estar definidas de acuerdo a rangos de temperaturas medias anuales ponderadas, definidas en el Manual de Carreteras Volumen 3, en las cuales los resultados muestren diferencias significativas entre unas y otras.
- Se diseñará utilizando 3 métodos de diseño de pavimentos flexibles, uno de ellos será el método empírico AASHTO 93 que se basa el Manual de Carreteras y los otros dos métodos son empírico-mecanicistas (Método Shell y Método Sudafricano).

Se analizarán los parámetros de diseño para cada uno de los métodos.

- Los parámetros y variables que condicionan el diseño como la temperatura, ejes equivalentes, entre otros, corresponden a datos obtenidos en Chile. Si existe un método en que las variables no se puedan adoptar a condiciones correspondientes a otras latitudes, se optará por las variables que más se asemejen al territorio nacional.
- Para el diseño se utilizará los softwares o planillas de diseño correspondiente a cada método de diseño; en este caso, para el diseño con método Shell se ocuparán las subrutinas BANDS, BISAR y SPDM, mientras que para el método Sudafricano se utilizará el software RUBICON y para el diseño con AASHTO 93 se aplicará la planilla PAVIVIAL.

METODOLOGIA

- Revisión bibliográfica: En esta etapa se realizará una búsqueda exhaustiva de información para el diseño de pavimentos flexibles para los distintos métodos de diseño (empírico y empírico-mecanicista) y metodologías de análisis comparativos.
- Estudio y aplicación del método de diseño AASHTO 93 y los 2 métodos empírico-mecanicista, Shell y Sudafricano.
- Recolección y elección de parámetros de entrada utilizados por los métodos: cada método necesita la elección de distintos parámetros de entrada, un ejemplo de esto es la influencia del factor clima en los distintos métodos de diseño.
- Utilización de softwares de diseño correspondientes a cada método que son utilizados para el diseño de pavimentos, para el diseño con método Shell se ocuparán las subrutinas BANDS, BISAR y SPDM, para el método Sudafricano se utilizará el software RUBICON y para el diseño con AASHTO se aplicará la planilla PAVIVIAL.
- Diseño de pavimentos de acuerdo a los tres métodos: Para cada diseño de estructura de pavimento se diseñara usando una metodología empírica (AASHTO 93) y dos metodologías empíricas-mecanicistas (Método Shell y Método Sudafricano).
- Desarrollo de una metodología de comparación, cumpliendo que las diferentes estructuras cumplan con la cantidad de años de vida útil. En este punto se relacionará los resultados obtenidos de cada uno de los métodos.
- Efectuar un análisis de sensibilidad para cada método, para determinar cómo afecta la variación de los parámetros de diseño en la estructura del pavimento, a nivel estructural.
- Análisis de resultados: se realizará un análisis comparativo de los resultados obtenido para cada metodología, de acuerdo a lo obtenido en el análisis de sensibilidad para cada método.

CAPITULO II

2. ANTECEDENTES.

A partir de un trabajo de título realizado por la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Valparaíso titulado “Comparación Técnica y Económica en el Diseño de Pavimentos Flexibles por medio de los Métodos AASHTO, Shell y Sudafricano” [1], nace una inquietud con respecto a si el método de diseño de pavimentos flexibles actualmente implementado en Chile es óptimo a lo largo de todo su territorio.

Por un lado, es sabido que los métodos de diseño empíricos están muy influenciados por las características del lugar donde se emplaza un proyecto, por lo que es necesario realizar alcances y modificaciones en los parámetros utilizados en las ecuaciones de diseño para adoptarlas en lugares diferentes a los de su origen. El Manual de Carreteras sigue estas recomendaciones, incluyendo cambios en las ecuaciones de diseño destinados a ajustarse mejor a la realidad nacional [2].

A su vez los métodos empíricos-mecanicistas pretenden tener un enfoque más científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, ante las acciones del clima y del tránsito vehicular. Esto es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los materiales se conocen, y se pueden determinar en laboratorio o en campo. Esta metodología nos permitiría la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por ende, aumentar en gran medida la confiabilidad de nuestros diseños.

Y además al saber que en las ecuaciones de diseño influyen una variedad de parámetros como las sollicitaciones de tránsito, propiedades mecánicas y físicas de los materiales y las condiciones climáticas, todas estas influyen el comportamiento futuro del pavimento [4].

Entonces al observar la diferencia que existe en los resultados del trabajo de título a nivel de espesores de capa de asfalto entre el método AASTHO con los métodos Shell y Sudafricano, se continua la investigación ampliando los parámetros de entrada como temperatura, nivel de tránsito, características de los materiales, etcétera, comparando los espesores de capa de asfalto a través de un análisis de sensibilidad.

Para esto tenemos que tener claro la metodología de diseño implementada en cada método que utilizaremos, los cuales se describen a continuación.

2.1 Método AASHTO.

El método de diseño que provee la guía de diseño AASHTO 93 se basan en la obtención de niveles de tránsito correspondiente a los niveles terminales de servicialidad, en función a las características físicas de la estructura de pavimento tales como las propiedades de los materiales, características de drenaje, medio ambiente, entre otras. Estas ecuaciones fueron desarrolladas de forma empírica, mediante observaciones de terreno realizadas en la carretera de prueba [3].

La ecuación de diseño correspondiente a pavimentos flexibles se muestra a continuación:

$$EE = (NE + 25,4)^{9,36} \times 10^{(-16,40+ZR \times S0)} \times M_R^{2,32} \times [(p_i - p_f)/(p_f - 1,5)]^{1/\beta} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$\beta = 0,40 + [97,81/(NE + 25,4)]^{5,19}$$

Dónde

EE: Ejes equivalentes de 80 KN acumulados durante la vida de diseño.

NE: Numero estructural (mm).

NE: $a_1 \times h_1 + a_2 \times h_2 \times m_2 + a_3 \times h_3 \times m_3$.

a_1, h_1 : Coeficiente estructural y espesor (mm) de cada una de las capas asfálticas o tratadas que componen el pavimento. Los subíndices 2 y 3 representan las capas granulares no tratadas.

m_1, m_2 : Coeficiente de drenaje de las capas no tratadas (bases y subbases granulares).

Z_r : Coeficiente estadístico que depende del nivel de confianza que se adopte.

S_0 : Desviación estándar del error combinado de todas las variables que intervienen en el modelo.

M_R : Modulo resiliente del suelo de la subrasante (MPa).

p_i, p_f : Índice de servicialidad inicial y final respectivamente.

2.1.2 Tránsito.

Para que un pavimento cumpla con las expectativas de diseño a lo largo de su vida útil, es necesaria una adecuada modelación del volumen de tránsito como una correcta elección de ejes equivalentes a lo que se verá expuesta una determinada vía.

El eje equivalente es un parámetro de diseño que representa la carga que genera el deterioro del pavimento, la cual representa el peso del vehículo, potencia, capacidad de carga entre otras características.

El método de diseño AASHTO establece un procedimiento que transforma los diferentes tipos y pesos de eje que circulan por una vía a un patrón simple de rueda doble de 80 KN de peso, este factor representa el número de repeticiones de cualquier configuración de ejes necesarios para desarrollar la misma reducción de PSI de un eje de 80 KN [3], esta ecuación se describe a continuación.

$$\text{Factor Eje Equivalente} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de ejes de } \times \text{ peso (kN) que causan una determinada pérdida de servicialidad.}}{\text{N}^\circ \text{ de ejes de 80 (kN) que causan la misma pérdida de servicialidad.}}$$

Ecuación 2.2

Los ejes equivalentes acumulados durante la vida útil del pavimento son los que condicionan ciertos espesores a la estructura de pavimento.

2.1.3 Confiabilidad y variabilidad de diseño.

Estos parámetros están sujetos a una variabilidad que se debe tener en cuenta a la hora del diseño, debido a que pueden existir diferencias entre las mediciones de los parámetros que se definen en el diseño con los valores que se obtienen en terreno [4]. Es por estas incertidumbres que el diseñador

debe incluir factores de seguridad en el diseño. La guía AASHTO propone el factor confiabilidad, la cual se define como la probabilidad que el diseño de una sección de pavimento se desempeñe satisfactoriamente para el tráfico y condiciones ambientales durante el período de diseño [3], esta se define como el nivel de confiabilidad (R).

Los valores adoptados en Chile se basan tanto en los errores de predicción de la proyección del tránsito y el coeficiente de variación de los suelos de la subrasante, debido a que estos factores son considerados por el Manual de Carreteras como los factores que más afectan la servicialidad del pavimento [1].

La elección del nivel de confianza depende principalmente del nivel proyectado de uso para una estructura, si una vía es solicitada por grandes flujos de tránsito es indeseable tener que cerrar o restringir el tránsito para su reparación, por el contrario si una vía presenta bajos volúmenes de tránsito se puede correr más riesgo para una posterior reparación o mantención [3].

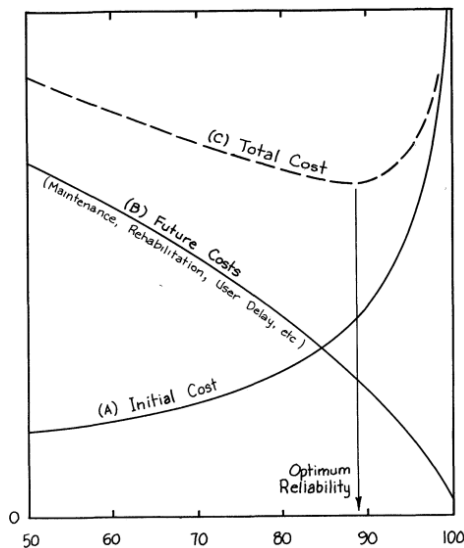


Figura 2.1 - Ilustración del diseño óptimo [3].

Este análisis se utiliza para obtener los valores de confiabilidad dados por la AASHTO y están basados en experiencias pasadas, en relación al estudio de distintos pavimentos en servicio.

2.1.4 Temperatura

Este parámetro es uno de los que más influye en las propiedades del asfalto [5]. El Manual De Carreteras Volumen 3 lo incluye dentro de su diseño, para esto recurre al factor Temperatura Media Anual Ponderada del Aire (TMAPA), este se calcula a través de las Temperaturas Medias Mensuales del Aire (TMMA).

Para el cálculo de la TMAPA se debe contar con la estadística de una estación no menor a 10 años del promedio de TMMA en la zona donde se emplazará el camino. Se separa las estadísticas por mes y se determina un factor de ponderación (W_i) para cada mes, mediante la siguiente ecuación:

$$TMMA(^{\circ}C) = 20,348 + 17,5683 \times \log W_i \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Finalmente se introduce el promedio del factor de ponderación (W_i) en la Ecuación 2.3 y se obtiene el valor de TMAPA.

2.1.5 Caracterización de los materiales componentes del pavimento.

2.1.5.1 Subrasante.

Caracterización del material.

El método de diseño AASHTO caracteriza los suelos de la subrasante mediante el módulo resiliente (M_R).

Este módulo se denomina al comportamiento resiliente (elástico), es decir que luego de que la estructura de pavimento alcanza deformaciones permanentes por la aplicación de carga y descarga inducida por la aplicación de una carga móvil (rueda), las posteriores cargas tienen una total recuperación de la deformación [5].

Las pruebas de laboratorio deben representar adecuadamente las condiciones de tensión y humedad más desfavorable al cual se verá expuesto la estructura de pavimento. Ya que este parámetro se ve muy influenciado por las condiciones que está expuesto el material, las que son principalmente la humedad, las tensiones recibidas por las capas y las propiedades de las capas adyacentes [3].

Cabe destacar que no se deben aplicar valores mínimos o conservadores del módulo resiliente en el diseño, debido a que en el factor confiabilidad ya incluye esta variabilidad en el diseño [1].

Capacidad estructural.

El procedimiento para la obtención del módulo resiliente depende del tipo de material, el diseñador deberá considerar el comportamiento de este para la aplicación de distintos ensayos de laboratorio para la obtención del módulo resiliente. Por lo cual surgen correlaciones para la obtención de este módulo mediante otros ensayos más comúnmente utilizados, como por ejemplo el ensayo CBR, para estos propósitos el Manual de Carreteras considera para obtener el módulo resiliente de la capa de la subrasante las ecuaciones 2.4 y 2.5.

$$M_R(MPa) = 17,6 (CBR)^{0,64} \text{ para } CBR < 12\% \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$M_R(MPa) = 22,1 (CBR)^{0,55} \text{ para } 12 \leq CBR < 80\% \quad \text{Ecuación 2.5}$$

2.1.5.2 Materiales de la capa base y subbase.

Caracterización del material.

Los materiales de base y subbase preferentemente se deben caracterizar a través del módulo elástico, para las bases y subbases no tratadas este valor se debe obtener por medio del ensayo AASHTO T 294 – 92.

Capacidad estructural.

La versión de la guía AASHTO de 1993 enfatiza la conveniencia de asignar un coeficiente estructural adecuado para cada capa del pavimento. El coeficiente estructural depende directamente del módulo elástico de la capa granular. Los ensayos de laboratorios para determinar el módulo elástico requiere de equipos muy especializados, de manera que en la mayoría de los casos no resulta práctico su utilización, por lo cual, las oficinas de diseño optan por obtener este módulo a partir de correlaciones en función de resultados de ensayos más comunes. Los coeficientes estructurales de bases y subbases no tratadas se pueden estimar de igual forma con la aplicación de ensayos CBR, mediante las siguientes correlaciones.

Coeficiente estructural de bases granulares.

$$a_2 = 0,032 \times (CBR)^{0,32} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Coeficiente estructural para subbases granulares

$$a_3 = 0,058 \times (CBR)^{0,19} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

2.1.5.3 Materiales asfálticos.

Caracterización del material.

Para la obtención de la capacidad estructural del pavimento se debe obtener el módulo elástico de la mezcla asfáltica, para esto es necesario la realización del ensayo ASTM 4123 o ASTM C 469. Alternativamente es posible obtener la capacidad estructural a través de ensayos de estabilidad de Marshall.

Capacidad estructural de la capa asfáltica.

Para el uso de este procedimiento de diseño, la capacidad estructural de la capa de asfalto se debe representar por un coeficiente de capa (a_1). Las siguientes relaciones permiten estimar este coeficiente en función del módulo elástico y estabilidad de Marshall.

$$a_1 = 0,0052 \times E^{0,555} \quad E \text{ en MPa} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

$$a_1 = 0,0078 \times EM^{0,441} \quad EM: \text{Estabilidad de Marshall en N} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

2.1.6 Capacidad estructural del pavimento.

La caracterización de los materiales es a través de los módulos de resiliencia (M_R) y elásticos (E), si bien debería ser este el parámetro necesario para representar la capacidad estructural de cada capa, es todavía necesario identificar los correspondientes coeficientes de capa, debido a que el diseño de pavimentos por el método AASHTO 93 requiere de este factor para el diseño de pavimentos [3].

Los coeficientes estructurales de cada capa (a_i) son los encargados de representar la capacidad relativa a la unidad de espesor de una determinada capa de pavimento, los cuales son (a_1) que

representa el coeficiente estructural para el asfalto, (a_2) para la capa base y (a_3) para la capa subbase.

Los coeficientes de capas (a_i) en conjunto con los coeficientes de drenaje (m_i) componen lo que se denomina el número estructural (NE). Este representa un número abstracto que representa la capacidad resistente para una combinación de las capacidades de soporte de las distintas capas del pavimento.

$$NE(mm) = a_1 \times h_1 + a_2 \times h_2 \times m_2 + a_3 \times h_3 \times m_3 \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Dónde:

a_1, h_1 = Coeficiente de capa y espesor de la capa de concreto asfáltico.

a_2, h_2, m_3 = Coeficiente de capa, espesor y coeficiente de drenaje de la capa base.

a_3, h_3, m_3 = coeficiente de capa, espesor y coeficiente de drenaje de la capa subbase.

2.1.6.1 Número estructural mínimo (NE_A) de las capas asfálticas.

El coeficiente estructural mínimo de la capa asfáltica va a estar definido por el factor de temperatura TMAPA junto con las solicitaciones de tránsito y el módulo resiliente de la subrasante. Para esto es necesario ingresar a los gráficos dispuestos por el Manual de Carreteras, se debe destacar que el programa de diseño PAVIVIAL contiene subrutinas que calculan directamente este factor.

$$NE_A(mm) = \sum a_i \times h_i \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Dónde:

a_i = Coeficiente estructural de la capa asfáltica de orden i .

h_i = Espesor (mm) de la capa asfáltica de orden i .

2.2 Método Shell.

El método de diseño de pavimentos flexibles del Manual de Diseño Shell pertenece a la metodología empírico-mecanicista, éste se basa en modelos matemáticos que relacionan datos de entrada (como las cargas de tránsito, clima, propiedades de las capas que componen al pavimento, etcétera) con la respuesta del pavimento, tensiones y deformaciones. Estas respuestas en conjunto con observaciones realizadas en campo, se utilizan para predecir el fin de la vida de diseño de la carpeta asfáltica [1].

El objetivo del diseño es estimar los espesores necesarios para soportar la carga de tránsito durante la vida de diseño, donde se deberá evitar esfuerzo excesivo de compresión en la subrasante, para evitar deformaciones permanentes que ocasionen deformaciones en la superficie de la estructura de pavimento, tensión horizontal desmedida en las capas de asfalto y deformaciones y tensiones en cada capa de la base cementada, por consecuencia la deformaciones en la capa de asfalto debido a las deformaciones de cualquier capa individual.

El Método de Diseño Shell al contar con un gran número de parámetros de entrada, se transforma en un tipo de diseño muy complejo, es por esto que el manual adopta el uso de una serie de cartillas de diseño [4]. Estas se construyeron mediante la combinación de distintos espesores, propiedades de los materiales que componen la estructura de pavimento, distintas cargas externas (como la temperatura) y números de ejes equivalentes estándar esperados durante la vida de diseño.

La estructura de pavimento se componen generalmente por tres capas, la primera representa todos los materiales ligados (capa asfalto), la segunda capa representada por la capa base y subbase (las cuales se consideran como una sola capa) y por último la subrasante, como se aprecia en la figura 2.2.

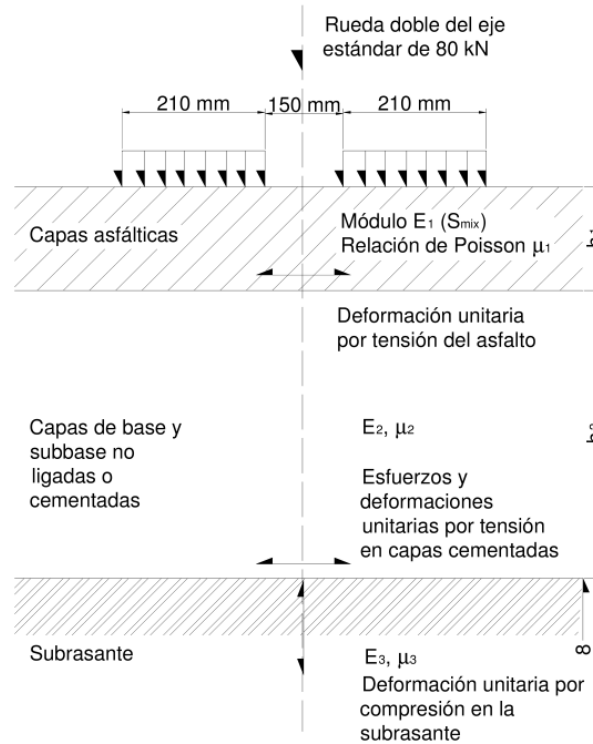


Figura 2.2 - Bases de diseño Método Shell [6].

2.2.1 Tránsito.

La carga de tránsito se representa como en la mayoría de los diseños, a través del número total de ejes de carga estándar de diseño (EE) que someterán a la estructura durante la vida de diseño. Este factor se adopta como un eje estándar de 80 kN, el cual se considera como un eje de rueda doble (ver figura 2.2), con un radio de contacto de 105 mm, éstas generan un esfuerzo total de $6 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ [6].

Este método no hace diferencia entre un eje simple de rueda doble y un eje doble con rueda doble (tándem), a ambos los considera como un eje simple de rueda doble, debido que para el criterio de deformación lo más importante es la magnitud de la carga [6].

2.2.2 Temperatura.

Este parámetro influencia directamente la vida de servicio de la estructura de pavimento, es por esto que tanto el módulo de rigidez y el esfuerzo permisible de la mezcla de asfalto dependen de este factor.

Para este objetivo se incluyó un parámetro denominado promedio del aire ponderado (w-MAAT, °C), que se refiere a la temperatura efectiva del asfalto al momento en que la vía es puesta en servicio, el cual se obtiene mediante un promedio mensual de las temperaturas del aire (MMAT, °C), estos últimos se consiguen por medio de la medición en estaciones meteorológicas ubicadas en cercanías de donde se ubicará el proyecto de estudio.

El w-MAAT se deriva por medio de los valores del promedio mensual de las temperaturas del aire a través de curvas de temperaturas de ponderación (figura 2.3).

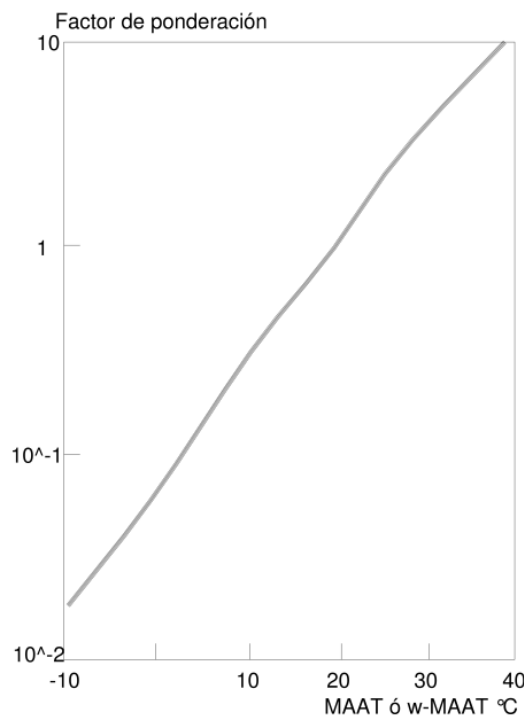


Figura 2.3 - Monograma W del Manual Shell, factor ponderado de temperatura [1].

2.2.3 Confiabilidad y variabilidad de diseño.

El método de diseño Shell incluye un factor de confiabilidad en el diseño de la subrasante, el cual modifica la deformación admisible de la capa, dependiendo del factor de confiabilidad adoptado en el diseño, el cual puede ser de 50%, 85% y 95%.

Este método de diseño no posee recomendaciones o disposiciones para la elección de un nivel de confiabilidad asociado a algún parámetro de diseño, esta elección queda totalmente sujeta al criterio del diseñador [1].

2.2.4 Caracterización de los materiales componentes del pavimento.

2.2.4.1 Subrasante.

Caracterización del material.

El módulo de la subrasante se debe obtener in situ a través de mediciones en terreno de deflexiones dinámicas o también a partir de mediciones de propagación de ondas, donde las propiedades (densidad, contenido de humedad) y condiciones de cargas deben ser representativos para las condiciones que se presentan en la realidad.

Existen correlaciones entre valores obtenidos de ensayos CBR y el módulo elástico dinámico de la subrasante (E_3), siendo la siguiente relación (ecuación 2.12) entregada por el Manual de diseño Shell.

$$E_3 = 10^7 \cdot CBR(N/m^2) \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Cuando no existe información de pruebas de laboratorio o terreno, esta correlación empírica nos entrega relaciones estimadas sobre los módulos de materiales no ligados. Esta ecuación se obtuvo a través de un gran número de pruebas dinámicas realizadas en terreno.

Los resultados entregados por esta relación resultan ligeramente elevados para algunos materiales, se recomienda su uso para suelos más bien plásticos con bajos valores de CBR [1].

Capacidad estructural.

Uno de los criterios de diseño utilizados por este manual, se basa en la deformación permisible de la subrasante (ε_3), la cual se relaciona con el número de repeticiones de carga (N) aplicadas al pavimento durante la vida de diseño, las ecuaciones obtenidas se basaron en datos experimentales realizados por los laboratorios de Shell [6]. Estas se muestran a continuación:

50% de Confiabilidad.

$$\varepsilon_3 = 2,8 \times 10^{-2} \cdot N^{-0,25} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

85% de Confiabilidad.

$$\varepsilon_3 = 2,1 \times 10^{-2} \times N^{-0,25} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

95% de Confiabilidad.

$$\varepsilon_3 = 1,8 \times 10^{-2} \times N^{-0,25}$$

Ecuación 2.15

Dónde:

ε_3 en $\mu\text{m}/\text{m}$.

N en términos de ejes equivalentes de 80 kN.

2.2.4.2 Materiales de la capa base y subbase.

Caracterización del material.

Para el Manual de Diseño de Pavimentos Shell, las capas y subbases se consideran como una sola capa, por lo tanto el módulo elástico efectivo para el diseño de las capas no ligadas se representa por un solo parámetro E_2 , este depende de su espesor (h_2) y el módulo dinámico de la subrasante E_3 .

Capacidad estructural de la capa granular.

La siguiente ecuación se utiliza para la obtención del módulo de la capa de base y subbase.

$$E_2 (N/m^2) = k \cdot E_3 (N/m^2)$$

Ecuación 2.16

Dónde,

$$k = 0,2 \cdot h_2^{0,45} \quad ; \quad h_2 \text{ en milímetros} \quad \text{cuando} \quad 2 < k < 4$$

En el procedimiento de diseño se asume que los materiales utilizados en la capa base y subbase tienen la capacidad suficiente para lograr un valor de módulo efectivo al menos igual al obtenido de la ecuación 2.16.

2.2.4.3 Materiales asfálticos.

Caracterización del material.

Existen dos propiedades fundamentales en la mezcla asfáltica para propósitos de diseño, estas son la rigidez de la mezcla bajo cargas de corta duración (Módulo de rigidez dinámico) y las características de fatiga.

A través de diversas pruebas de laboratorios realizadas por Shell, se obtuvo como conclusión que la rigidez de la mezcla depende de la rigidez del asfalto y la relación volumétrica entre el asfalto, agregados y vacío [1]. Para la obtención de este último se requieren 4 parámetros:

Dos del asfalto:

1. $T_{800 \text{ pen}}$: Temperatura de penetración.

2. *IP*: Índice de penetración.

Dos de condiciones de servicio:

1. Temperatura.

2. Tiempo de carga, considerado de 0,02 segundos, esta consideración es la correspondiente para una velocidad de tránsito entre 50-60 km/h.

Capacidad estructural.

El criterio de fatiga para la mezcla asfáltica se basa en la deformación permisible, ε_{fat} ($\mu\text{m/m}$), como función del número de aplicaciones de cargas repetitivas (N), en términos de ejes equivalentes, el módulo de rigidez (N/m^2) y el porcentaje de asfalto de la mezcla.

Las curvas de fatiga de las mezclas pueden ser representadas por la siguiente relación:

$$N_{fat} = k \cdot \varepsilon_{fat}^{-n} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

Dónde:

ε_{fat} en $\mu\text{m/m}$.

N_{fat} en términos de ejes equivalentes de 80 kN.

k y n son constantes que dependen del tipo de mezcla.

El Manual Shell propone dos aproximaciones, la primera basada en la interpretación directa de las medidas de fatiga presentes en la estructura de pavimento y la segunda también basada en la interpretación de las medidas de fatiga, pero utilizando el concepto de disipación de energía.

2.3 Método Sudafricano.

Este método ha sido probado y refinado a través de extensas mediciones por medio de pruebas con el Simulador de Vehículos pesados (Heavy Vehicle Simulator, HVS) en Sud África.

El método sudafricano fue actualizado en 1995 por Theyse, las funciones de transferencia fueron modificadas para incluir un factor de confiabilidad de diseño para las distintas categorías de carreteras existentes en Sudáfrica, estas categorías se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 - Categorías de carreteras Sudafricanas.

Categoría de carretera	Descripción
A	Carreteras interurbanas
B	Colectores interurbanos
C	Carreteras rurales
D	Carreteras rurales con tráfico ligero

En la caracterización de materiales se incluyen espesores y las propiedades de cada capa de la estructura de estudio. El análisis estructural se realiza bajo un análisis elástico-estático de un sistema de multi-capas donde la respuesta del pavimento para las condiciones de carga se calculan en términos de esfuerzos (σ) y deformación (ϵ) en posiciones críticas de la estructura. Estas posiciones críticas se determinan de manera particular para el tipo de material utilizado en una capa específica de la estructura [1].

Este método de diseño se enfoca en la caracterización, análisis estructural y funciones de transferencia de materiales comúnmente utilizados en Sudáfrica, los que se realizan a través de un software de diseño lineal elástico de un sistema multicapas tal como Rubicon.

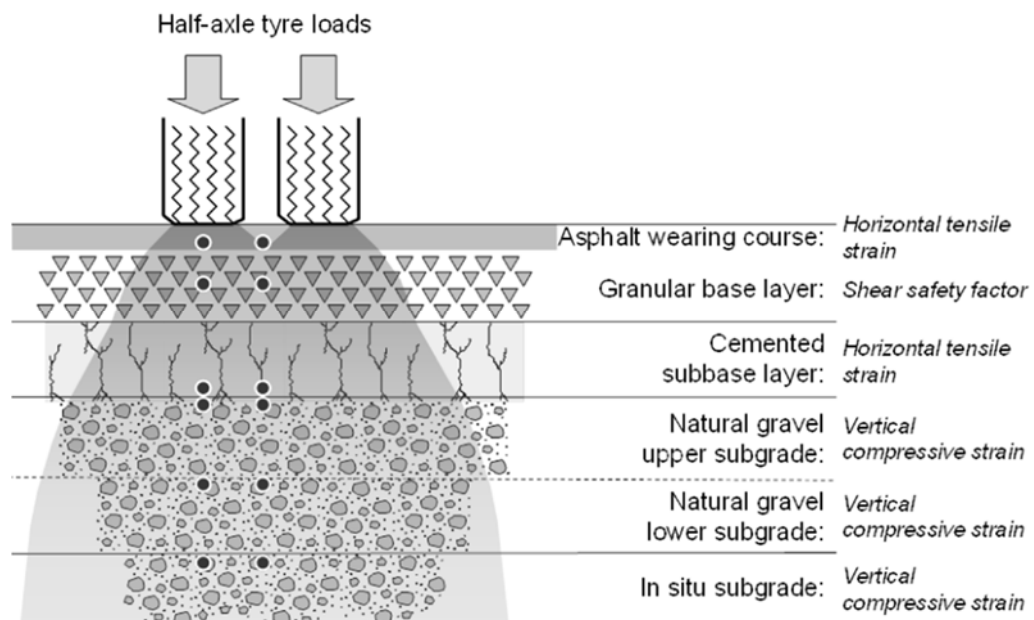


Figura 2.4 - Parámetros críticos Método Sudafricano [8].

2.3.1 Tránsito.

Para realizar diseños prácticos de pavimentos es necesario contar con el número total de ejes estándar acumulados durante el periodo de análisis. La conversión se realiza por medio de un factor de equivalencia (F), el cual relaciona el efecto del daño acumulado causado por todos los ejes individuales de carga, expresado o convertido a través de un número equivalente de eje simple de 80 kN, estos ejes presentan una separación entre ruedas de 350 mm y generan una presión uniforme de contacto de 520 kPa [8].

$$F = \left(\frac{P}{80}\right)^n \quad \text{Ecuación 2.18}$$

Donde

n : Exponente de daño relativo.

F : Factor equivalente de carga.

P : Eje de carga, en kN.

La tabla 2.2 indica valores recomendados de n relacionados al tipo de pavimento para propósitos de la estimación del tráfico equivalente, estos valores se basan en la investigación realizada con el Simulador de Vehículos Pesados (Heavy Vehicle Simulator), los cuales depende del tipo de pavimento, estado y su mecanismo de falla.

Tabla 2.2 - Exponente de daño relativo de acuerdo al tipo de pavimento [1].

Tipo de pavimento	Recomendado
Granular/Granular	4
Granular/Cementado	3
Cementado/Granular: pre-agrietado post- agrietado	5
Cementado/cementado: pre-agrietado post-agrietado	4,5
Base de mezcla caliente/Cementado	4

2.3.2 Temperatura.

Se debe considerar las condiciones climáticas como la humedad, temperatura y la condición de la subrasante que presenta la estructura se debe tomar en cuenta para el diseño de pavimentos. Principalmente la temperatura de pavimento puede afectar la estabilidad de la superficie.

Sud África puede ser dividido en tres regiones climáticas.

- (a) Regiones secas.
- (b) Regiones moderadas.
- (c) Regiones húmedas.

2.3.3 Confiabilidad y variabilidad de diseño.

La intensión histórica del diseño empírico-mecanicista fue obtener un proceso de diseño ampliamente determinístico, sin embargo esto no fue posible debido a la variabilidad presente en el diseño de una vía, ya sea por su geometría, como por las propiedades y respuesta de los materiales que componen el pavimento.

La capacidad estructural presentará una cierta confiabilidad de diseño, que se asocia a la categoría del camino, tal como se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 - Categoría de carretera método de diseño Sudafricano [9].

Categoría de carretera	Descripción	Confiabilidad aproximada (%)
A	Carreteras interurbanas	95
B	Colectores interurbanos	90
C	Carreteras rurales	80
D	Carreteras rurales con tráfico ligero	50

2.3.4 Caracterización de los materiales componentes del pavimento.

El manual de diseño Sudafricano contiene guías para la selección de las características en los materiales utilizados habitualmente en Sudáfrica, si bien es cierto, dejan muy en claro que es importante la realización de ensayos de laboratorio, los valores entregados en este manual sirven como una guía en la ausencia de medidas y pruebas de laboratorio o terreno [1].

Los códigos de materiales que figuran en las tablas 2.4 a 2.6 se utilizan ampliamente en el método de diseño Sudafricano. Los materiales se clasifican en función de su comportamiento fundamental, en varias categorías con diferentes clases de acuerdo a las características de resistencia [9].

Tabla 2.4 - Características de materiales asfálticos estándar utilizado por el Manual Sudafricano [9].

Material	Código	Características
Superficie asfáltica	AG	Superficie de asfalto graduación discontinua
Superficie asfáltica	AC	Superficie de asfalto graduación continua
Superficie asfáltica	AS	Superficie de asfalto grad. semi-discontinua
Superficie asfáltica	AO	Superficie de asfalto grad. abierta

Tabla 2.5 - Características de materiales granulares estándar utilizado por el Manual Sudafricano [9].

Material	Código	Características
Piedra chancada de alta calidad	G1	Piedra chancada graduada; tamaño máximo 37,5 mm; 86 – 88 % densidad relativa aparente; IP < 4
Piedra chancada	G2	Piedra graduada densa; tamaño máximo 37,5 mm; 100 – 102 % Proctor modificado ; IP < 6
Piedra chancada	G3	Piedra graduada densa y suelo con aglutinante; tamaño máximo 37,5 mm; 98 – 100 % Proctor modificado; IP < 6

Grava natural (material base)	G4	CBR \geq 80; tamaño máximo 53 mm; 98 – 100 % Proctor modificado; IP < 6; hinchamiento 0,2 @ 100 % AASHTO modificado
Grava natural	G5	CBR \geq 45; tamaño máximo 63 mm o 2/3 del espesor de capa; la densidad debe ser como la prescrita para el uso de la capa; IP < 10; hinchamiento 0,5 @ 100 % Proctor modificado
Grava natural (calidad subbase)	G6	CBR \geq 25; tamaño máximo 63 mm o 2/3 del espesor de capa; la densidad debe ser como la prescrita para el uso de la capa; IP < 12; hinchamiento 1,0 % @ 100 % Proctor modificado.

Tabla 2.6 - Características de materiales de subrasante estándar utilizado por el manual Sudafricano [9].

Material	Código	Características
Grava-Suelo	G7	CBR > 15 % @ 93 % Proctor modificado; tamaño máximo 2/3 de la capa; la densidad debe ser como la prescrita para el uso de la capa; IP > 12; hinchamiento 1,5 % @ 100 % Proctor modificado
Grava-Suelo	G8	CBR > 10 % @ 93 % Proctor modificado; tamaño máximo 2/3 de la capa; la densidad debe ser como la prescrita para el uso de la capa; IP > 12; hinchamiento 1,5 % @ 100 % Proctor modificado
Suelo	G9	CBR > 7 % @ 93 % Proctor modificado; tamaño máximo 2/3 de la capa; la densidad debe ser como la prescrita para el uso de la capa; IP > 12; hinchamiento 1,5 % @ 100 % Proctor modificado
Suelo	G10	CBR > 3 % @ 93 % Proctor modificado; tamaño máximo 2/3 de la capa; la densidad debe ser como la prescrita para el uso de la capa; o 90 % AASHTO modificado

2.3.4.1 Subrasante.

Caracterización del material.

Se utiliza el módulo resiliente de los materiales para caracterizar y diseñar las estructuras de pavimentos. Sin embargo, en el catálogo de diseño lo relacionan con valores de CBR a una densidad representativa.

La clasificación de los materiales de la subrasante se entrega en la tabla 2.7, en la cual se entrega su código representativo además de las propiedades específicas para cada tipo de subrasante. El valor del módulo de Poisson utilizado en materiales granulares corresponde a 0.35 [11].

Tabla 2.7 - Propiedades específicas de materiales de subrasante estándar utilizado por el Manual Sudafricano [11].

Código de material	CBR sumergido	Descripción del Material	Módulo elástico (MPa)	
			Condición seca	Condición húmeda
G7	\geq 15	Grava-Suelo	30 – 200	20 – 120
G8	\geq 10	Grava-Suelo	30 – 180	20 – 90
G9	\geq 7	Suelo	30 – 140	20 – 70
G10	\geq 3	Suelo	20 – 90	10 – 45

Capacidad estructural.

Cada tipo de material presenta un modo único de falla, el cual está ligada a un parámetro crítico y es calculado en una posición específica de la estructura de pavimento. Las funciones de transferencia proporcionan la relación entre el valor del parámetro crítico (esfuerzo, deformación) y el número de aplicaciones de carga que se pueden sostener en un valor determinado del parámetro crítico, antes de que el tipo de material particular falle de un modo específico [11].

La ecuación 2.19 entrega de forma general la función de transferencia para el material seleccionado de la subrasante, los coeficientes de regresión para las dos condiciones terminales nombradas anteriormente se entregan en la tabla 2.9, estas se separan por categoría de carretera.

$$N = 10^{(A - 10 \log \varepsilon_v)} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Dónde:

ε_v en [$\mu\text{m}/\text{m}$] y N en términos de ejes equivalentes de 80 [kN].

Tabla 2.8 - Coeficientes de regresión para las condiciones terminales de falla [11].

Condición terminal de ahuellamiento (mm)	Categoría de carretera	A
10	A	33.3
	B	33.38
	C	33.47
	D	33.70
20	A	36.30
	B	36.38
	C	36.47
	D	36.70

2.3.4.2 Materiales granulares base y subbase.

Caracterización del material.

Los módulos resilientes sugeridos en las capas bases y subbases se entregan en la tabla 2.9, el valor del módulo de Poisson utilizado en materiales granulares corresponde a 0.35 [11].

Tabla 2.9 - Propiedades específicas de materiales de subrasante estándar utilizado por el Manual Sudafricano [11].

Código de material	Descripción de material	Módulo elástico (MPa)
G1	Piedra chancada de alta calidad	150 – 600 (300)
G2	Piedra chancada	100 – 400 (250)
G3	Piedra chancada	100 – 350 (250)
G4	Grava natural (material base)	75 – 350 (225)
G5	Grava natural	40 – 300 (200)
G6	Grava natural (calidad subbase)	30 – 200 (150)

Capacidad estructural.

Las capas granulares acumulan una deformación permanente debido a la deformación por corte producida en la capa, por la aplicación de cargas repetitivas (ruedas). El factor de seguridad se correlacionó con la deformación gradual permanente del material granular bajo cargas triaxiales dinámicas para niveles específicos del factor de seguridad [1].

El factor de seguridad contra la falla por corte para materiales granulares se define:

$$F = \frac{\sigma_3 \left[\tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) - 1 \right] + 2KC \tan \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)}{(\sigma_1 - \sigma_2)} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

O también:

$$F = \frac{\sigma_3 \varphi_{term} + c_{term}}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Dónde

σ_1 y σ_3 = Esfuerzo principal mayor y menor, actuando en un punto de la capa granular.
(Esfuerzo de compresión positivo y tracción negativo).

C = Cohesión.

φ = Ángulo de fricción interna.

K = Constante = 0,65 para condiciones saturadas.

0,80 para condiciones moderadamente húmedas.

0,95 para condiciones normales de humedad.

2.3.4.3 Materiales asfálticos.

Caracterización del material.

Estos son representados a través del módulo resiliente, el cual es una buena aproximación de la rigidez que es considerada como el término general del asfalto. Expuestos por Freeme que baso sus resultados en retrocalculos de deflexiones de terreno y por Jordaan los que se calcularon mediante la medición de deflexión con deflectómetros multi-profundidad. Estos módulos elásticos sugeridos para el asfalto se dan en la tabla 2.10 y 2.11.

La Razón de Poisson para la capa de asfalto se asume como 0.44.

Tabla 2.10 - Módulos elásticos sugeridos por Freeme.

Profundidad (medida desde la superficie)	Valores del módulo de rigidez (MPa) basado en la temperatura y en la condición del material.					
	Condición buena		Rígido, mezcla seca		Agrietado	
	20° C	40° C	20° C	40° C	20° C	40° C
0 – 50	4000	1500	5000	1800	1000	500
50 – 150	6000	3500	7000	4000	1000	500
150 – 250	7000	5500	8000	6000	1000	500
0 – 50	6000	2200	7000	4000	750	500
50 – 150	8000	5500	9000	6000	1000	750
150 – 250	9000	7500	10000	8000	1000	750

Tabla 2.11 - Módulos elásticos sugeridos por Jordaan.

Profundidad (medida desde la superficie)	Valores del módulo de rigidez (MPa) basado en la temperatura y en la condición del material.					
	Condición buena		Rígido, mezcla seca		Agrietado	
	20° C	40° C	20° C	40° C	20° C	40° C
0 – 50	1000	200	200	300	600	200
50 – 150	2000	300	3000	400	750	300
150 – 250	3000	400	4000	500	800	400
0 – 50	2000	300	3000	300	750	300
50 – 150	4000	400	5000	600	800	400
150 – 250	6000	1000	7000	1500	1000	750

Capacidad estructural.

Los materiales de asfaltos fallan debido a las grietas ocasionadas por cargas repetitivas, estas son el resultado del esfuerzo de tracción en la parte inferior de la capa de asfalto [11]. La función de transferencia utiliza la deformación de tracción producida en la parte inferior de la capa y esta representa la resistencia a la formación de grietas en la estructura.

Las funciones de transferencia fueron realizadas tanto para capas delgadas de asfalto (< 50 mm) y capas gruesas de asfalto (> 75 mm). Estas ecuaciones se diferencian por la categoría de carretera, rigidez y características de la mezcla [1], las cuales se expresan a continuación:

Capas delgadas de asfalto

Capas delgada de asfalto de graduación continua

Las ecuaciones de transferencia para materiales de graduación continua para los diferentes niveles de servicio del Método Sudafricano se entregan en las ecuaciones 2.22 a 2.25.

$$N_f = 10^{17,40(1-\frac{\log \varepsilon_t}{3,40})} \quad \text{para categorías A} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

$$N_f = 10^{17,46(1-\frac{\log \varepsilon_t}{3,41})} \quad \text{para categorías B} \quad \text{Ecuación 2.23}$$

$$N_f = 10^{17,54(1-\frac{\log \varepsilon_t}{3,42})} \quad \text{para categorías C} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

$$N_f = 10^{17,71(1-\frac{\log \varepsilon_t}{3,46})} \quad \text{para categorías D} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

Dónde:

ε_t , en $\mu\text{m}/\text{m}$.

N_f , en términos de ejes equivalentes de 80 kN.

Capas delgada de asfalto de graduación discontinua.

Las ecuaciones de transferencia para materiales asfálticos de graduación discontinua para diferentes niveles de servicio se entregan las ecuaciones 2.26 a 2.29.

$$N_f = 10^{15,79(1-\frac{\log \varepsilon_t}{3,71})} \quad \text{para categorías A} \quad \text{Ecuación 2.26}$$

$$N_f = 10^{15,85(1-\frac{\log \varepsilon_t}{3,72})} \quad \text{para categorías B} \quad \text{Ecuación 2.27}$$

$$N_f = 10^{15,93(1-\frac{\log \varepsilon_t}{3,74})} \quad \text{para categorías C} \quad \text{Ecuación 2.28}$$

$$N_f = 10^{16,09(1-\frac{\log \varepsilon_t}{3,77})} \quad \text{para categorías D} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

Dónde:

ε_t , en $\mu\text{m}/\text{m}$.

N_f , en términos de ejes equivalentes de 80 kN.

Capas asfálticas gruesas.

La forma general de la función de transferencia para capas de asfalto gruesas se da en la ecuación 2.30, los coeficientes de regresión de para las distintas categorías de tránsito y módulo de rigidez se entregan en la tabla 2.12.

$$N_f = 10^A \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{B}\right) \quad \text{para todas las categorías}$$

Ecuación 2.30

Dónde:

ε_t , en $\mu\text{m}/\text{m}$.

N_f , en términos de ejes equivalentes de 80 kN.

Tabla 2.12 - Coeficientes de regresión para las condiciones terminales de falla [11].

Rigidez de la mezcla de asfalto (MPa)	Categoría de servicio	A	B
1000	A	16.44	3.378
	B	16.81	3.453
	C	17.25	3.453
	D	17.87	3.671
2000	A	16.09	3.357
	B	16.43	3.428
	C	16.71	3.487
	D	17.17	3.583
3000	A	15.78	3.334
	B	16.11	3.403
	C	16.26	3.435
	D	16.68	3.524
5000	A	15.52	3.317
	B	15.73	3.362
	C	15.83	3.383
	D	16.10	3.441
8000	A	15.09	3.227
	B	15.30	3.272
	C	15.39	3.291
	D	15.65	3.346

CAPITULO III

3. DATOS DE ENTRADA.

En este capítulo se definen todos los parámetros que se adoptaron para los distintos diseños realizados según su método aplicado en cada zona.

Aprovechando los distintos tipos de climas presentes en el país, para el caso de la variable temperatura, se escogieron rangos en los cuales los resultados presenten diferencias representativas, además se utilizaron distintas categorías de tránsito, calidad de %CBR Subbase con el fin de comparar los parámetros de entrada.

Se realizan modificaciones de espesores de la capa asfáltica como de la base granular para cumplir los requisitos de diseño dispuestos por cada método, los espesores de las capas granulares van a ser valores constantes (150 mm; 200 mm; 250 mm) que tendrán las mismas propiedades y características de diseño para cada método.

El punto de comparación es que todos cumplan la misma vida útil de diseño, obtenidos por medio de los distintos programas de computador pertenecientes a cada método de diseño.

Los parámetros de entrada utilizados se describen a continuación.

3.1 Variable de Niveles de Tránsito.

Para visualizar la forma en que esta variable influye en los distintos métodos de diseño, se evaluará los diseños de pavimento en distintos niveles de tránsito, estos serán expresados en términos de ejes equivalentes. Para este objetivo se fijarán distintas categorías de tránsito, con la función de evaluar la sensibilidad de este parámetro en el diseño de pavimentos flexibles. Se diferencian seis niveles de comportamientos.

Tabla 3.1 - Tránsito de Estudio.

Nivel de Transito (Ejes Equivalentes x millón)
5
10
20
30
60
100

3.2 Temperatura de diseño.

Chile al ser un país de gran extensión longitudinal, existe a lo largo de su territorio distintos climas.

Utilizando esta variabilidad climática se podrá utilizar el factor temperatura como otro punto de comparación para los distintos métodos de diseño.

Se escogieron rangos donde los resultados obtenidos tienen diferencias considerables entre uno y otra, considerando a su vez la ubicación geográfica de cada localidad.

Las zonas escogidas contemplan todas las temperaturas medias anuales a lo largo del territorio chileno.

Tabla 3.2 – Zonificación de Temperaturas Medias Mensuales [2].

Localidad	TMAPA (°C)	ZONA	TMAPA de Diseño (°C)
Isla de Pascua	20,8	1	20
Arica	19		
Iquique	18,2		
Antofagasta	16,8		
Copiapó	15,8		
Santiago	15,7		
Isla Juan Fernández	15,6		
Vallenar	15,3		
Santiago	15,4		
Santiago	14,9		
Curicó	14,4		
Valparaíso	14,3		
La Serena	13,9		
Chillan	13,8		
Parrón	13,8		
Quintero	13,5		
Concepción	12,6		
Calama	12,5		
Temuco	11,8		
Valdivia	11,7		
Sewell	11,4		
Osorno	11,1		
Puerto Montt	10,6		

Chile Chico	10,4	3	10
Puerto Aysén	9,7		
Coyhaique	9,1		
Cochrane	8,9		
Balmaceda	7,4		
Punta Arenas	6,6		
Isla Diego Ramírez	5,3		

**Nota: dentro de las zonificaciones realizadas estas fueron determinadas de acuerdo a su TMAPA y lugar geográfico, a excepción de Calama que presenta una diferencia considerable con las localidades cercanas dentro de la zona 1.*

Escogidos los rangos de temperaturas mensuales se calcula la temperatura de diseño que controle de acuerdo al método de diseño, siendo estos valores máximos aproximados.

3.3 Porcentaje de %CBR en subrasante.

Para hacer aún más completo el análisis para los distintos diseños se variará el % CBR de subrasante dirigidos principalmente a niveles encontrados a lo largo de nuestro territorio. Estos van a estar dados por los siguientes valores:

- 5%
- 10%
- 20%

3.4 Estructura Asfáltica.

De acuerdo a una información entregada por la Dirección de Vialidad 5° Región, se escogió el tipo de mezcla asfáltica Bitumix Con-Con / CA 24. Sus características de describen a continuación.

Tabla 3.3 - Parámetros de Diseño para estructura asfáltica.

Parámetro	Valores adoptados	
Módulo Resiliente	3750 MPa	
% Vacíos	5%	
% Agregados	Sobre N°8	Bajo N°8
	46%	54%
% Asfalto	5%	
T° Ablandamiento	52,3 °C	
Índice Penetración	-0,2	

CAPITULO IV

4. VERIFICACION DE DISEÑO.

En este capítulo se muestran las distintas formas de modelar una estructura de pavimento, esto es, definición de las propiedades y capacidad resistente de cada capa de la estructura. Además cómo y de qué manera las condiciones externas influyen en los resultados desarrollados por los distintos métodos, los cuales se analizan y/o definen de diferente forma en función de la metodología empleada en el diseño.

Se debe destacar que cada factor nombrado con anterioridad, está sujeto a una variabilidad asociada a la definición de las propiedades y capacidad resistente de la estructura. Además de la variabilidad presente en el cálculo del nivel de tránsito y en la construcción de la estructura, lo que se debe tener presente en el diseño de la estructura.

Cada método de diseño cuenta con diferentes criterios a la hora de aplicar un parámetro que represente una confiabilidad en el diseño, si bien es cierto, los factores de confiabilidad utilizados por todos los métodos de diseño vistos en este Trabajo de Título provienen de la aplicación de límites de probabilidad estadística, estos pueden ser aplicados de distinta forma, ya sea con ecuaciones que representen distintos niveles de confiabilidades o porcentajes y/o niveles de confiabilidad. Los cuales son aplicados a toda la estructura o aplicados a cada capa, estos dependen de la metodología de diseño y de las condiciones presentes en donde se generó el método de diseño, esto es, tipos de materiales granulares y asfálticos, nivel de tránsito, tipo de tránsito, tecnología y metodologías utilizadas en pruebas de laboratorio, por tanto cada método de diseño presentan distintos valores de confiabilidad asociado a algún parámetro de diseño [1].

Es por esto, que en cada estructura se utilizan los porcentajes y/o funciones de confiabilidad entregados por cada método, de los cuales, en el caso del método AASHTO y método Sudafricano está asociado al nivel de tránsito.

Se debe destacar que el método Shell sólo posee criterios de confiabilidad para el diseño de la subrasante y además no posee recomendaciones o pautas para la elección de una ecuación de confiabilidad.

A su vez las confiabilidades de diseño de 50% y 85% aplicados en la subrasante generan espesores de la capa asfáltica bastante alejados en comparación a los espesores de la capa de asfalto desarrollados por los métodos AASHTO y método Sudafricano [1].

Pero en los diseños realizados por el método Shell, en los cuales se aplica una confiabilidad del 95% en la subrasante, genera espesores de la capa de asfalto similares a los obtenidos mediante los métodos AASHTO y Sudafricano [1], por lo cual este último se utiliza para posteriores análisis.

4.1 Método de diseño AASHTO.

4.1.1 Parámetros de entrada.

Para observar el efecto e importancia de los parámetros de entrada utilizados por este método de diseño, se analiza todas las estructuras en distintas condiciones de diseño, para lo cual se utiliza el programa de computador recomendado por el Manual de Carretera, denominado PAVIVIAL. En este programa se ingresan los distintos parámetros de entrada utilizados por el método de diseño de pavimentos flexibles AASHTO 93. Como se define en el Capítulo II, cada parámetro depende de las características propias del proyecto, las cuales difieren de un país a otro, para lo cual, se utilizarán las recomendaciones entregadas por el Manual de Carreteras para la aplicación en el diseño.

De acuerdo a la variable de tránsito, el programa permite la opción de ingresar directamente los ejes equivalentes acumulados durante el periodo de vida de diseño, los que se ingresan de acuerdo a los rangos descritos en el capítulo anterior.

En cuanto a los valores de confiabilidad la tabla 4.1 indica los niveles de confianza, coeficiente estadístico (Z_R) y desviación normal del error combinado (S_0) que son utilizados para distintos diseños en el país.

Tabla 4.1 - Nivel de confianza y valor del S_0 [2].

EE (millones)	Confiabilidad (%)	Z_R	S_0 en función del coeficiente variación de los suelos				
			15%	20%	30%	40%	50%
< 5	60	-0,253	0,45	0,46	0,47	0,49	0,5
5 – 15	60-70	-0,253 - 0,524	0,45	0,46	0,47	0,49	0,5
15 – 30	60-75	-0,253 - 0,674	0,45	0,46	0,47	0,49	0,5
30 – 50	70-80	-0,524 - 0,841	0,44	0,45	0,46	0,48	0,49
50 – 70	70-85	-0,524 - 1,037	0,42	0,43	0,44	0,47	0,48
70 - 90	70-90	-0,524 - 1,282	0,40	0,41	0,42	0,45	0,46

Nota: para el diseño de 100×10^6 EE, se extrapola según Tabla 4.1 con confiabilidad de un 95% y S_0 igual a 0,45.

El ingreso de niveles de servicialidad tanto inicial y final se realizarán en base a las recomendaciones (para situaciones normales) entregadas por el Manual de Carreteras, estas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.2 - Índice de confiabilidad recomendados [2].

Índice de servicialidad inicial (p_i)	4,2
Índice de servicialidad final (p_f)	2

En el ingreso de los datos correspondientes a la resistencia de los materiales, dependerá del tipo capa. Si se trata de la subrasante, esta se ingresa directamente a través del valor del módulo resiliente. Este valor deberá ser ingresado en MPa.

Por otra parte para las capas granulares y la capa asfáltica se adoptó especificaciones constructivas habituales, indicados en la tabla 4.3. Estos valores se ingresan directamente al programa junto a sus espesores.

Tabla 4.3 - Coeficientes estructurales para las capas de pavimento [2].

Capa	Características	Coeficiente estructural
Base granular	CBR = 80 %	0,13
C. asfáltico de superficie		0,43

Los valores de coeficiente estructural de las capas granulares se deberán ajustar mediante un factor correspondiente a las condiciones de drenaje. El Manual de Carretera Volumen 3 muestra los coeficientes de drenaje que se proponen para distintos sectores del país, los que se ingresan directamente al programa de computador.

Para el diseño de las distintas carpetas asfálticas se utilizó un coeficiente de drenaje igual a 1, con el fin de homogenizar los resultados al comparar con los distintos métodos.

Con el fin de calcular el número estructural mínimo de las capas asfálticas (NE_A). El programa PAVIVIAL contiene rutinas para el cálculo del NE_A , ingresando directamente la temperatura media anual ponderada del aire (TMAPA) o a través del cálculo de esta, por medio de valores de las temperaturas medias mensuales del proyecto (TMMA). Las cuáles serán adoptadas según el punto 3.2 como se muestra a continuación:

Tabla 4.4 - Valores de TMAPA para diseño de cada zona [2].

Zona	TMAPA de Diseño (°C)
1	20
2	15
3	10

Finalmente el programa de computador PAVIVIAL verificara si los números estructurales satisfacen las ecuaciones de diseño.

4.1.2 Resultado de diseño de espesores

Después de ingresar todos los parámetros de diseño de todas las situaciones creadas en este análisis, los que fueron definidos en los capítulos anteriores, con ayuda de la herramienta de diseño PAVIVIAL, se procede a iterar mediante la modificación de los espesores de las distintas capas del pavimento, hasta lograr satisfacer las ecuaciones de diseño para el método de diseño AASHTO 93, los resúmenes de los resultados obtenidos para cada situación de diseño, se entregan en las tablas que se muestran a continuación.

Tabla 4.5 – Espesores de Asfalto (mm) para Método AASHTO en Zona 1.

ZONA 1		Tránsito (x millón)					
% CBR	Base Granular (mm)	5	10	20	30	60	100
5%	150	175	200	230	270	290	350
	200	160	185	215	255	275	335
	250	145	180	200	240	260	320
10%	150	145	170	190	230	245	315
	200	130	150	175	215	235	315
	250	130	150	175	215	235	315
20%	150	120	140	160	195	210	265
	200	105	130	150	180	195	255
	250	95	130	150	180	195	255

Tabla 4.6 - Espesores de Asfalto (mm) para Método AASHTO en Zona 2.

ZONA 2		Tránsito (x millón)					
% CBR	Base Granular (mm)	5	10	20	30	60	100
5%	150	175	200	230	270	290	350
	200	160	185	215	250	275	335
	250	145	170	200	235	260	320
10%	150	145	170	190	230	245	305
	200	130	150	175	215	230	290
	250	120	140	160	200	215	275
20%	150	120	140	160	195	210	270
	200	105	125	145	180	200	270
	250	100	120	145	180	200	270

Tabla 4.7 - Espesores de Asfalto (mm) para Método AASHTO en Zona 3.

ZONA 3		Tránsito (x millón)					
% CBR	Base Granular (mm)	5	10	20	30	60	100
5%	150	175	200	230	270	290	350
	200	160	185	215	250	275	335
	250	145	170	200	235	260	320
10%	150	145	170	190	230	245	305
	200	130	150	175	215	230	290
	250	115	135	160	200	215	275
20%	150	120	140	160	195	210	265
	200	105	125	145	180	195	250
	250	95	115	130	165	180	240

4.2 Método de diseño Shell.

4.2.1 Parámetros de entrada.

El método Shell utiliza distintos datos de entrada, como temperatura, propiedades de la mezcla y propiedades de los materiales granulares que componen la vía, espesores, todos estos parámetros fueron analizados en el Capítulo II.

El programa de diseño SPDM calcula automáticamente la temperatura de diseño para la estructura de pavimento, ingresando los valores correspondientes al conjunto de temperaturas medias mensuales del aire (TMMA). Estas se obtuvieron a través del Manual de Carretera Volumen 3.

Las temperaturas medias anuales del aire ponderadas (w-MAAT) incorporadas al software, se muestran a continuación.

Tabla 4.8 - Temperatura de diseño Método Shell [6].

Zona	w-MAAT °C
1	20
2	15
3	10

La configuración de carga utilizada por este programa corresponde un eje estándar de rueda doble, posee las siguientes características:

- Carga vertical de 20 kN.
- Cada rueda posee una presión de neumáticos de 580 Mpa.
- Área de contacto de 105 mm.
- Distancia entre las ruedas es de 0,315 (m).

De acuerdo a la variable de tránsito, el programa de diseño entrega la opción de ingreso directo de los ejes equivalente estándar de diseño para un periodo de diseño considerado. Los EE son reducidos por un factor de desplazamiento lateral y un factor de autocicatrización (Healing), para lo cual se utilizarán los valores por defecto del programa de diseño SPDM, ya que encontrar valores representativos a la realidad chilena se aleja del objetivo de este Trabajo de Título. Estos valores se muestran a continuación.

- Factor de distribución lateral: 2,0
- Factor de autocicatrización: 5,0

La modelación de la estructura se define mediante espesores, módulos elásticos, composición y rigidez tanto del asfalto como de la mezcla. El tipo de asfalto que compone la mezcla, es del tipo CA 24, presenta un índice de penetración de -0,2 y temperatura de punto de ablandamiento de 53,3°C. La mezcla asfáltica contendrá una banda granulométrica de un 90% de agregados, con un 46% sobre N°8 y 54% bajo este tamaño, con un volumen de asfalto de aproximadamente 5% y contiene un porcentaje de vacíos de alrededor de un 5%.

Tabla 4.9 - Parámetros de asfalto.

Cálculo del monograma de rigidez del asfalto	
Tiempo de carga (s)	0,02
Temperatura del asfalto w-MAAT (°C)	Depende de cada Diseño
Punto de ablandamiento (°C)	52,3
Índice de penetración	-0,2
Rigidez del asfalto (Mpa)	Depende de cada Diseño

Tabla 4.10 - Parámetros de la mezcla.

Cálculo del monograma de rigidez de la mezcla de asfalto	
Volumen del asfalto (%v/v)	5
Volumen de agregados (%v/v)	90
Volumen de vacíos (%v/v)	5
Rigidez de la mezcla de asfalto (Mpa)	Depende de cada Diseño

Las capas granulares se definen mediante los módulos elásticos y razones de Poisson. Los módulos de elasticidad de la subrasante se ingresan directamente al programa (en Megapascales).

Si bien es cierto el método de diseño de pavimentos de Shell posee correlaciones propias para la determinación de los módulos de elasticidad de la subrasante, los que relacionan mediante resultados de ensayos CBR (también utilizados en la capa de subbase), pero los resultados obtenidos de estas ecuaciones difieren excesivamente de los valores ya probados de las correlaciones encontradas en el Manual de Carreteras, por lo cual estas últimas serán utilizadas [2].

$$M_R(\text{MPa}) = 17,6 (\text{CBR})^{0,64} \quad \text{para } \text{CBR} < 12\% \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$M_R(\text{MPa}) = 22,1 (\text{CBR})^{0,55} \quad \text{para } 12 \leq \text{CBR} < 80\% \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Tabla 4.11 - Características de capas granulares [2].

Capa	Características
Base granular	CBR = 80 %

Para la definición de la razón de Poisson en la subrasante, capa base y capa subbase se utilizarán los valores por defecto entregados por la subrutina SPDM, los cuales son:

- Razón de Poisson Subrasante: 0,35
- Razón de Poisson Base-Subbase: 0,35

La ecuación de deformación permisible de la subrasante puede variar dependiendo de la confiabilidad deseada para el proyecto, éstas pueden ser de 50%, 85%, 95% respectivamente, el manual de diseño de Shell no entrega pauta o recomendación para la elección de la confiabilidad en el diseño, ésta queda totalmente a criterio del diseñador.

Se utilizarán las ecuaciones entregadas por defecto del programa de computador SPDM para el diseño de las estructuras de asfalto además de optar por una confiabilidad del 95%.

El módulo de rigidez de la mezcla asfáltica se obtiene a través de SPDM debido a que contiene subrutinas para el cálculo de las propiedades del asfalto y la mezcla. Su resistencia estructural se evaluará con el monograma de fatiga estándar del método Shell.

Una vez definidos e ingresados los parámetros de diseño nombrados anteriormente, el programa procede a calcular espesores mediante iteraciones en base a la variación de los espesores de la capa de asfalto, de manera de satisfacer los esfuerzos y deformaciones permisibles obtenidas por medio del método de diseño de pavimentos flexibles del Manual Shell.

4.2.2 Resultados de diseño de espesores.

Después de ingresar todos los parámetros de diseño, de todas las situaciones creadas para este análisis, las que fueron definidas en los capítulos anteriores, con ayuda de la herramienta de diseño SPDM, se procede a iterar mediante la modificación de los espesores de la capa de asfalto, hasta lograr satisfacer los esfuerzos y deformaciones obtenidas mediante el método Shell para los años de vida útil a diseñar, los resúmenes de los resultados obtenidos para cada situación de diseño se entregan en las tablas que se muestran a continuación.

De manera de dar un orden a los datos entregados, la información se clasifica mediante la zonificación ficticia del proyecto.

Tabla 4.12 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SHELL en Zona 1.

ZONA 1		Tránsito (x millón)					
% CBR	Base Granular (mm)	5	10	20	30	60	100
5%	150	215	240	265	300	315	340
	200	200	225	255	285	305	330
	250	190	215	240	270	290	315
10%	150	185	210	235	265	280	305
	200	175	195	220	250	265	290
	250	170	190	215	240	255	275
20%	150	170	190	215	235	250	270
	200	165	185	210	235	245	265
	250	165	185	205	230	245	265

Tabla 4.13 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SHELL en Zona 2.

ZONA 2		Tránsito (x millón)					
% CBR	Base Granular (mm)	5	10	20	30	60	100
5%	150	180	205	225	250	265	290
	200	170	195	215	240	260	280
	250	160	185	205	230	250	270
10%	150	160	180	200	220	235	255
	200	155	175	195	215	230	245
	250	150	170	190	215	225	245
20%	150	150	170	190	210	225	240
	200	150	165	185	210	220	235
	250	145	165	185	205	220	235

Tabla 4.14 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SHELL en Zona 3.

ZONA 3		Tránsito (x millón)					
% CBR	Base Granular (mm)	5	10	20	30	60	100
5%	150	155	170	190	210	225	245
	200	145	165	185	205	220	235
	250	140	160	180	195	210	230
10%	150	140	160	175	195	205	220
	200	140	155	175	190	205	220
	250	135	150	170	190	200	215
20%	150	135	150	170	185	195	210
	200	130	145	165	185	195	210
	250	130	145	165	180	195	205

4.3 Método de diseño Sudafricano.

4.3.1 Parámetros de entrada.

El método de diseño Sudafricano utiliza distintos parámetros de entrada tales como las propiedades de la mezcla asfáltica, propiedades de los materiales granulares, además de la geometría de la vía (espesores), criterios de confiabilidad, entre otros parámetros.

En el caso de la temperatura, su magnitud es representada por el módulo resiliente, el cual es calculado por subrutinas del programa Rubicon.

Tabla 4.15 - Temperatura de diseño para método Sudafricano.

Zona	w-MAAT °C
1	20
2	15
3	10

La configuración de carga utilizada por este método corresponde un eje estándar de rueda doble, el cual posee las siguientes características:

- Carga vertical de 80 kN.
- Cada rueda posee una presión de neumáticos de 520 MPa.
- Distancia entre las ruedas es de 0,350 (m).

Los materiales poseen propiedades características dependiendo del país de origen, diversos investigadores desarrollaron un conjunto de propiedades sugeridas para los materiales utilizados frecuentemente en la construcción de estructuras de pavimentos en Sudafrica.

Para la caracterización de la capa de asfalto, en Sudáfrica normalmente se utiliza como referencia los valores de rigidez de la mezcla asfáltica expuestos por Freeme (ver Capítulo III), pero estos valores difieren en demasía con los módulos obtenidos por el método Shell, por lo cual es necesario la elección de la rigideces sugeridas por un método empírico-mecanicista específico, de modo de no generar diferencias significativas en los diseños de la estructura de asfalto. El método Shell a través de su subrutina del programa de diseño SPDM, es posible obtener las propiedades de la mezcla de asfalto a través de la definición de algunas características de la mezcla, debido a que las características del asfalto ya fueron definidas, se opta por la utilización de los resultados obtenidos de este programa de diseño.

En la elección de la razón de Poisson para la mezcla de asfalto (al utilizar las propiedades del asfalto obtenidas del método Shell) también se utilizará los valores de la razón de Poisson sugerida por el método Shell, la cual es 0,35.

Las capas granulares se definen mediante los módulos elásticos y razones de Poisson. Los módulos de elasticidad de la subrasante se ingresan directamente al programa (en Mega pascales).

Para las capas granulares utilizan las características de los materiales definidos en los manuales de diseño Sudafricano. Estos tipos de materiales presentan características muy similares a los utilizados en Chile, esto queda demostrado en las tablas que se muestran a continuación.

Tabla 4.16 - Características de materiales utilizados para la subrasante [9].

Material	Código	Manual Sudafricano
Subrasante Estructura 1	G7	CBR > 15 % @ 93 % Proctor modificado; tamaño máximo 2/3 de la capa; la densidad debe ser como la prescrita para el uso de la capa; IP > 12; hinchamiento 1,5 % @ 100 % Proctor modificado
Subrasante Estructura 2	G10	CBR > 3 % @ 93 % Proctor modificado; tamaño máximo 2/3 de la capa; la densidad debe ser como la prescrita para el uso de la capa; o 90 % Proctor modificado

Tabla 4.17 - Características de materiales utilizados en las capas base y subbase [9].

Material	Código	Características
Base Granular	G4	CBR \geq 80; tamaño máximo 53 mm; 98 – 100 % Proctor modificado; IP < 6; hinchamiento 0,2 @ 100 % Proctor modificado
Subbase Granular	G5	CBR \geq 45; tamaño máximo 63 mm o 2/3 del espesor de capa; la densidad debe ser como la prescrita para el uso de la capa; IP < 10; hinchamiento 0,5 @ 100 % Proctor modificado

El Método Sudafricano sugiere los siguientes valores para la capacidad de soporte de las capas granulares.

Tabla 4.18 - Módulos elásticos sugeridos por el Método Sudafricano [8].

Material	Módulo elástico (MPa)
G4	75 – 350 (246)
G7	120 (115)
G10	45 (43)

Los valores entre paréntesis son los utilizados en los diseños originales de las dos estructuras de pavimento, como se puede observar los valores de los materiales escogidos tienen muy poca variación en comparación con los materiales usados en el país.

El método Sudafricano reconoce que existen diversas correlaciones utilizadas por diversas oficinas de diseño entre relaciones de CBR y los módulos de elasticidad en materiales granulares, pero en estos manuales no sugiere la aplicación de alguna correlación en particular, por esto se utilizarán las correlaciones definidas en el Manual de Carreteras, estas se muestran a continuación.

$$M_R(\text{MPa}) = 17,6 (\text{CBR})^{0,64} \quad \text{para } \text{CBR} < 12\% \quad \text{Ecuación 4.4}$$

$$M_R(\text{MPa}) = 22,1 (\text{CBR})^{0,55} \quad \text{para } 12 \leq \text{CBR} < 80\% \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Las razones de Poisson en la subrasante, base y subbase, tomaran los valores por defecto entregados por el Manual de Diseño Sudafricano, los cuales son:

- Razón de Poisson Subrasante: 0,35
- Razón de Poisson Base-Subbase: 0,35

De acuerdo a la aplicación de una confiabilidad en el diseño, en el método de diseño Sudafricano posee distintas regresiones para distintos niveles de confiabilidad, para cada modo de falla dependiendo de un tipo de material específico (Capítulo III), las distintas regresiones representan un tipo de confiabilidad, 50%, 80%, 90%, 95%, las cuales se asocia a un tipo de categoría de carretera. Las confiabilidades recomendadas en función a la categoría de carretera se entregan a continuación.

Tabla 4.19 - Confiabilidad de diseño recomendada [10].

Categoría de carretera	Descripción	Confiabilidad aproximada (%)
A	Carreteras interurbanas	95
B	Colectores interurbanos	90
C	Carreteras rurales	80
D	Carreteras rurales con tráfico ligero	50

Una vez definidos e ingresados los parámetros de diseño nombrados anteriormente, el programa de diseño RUBICON calcula los esfuerzos producidos en todas las capas de la estructura, a través de una análisis de multicapas elástico-estático y evalúa las si las estructuras tienen las propiedades adecuadas para soportar la carga de tránsito, para esto utiliza las ecuaciones de transferencia definidas en el método Sudafricano.

4.3.2 Resultados de diseño de espesores.

Después de ingresar todos los parámetros de diseño, de todas las situaciones creadas para este análisis (ver capítulo III), con ayuda de la herramienta de diseño RUBICON, se procede a iterar mediante la modificación de los espesores de la capa asfáltica, hasta lograr satisfacer los esfuerzos y deformaciones obtenidas mediante el método de diseño de pavimentos flexibles Sudafricano para los años de vida útil a diseñar, los resúmenes de los resultados obtenidos para cada situación de diseño se entregan en las tablas que se muestran a continuación.

De manera de dar un orden a los datos entregados, la información se clasifica mediante la zonificación del proyecto.

Tabla 4.20 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SUDAFRICANO en Zona 1.

ZONA 1		Tránsito (x millón)					
% CBR	Base Granular (mm)	5	10	20	30	60	100
5%	150	185	205	240	260	275	290
	200	180	200	235	255	270	285
	250	175	195	230	250	265	280
10%	150	180	195	230	250	265	280
	200	175	190	225	245	260	275
	250	170	185	220	240	255	270
20%	150	170	185	220	240	250	270
	200	170	185	215	235	250	265
	250	165	180	215	235	245	265

Tabla 4.21 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SUDAFRICANO en Zona 2.

ZONA 2		Tránsito (x millón)					
% CBR	Base Granular (mm)	5	10	20	30	60	100
5%	150	175	190	220	240	255	270
	200	170	185	215	235	250	265
	250	165	180	210	235	245	260
10%	150	165	180	210	230	245	260
	200	160	175	205	225	240	255
	250	160	175	205	225	235	255
20%	150	160	175	200	220	235	250
	200	155	170	200	220	230	245
	250	155	170	200	215	230	245

Tabla 4.22 - Espesores de Asfalto (mm) para Método SUDAFRICANO en Zona 3.

ZONA 3		Tránsito (x millón)					
% CBR	Base Granular (mm)	5	10	20	30	60	100
5%	150	140	155	180	195	205	220
	200	135	150	175	190	200	215
	250	130	145	170	190	200	215
10%	150	130	145	170	185	195	210
	200	130	145	170	185	195	210
	250	125	140	165	180	190	205
20%	150	125	140	165	180	190	200
	200	125	140	160	175	185	200
	250	125	135	160	175	185	200

CAPITULO V

5. SENSIBILIDAD DE PARAMETROS DE DISEÑO.

En este Trabajo de Título se muestran distintas formas de análisis para el diseño de una estructura de pavimentos flexibles.

Tanto en la definición de las propiedades de resistencia de cada material que compone la estructura como también el criterio utilizado para el cálculo de la capacidad de ésta.

Para el cálculo y/o definición de los componentes antes mencionados es necesario tomar en cuenta diversos parámetros y factores relacionados a las características externas de una estructura, tales como, la temperatura, tráfico. Además de factores internos de la estructura, como la capacidad de soporte de la capa asfáltica y materiales granulares, características físicas de la estructura, entre otras.

Para todos los diseños pertenecientes a las distintas zonas se modificarán sus características, esto es, diseñar estas estructuras para distintos niveles de tránsito, distintas temperaturas de servicio, %CBR subrasante, con el fin de mostrar cómo influyen los parámetros principales (comunes en los tres métodos) en los diseños finales de las estructuras de pavimentos.

En el análisis de sensibilidad se muestran distintos gráficos, donde cada línea representará distintos resultados de diseño, los cuales son espesores para cada condición en particular que influencia el diseño, lo que permitirá analizar la temperatura como parámetro en las distintas metodologías de diseño mostradas en este Trabajo de Título.

5.1 Método AASHTO.

El método de diseño AASHTO 93 considera el factor temperatura directamente en su diseño, este influencia directamente en la capacidad resistente del pavimento. El factor temperatura junto con la capacidad de soporte de la subrasante (M_r) definen el número estructural mínimo correspondiente a la capa de asfalto (a_i).

De acuerdo a las zonas escogidas, se puede ver claramente que no existen diferencias considerables en los espesores de asfalto en las distintas zonas de estudio.

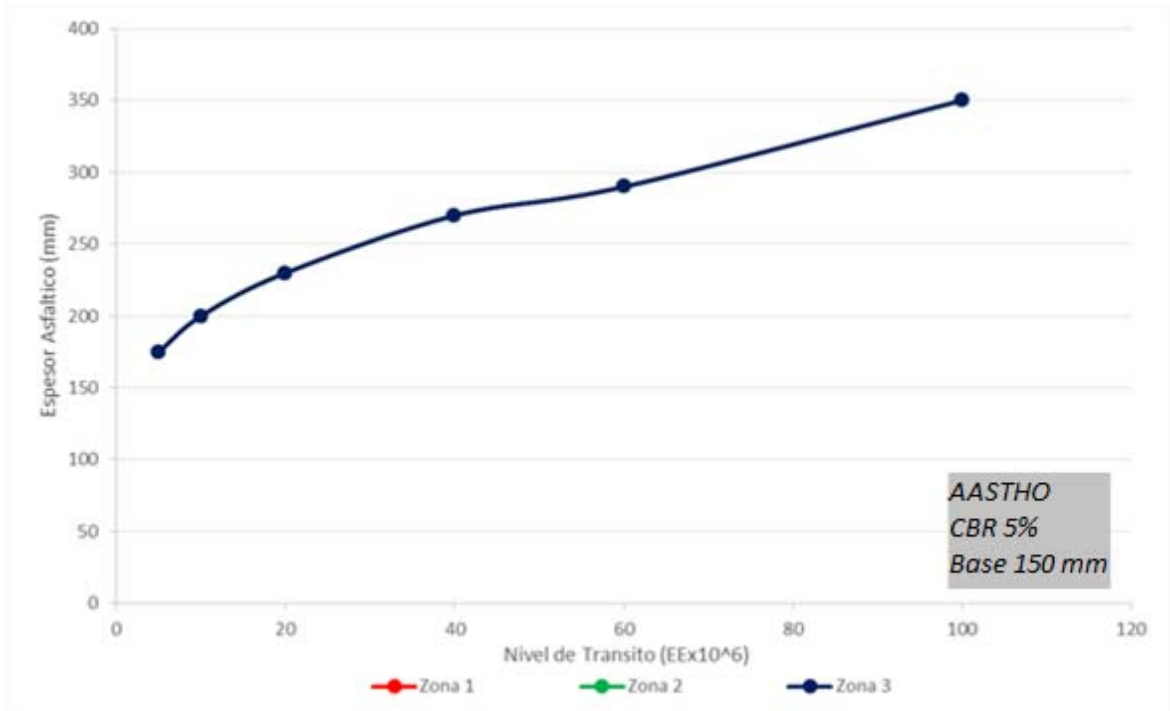


Figura 5.1 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.

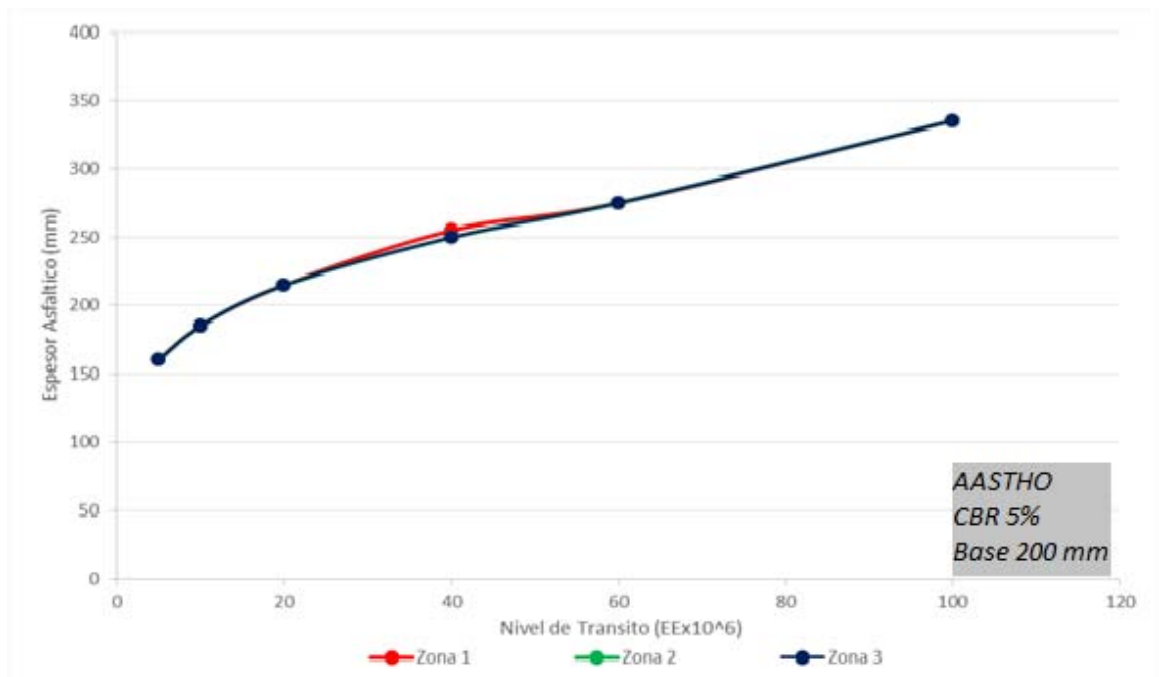


Figura 5.2 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.

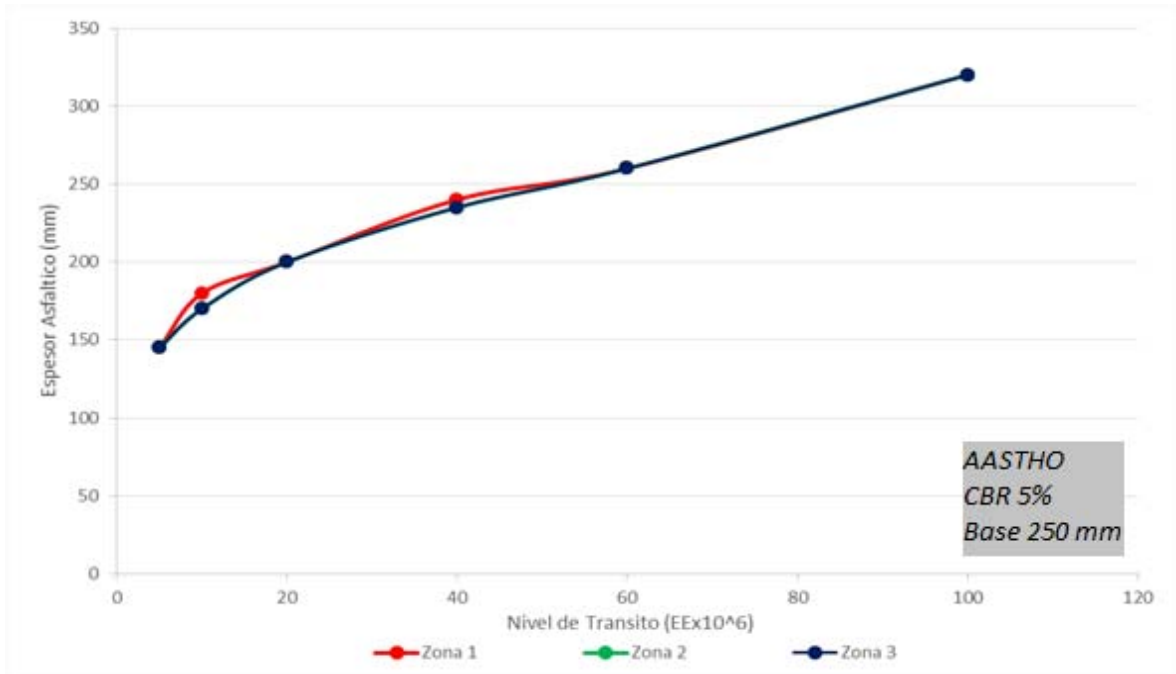


Figura 5.3 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.

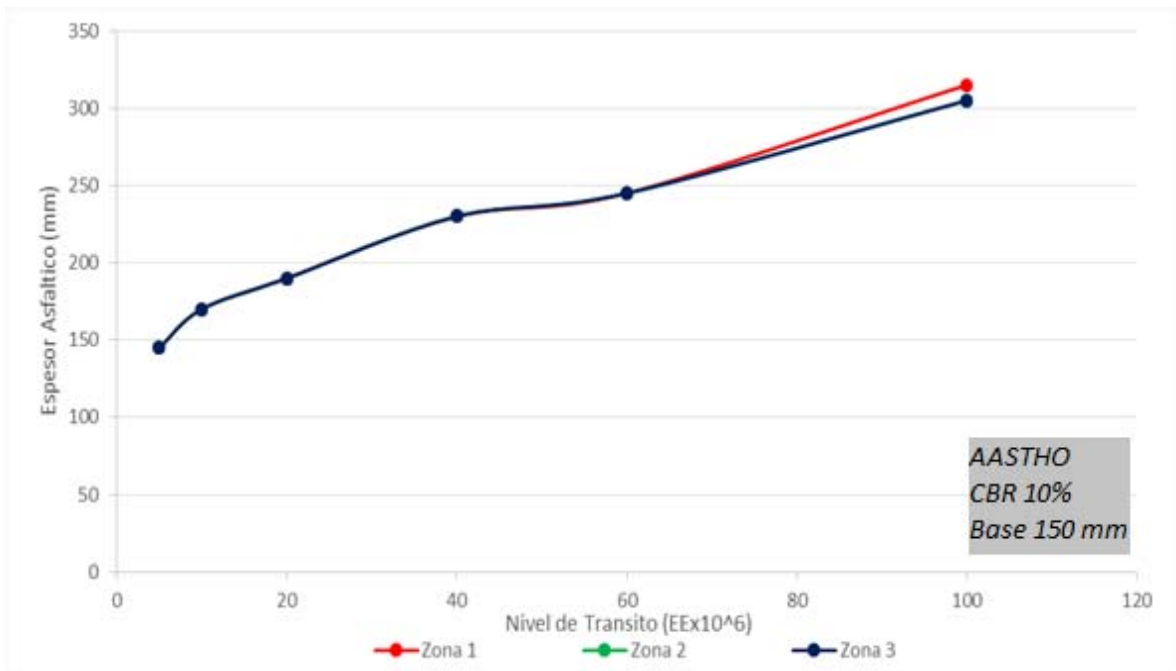


Figura 5.4 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.

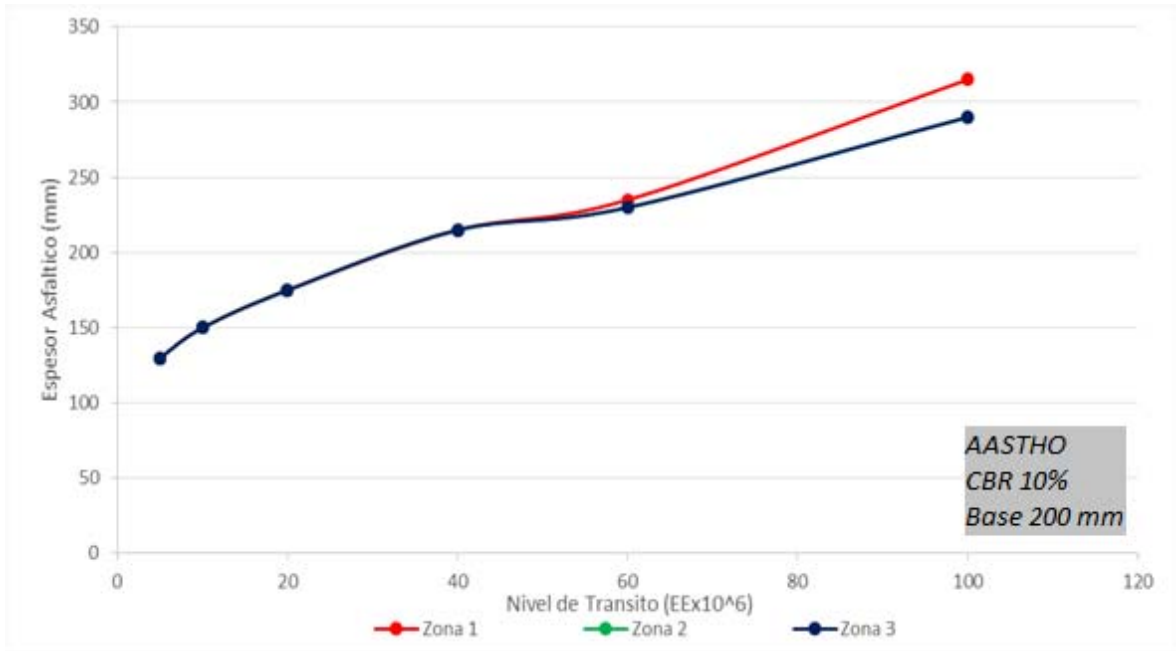


Figura 5.5 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.

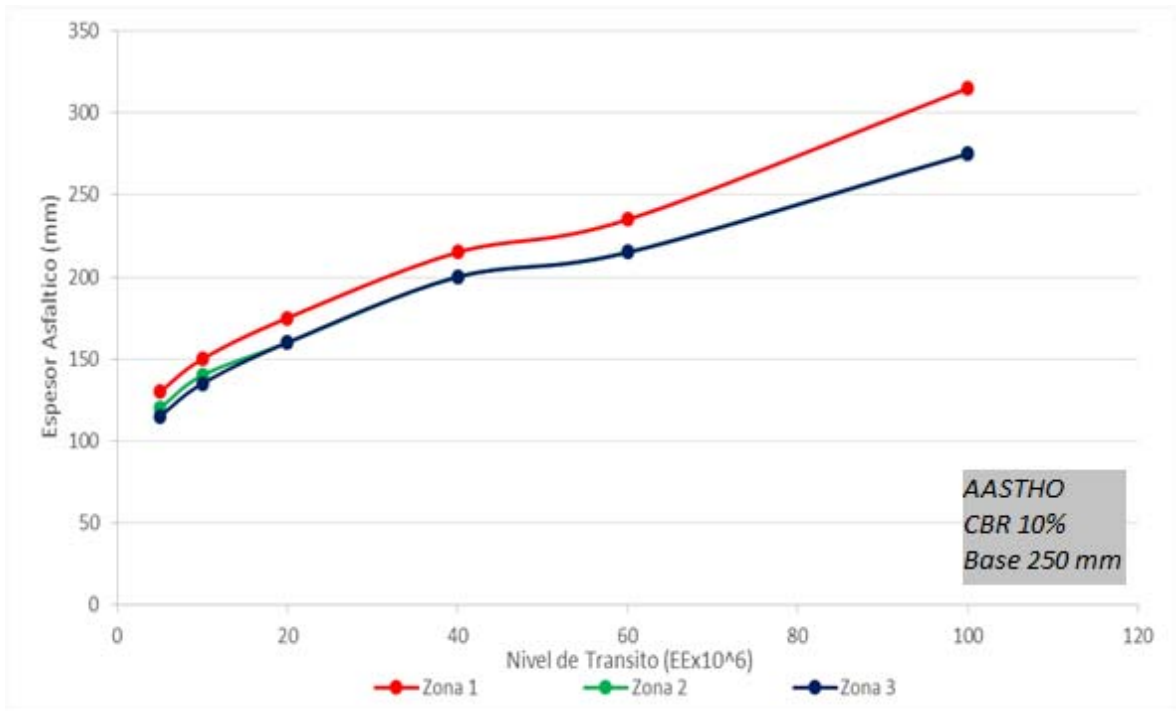


Figura 5.6 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.

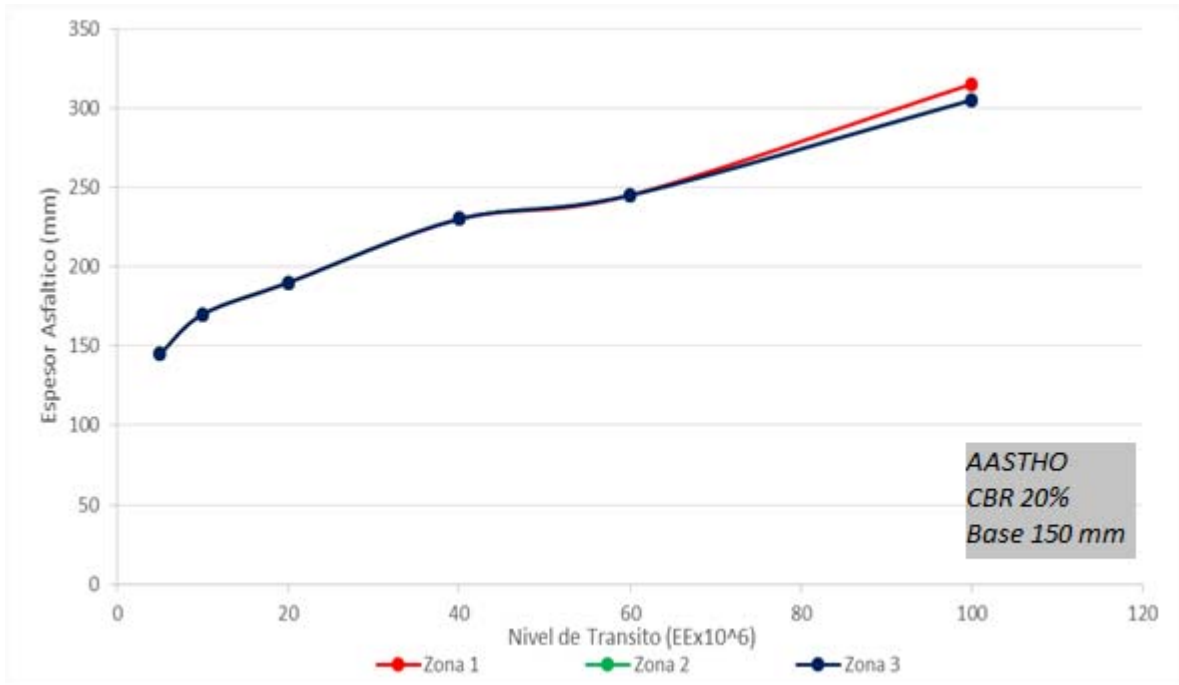


Figura 5.7 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.

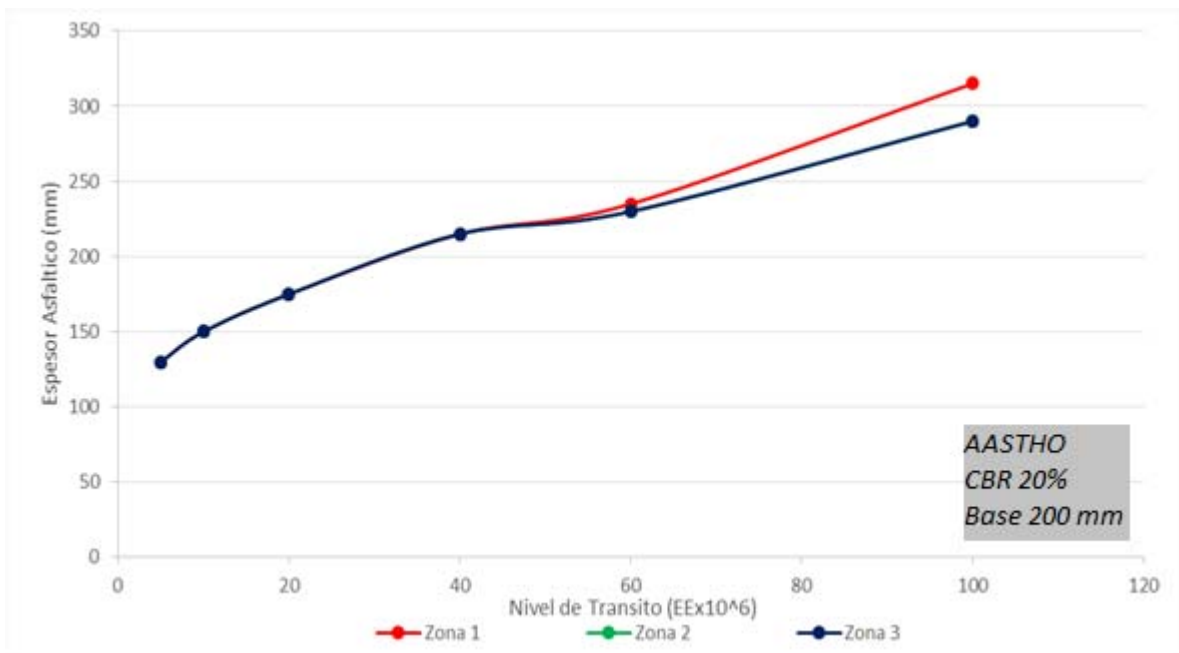


Figura 5.8 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.

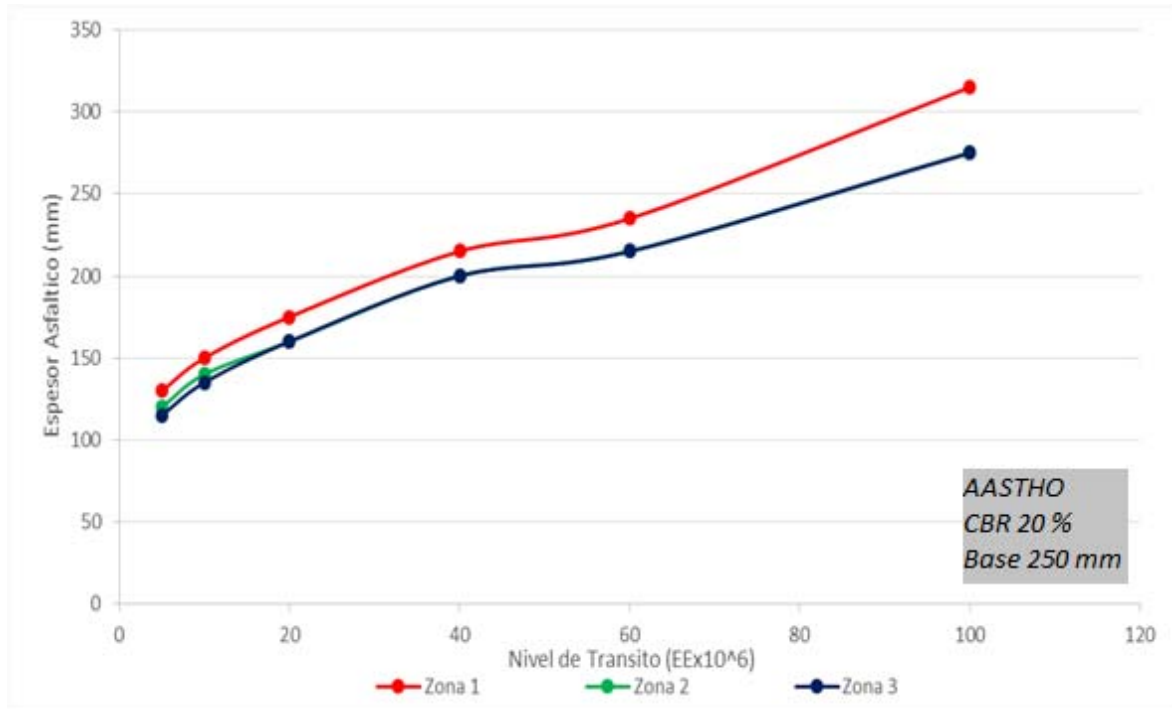


Figura 5.9 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.

Se debe destacar que para las tres zonas si se habla de capacidad estructural en términos de números estructurales totales (ver punto 1.7), la temperatura tiene nula influencia en la capacidad estructural total requerida por la estructura (ver figuras de 5.1 a 5.9).

Aunque no existan diferencias significativas en términos de espesores de la capa de asfalto y capacidad estructural total, no quiere decir que el factor temperatura no influye en el diseño de la estructura de pavimento. Este factor tiene directa influencia en el número estructural mínimo requerido de las capas de asfalto, el cual se aprecia en las diferentes zonas, donde el NEA_{min} tienen números estructurales muy similares, por lo cual, sus números estructurales de la capa asfáltica no se ven afectados por el factor temperatura, que por el contrario debiera ocasionar espesores de asfalto significativamente menores a medida que bajamos de zona, pero esta situación no se refleja en el gráficos de espesores de la capa de asfalto mostrados, donde se puede ver claramente que en los diseños obtenidos en las distintas zonas de estudio, resultan en los mismos espesores de la capa asfáltica, esto es, porque en la estructuración de las distintas capas de la estructura de pavimento, se definieron a las capas granulares mediante espesores constantes, entonces, si la capacidad total de la estructura (NE) no es alcanzada mediante el valor del NEA_{min} en conjunto con los espesores fijos de las capas granulares, el número estructural total deberá ser obtenido mediante el aumento de los espesores de la capa de asfalto. Esto ocasiona una reestructuración del número estructural de las capas de asfalto, originando espesores de asfalto similares aún con la influencia de diferentes temperaturas.

Por otro lado si tomamos en cuenta los distintos parámetros, en primera instancia la influencia que tiene el nivel de tránsito para los distintos diseños de espesores asfálticos, se ve una escasa variación al ir aumentando este parámetro en cada zona de estudio.

A su vez se puede apreciar que para un %CBR Subrasante bajo la influencia es nula pero al ir mejorando la calidad de la subrasante tiende a provocar una leve influencia en las diferentes zonas a medida que bajamos el parámetro temperatura.

Mismos resultados se pueden ver al ir variando el parámetro de espesor para las bases granulares, es decir, que al ir bajando la temperatura se aprecia una disminución de espesores asfálticos para el diseño de pavimentos flexibles.

5.2 Método Shell.

El método de diseño SHELL involucra directamente el factor de temperatura en el proceso de diseño de pavimentos, por un lado, a través de los datos de entrada, por medio de la modificación de la capacidad resistente de la capa de asfalto. Esta propiedad se calcula a través del programa de computador SPDM, el cual utiliza la temperatura de servicio del pavimento para la obtención de la rigidez del asfalto, cuya propiedad es necesaria para el cálculo del módulo de rigidez de la mezcla.

Por otro lado afecta también en la capacidad admisible de la capa de asfalto (medida a través de la deformación por tracción en la fibra inferior de la capa), la cual se obtiene a través de los monogramas de diseño del Manual Shell, cuyos valores dependen de las propiedades de la mezcla.

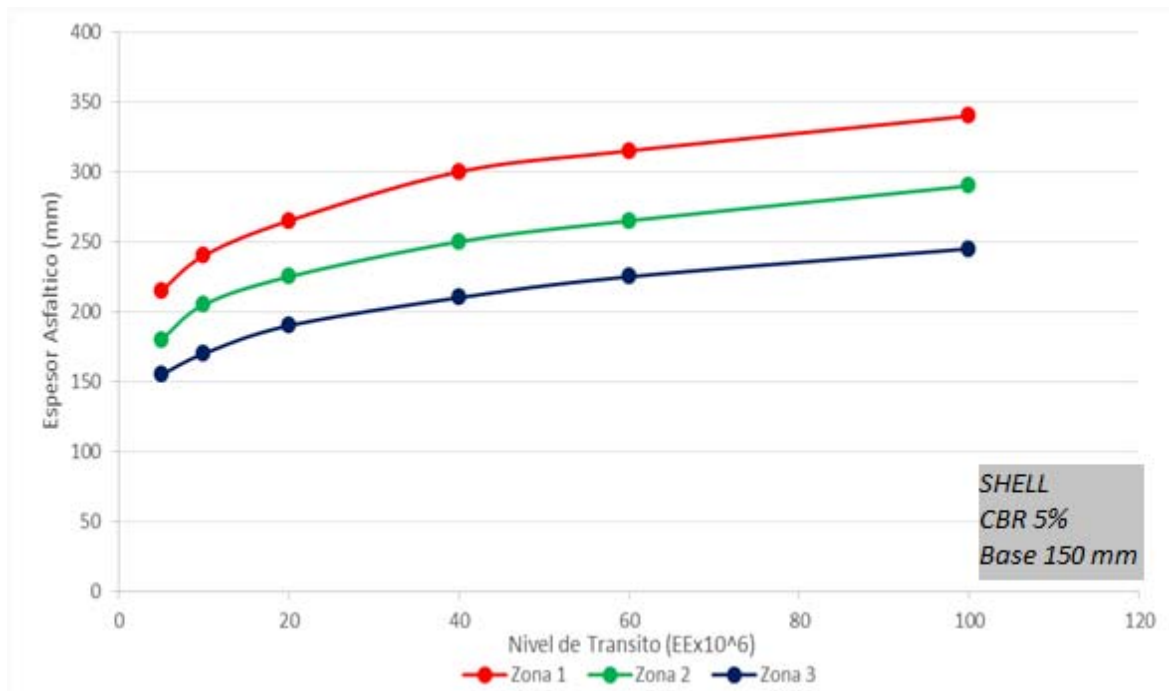


Figura 5.10 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.

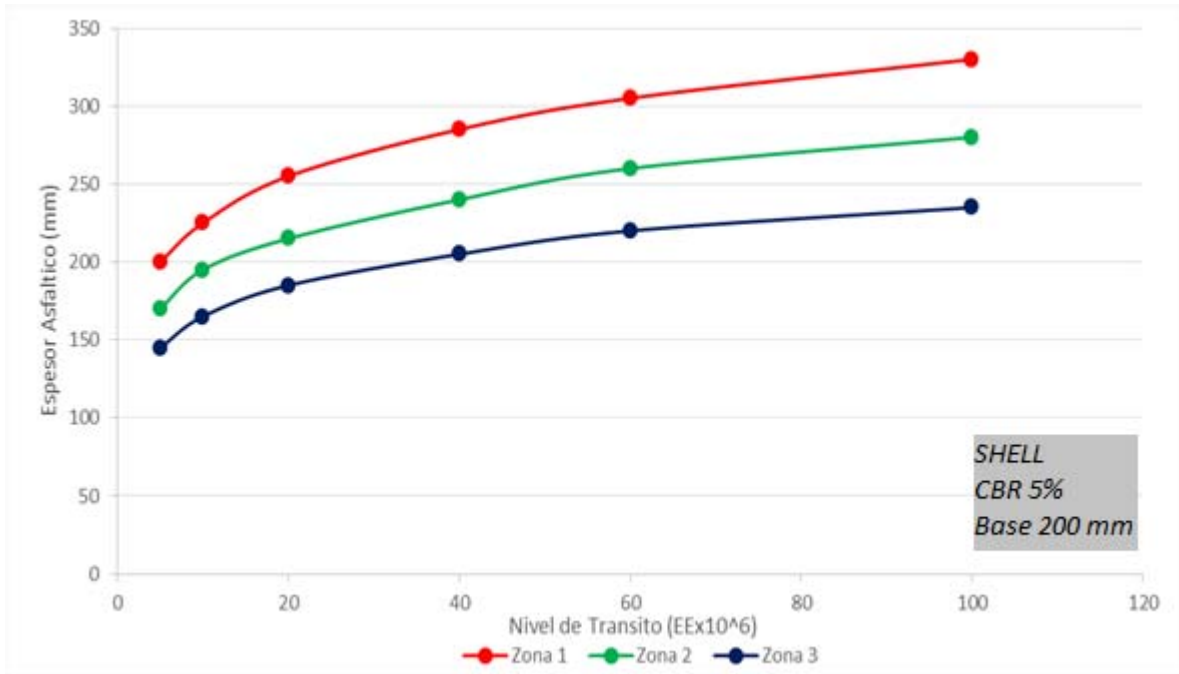


Figura 5.11 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.

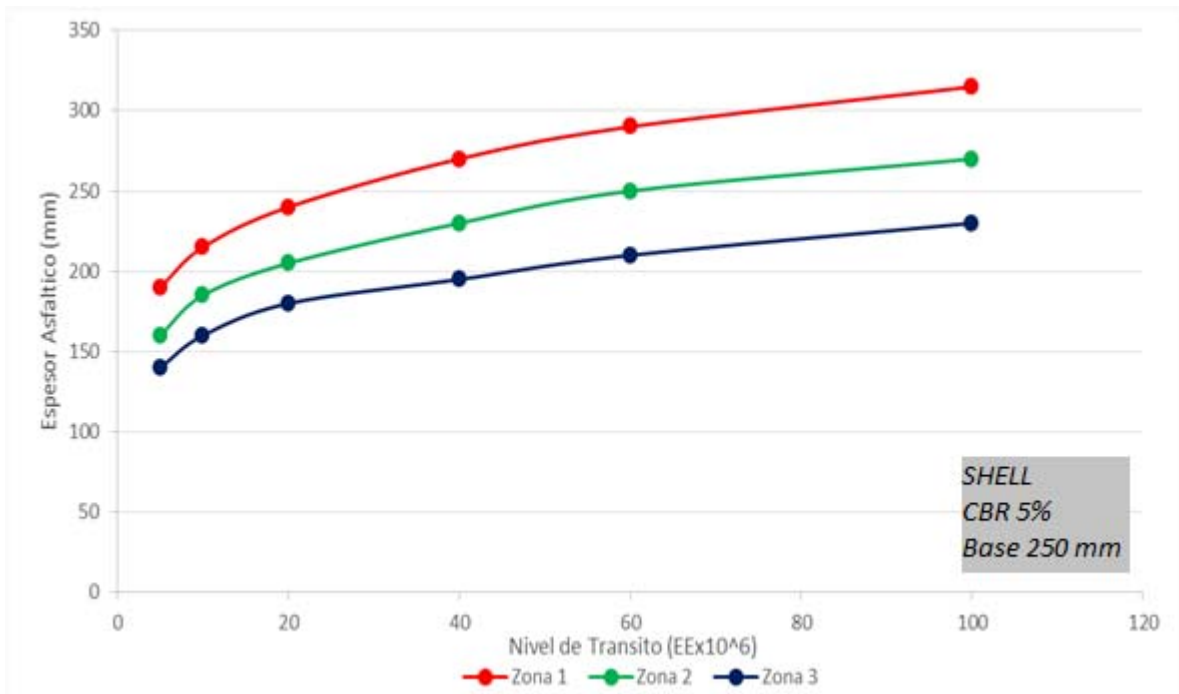


Figura 5.12 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.

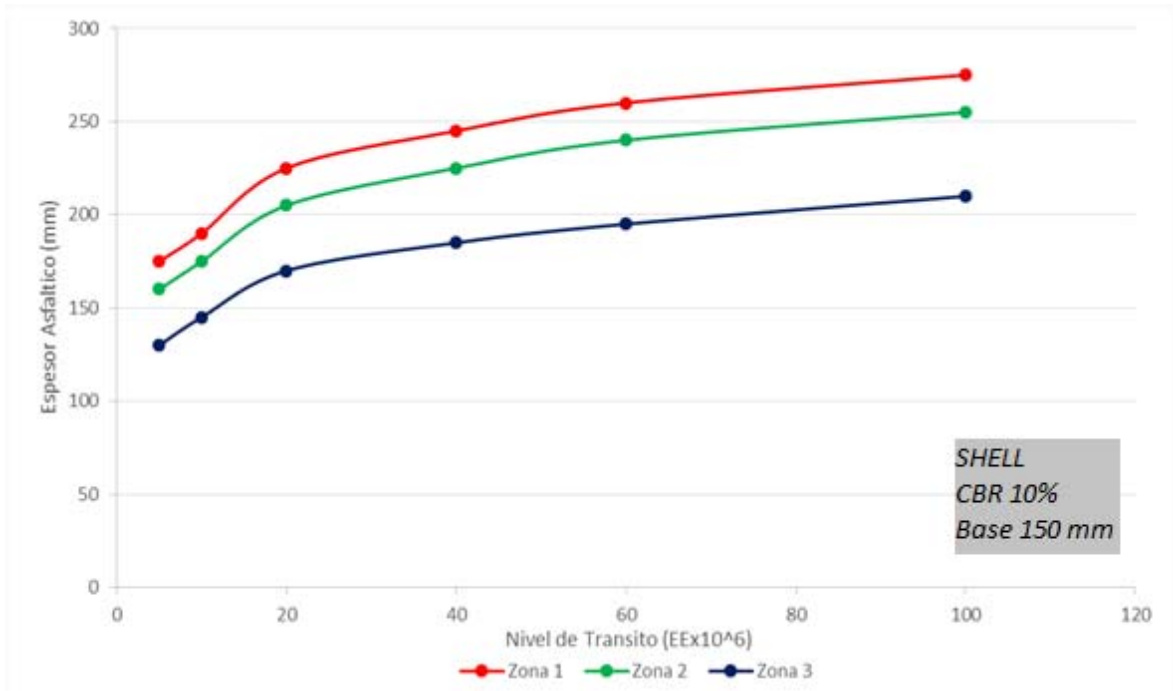


Figura 5.13 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.

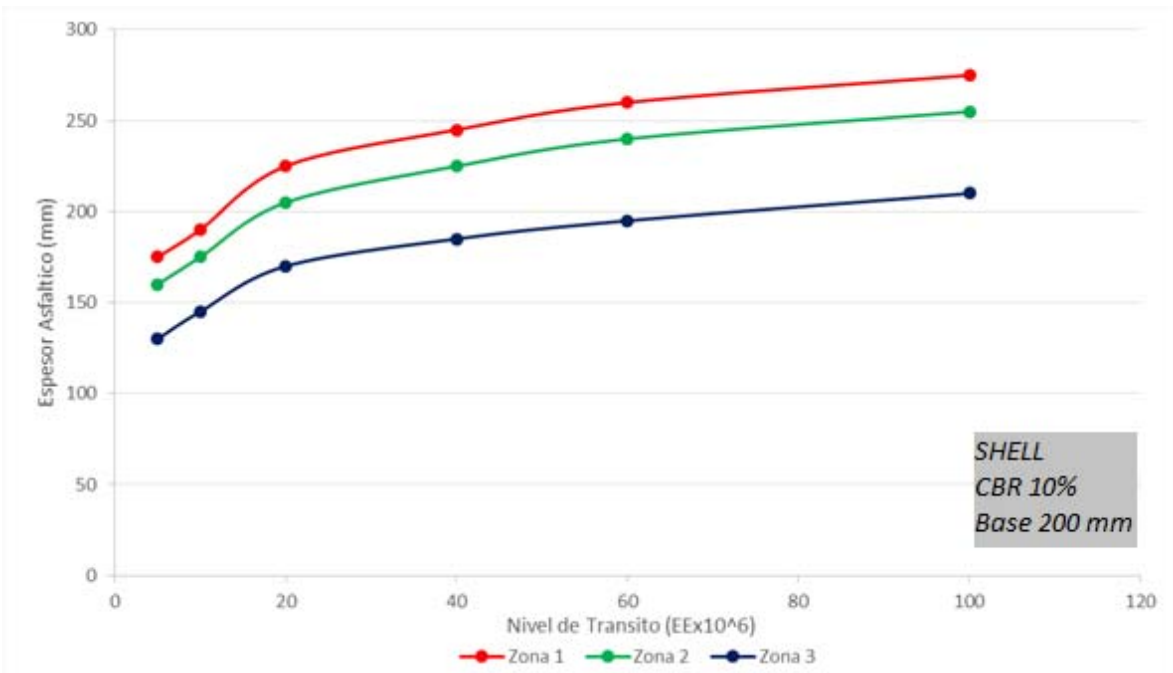


Figura 5.14 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.

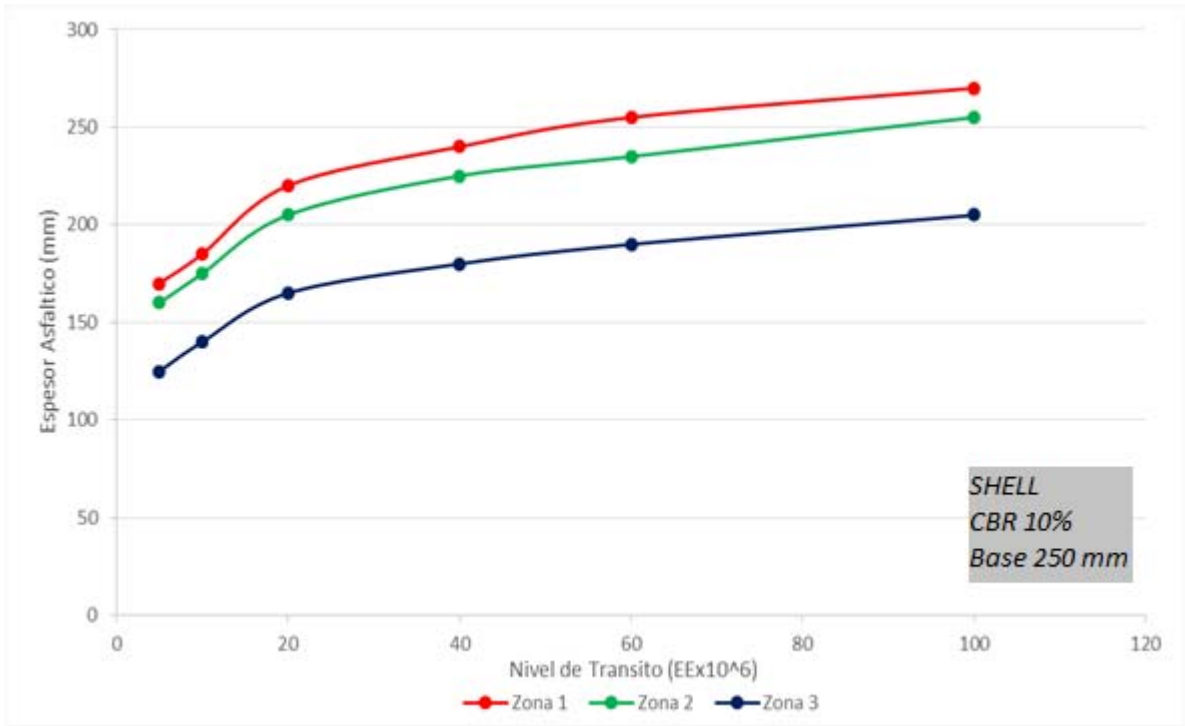


Figura 5.15 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.

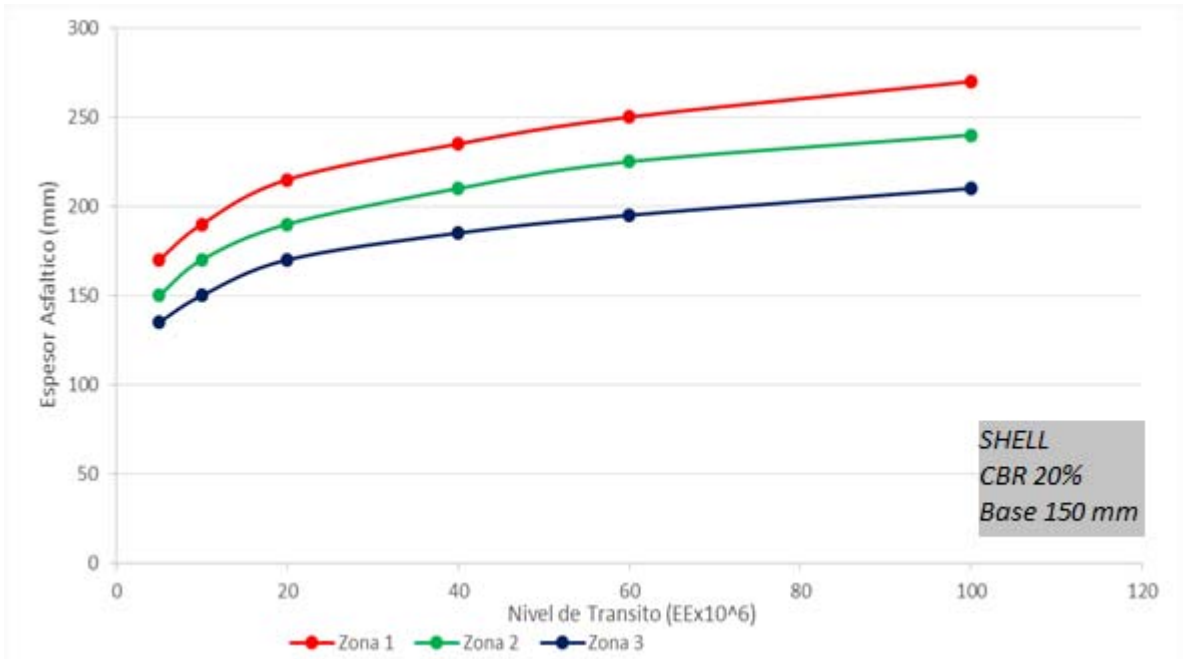


Figura 5.16 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.

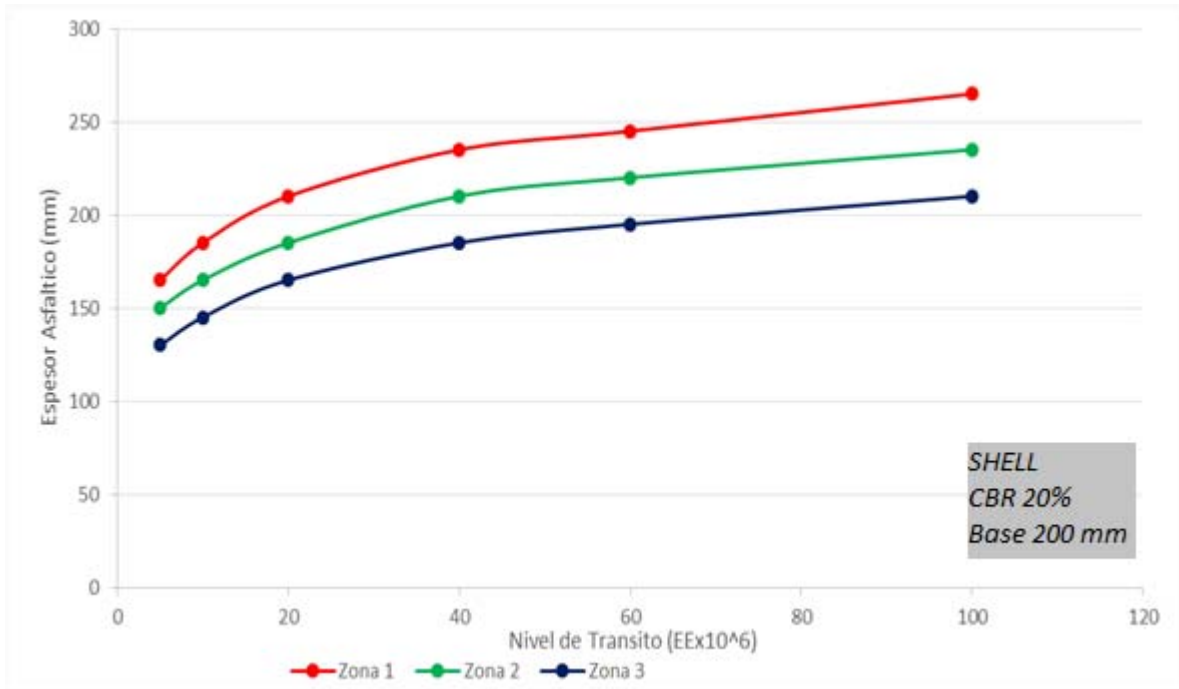


Figura 5.17 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.

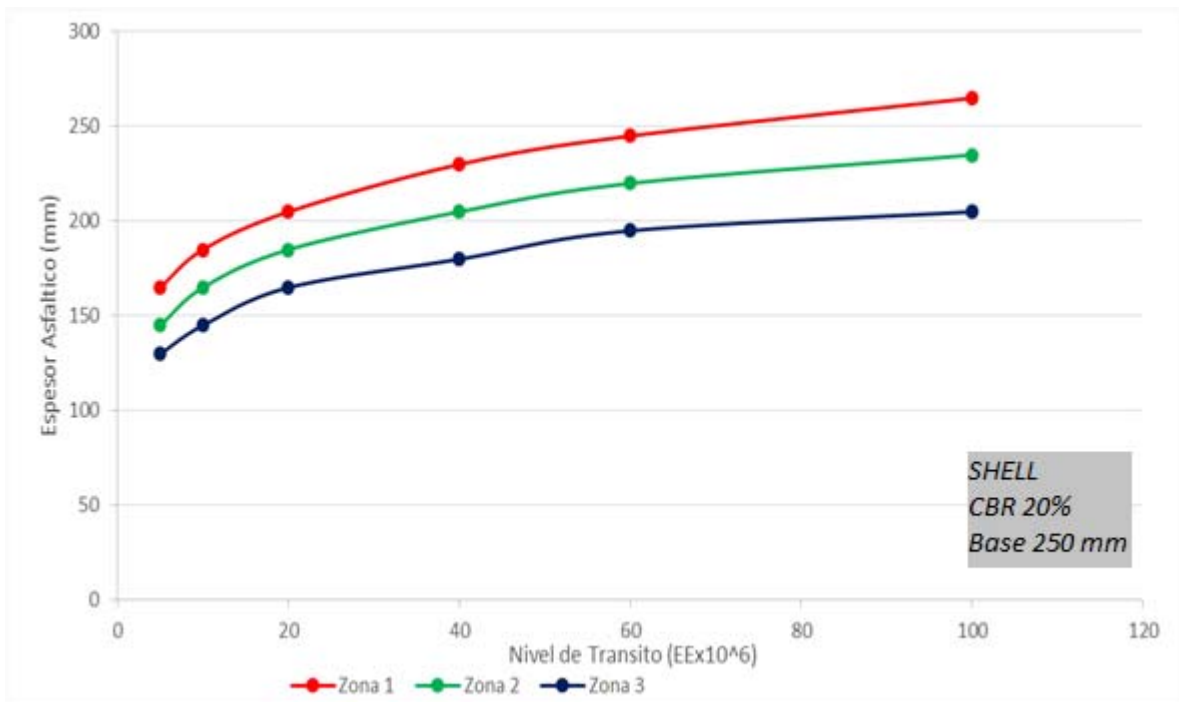


Figura 5.18 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.

Mediante el análisis de las figuras 5.10 a la figura 5.18, se puede concluir que para las temperaturas propias de cada zona de existen diferencias en los espesores asfálticos, lo que permite concluir que el factor temperatura influye realmente en el diseño de pavimentos realizados mediante el método Shell y se refleja en las propiedades de la mezcla como también en las ecuaciones de transferencia que representan los modos de falla específicos del material asfáltico.

Además se puede concluir que las deformaciones de diseño tienen directa relación con la rigidez de la mezcla asfáltica, al aumentar la temperatura de servicio en una estructura de pavimento resultará en una disminución de la rigidez en la capa de asfalto, por lo cual, la estructura presentará un aumento de las deformaciones producidas por la carga de tránsito.

Lo que es proporcional a proyectar la estructura para distintos niveles de tránsito, ocasionando un aumento en los espesores de la capa de asfalto lo que producirá un aumento de la rigidez de esta capa, cuyo resultado será la disminución de las deformaciones producidas en la estructura.

Si bien es cierto, la temperatura de diseño sólo afecta las propiedades de la capa de asfalto, a medida que la temperatura afecte las propiedades de esta capa, puede influenciar de una u otra forma los esfuerzos recibidos por la subrasante. La cual a su vez refleja una disminución de espesores asfálticos a medida que el factor temperatura disminuye u la calidad del %CBR subrasante mejore, al igual pero de menor manera que el caso de los espesores granulares aumenten.

Por último las deformaciones admisibles son más limitadas en las zonas de menor temperatura y a medida que la carga de tránsito aumenta. Esto se debe al aumento de la rigidez presente en las capas, la cual aumenta a medida que crecen los espesores de la base granular pero con una menor relevancia que los factores anteriores.

5.3 Método Sudafricano.

El factor temperatura influye en la capacidad resistente del material asfáltico (módulo de rigidez). Si bien es cierto en el diseño de pavimento realizado por el método Sudafricano, se utilizaron las propiedades de la mezcla obtenidas a través del programa de computador BANDS (Método Shell), los valores del módulo de rigidez recomendados por este método igualmente se ven influenciados por este factor (ver punto 3.5.3.1).

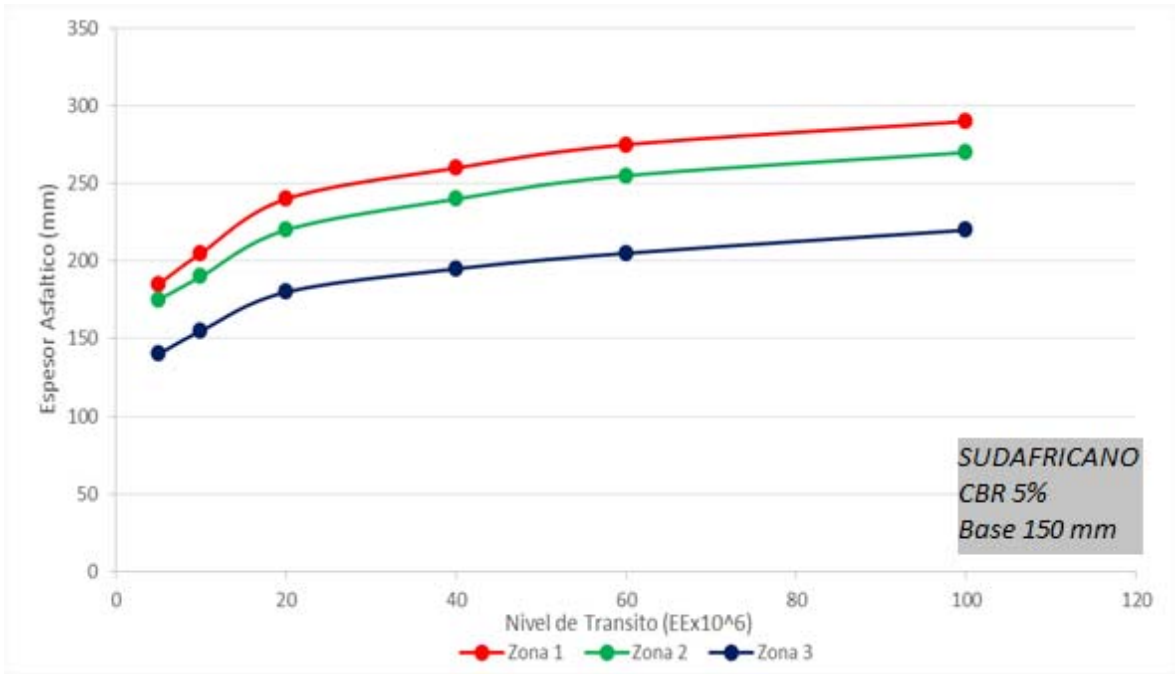


Figura 5.19 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.

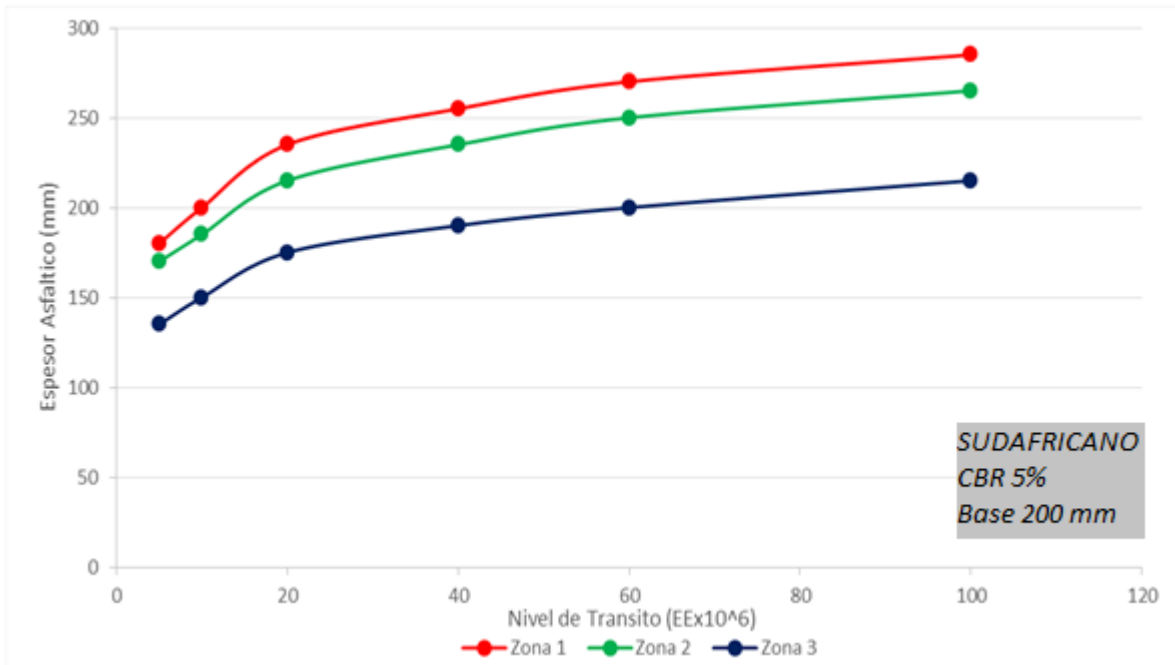


Figura 5.20 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.

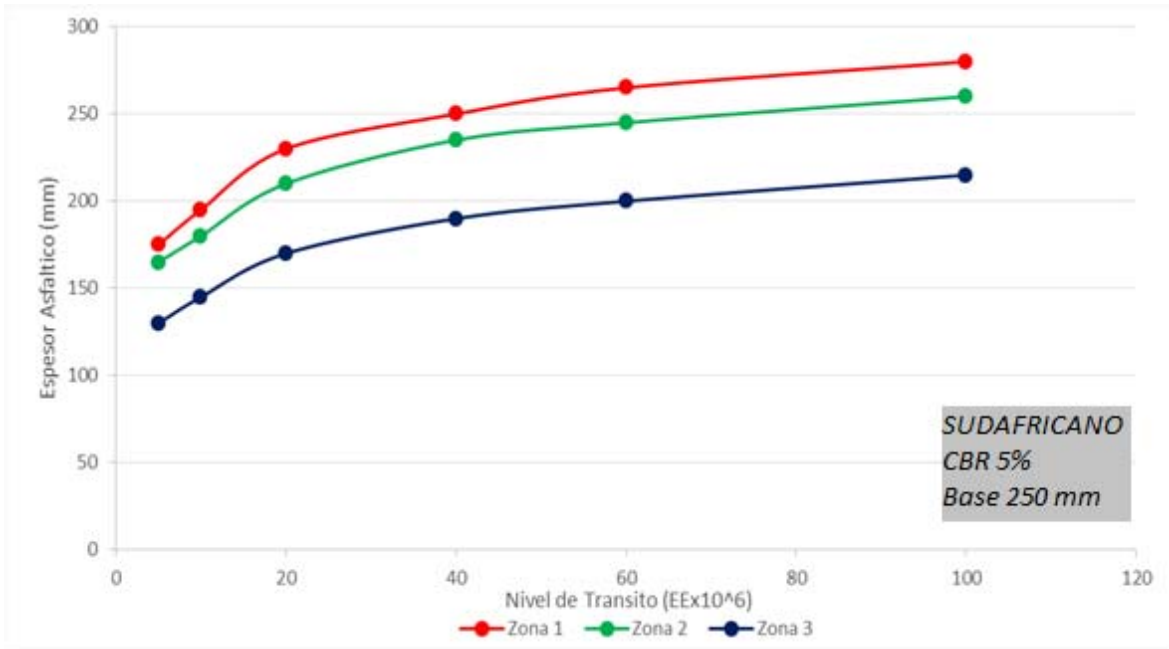


Figura 5.21 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.

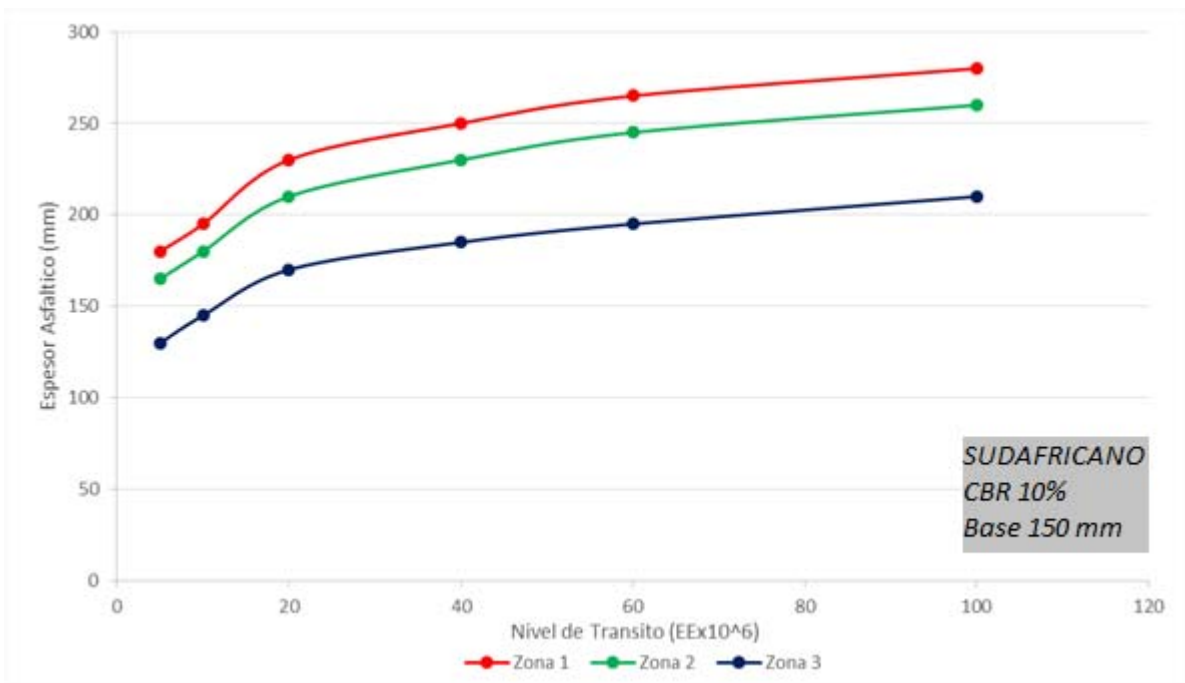


Figura 5.22 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.

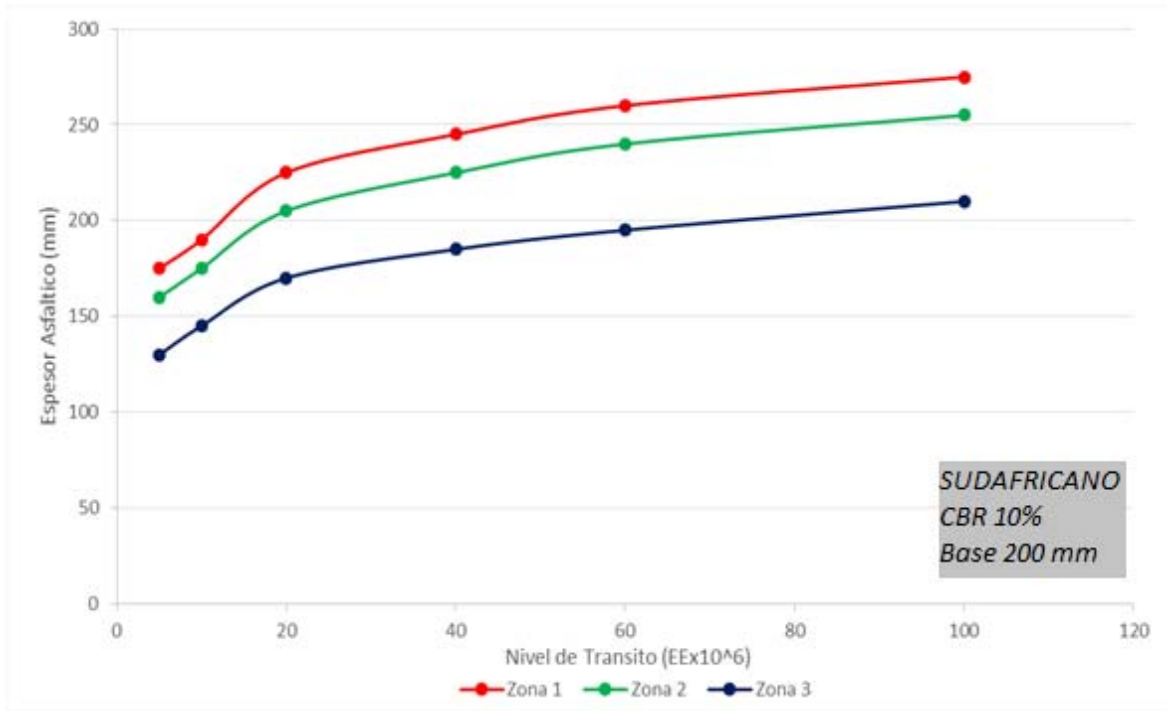


Figura 5.23 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.

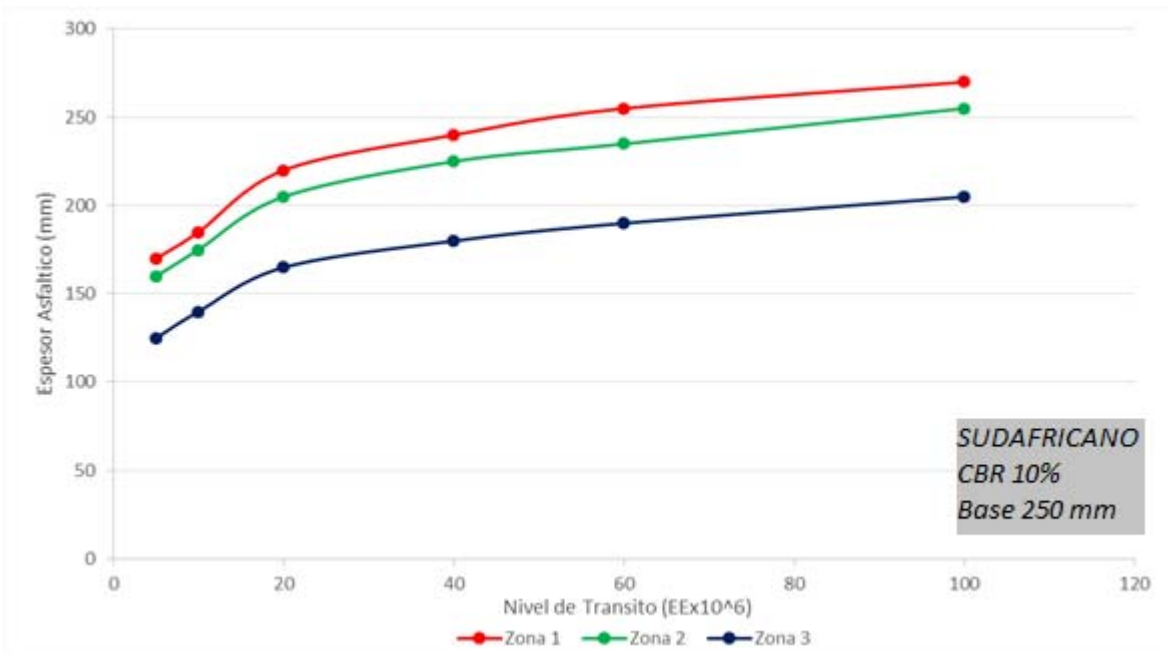


Figura 5.24 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.

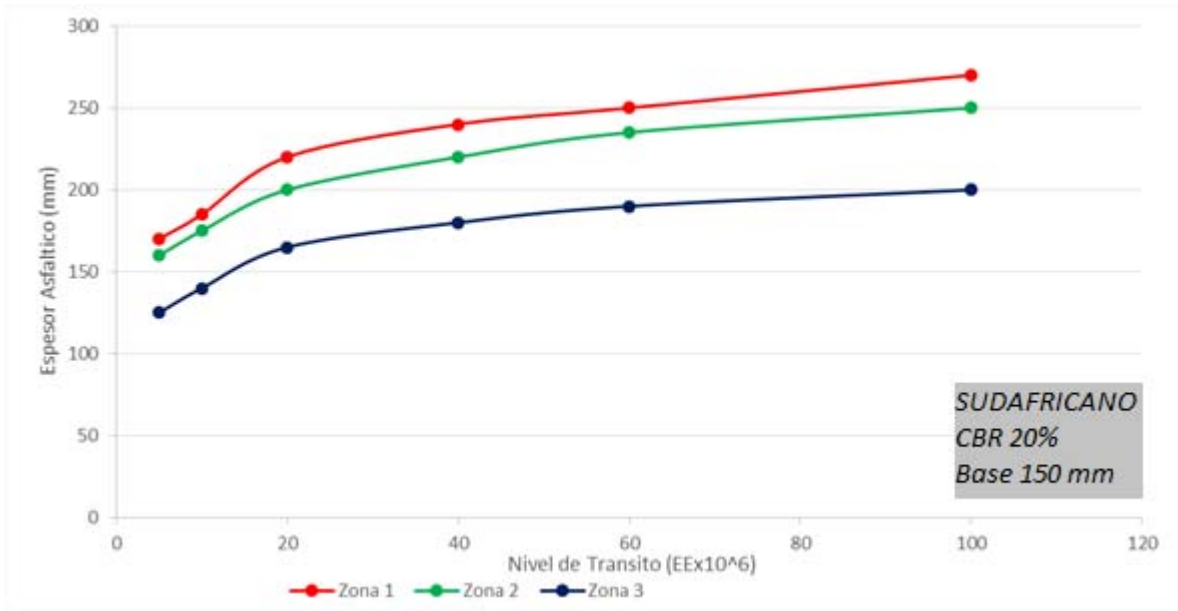


Figura 5.25 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.

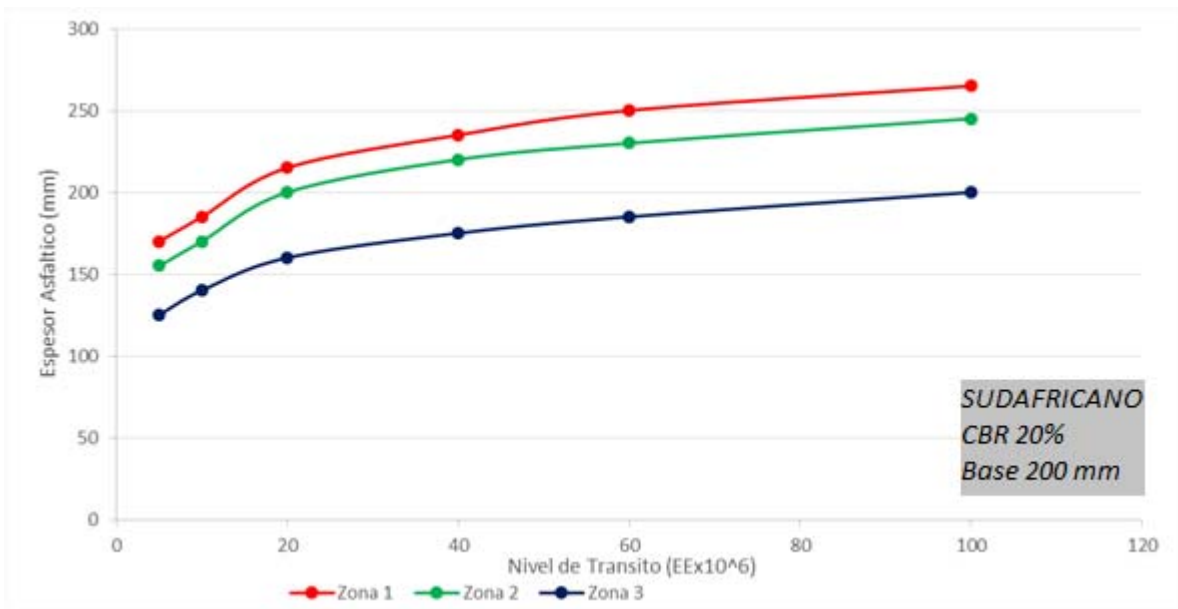


Figura 5.26 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.

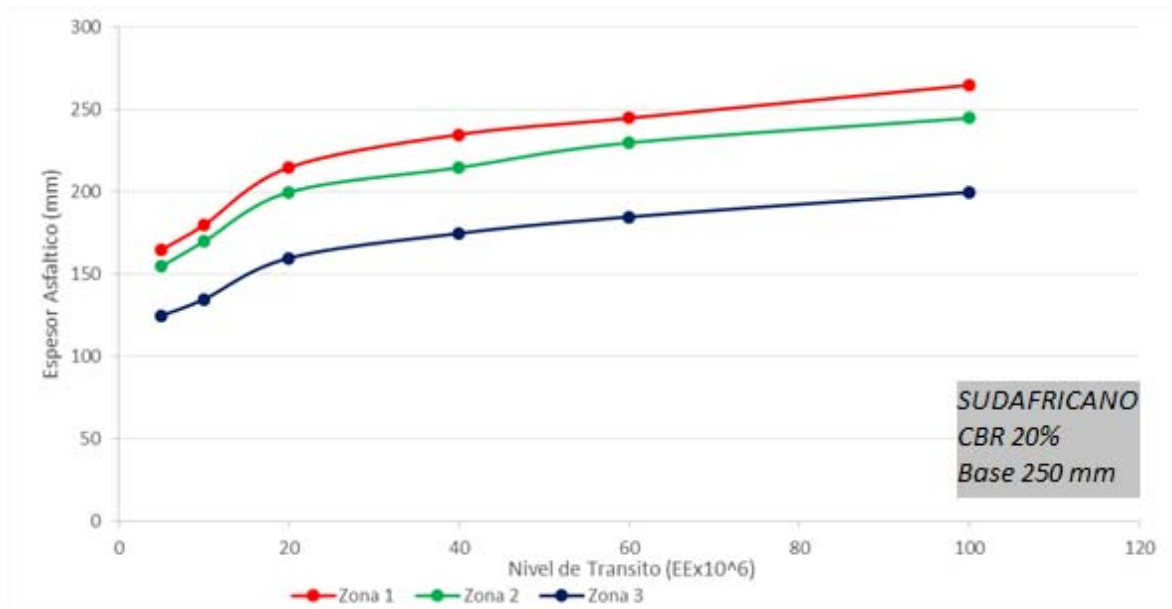


Figura 5.27 - Espesores de asfalto considerando las distintas Zonas, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.

Realizando un análisis comparativo entre los diseños, mediante las figuras 5.19 a la 5.27, se puede concluir que las estructuras de asfalto diseñadas mediante el método Sudafricano, controla el modo de falla por tracción de las capas de asfalto, los cuales tendrán directa influencia en el diseño final de la estructura de pavimento. Entonces estas estructuras al ser proyectadas en zonas que presentan distintas temperaturas, tendrán diferencias marcadas en el diseño, los que se reflejarán en los espesores finales de la carpeta asfáltica.

La capacidad estructural admisible, depende de la categoría de la carretera además del módulo de rigidez de la capa, cuyo valor depende directamente de la temperatura en servicio de la estructura de pavimento. Entonces el factor de temperatura debería afectar directamente el diseño de las estructuras de pavimentos.

A su vez a medida que aumenta la carga de tránsito y al disminuir la temperatura del proyecto, todo eso relacionado al aumento de la rigidez de la carpeta asfáltica, ya que al disminuir la temperatura de proyecto aumenta la rigidez de la estructura. Las estructuras de tránsito alto originan mayores espesores de asfalto, por lo cual de igual manera aumentan la rigidez de la estructura.

En el caso del %CBR Subrasante y espesores granulares se aprecia que si bien al mejorar y/o aumentar parámetros de estos su influencia sobre la estructura es mínima, esto debido a que el diseño está controlado por las capas superiores, es decir la carpeta asfáltica que constituye el modo de falla de la estructura de pavimento a controlar.

Por lo tanto se aprecia una variación paralela para espesores asfálticos al variar la temperatura y proporcional a medida que se varían los demás parámetros para cada zona.

CAPITULO VI

6. COMPARACION DE DISEÑOS.

En el capítulo anterior se mostró como y de qué manera los parámetros más importantes en el diseño de una estructura de pavimentos flexibles, afectan o influyen en las características finales de una estructura. Además se dió a entender que existen distintas formas de modelar a una estructura, de acuerdo al ingreso de los parámetros de entrada en las distintas ecuaciones de diseño, consideradas por cada método de diseño, tales como, propiedades de soporte de las capas granulares y capas asfálticas, confiabilidad de diseño, temperatura de servicio, carga de tránsito, como también en los resultados obtenidos por cada método, los cuales dependen de las consideraciones y restricciones que rigen en cada diseño, por lo cual su comparación resulta bastante complejo. Existe un parámetro en términos de resultados de diseño que converge en los tres métodos de diseño, estos son los espesores de asfalto.

Por un tema de conveniencia, como también una forma de simplificar los análisis y resultados obtenidos a través de cada método de diseño, se compara con el similar en donde se mantuvo el espesor de la capa granular constante. En cada caso de estudio se varía solamente los espesores de la capa de asfalto para cumplir con las disposiciones propias de cada método de diseño.

El objetivo de este capítulo es comparar los espesores de la capa asfáltica obtenidos por el método AASHTO, método Shell y método Sudafricano y obtener conclusiones del cómo y porqué una estructura en particular se comporta frente a distintas condiciones al analizarla con distintas metodologías de diseño.

Esta comparación se realizará mediante un gráfico, en el cual se muestra los resultados de los distintos diseños, en términos de espesor de la capa de asfalto, para cada condición de tránsito, temperatura, capacidad de soporte de la subrasante, condiciones definidas en el Capítulo III, de manera de simplificar la comparación entre los distintos métodos de diseño.

6.1 Resultados obtenidos en Zona 1

Los gráficos de las figura 6.1 a la 6.9 resume los resultados en términos de espesores de la capa de asfalto (en milímetros), obtenidos a través de las distintas metodologías de diseño en función de la sollicitación de tránsito (en términos de ejes equivalentes), en cuales se considera una vida de diseño de 20 años.

Estos resultados fueron extraídos de los diseños realizados en el capítulo IV, a partir de la definición de los distintos parámetros que influyen en el diseño de pavimentos flexibles, tales como, clima, espesores de las distintas capas granulares, propiedades de la mezcla asfáltica, confiabilidad de diseño, factores que fueron completamente definidos en el Capítulo III.

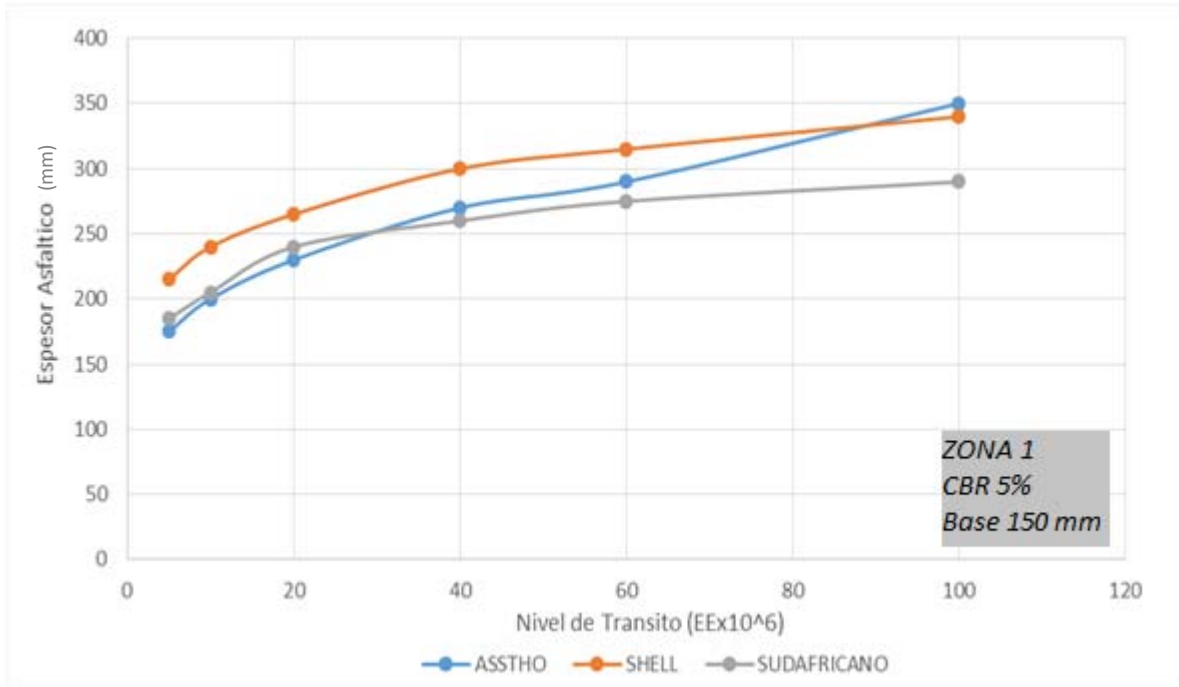


Figura 6.1 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.

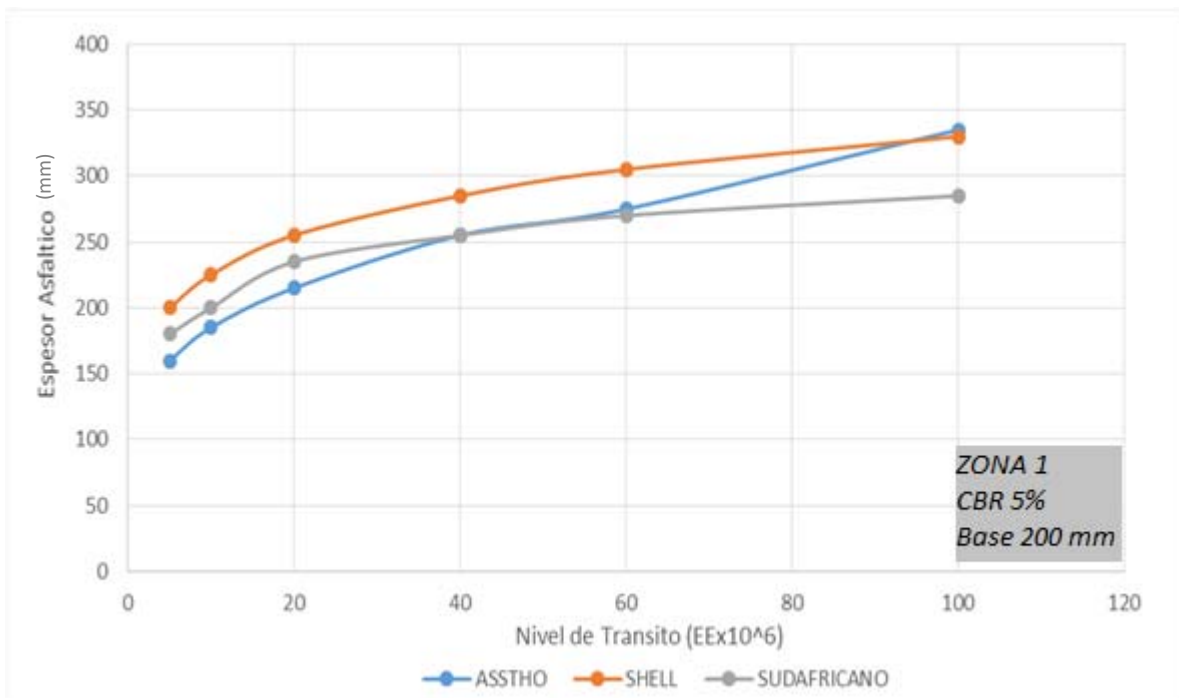


Figura 6.2 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.

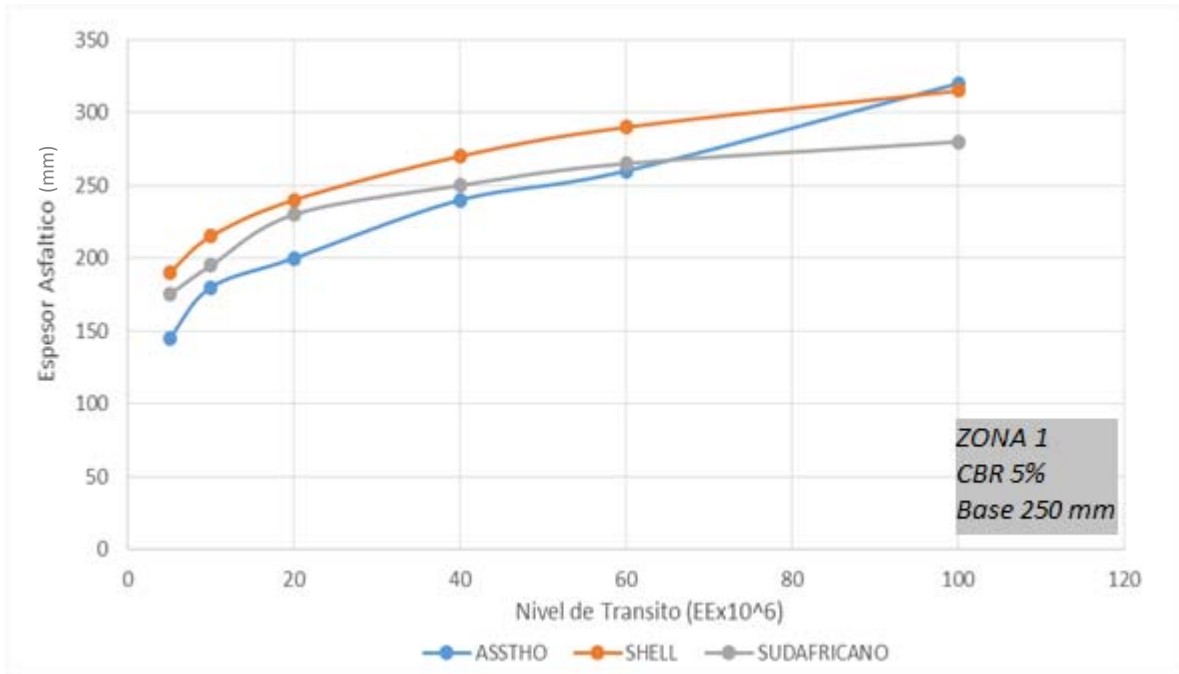


Figura 6.3 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.

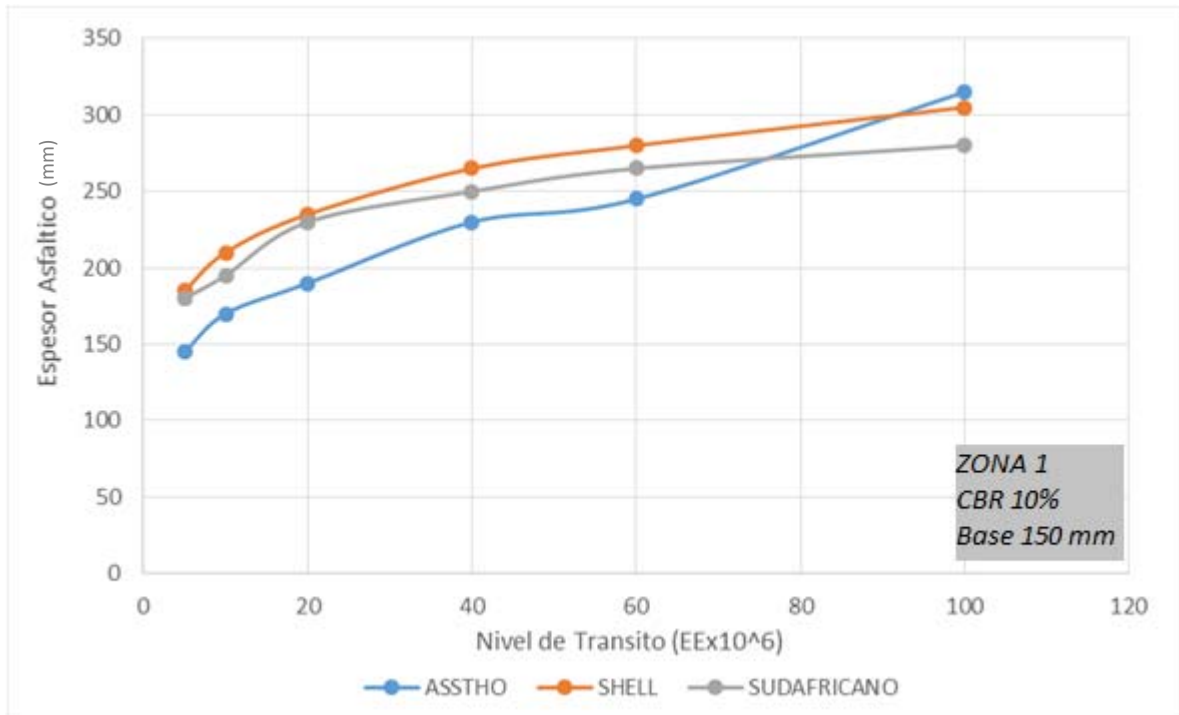


Figura 6.4 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.

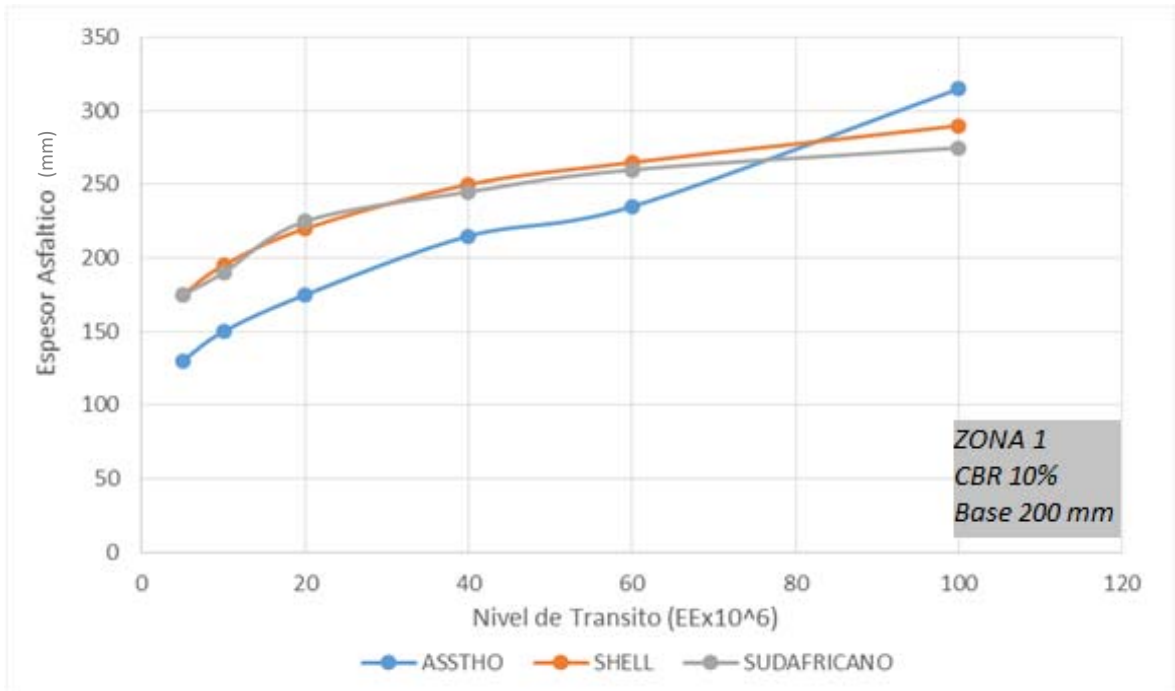


Figura 6.5 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.

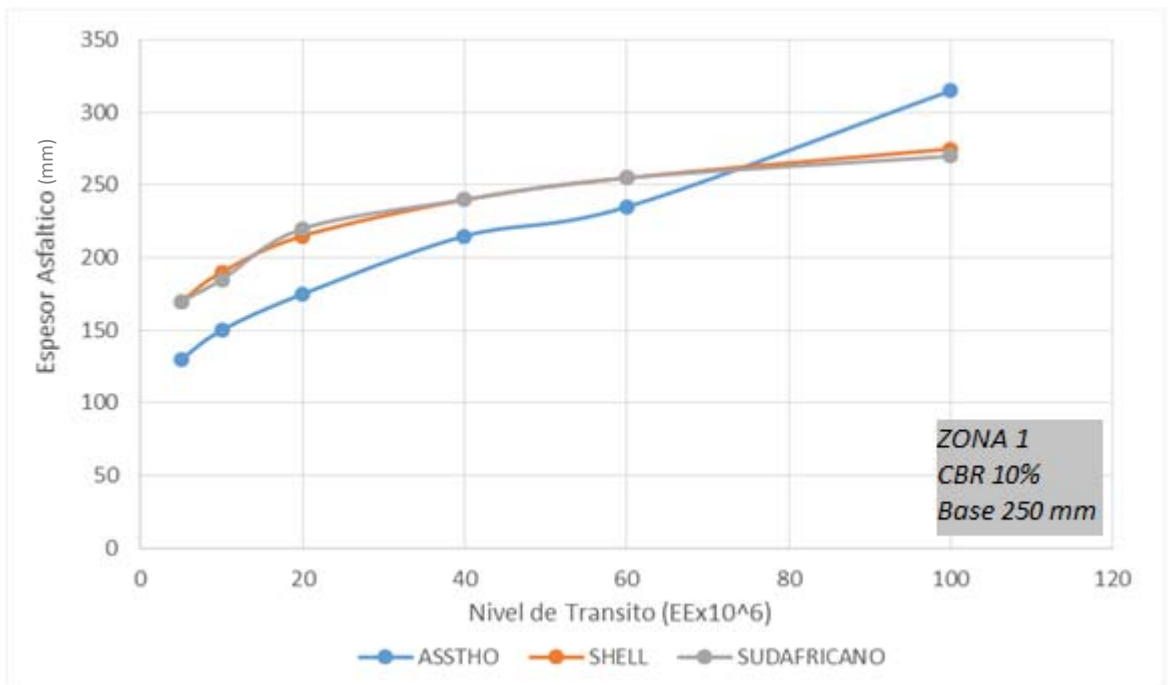


Figura 6.6 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.

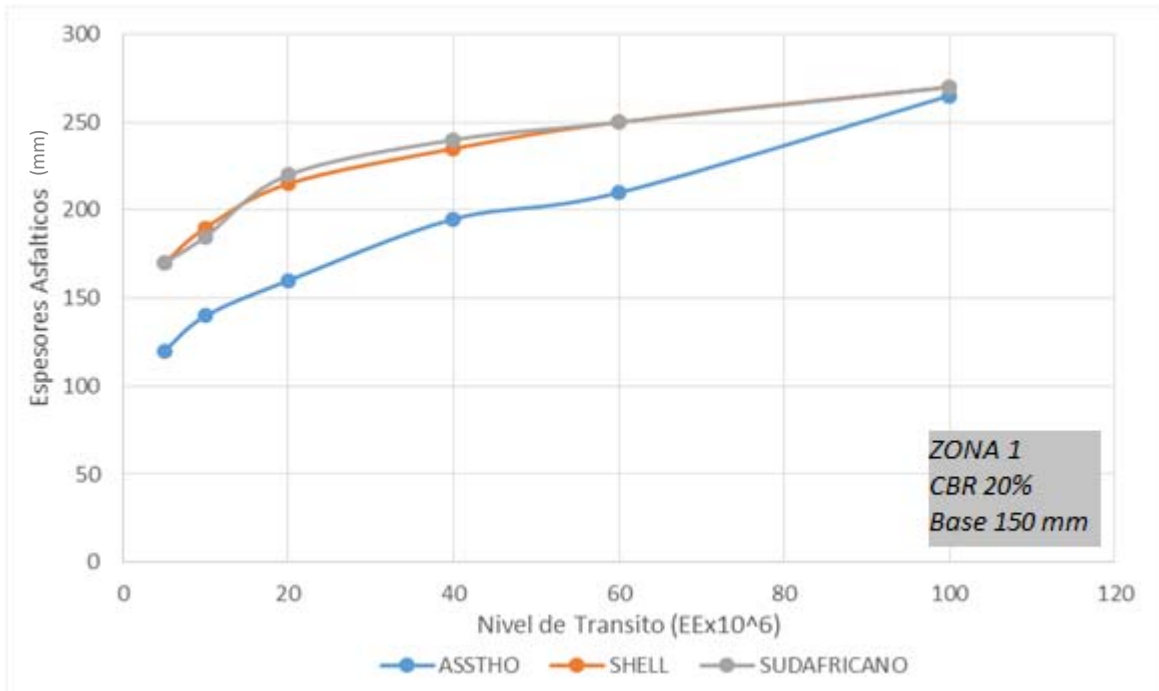


Figura 6.7 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.

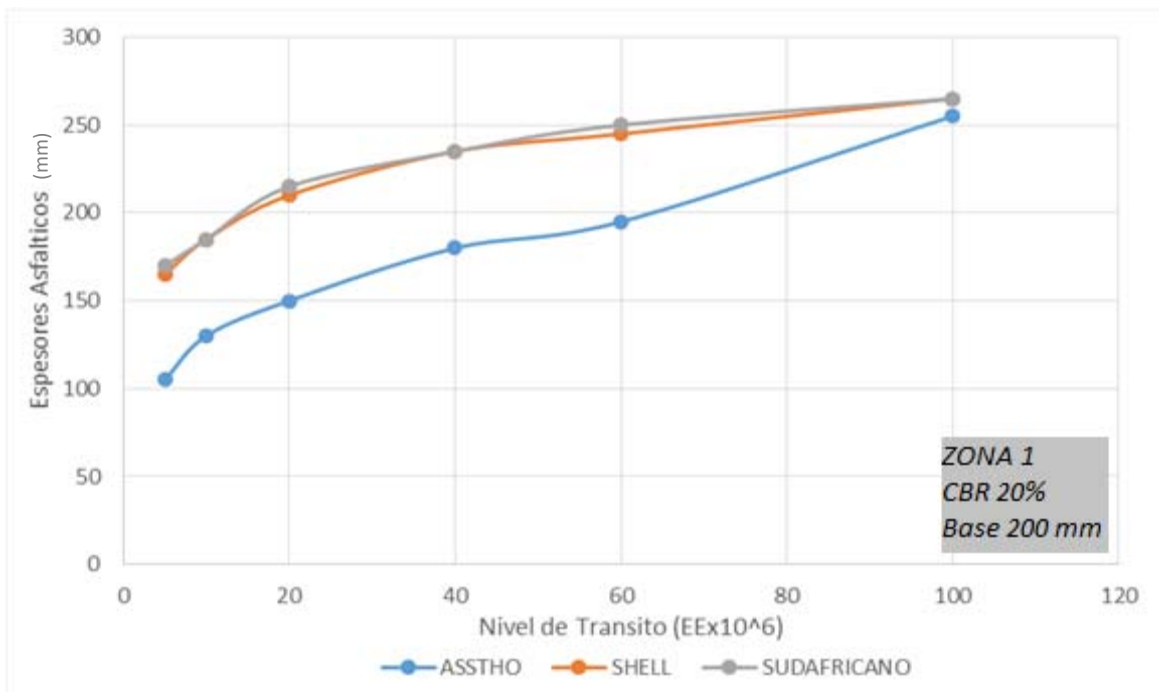


Figura 6.8 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.

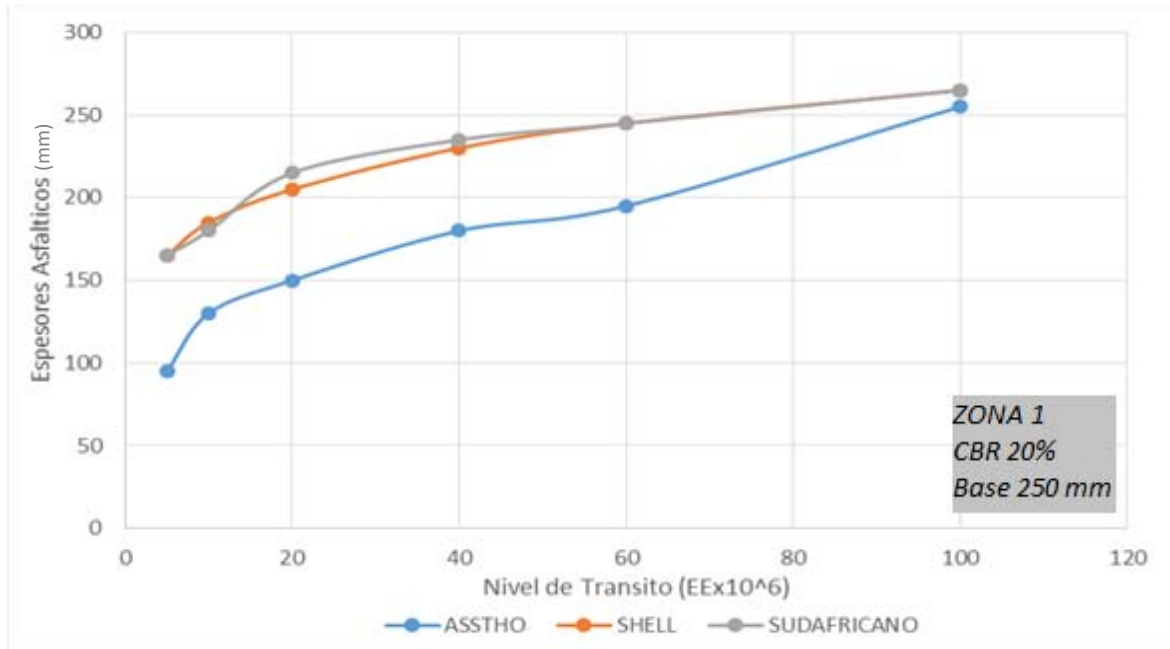


Figura 6.9 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 1, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.

La diferencia en términos de espesores de la capa de asfalto, que resulta entre los distintos métodos de diseño se puede explicar al recordar el análisis de sensibilidad realizado en el Capítulo V, en relación al parámetro temperatura. En este análisis se concluye que el diseño realizado por el método AASHTO, en relación a los espesores de la capa de asfalto, no se ve influenciado por el factor temperatura, a diferencia de los diseños realizados por los métodos empírico-mecanicistas, en los cuales este parámetro presenta una influencia significativa en el diseño.

En los gráficos de las figuras 6.1 a la 6.6, se aprecia que para %CBR Subrasante bajos se ven puntos de intersección para las curvas de los métodos empírico-mecanicistas (Shell y Sudafricano) con el método empírico (AASHTO), los cuales van en aumento proyectándose en niveles de tránsito superiores a partir del aumento de espesores en bases granulares.

A diferencia de los resultados anteriores cuando el %CBR de la subrasante supera el 20%, se puede observar claramente que los métodos de diseño gobernados por la metodología empírico-mecanicistas generan mayores espesores en la capa de asfalto en comparación a los espesores desarrollados por el método empírico para esta misma zona, esta diferencia se muestra constante para todas las condiciones de tránsito consideradas en el análisis, aunque se ve una tendencia a revertir esta condición el método Sudafricano en particular, lo cual muestra coherencia con lo descrito en el párrafo anterior.

De los resultados obtenidos mediante el método Shell y Sudafricano, se puede observar que son bastante similares, sólo en condiciones de tránsito y %CBR Subrasante bajos se puede apreciar mayores diferencias, la cual disminuye al ir creciendo estos parámetros.

6.2 Resultados obtenidos en la Zona 2.

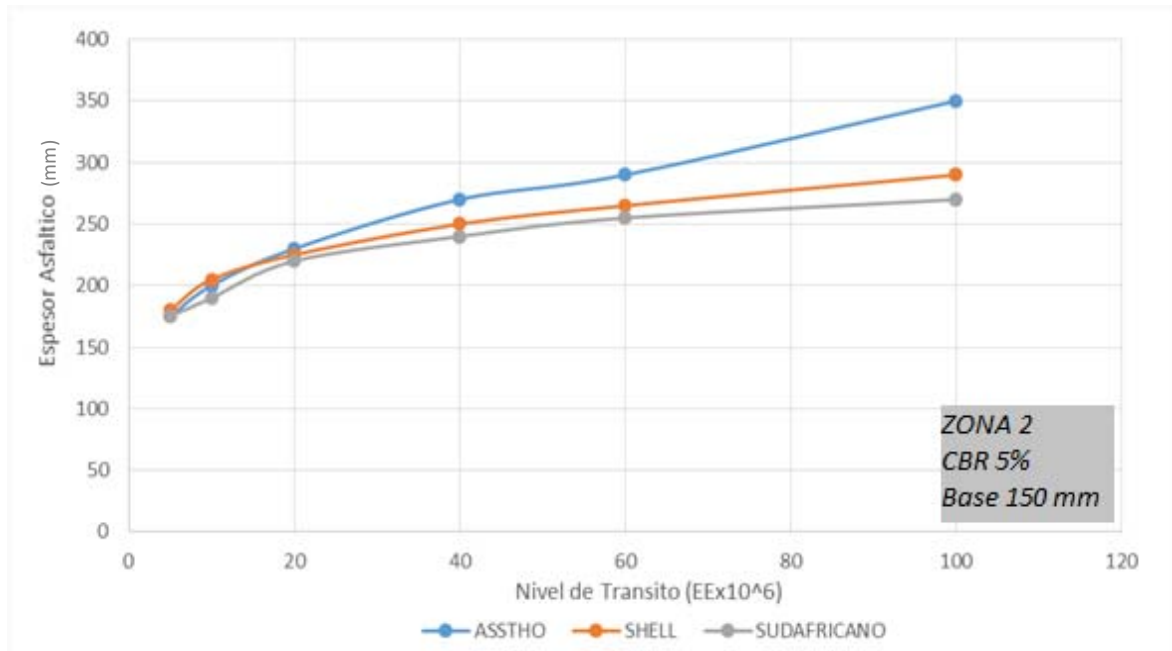


Figura 6.10 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.

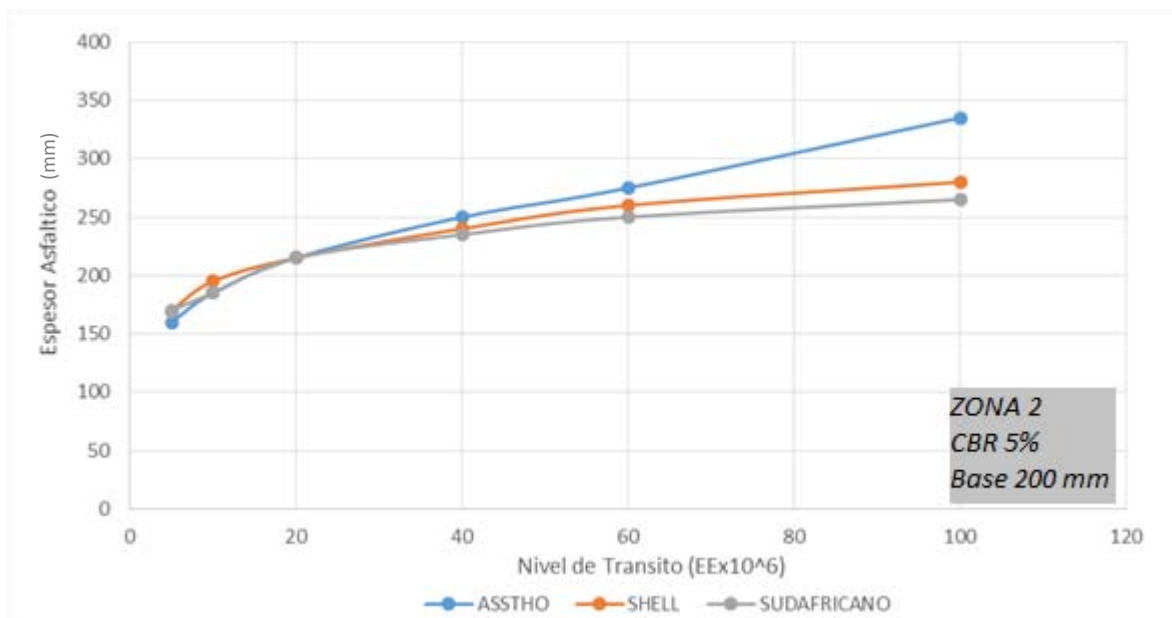


Figura 6.11 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.

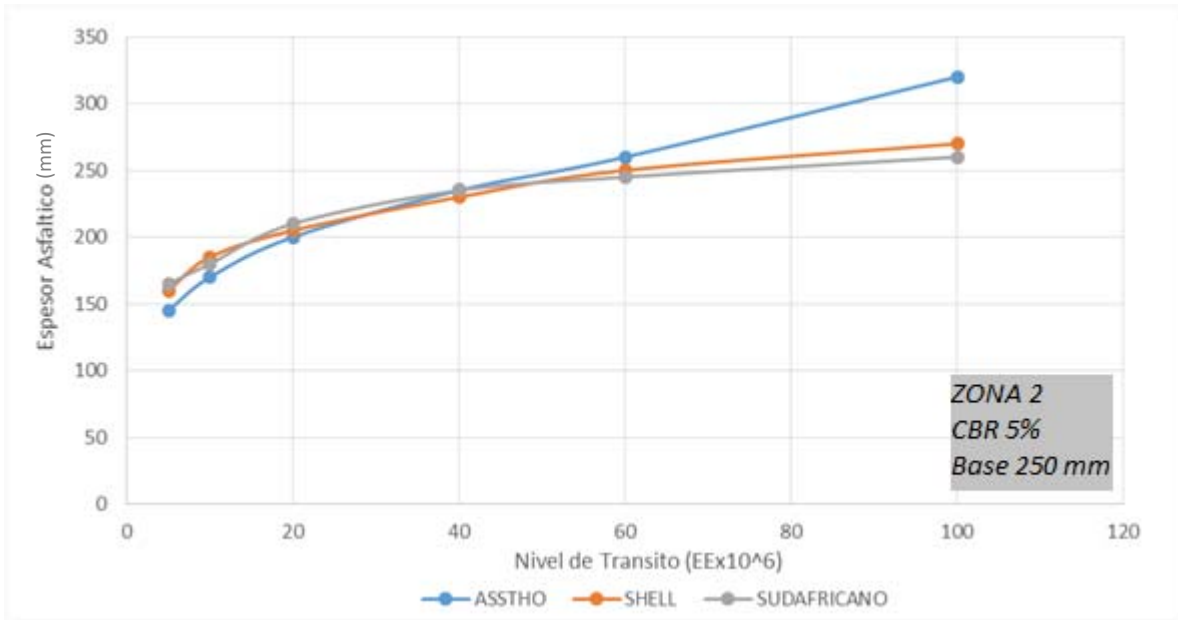


Figura 6.12 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.

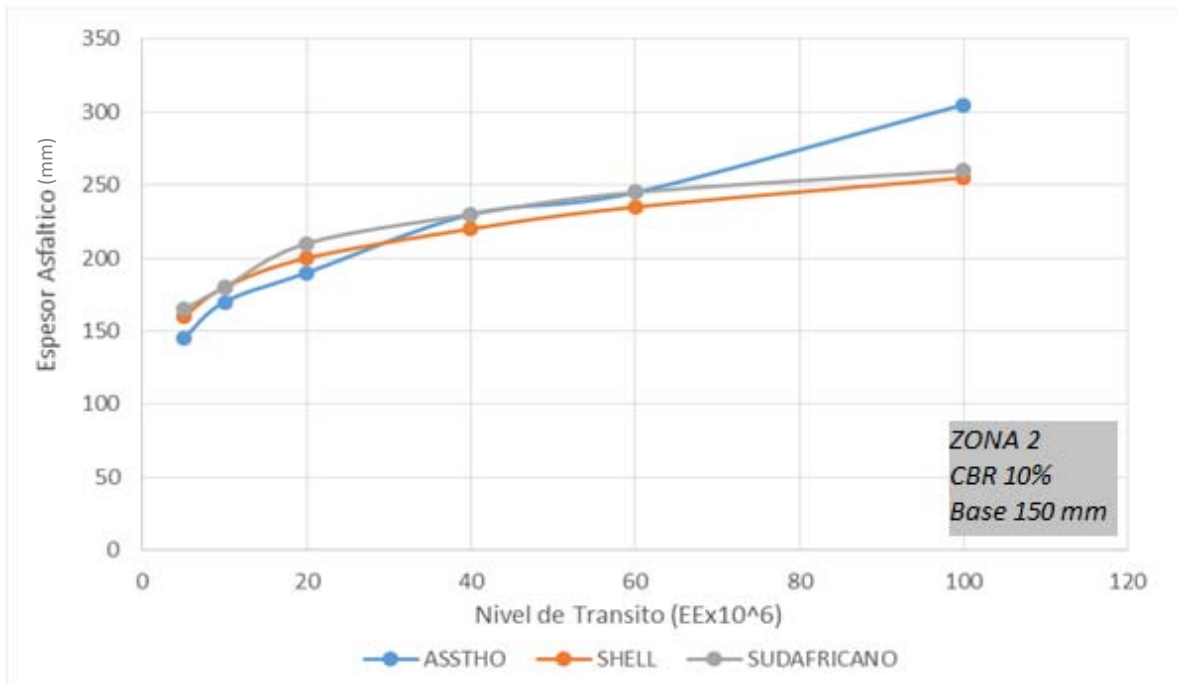


Figura 6.13 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.

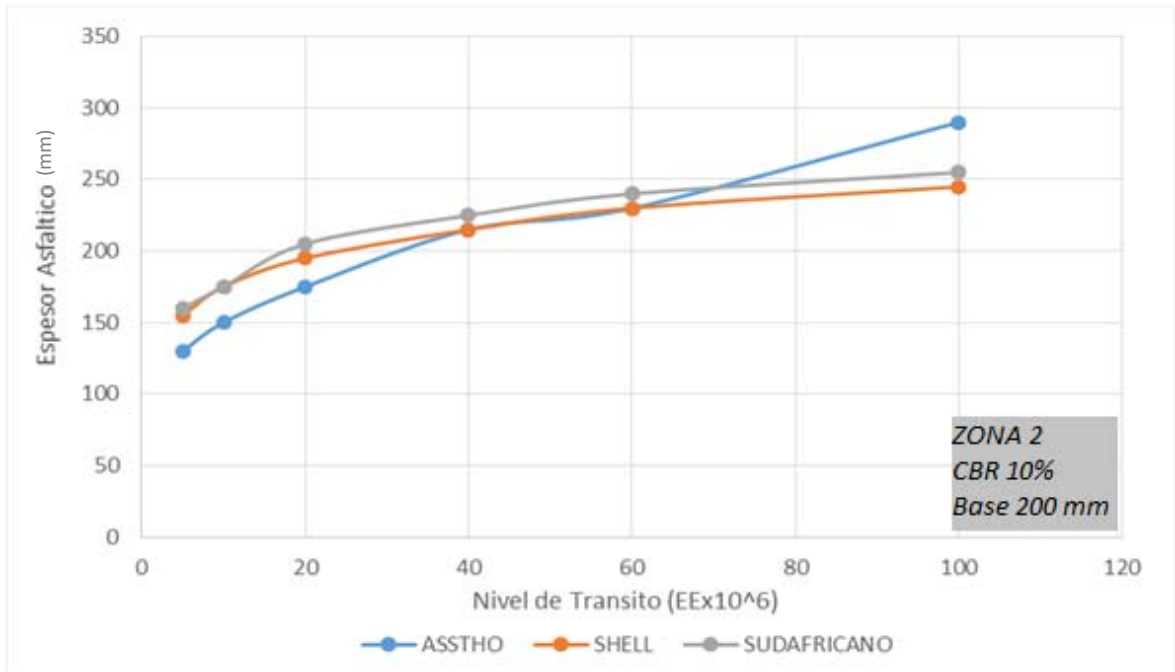


Figura 6.14 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.

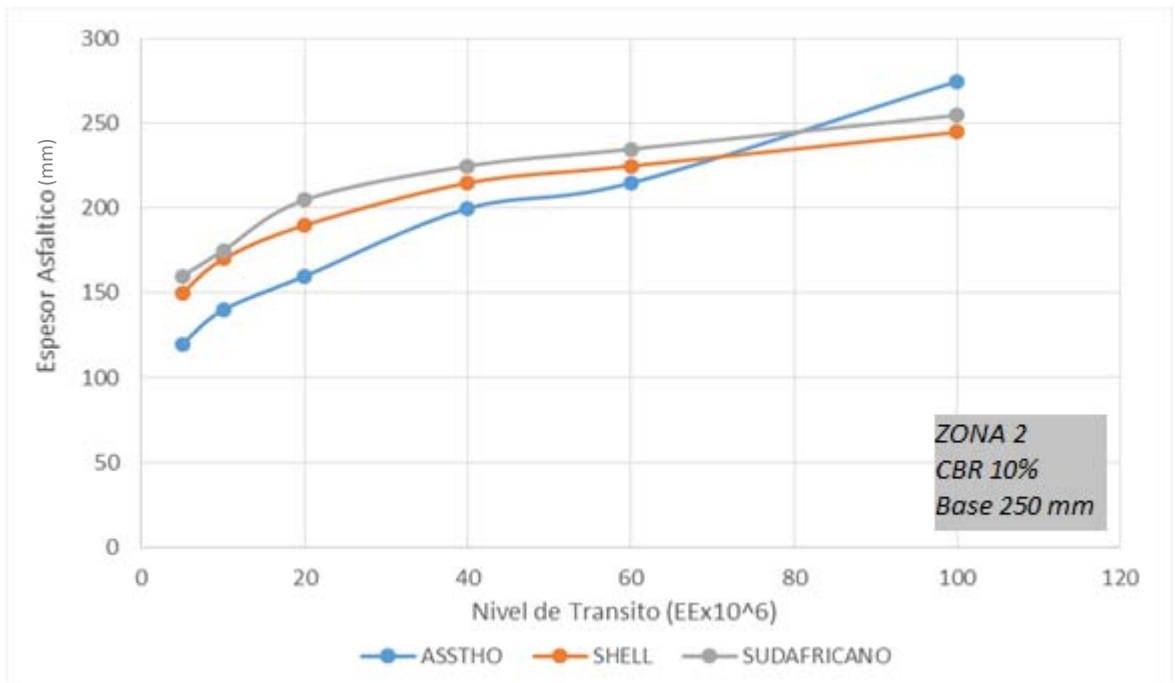


Figura 6.15 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.

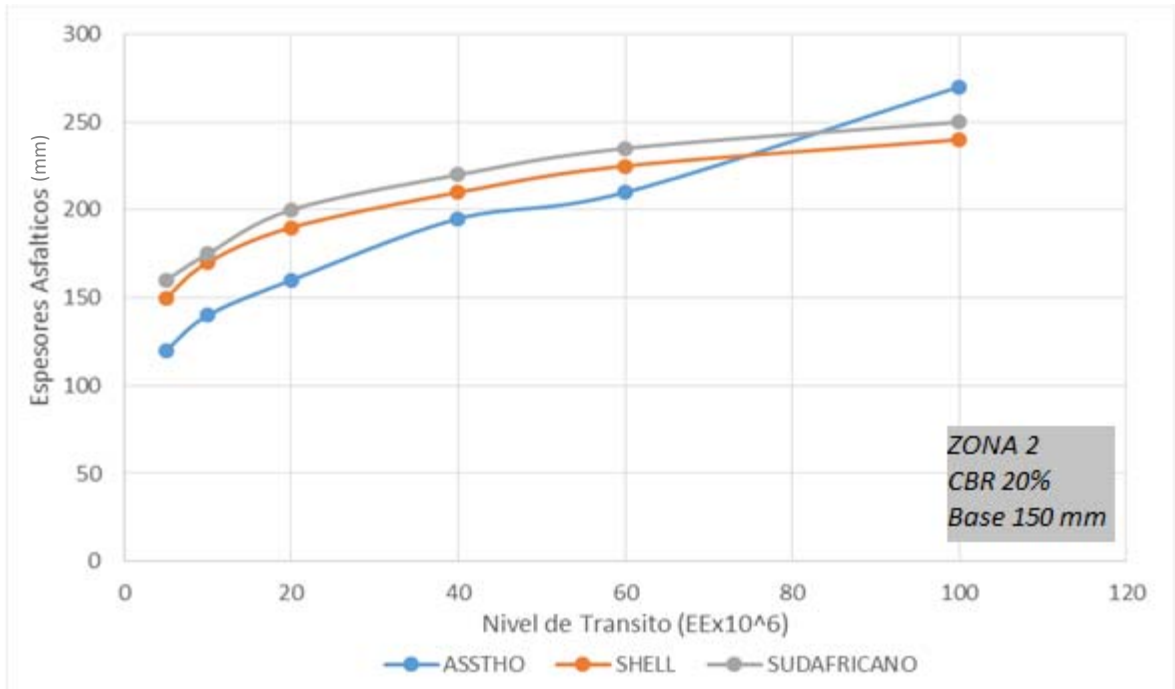


Figura 6.16 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.

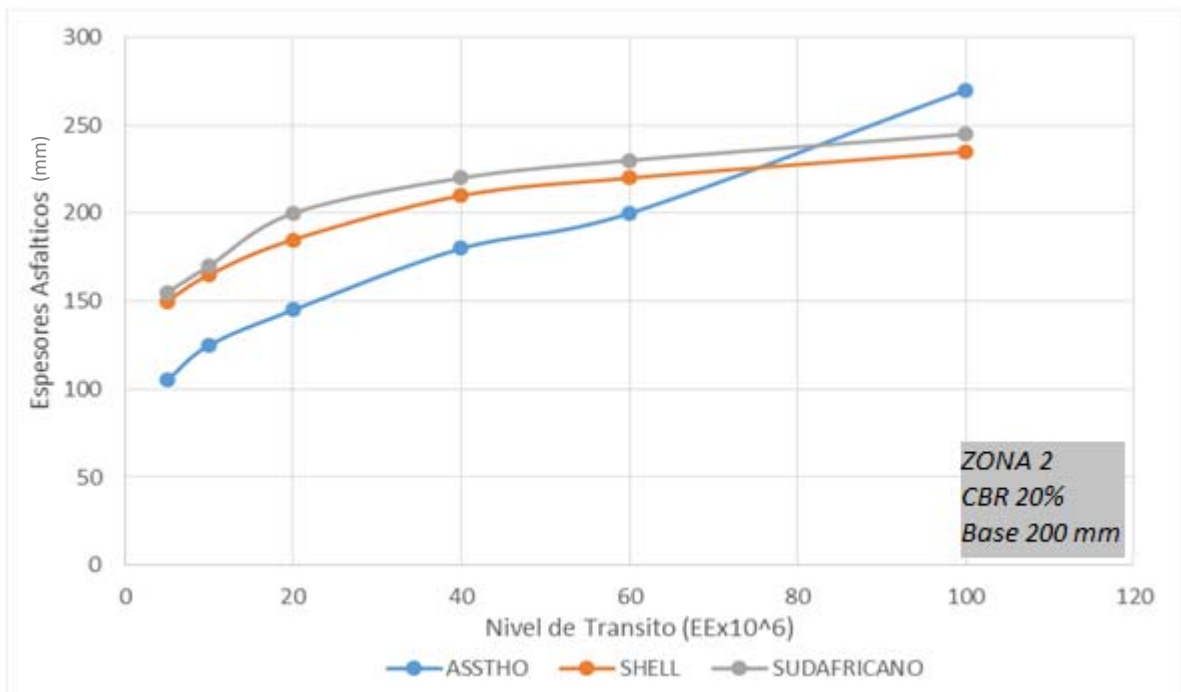


Figura 6.17 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.

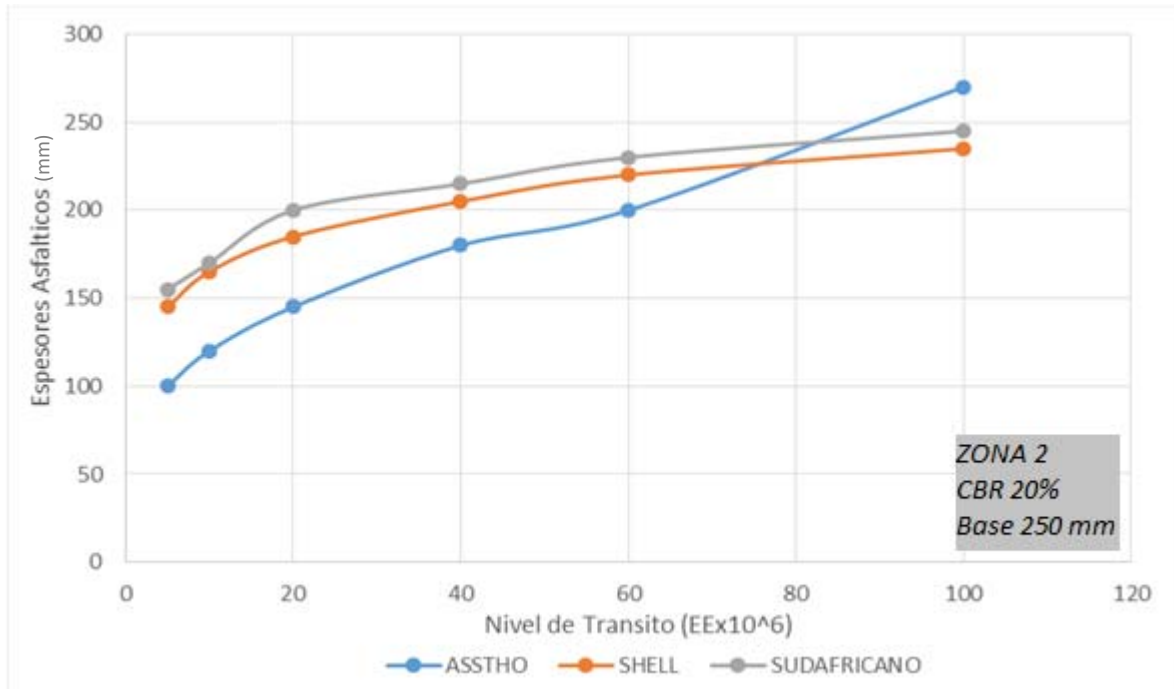


Figura 6.18 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 2, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.

La figuras anteriores se muestra un gráfico el cual muestra los espesores de la capa de asfalto obtenidos por medio de las tres metodologías de diseño para distintas condiciones de tránsito (condiciones de tránsito definidos en el capítulo III). Estos espesores se extraen de los diseños realizados del Capítulo IV.

En los gráficos de las figuras 6.10 a la 6.15 se puede observar que no existen diferencias significativas en los espesores de pavimento obtenidos por medio de los métodos AASHTO, método Shell y método Sudafricano.

En las estructuras diseñadas para una condición de tránsito bajo, la diferencia de espesores de la capa de asfalto son menores pero significativas entre los métodos de diseño empíricos y empíricos-mecanicistas, esta desigualdad disminuye a medida que aumenta la condición de tránsito, logrando espesores similares para todos los métodos de diseño en condición de tránsito alto hasta los 60×10^6 EE, para luego ver una diferencia considerable en desmedro del método actual implementado en Chile.

En el análisis de sensibilidad desarrollado en el capítulo V, se demostró que el factor temperatura sólo afecta los diseños realizados por medio de los métodos empíricos-mecanicistas, por lo cual sólo estos espesores de asfalto tuvieron modificaciones considerables entre las zona 1 y 2.

En los métodos Shell y Sudafricano, al considerar una menor temperatura de servicio, provoca el aumento del módulo resiliente de la capa de asfalto, en consecuencia esta estructura requiere un menor espesor de pavimento para una misma condición de tránsito.

En el método AASHTO, según las conclusiones obtenidas en el análisis de sensibilidad, el parámetro de temperatura influye en la obtención de la capacidad requerida en la capa de asfalto, en términos de números estructurales sobre la base. La diferencia entre la temperatura de la zona 1 y la zona 2

(5°C) no es suficiente para generar distintos espesores en la capa de asfalto entre los diseños realizados en las dos regiones de estudio.

De acuerdo a las conclusiones obtenidas en el análisis de sensibilidad, para el parámetro temperatura, se pudo demostrar que este factor influye en el diseño de pavimento de las metodologías empíricas-mecanicistas, aumentando la capacidad de la mezcla de asfalto en localidades que presentan menores temperaturas de servicio, lo que se traduce en la reducción del espesor de la capa de asfalto, para una misma condición de tránsito.

6.3 Resultados obtenidos en la Zona 3.

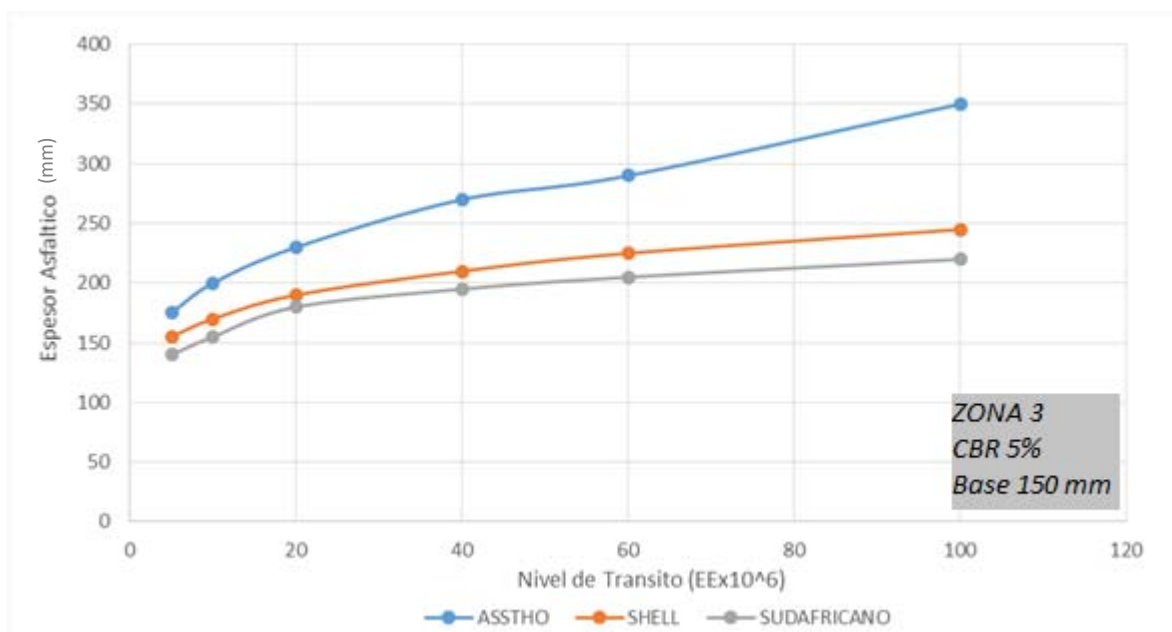


Figura 6.19 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 150 mm.

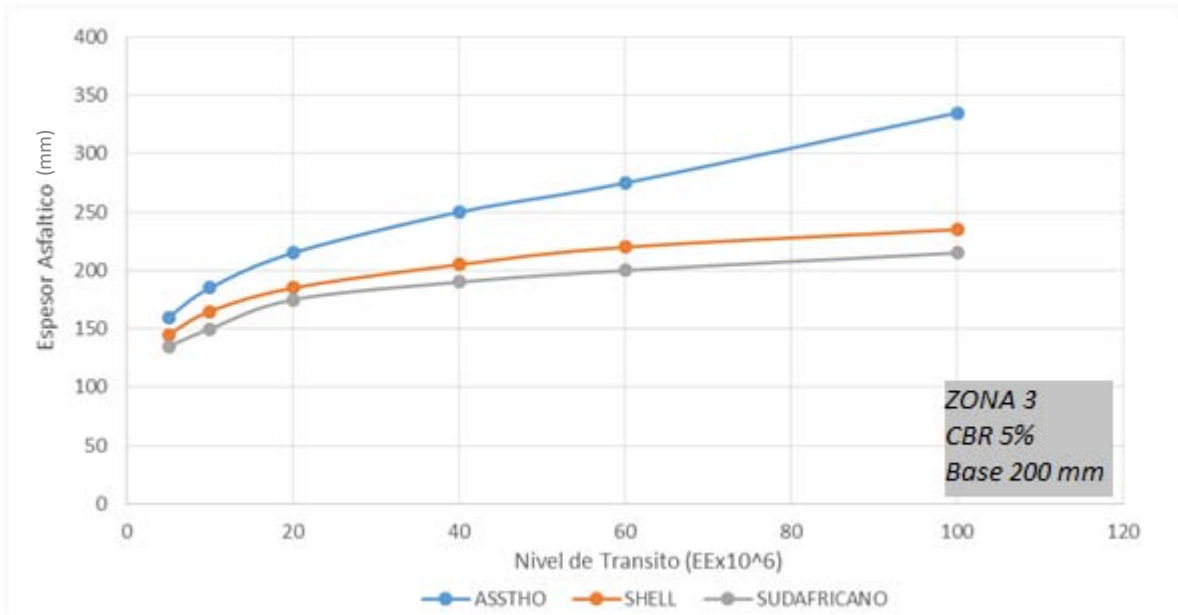


Figura 6.20 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 200 mm.

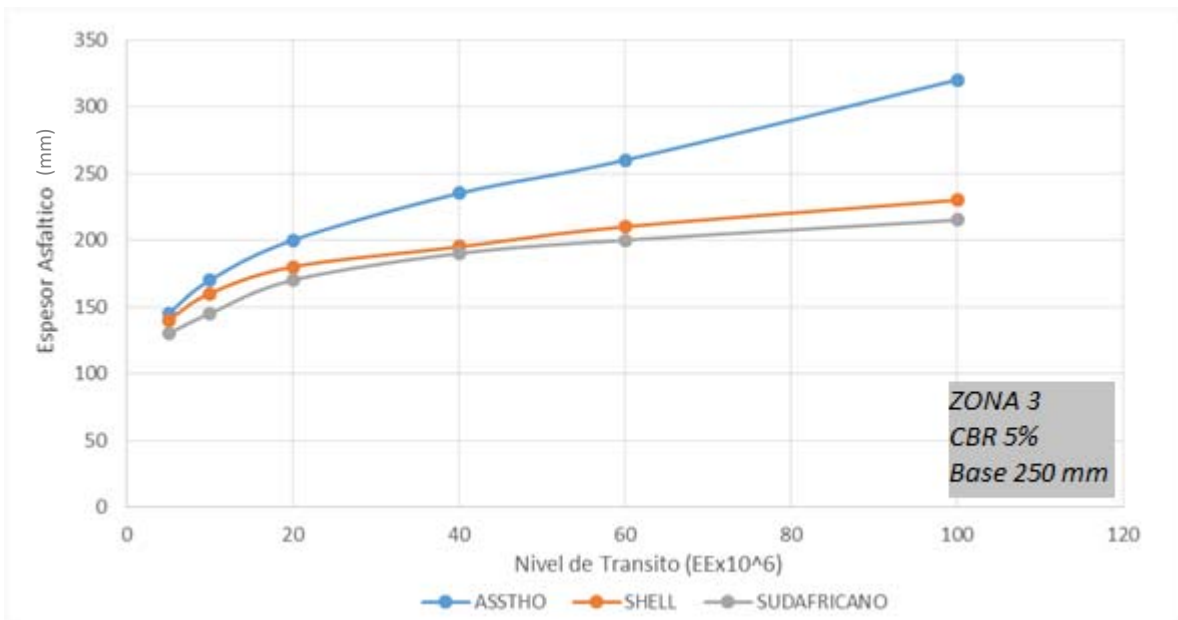


Figura 6.21 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 5% y espesor de Base de 250 mm.

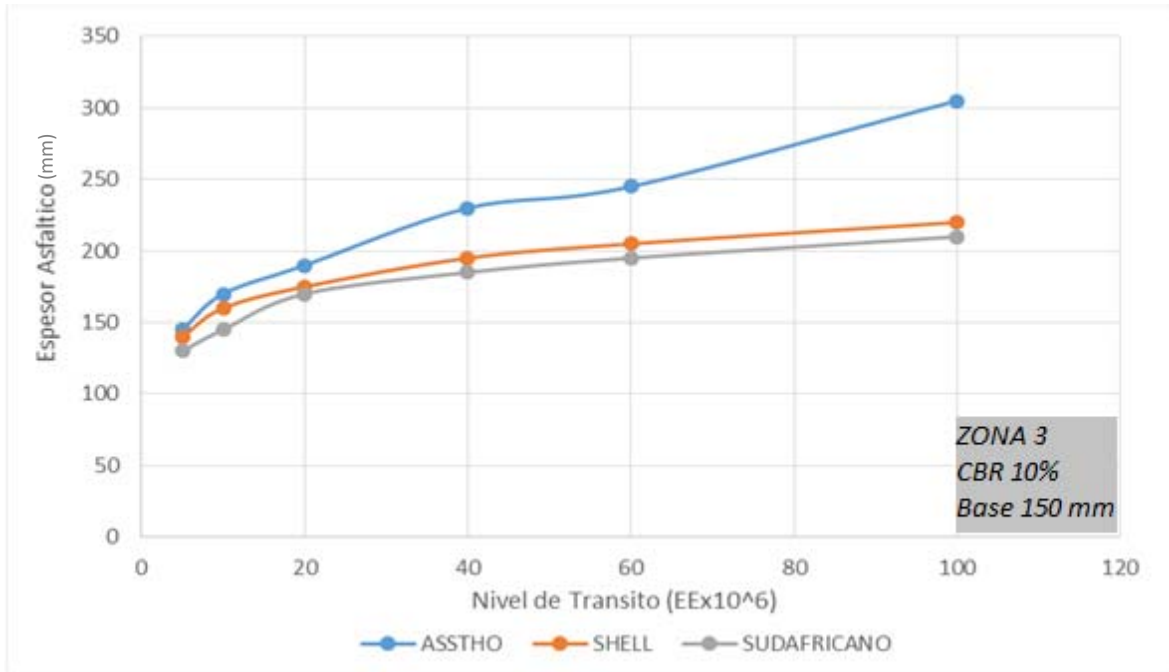


Figura 6.22 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 150 mm.

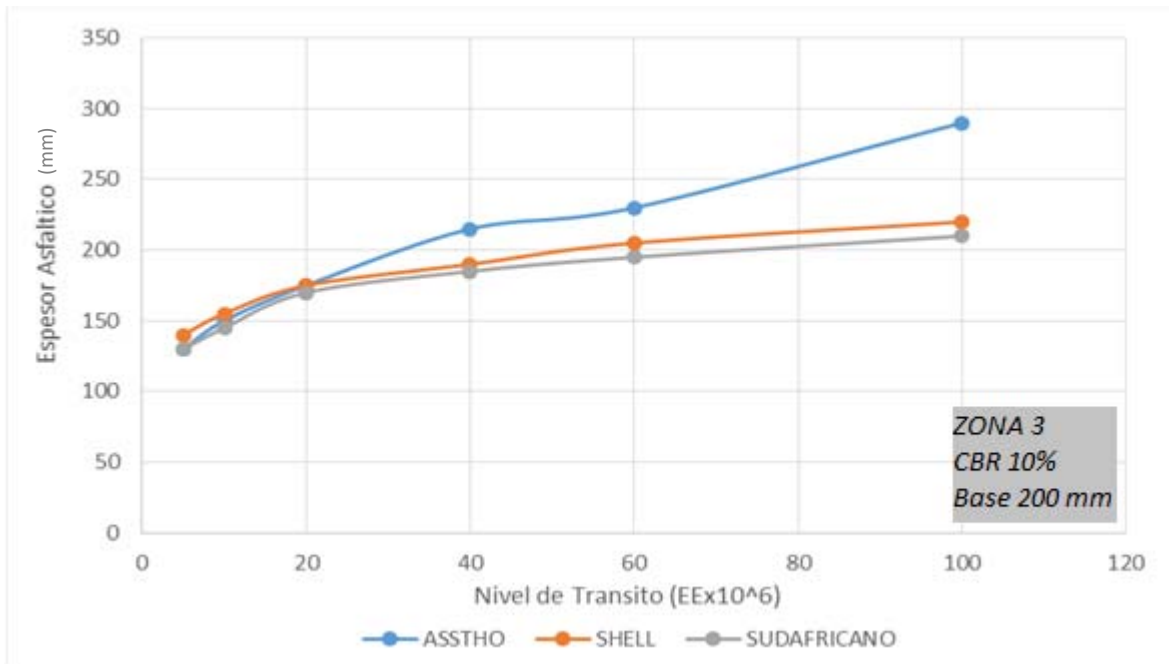


Figura 6.23 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 200 mm.

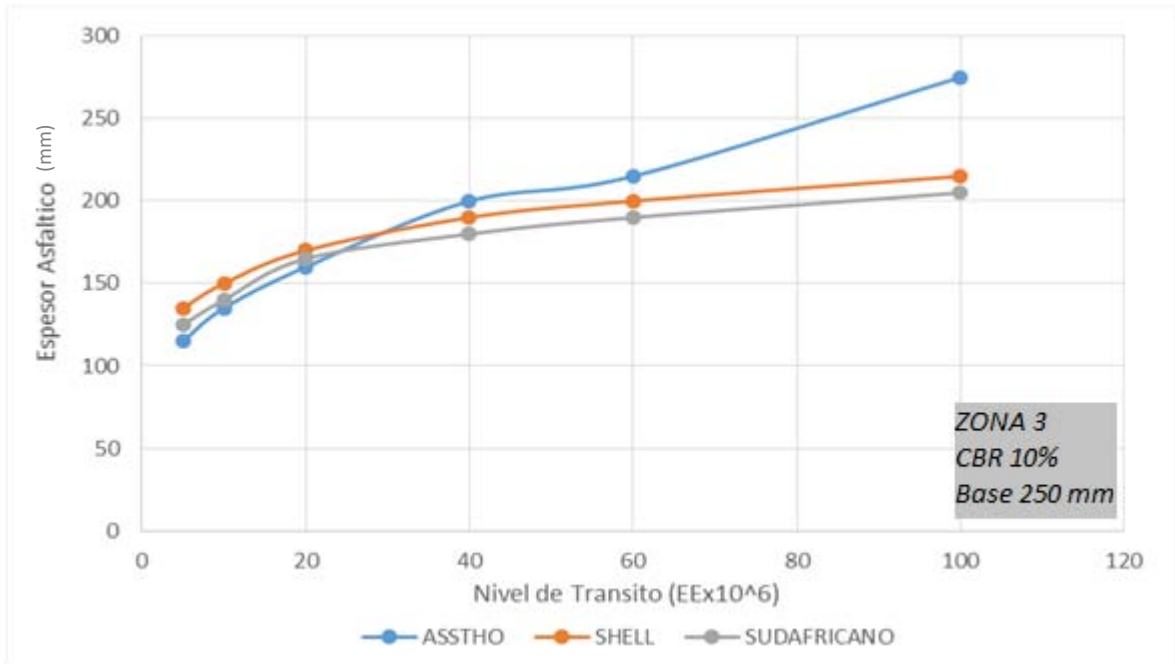


Figura 6.24 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 10% y espesor de Base de 250 mm.

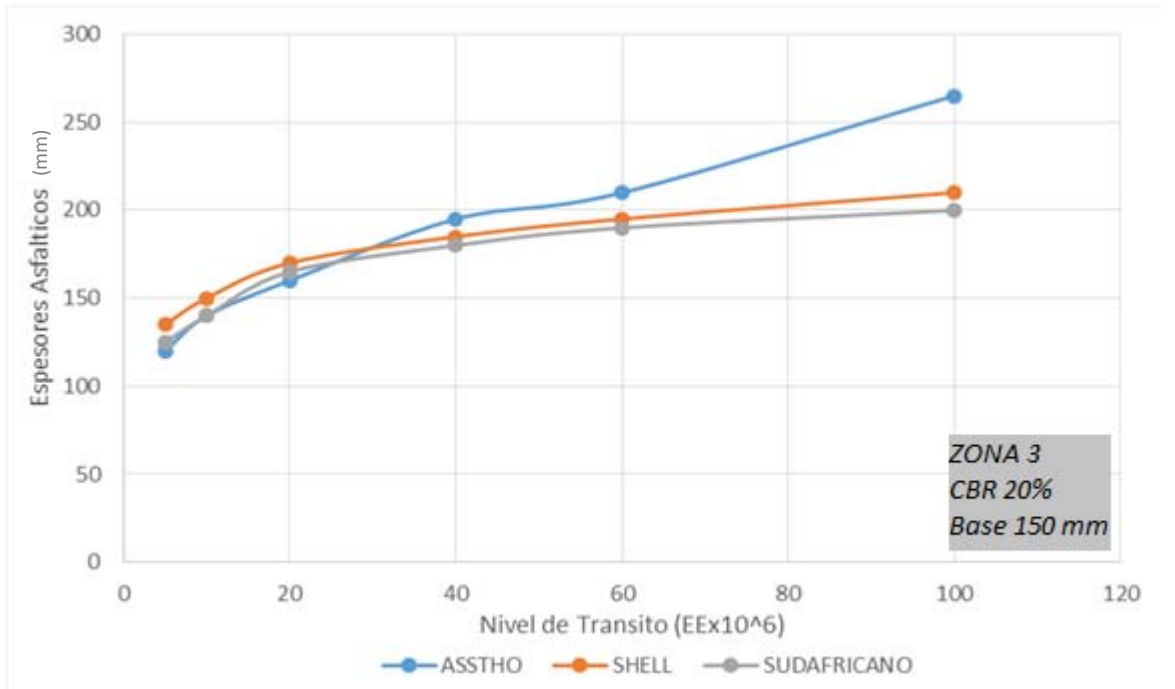


Figura 6.25 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 150 mm.

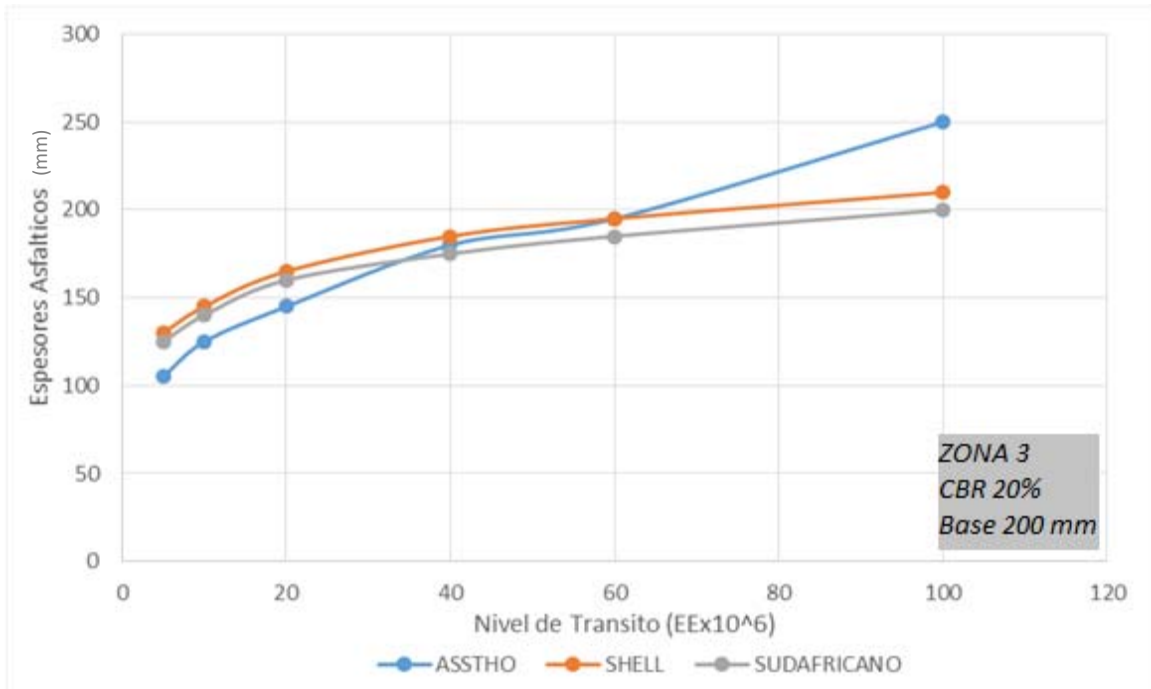


Figura 6.26 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 200 mm.

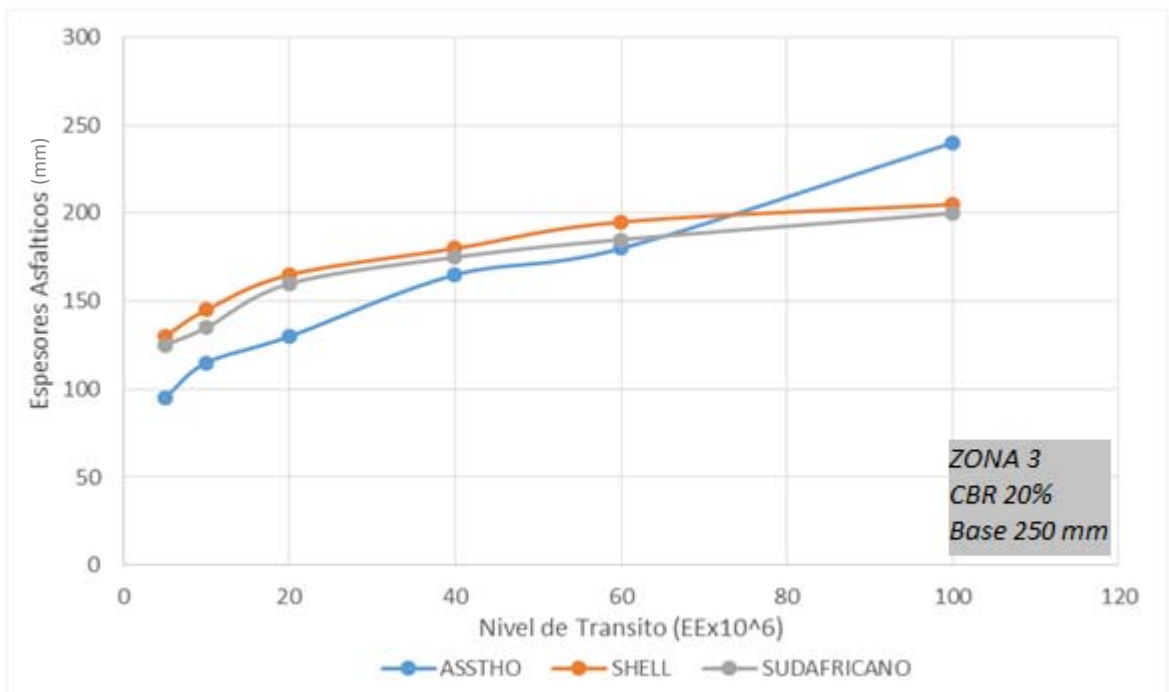


Figura 6.27 - Espesores de asfalto para distintos métodos en Zona 3, para un CBR Subrasante del 20% y espesor de Base de 250 mm.

En los gráficos anteriores se resumen los resultados de los diseños realizados por medio de las distintas metodologías de diseño vistas en este Trabajo de Título, realizados en la Zona 3 (10°C) mostrados a través de espesores de la capa de asfalto. Los distintos espesores de la capa asfáltica se obtienen a partir de la aplicación de distintos niveles de tránsito, los cuales se expresan a través de eje equivalentes (EE).

Estos resultados se extraen de los diseños realizados en el Capítulo IV, a partir de la definición de los distintos parámetros que influyen en el diseño de pavimentos flexibles, tales como, el clima, propiedades de las distintas capas granulares, propiedades de la mezcla asfáltica, confiabilidad de diseño, factores que fueron completamente definidos en el Capítulo III.

Como se puede apreciar en la figuras 6.19 a la 6.27 los resultados de espesores de la capa de asfalto producidos mediante el método AASHTO son bastantes superiores a los obtenidos por medio del método Shell y método Sudafricano.

Una de las razones de esta gran diferencia se define a partir del análisis de sensibilidad realizado en el Capítulo V, en este se puede observar que los espesores de asfalto resultantes de este método, no son los óptimos para la condición de tránsito considerado en cada diseño.

Del análisis de sensibilidad del factor temperatura se puede concluir que la capacidad requerida en la capa asfáltica (número estructural sobre la base) presenta una disminución considerable en la zona 3, pero la capacidad requerida total de la estructura (número estructural total) no presenta variación respecto a los resultados obtenidos en otras zonas de estudio (las cuales poseen mayor temperatura). En los diseños de pavimentos realizados en este Trabajo de Título se mantuvieron los espesores de las capas granulares intermedias constantes, por lo cual para obtener la capacidad total requerida por la estructura, se debió aumentar la capacidad de la capa asfáltica, generando mayores espesores de pavimento que los requeridos por el diseño. Situación que se ve aumentada a medida que aumenta el nivel de tránsito.

A esta situación se suma que en los métodos de diseño empírico-mecanicista, los pavimentos expuestos a baja temperatura presentan un aumento considerable en los módulos resilientes de la capa de asfalto, generando espesores significativamente menores que en los diseños realizados en las otras Regiones, las cuales presentan mayores temperaturas de servicio.

A su vez se aprecia una situación similar a la zona 2, en donde se observa que los espesores asfálticos por el método ASSTHO disminuyen a medida que mejora la calidad de %CRB subrasante o aumenta los espesores granulares que a su vez tienden a llegar a un punto de intersección con los métodos Shell y Sudafricano a medida que aumenta el nivel de tránsito.

CAPITULO VII

7. PLANILLAS DE DISEÑO.

La finalidad de este capítulo es entregar planillas de diseño para cada zona especificada en este Trabajo de Título, con el objetivo de lograr desarrollar planillas con espesores de capa de asfalto para las diferentes condiciones presentes en cada región descritas en los capítulos anteriores.

A su vez la intención de desarrollar todos los diseños con las temperaturas máximas para cada zona, otorga espesores que controlarán a lo largo de esa misma región, es decir, que los valores expuestos en cada planilla, va a cumplir con los requerimientos de diseño para los rangos de temperatura entre zonas.

Cada cartilla va a entregar los espesores menores entre cada método desarrollado para cada zona.

Por lo tanto los resultados serán planillas de diseño óptimo (tabla 7.1, 7.2 y 7.3) que cumplen los requerimientos de cada método para los diferentes parámetros en estudio.

Nota:

Los valores **Azules** representan espesores de la capa de asfalto en milímetros, controlados por método AASTHO.

Los valores **Rojos** representan espesores de la capa de asfalto en milímetros, controlados por método Sudafricano.

Los valores **Verdes** representan espesores de la capa de asfalto en milímetros, controlados por método Shell.

Tabla 7.1 - Espesores mínimos (mm) para los diferentes métodos en Zona 1.

ZONA 1							
CBR Subrasante (%)	Base Granular (mm)	Tránsito (x Millón)					
		5	10	20	30	60	100
5%	150	175	200	230	260	275	290
	200	160	185	215	255	270	285
	250	145	180	200	240	260	280
10%	150	145	170	190	230	245	280
	200	130	150	175	215	235	275
	250	130	150	175	215	235	270
20%	150	120	140	160	195	210	265
	200	105	130	150	180	195	255
	250	95	130	150	180	195	255

Tabla 7.2 - Espesores mínimos (mm) para los diferentes métodos en Zona 2.

ZONA 2							
CBR Subrasante (%)	Base Granular (mm)	Tránsito (Millón)					
		5	10	20	30	60	100
5%	150	175	190	220	240	255	270
	200	160	185	215	235	250	265
	250	145	170	200	230	245	260
10%	150	145	170	190	220	235	255
	200	130	150	175	215	230	245
	250	120	140	160	200	215	245
20%	150	120	140	160	195	210	240
	200	105	125	145	180	200	235
	250	100	120	145	180	200	235

Tabla 7.3 - Espesores mínimos (mm) para los diferentes métodos en Zona 3.

ZONA 3							
CBR Subrasante (%)	Base Granular (mm)	Tránsito (Millón)					
		5	10	20	30	60	100
5%	150	140	155	180	195	205	220
	200	135	150	175	190	200	215
	250	130	145	170	190	200	215
10%	150	130	145	170	185	195	210
	200	130	145	170	185	195	210
	250	115	135	160	180	190	205
20%	150	120	140	160	180	190	200
	200	105	125	145	175	185	200
	250	95	115	130	165	180	200

A partir de las tablas 7.1 a la 7.3, se desarrollan cartillas con curvas de diseño de espesores asfálticos óptimos, según parámetros analizados en cada zona para los diferentes métodos.

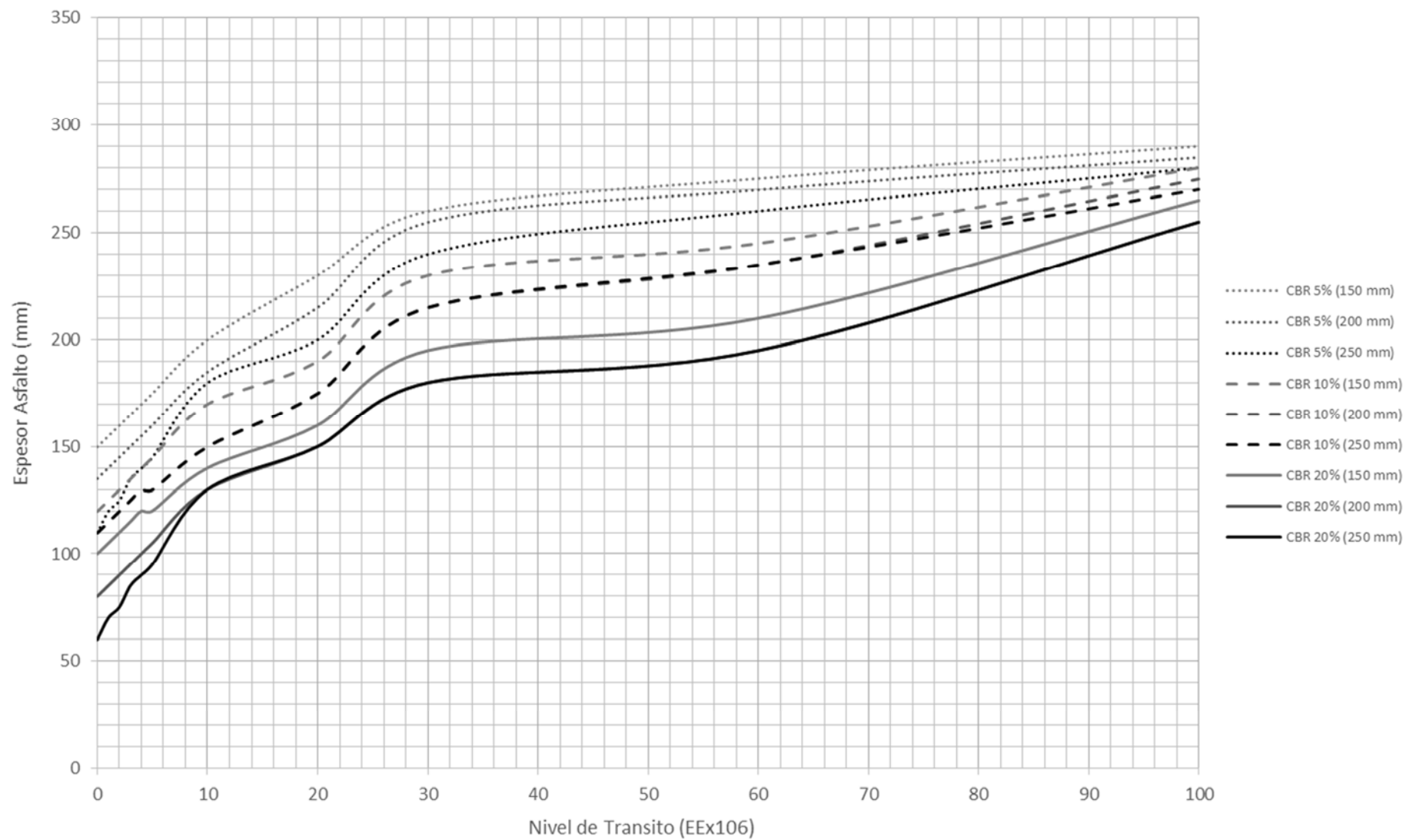


Figura 7.1 - Cartilla de diseño de espesores asfálticos para zona 1.

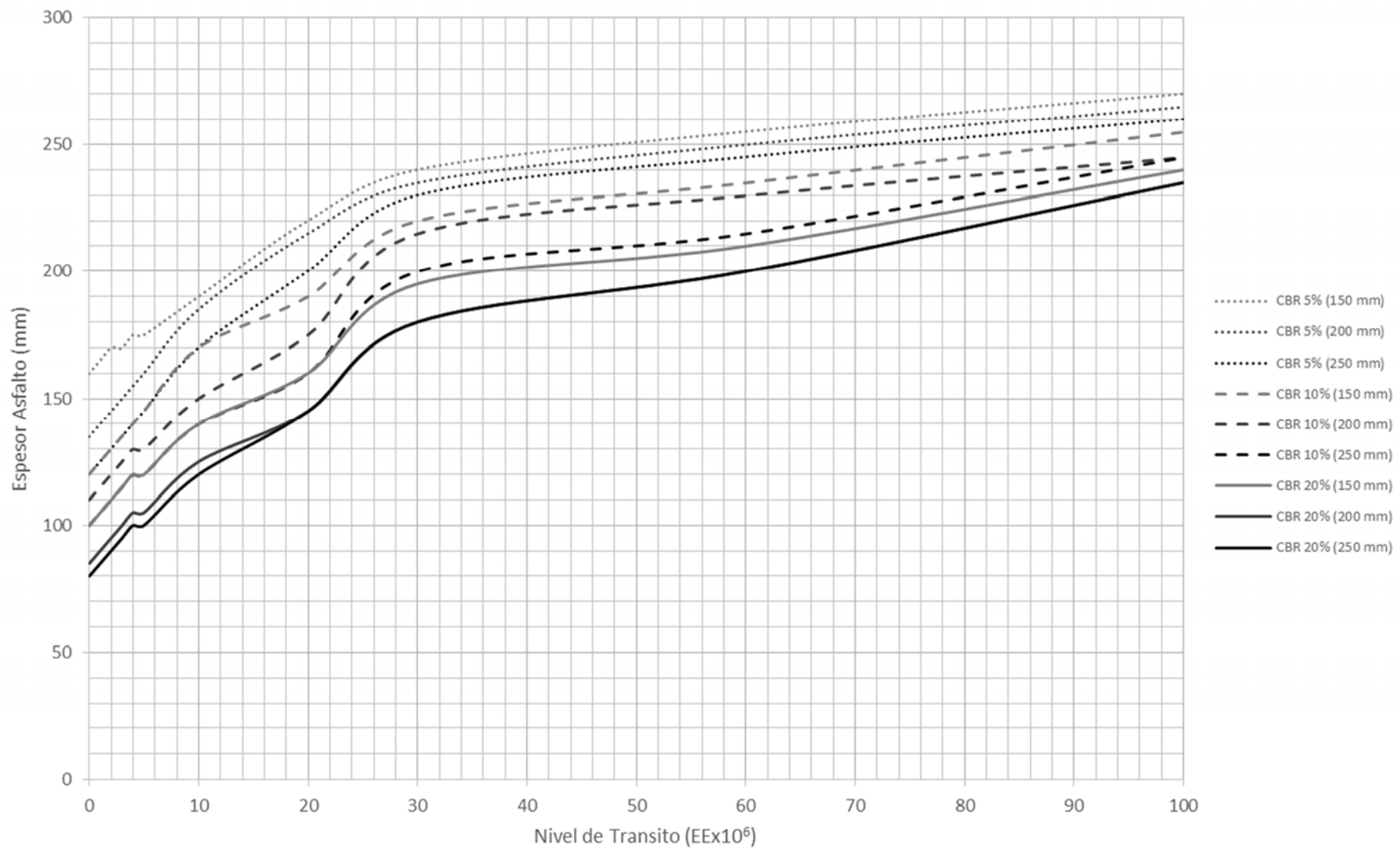


Figura 7.2 - Cartilla de diseño de espesores asfálticos para zona 2.

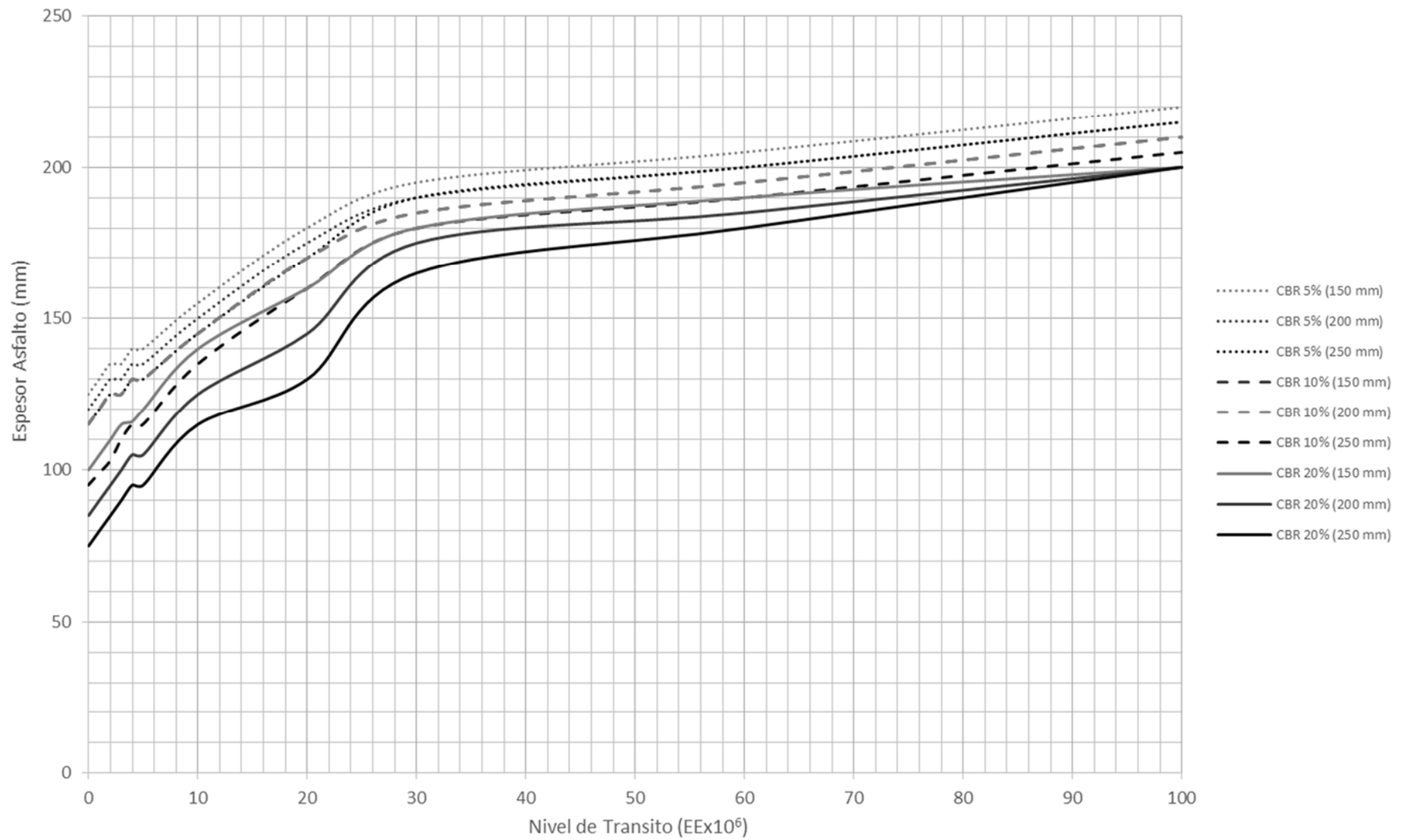


Figura 7.3 - Cartilla de diseño de espesores asfálticos para zona 3.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES

Se proponen planillas de diseño logrando una optimización del diseño de pavimentos flexibles a lo largo del territorio Chileno, categorizándolo en tres zonas que (ver capítulo 7).

Al analizar los diferentes diseño de pavimentos flexibles en las tres zonas propuestas y variando el abanico de parámetros descritos bajo el método empírico AASTHO y los métodos empíricos-mecanicistas Shell y Sudafricano, se pueden concluir lo siguiente.

Con respecto a la temperatura:

Del análisis de sensibilidad efectuado al parámetro temperatura, se puede concluir que la temperatura influye significativamente en los resultados de espesores de la capa de asfalto obtenidos por medio de los métodos empíricos-mecanicistas. Comparando los espesores de la capa asfáltica obtenidos en las distintas zonas de estudio (ver capítulo V), se observa que al aumentar la temperatura de servicio, el módulo resiliente de la capa asfáltica disminuye, lo que provoca la generación de mayores espesores de la capa de asfalto.

Por otro lado al comparar los espesores de la capa asfáltica desarrollados por medio del método AASTHO en todas las regiones de estudio, se puede concluir que el parámetro temperatura presenta muy poca influencia en los resultados finales en términos de espesores de la capa de asfalto (ver capítulo V).

Con respecto al %CBR subrasante:

Si bien para este parámetro los resultados se ven afectados de menor manera que para los casos anteriores, es importante decir que a medida que la calidad de la subrasante aumenta los espesores de asfalto se ven controlados por el método empírico en niveles de tránsito bajo, lo cual no impide la tendencia a que para niveles de tránsito alto los métodos empíricos-mecanicistas logren desarrollar espesores de capas de asfalto menores (ver tablas 7.1 a 7.3).

Con respecto a las Bases Granulares:

Se aprecia que al aumentar los espesores granulares, los resultados de capa de asfalto disminuyen de mayor forma en el método empírico que en los métodos empíricos-mecanicistas, ya que en el método AASTHO las capas granulares tienen una mayor influencia en la resistencia total de la estructura de pavimento. A diferencia de los métodos Shell y Sudafricano donde el diseño se ve controlado por las fallas en el asfalto.

Con respecto al nivel de tránsito:

Es uno de los puntos relevantes que se obtuvo en este trabajo de título, dado que el diseño de pavimentos flexibles se ve influenciado bajo los diferentes métodos de análisis al aumentar el nivel de tránsito.

A medida que el nivel de tránsito crece, al margen del método utilizado los espesores asfálticos aumentan. Por un lado los espesores de capa de asfalto son controlados por el método AASTHO en las tres zonas de estudio para niveles de tránsito bajo (ver tablas 7.1 a 7.3).

Luego en niveles de tránsito entre los 5 a los 60 x10⁶ EE, este parámetro se ve influenciado de acuerdo al método de estudio realizado, donde se aprecia que a medida que cambiamos de zona de mayor a menor temperatura los espesores asfálticos se ven controlados de método empírico a los métodos empírico-mecanicistas respectivamente (ver tablas 7.1 a 7.3).

Lo cual finalmente entrega una tendencia que para niveles de tránsito mayores a los 60x10⁶ EE, tienden a controlar los métodos empíricos-mecanicistas (especialmente el Sudafricano), independiente de la zona y cualquier otro parámetro en estudio (ver tablas 7.1 a 7.3).

Todo esto provoca el cuestionamiento sobre la metodología empírica desarrollada actualmente por nuestro país, más aun haciendo hincapié en la poca influencia que desarrolla la temperatura en el diseño de pavimentos flexibles, parámetro relevante al ver la diferencia que existe de este en las diferentes zonas a lo largo de nuestro país.

COMENTARIOS

Primero se debe destacar que la comparación entre estos métodos no es directa, ya que los parámetros de diseño que toma cada metodología, es de distinta manera tanto en la definición de la capacidad estructural (número estructural, módulo resiliente, número de pasadas) como también los resultados de diseño (ejes equivalentes, deformaciones). Además no todos los métodos de diseño toman los mismos parámetros, un ejemplo de esto es el parámetro drenaje, el cual el método AASHTO lo incluye modificando la resistencia de los materiales granulares a través de la inclusión de un factor, mientras que los métodos empíricos no lo utiliza.

La confiabilidad de diseño es un parámetro empleado para incluir la variabilidad presente en la obtención de las propiedades físicas, constructivas, de la modelación de la carga de tránsito y de la capacidad resistente o número de pasadas de rueda de cada capa del pavimento. Cada método de diseño posee distintos valores de confiabilidad asociados a estos parámetros, por esto es sumamente necesario adaptar las ecuaciones de diseño para las condiciones presentes en donde se realiza el diseño de la estructura.

Con respecto a la temperatura, aunque no existan diferencias significativas en términos de espesores de la capa de asfalto en el método AASTHO, no quiere decir que el factor temperatura no influye en el diseño de la estructura de pavimento. Este factor tiene directa influencia en el número estructural mínimo requerido de las capas de asfalto, el cual se aprecia en las diferentes zonas, donde el $NEA_{mín}$ tienen números estructurales muy similares, por lo cual, sus números estructurales de la capa asfáltica no se ven afectados por el factor temperatura, que por el contrario debiera ocasionar espesores de asfalto significativamente menores a medida que bajamos de zona, esto es, porque en la estructuración de las distintas capas de la estructura de pavimento, se definieron a las capas granulares mediante espesores constantes, entonces, si la capacidad total de la estructura (NE) no es alcanzada mediante el valor del $NEA_{mín}$ en conjunto con los espesores fijos de las capas granulares, el número estructural total deberá ser obtenido mediante el aumento de los espesores de la capa de asfalto. Esto ocasiona una reestructuración del número estructural de las capas de asfalto, originando espesores de asfalto similares aún con la influencia de diferentes temperaturas.

Bibliografía

- [1] Dante Garcia, *Memoria de Título "Comparación Técnica y Económica en el Diseño de Pavimentos Flexibles por medio de los Métodos AASHTO, Shell y Sudafricano"*, Universidad de Valparaíso, 2016.
- [2] *"Manual de Carreteras Ministerio de Obras Públicas - Volumen 3"*, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, Chile, 1997.
- [3] Guía de diseño "AASHTO", American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993.
- [4] Carlos Wahr, Publicación *"Diseño de Pavimentos Flexibles AASHTO 93"*, 2008.
- [5] Moreno Rubio, Publicación *"Modulo Resiliente - Capitulo 4"*, Universidad Técnica de Cataluña 2005.
- [6] *"Manual de Diseño de Shell"*, 1978.
- [7] Bitumen Business Group, *User Manual*, 1998.
- [8] The South African National Roads Agency, *South African Pavement Engineering Manual, chapter 10.*, 2013.
- [9] Sección TRH4, *"Diseño Estructural de Pavimentos para Carreteras Urbanas e Interurbanas"*, 1996.
- [10] TRH4 Technical Recommendations for Highways, *"Structural Design of Flexible Pavements for Inter urban and Rural Roads"*, 1996.
- [11] Theyse H. L., *"Overview of the South African Mechanistic Pavement Design Method"*, 1996.
- [12] The South African National Roads Agency, *"South African Pavement Engineering Manual Chapter 2"*, 2014.
- [13] The South African National Roads Agency, *"South African Pavement Engineering Manual, Chapter3"*, 2014.
- [14] Jordaan G.J., *"Users Manual For the South African Mechanistic Pavement Rehabilitation Design Method"*, 1993.
- [15] www.modsys1.com, *"Modelling and analysis system"*.
- [16] Modelling and Analysis Systems, *"RUBICON PROGRAM"*, 2004.