

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**LOS PAVIMENTOS COMPUESTOS COMO ALTERNATIVA
CONSTRUCTIVA PARA VÍAS DE TRÁFICO PESADO**

AUTORES:

**Andrade Triviño, Nati Malena
Franco Puga, Fernando Xavier**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Vila Romani, Rolando. PhD.

**Guayaquil, Ecuador
12 de marzo del 2019**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Andrade Triviño Nati Malena y Franco Puga Fernando Xavier**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**

TUTOR

f. _____

Ing. Rolando Vila Romani, PhD.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc

Guayaquil, 12 de marzo del 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Andrade Triviño Nati Malena y Franco Puga Fernando Xavier**

DECLARAMOS QUE:

El Trabajo de Titulación, “LOS PAVIMENTOS COMPUESTOS COMO ALTERNATIVA CONSTRUCTIVA PARA VÍAS DE TRÁFICO PESADO”, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de nuestra total autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, 12 de marzo del 2019

LA AUTORA

EL AUTOR

f. _____

Andrade Triviño, Nati Malena

f. _____

Franco Puga, Fernando Xavier



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Andrade Triviño Nati Malena y Franco Puga Fernando Xavier**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, “LOS PAVIMENTOS COMPUESTOS COMO ALTERNATIVA CONSTRUCTIVA PARA VÍAS DE TRÁFICO PESADO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 12 de marzo del 2019

LA AUTORA

EL AUTOR

f. _____

f. _____

Andrade Triviño, Nati Malena

Franco Puga, Fernando Xavier

Urkund Analysis Result

Analysed Document:	Trabajo de Titulación. Nati Andrade y Fernando Franco.docx (D48186149)
Submitted:	2/21/2019 9:30:00 PM
Submitted By:	rebeca.gonzalez@cu.ucsg.edu.ec
Significance:	4 %

Sources included in the report:

TESIS DE GRADO JIMMY CEDEÑO-versión corregida..docx (D11540640)
 TRABAJO DE TITULACIÓN DE ANDREA MATUTE.doc (D21538421)
 Erik Jackson CaNar Fierro.docx (D21150565)
<https://docplayer.es/90226804-Universidad-andina-del-cusco.html>
<http://ribuni.uni.edu.ni/1780/1/90072.pdf>
http://repositorio.uladach.edu.pe/bitstream/handle/123456789/3490/CAPA_PAVIMENTO_ALBAN_ZAPATA%20TOMAS_ANGEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y
<https://docplayer.es/68078023-Calculo-de-un-coeficiente-de-calibracion-para-el-modelo-de-prediccion-del-iri-usando-el-mepdg-v-1-1.html>
http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_102_181_62_936.pdf
http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/boletines/boletin_prita_20_bases_estabilizadas_con_cemento.pdf
<http://ficem.org/boletines/boletin-tecnico-2013/Guia-de-Pavimentos-Semirigidos-para-Carreteras-Alto-Volumen.pdf>
https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_ano/civil1/files/IC%201-Pavimentos.pdf
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/3577/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-114.pdf>
https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf

Instances where selected sources appear:

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de todo corazón a mi familia, quienes son lo más importante de mi vida y han sido mi apoyo más grande a lo largo de todo este proceso.

A mi tutor, PhD. Rolando Vila quien siempre nos orientó y veló para que todo se haga de la mejor manera posible.

A Fernando, mi compañero de tesis y futuro colega le doy gracias por la gran responsabilidad y empeño que puso a lo largo de todo el proceso.

Por último, quiero agradecer a todas las demás personas, compañeros y docentes, quienes aportaron de manera positiva tanto en el desarrollo de esta tesis como a lo largo de mi carrera universitaria.

Nati Andrade Triviño

A toda mi familia que a lo largo de mi carrera universitaria me brindaron su apoyo incondicional para cumplir este importante objetivo en mi vida.

A mi tutor; PhD. Rolando Vila por el tiempo y la oportunidad brindada durante el desarrollo de esta tesis, por impulsar durante este tiempo el desarrollo de mi formación profesional.

A mi compañera de tesis; Nati Andrade por la amistad y el apoyo brindado no solo en el desarrollo de esta tesis sino también durante toda la etapa de mi carrera universitaria.

Fernando Franco Puga

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia, mayormente a mis padres porque siempre tuvieron grandes expectativas de mí, por el sacrificio diario que hicieron durante años para llegar hasta este momento y porque sin ellos nada hubiera sido posible.

A mis hermanos por siempre estar presentes dándome su amor, alegrando mis días y siendo una gran motivación.

A mis demás familiares y a todas las personas que me brindaron su apoyo, amistad y compañerismo.

Llena de orgullo, dedico este gran logro a quienes han formado parte importante de mi vida.

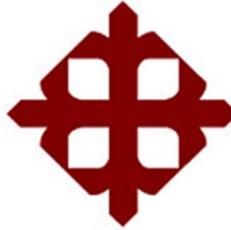
Nati Andrade Triviño

A Dios por permitirme cumplir una de las etapas más importante de mi vida como lo es mi formación profesional. Por haberme dado las fuerzas y perseverancia necesaria a lo largo de este duro camino.

A mis padres; Angela y Alberto, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida. Por su sacrificio y esfuerzo durante toda mi carrera universitaria

A mi abuelo; Adolfo (QEPD) Y a mi hermana; María de los Ángeles (QEPD) que siempre me han guiado durante todos estos años.

Fernando Franco Puga



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL**

f. _____

**Ing. Rolando Vila Romaní, PhD.
TUTOR**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

**Ing. Stefany Alcívar Bastidas, MSc.
DIRECTORA DE LA CARRERA**

f. _____

**Ing. Clara Glas Cevallos, MSc.
DOCENTE DE LA CARRERA**

f. _____

**Ing. Federico von Buchwald de Janon, MSc.
OPONENTE**

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	2
1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Alcance.....	4
1.5 Metodología de análisis	4
CAPÍTULO II.....	6
2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 Pavimento.....	6
2.2 Estructura de un pavimento	6
2.2.1 Subrasante.....	7
2.2.2 Sub-base de agregados (SB).....	8
2.2.3 Base de agregados (BG).....	9
2.3 Tipos de pavimentos.....	11
2.3.1 Pavimento flexible	12
2.3.2 Pavimento rígido	12
2.3.3 Pavimento compuesto.....	13
2.3.4 Base de agregados estabilizada con cemento Portland.....	15

2.3.5	Whitetopping	17
CAPÍTULO III		23
3	METODOLOGÍAS DE DISEÑO	23
3.1	Matriz de diseño, características de los materiales	23
3.2	Diseños de pavimentos de acuerdo a la metodología AASHTO 93	26
3.2.1	Diseño de pavimento flexible.	27
3.2.2	Diseño de pavimentos rígidos	32
3.3	Análisis mecanicista de pavimentos.	37
3.3.1	Metodología	37
3.3.2.	Análisis de las temperaturas en las regiones Sierra y Costa. ...	38
3.3.4.	Análisis de fallo a partir de modelos de desempeño de pavimentos flexibles	50
3.4	Diseño de whitetopping según metodología del Departamento de Transporte de Texas	65
3.4.1	Filosofía de diseño	65
3.4.2	Pasos de diseño.....	65
CAPITULO IV.....		67
4	RESULTADOS	67
4.1	. Diseño por AASHTO 93 de pavimentos flexibles con base de agregados y base estabilizada con cemento	68
4.2.	Análisis mecanicista para Costa y Sierra de los pavimentos flexibles diseñados.....	70
4.3.	Diseño por AASHTO 93 de pavimentos rígidos.....	82

4.4. Diseño de whitetopping según el procedimiento del Departamento de Transporte de Texas	83
CAPITULO V.....	84
5. ANÁLISIS ECONÓMICO	84
5.2. Resultados.....	85
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
7. BIBLIOGRAFÍA.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Exigencias para el mejoramiento de subrasante	7
Tabla 2.2.- Exigencia para sub-bases de agregados.....	8
Tabla 2.3.- Exigencias granulométricas para la sub-base de agregados.....	9
Tabla 2.4.- Exigencia para bases de agregados.....	9
Tabla 2.5.- Exigencias granulométricas para base de agregados – Clase I.	10
Tabla 2.6.- Exigencias granulométricas para base de agregados - Clase II.	10
Tabla 2.7.- Exigencias granulométricas para base de agregados - Clase III.	11
Tabla 2.8.- Exigencias granulométricas para base de agregados - Clase IV.	11
Tabla 2.9.- Metodologías para el diseño de whitetopping.....	22
Tabla 3.1.- Matriz de diseño para pavimentos flexibles	25
Tabla 3.2.- Matriz de diseño para pavimentos rígidos	25
Tabla 3.3.- Características de los materiales considerados en los diseños.	26
Tabla 3.4.- Valores del nivel de confianza R de acuerdo al tipo de camino.	28
Tabla 3.5.- Factores de desviación normal.	28
Tabla 3.6.- Valores de índice de servicio final según el tipo de vía.....	29
Tabla 3.7.- Rangos de valores para desviación estándar en pavimentos rígidos.	32
Tabla 3.8.- Rango de valores del coeficiente de drenaje	34
Tabla 3.9.- Valores del coeficiente de transferencia de carga	34
Tabla 3.10.- Valores para el factor de pérdida de soporte	35

Tabla 3.11.- Diámetros y longitudes recomendados en barras de amarre ..	37
Tabla 3.12.- Diámetros y longitudes recomendados en pasadores	37
Tabla 3.13.- Resultados de la temperatura media ponderada en función del tráfico y profundidad de medición	40
Tabla 3.14.- Granulometría de la mezcla asfáltica escogida	43
Tabla 3.15.- Valores de módulo dinámico a distintas temperaturas a una frecuencia de carga de 10 Hz	46
Tabla 3.16.- Coeficiente de Poisson para capa asfáltica según su temperatura	48
Tabla 5.1.- Precios unitarios referenciales utilizados para el análisis económico	84
Tabla 5.2.- Dosificación asumida para riego de liga y riego de imprimación	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Perspectiva de un pavimento flexible.	6
Figura 2.2.- Sección transversal típica de un pavimento flexible	12
Figura 2.3.- Sección transversal típica de un pavimento rígido	12
Figura 2.4.- Sección transversal típica #1 de un pavimento compuesto	13
Figura 2.5.- Sección transversal típica #2 de un pavimento compuesto	13
Figura 2.6.- Sección transversal típica #3 de un pavimento compuesto	14
Figura 2.7.- Cambio en la ubicación de la tensión crítica de un pavimento flexible típico (a) a un pavimento compuesto (b).....	15
Figura 2.8.- Aplicación de la base estabilizada con cemento en obra	16
Figura 2.9.- Estructura típica de rehabilitación con whitetopping.....	18
Figura 2.10.- Tipos de adherencia entre el whitetopping y la capa asfáltica	19
Figura 2.11.- Mecanismo de carga en losas largas y cortas.....	19
Figura 2.12.- Empleo de fibras sintéticas en losas de concreto.....	20
Figura 3.1.- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.....	27
Figura 3.2.- Procedimiento para la estructuración de capas.....	31
Figura 3.3.- Ejemplo de diseño de un pavimento flexible por AASHTO 93..	32
Figura 3.4.- Ejemplo de diseño de un pavimento rígido por AASHTO 93....	36
Figura 3.5.- Frecuencia horaria de vehículos pesados en la estación de peaje de Alóag (Sierra).....	39
Figura 3.6.- Frecuencia horaria de vehículos pesados en la estación de peaje de Nobol (Costa).....	40
Figura 3.7.- Temperatura media ponderada en función del tráfico de pesados y la profundidad de medición	41

Figura 3.8.- Límites de velocidad según el tipo de vía.....	45
Figura 3.9. Resultados de módulos dinámicos según la región y la temperatura de análisis.....	47
Figura 3.10.- Reporte de resultados de análisis tenso-deformacional en el programa BISAR 3.0.....	49
Figura 3.11.- Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista.....	50
Figura 3.12.- Patrón de fallo para la deformación permanente en capa asfáltica.....	52
Figura 3.13.- Deformación permanente en la capa asfáltica correspondiente a la variante 10-BEC para la región costa.....	54
Figura 3.14.- Deformación permanente en la capa asfáltica correspondiente a la variante 10-BEC para la región sierra.....	55
Figura 3.15.- Patrón de fallo para el agrietamiento "Piel de Cocodrilo".....	56
Figura 3.16.- Patrón de fallo para el agrietamiento longitudinal.....	57
Figura 3.17.- Fatiga en la capa asfáltica correspondiente a la variante 10-BEC para la región Costa.....	60
Figura 3.18 Fatiga en la capa asfáltica correspondiente a la variante 10-BEC para la región Sierra.....	61
Figura 3.19.- Fatiga en la base estabilizada con cemento correspondiente a la variante 10-BEC para la región Costa.....	63
Figura 3.20.- Fatiga en la base estabilizada con cemento correspondiente a la variante 10-BEC para la región Sierra.....	63
Figura 3.21.- Deformación permanente sobre la subrasante correspondiente a la variante 10-BEC para la región Costa.....	64
Figura 3.22 Deformación permanente sobre la subrasante correspondiente a la variante 10-BEC para la región Sierra.....	64

Figura 3.25.- Diseño de whitetopping delgado (TWT) correspondiente a la variante 10 de la matriz de diseño de pavimentos rígido.	67
Figura 4.1.- Resultados del diseño de pavimentos flexible con BG según AASHTO 93	68
Figura 4.2.- Resultados del diseño de pavimentos flexible con BEC según AASHTO 93	69
Figura 4.3.- Variantes ajustadas según el análisis mecanicista para BEC ..	70
Figura 4.4.- Resultados del análisis mecanicista con BG para tráfico medio	71
Figura 4.5.- Resultados del análisis mecanicista con BG para tráfico pesado	72
Figura 4.6.- Resultados del análisis mecanicista con BG para tráfico muy pesado	73
Figura 4.7.- Resultados del análisis mecanicista con BG para tráfico ultra pesado	74
Figura 4.8.- Resultados del análisis mecanicista con BEC para tráfico medio	75
Figura 4.9.- Resultados del análisis mecanicista con BEC para tráfico pesado	76
Figura 4.10.- Resultados del análisis mecanicista con BEC para tráfico muy pesado	77
Figura 4.11.- Resultados del análisis mecanicista con BEC para tráfico ultra pesado	78
Figura 4.12.- Resumen del análisis mecanicista para diseños con BG.	80
Figura 4.13.- Resumen del análisis mecanicista para diseños con BEC	81
Figura 4.14.- Resultados del diseño de pavimentos rígidos según AASHTO 93	82

Figura 4.15.- Resultados del diseño de whitetopping	83
Figura 5.1.- Resultados de análisis económico BG vs BEC	86
Figura 5.2.- Resultados de análisis económico losas de concreto convencionales vs whitetoppings.....	87

RESUMEN

Los pavimentos compuestos en los últimos años han ganado protagonismo en muchos países. En Europa son conocidos por su larga duración en carreteras principales, demostrando el potencial para convertirse en una solución de pavimento rentable para autopistas con altos niveles de tráfico.

En este trabajo se analizó el empleo de diferentes estructuras de pavimentos compuestos en vías de tráfico pesado en Ecuador mediante la aplicación de criterios técnicos de diseño y económicos, y a partir de comparaciones se valoró el papel práctico de dichas soluciones.

Se diseñaron dos tipos de pavimentos compuestos: 1) capa asfáltica sobre base estabilizada con cemento y 2) whitetopping sobre capa asfáltica, mediante una matriz de diseño que relaciona diferentes niveles de ESAL con distintas calidades de subrasante. Estos pavimentos fueron comparados con los pavimentos convencionales flexibles y rígidos.

Para el análisis mecanicista de los diseños de pavimentos flexibles se consideraron dos regiones del país: Costa y Sierra para considerar las distintas condiciones climáticas a las que podría estar sometido el pavimento. Como resultado se obtuvo un excelente comportamiento de la BEC al no fallar ante ningún modelo de desempeño.

El diseño de whitetopping fue realizado por la metodología del Departamento de Transporte de Texas, los cuales se compararon con diseños según AASHTO 93 para losas convencionales. Como resultado se obtuvo la disminución de espesores de losas para whitetopping en tráficos pesados.

A partir de los resultados obtenidos se realizaron comparaciones técnicas y económicas para identificar sus ventajas y desventajas con respecto a los diseños convencionales.

Palabras Claves: *ESAL, pavimentos compuestos, flexible, rígido, base estabilizada con cemento, whitetopping.*

ABSTRACT

Composite pavements in recent years have gained prominence in many countries. In Europe they are known for their long duration on major roads, demonstrating the potential to become a cost-effective pavement solution for high-traffic highways.

In the present work of investigation the use of different structures of composite pavements in routes of heavy traffic in Ecuador is analyzed since they have demonstrated the potential to turn into a solution of profitable pavement for freeways with high levels of traffic.

Two types of composite pavements were designed: 1) asphalt layer on cement-treated base and 2) whitetopping on asphalt layer. Using a design matrix which relates different levels of ESAL with different qualities of subgrade. These pavements were compared with flexible and rigid pavements.

To carry out the empirical-mechanistic analysis, two regions of the country were considered: *Costa* and *Sierra* in order to contrast the different climatic conditions to which the pavement will be subjected. As a result, excellent behavior of the BEC was obtained by not failing any performance model.

The white-topping design was done by the methodology of the Texas Department of Transportation, which was compared with designs according to AASHTO 93 for conventional slabs. As a result, the reduction of slab thickness for whitetopping in heavy traffic was obtained.

From the obtained results, technical and economic comparisons were made in order to identify their advantages and disadvantages over conventional designs.

Keywords: *ESAL, composite pavements, flexible, rigid, cement-treated base, whitetopping.*

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Los pavimentos compuestos se han implementado en todo el mundo en las últimas décadas. En Europa, los pavimentos compuestos se han utilizado ampliamente; países como Alemania, Francia, y España son conocidos por su amplio uso de estructuras semirrígidas de larga duración en sus carreteras principales. Redes, que representan del 30% al 50% de sus sistemas viales. Los pavimentos compuestos están constituidos fundamentalmente por capas de mezclas asfálticas sobre bases rígidas (bases estabilizadas con cemento, hormigón compactado con rodillos, etc.) o capas rígidas de concreto colocadas sobre capas asfálticas (whitetopping) o sobre losas de concreto. Desde hace unos 10 años, a partir de SHRP2 Renewal Research Project R21: Pavement Systems, de los Estados Unidos, se estudian y promueven estos tipos de pavimentos en dicho país.

El SHRP2 investigó el diseño y la construcción de nuevos sistemas de pavimentos compuestos que podrían proporcionar estructuras más duraderas con menores costos de ciclo de vida. Si bien los pavimentos compuestos han estado en uso durante muchos años, en la mayoría de los casos no están diseñados inicialmente como pavimentos compuestos, sino que se convierten en pavimentos compuestos a través de capas de refuerzo colocadas como parte de rehabilitaciones. Dicho proyecto desarrolló métodos de diseño y construcción para nuevos pavimentos compuestos.

1.2 Justificación

Los sistemas de pavimentos compuestos han demostrado el potencial para convertirse en una solución de pavimento rentable para autopistas con altos y elevados volúmenes de tráfico. Los mismos cuando se comparan con los pavimentos flexibles o rígidos tradicionales, se convierten en una alternativa rentable porque pueden proporcionar mejores niveles de rendimiento, tanto a nivel estructural como funcional. Por lo tanto, pueden ser opciones viables para corredores de tráfico de gran volumen. Países como el Reino Unido y España, que han utilizado sistemas de pavimento compuesto en sus redes de carreteras principales, han informado experiencias positivas en términos de desempeño. Las estructuras que conforman los pavimentos compuestos pueden proporcionar pavimentos de larga duración que ofrecen buenos niveles de servicio y operaciones de mantenimiento rápidas y rentables.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar el empleo de diferentes estructuras de pavimentos compuestos en vías de tráfico pesado en Ecuador mediante la aplicación de criterios técnicos de diseño, así como económicos, para a partir de comparaciones valorar el papel práctico de dichas soluciones.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar alternativas de pavimentos compuestos y pavimentos convencionales para vías de tráfico pesado mediante diferentes métodos variando los ejes equivalentes de diseño (ESAL) y la calidad de subrasante.
- Analizar según criterios mecanicistas el comportamiento de los pavimentos flexibles diseñados.
- Realizar un análisis comparativo de costos entre las alternativas diseñadas de pavimentos compuestos vs pavimentos convencionales.
- Comparar las soluciones determinadas respecto a los diseños convencionales, identificando ventajas y desventajas.

1.4 Alcance

Se analizaron las soluciones de pavimentos compuestos para vías de tráfico pesado utilizando métodos convencionales y criterios mecanicistas. Se evaluó su desempeño de acuerdo a los criterios presentes en la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico Mecanicista (MPEDG). Para el caso de whitetopping se empleó la metodología desarrollada por el Departamento de Transporte de Texas (Texas DOT). Además, se valoraron con criterios económicos las estructuras diseñadas. Posteriormente con la información obtenida se realizaron comparaciones y se hicieron recomendaciones sobre las mejores alternativas a utilizar en el país.

1.5 Metodología de análisis

Se realizó el diseño de dos tipos de pavimentos compuestos: 1) capa asfáltica sobre base estabilizada con cemento y 2) whitetopping sobre capa asfáltica. Para ambos casos se determinó una matriz de diseño que relaciona diferentes niveles de ESAL con distintas calidades de subrasante.

Para el primer caso (Capa asfáltica sobre base estabilizada con cemento). Se partió de un diseño de pavimento flexible según la metodología de AASHTO 93, empleando base de agregados (BG), que luego se comparó con un diseño según la misma iniciativa con base estabilizada con cemento (BEC). Posteriormente a los diseños se les realizó un análisis mecanicista empleando los criterios de la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista – AASHTO 2008. Para este análisis se tomó en cuenta dos regiones en el país: Costa y Sierra, debido a que el comportamiento del pavimento no es el mismo si es sometido a distintas condiciones climáticas. La variable que más implicación tiene en el análisis mecanicista, dependiendo de la región a analizar, fue la temperatura de la mezcla asfáltica que incide directamente el módulo dinámico. La determinación de los esfuerzos y deformaciones necesarios para este análisis se los realizó en el programa BISAR 3.0 creado por Shell Petroleum Company.

Para el segundo caso, se empleó metodología desarrollada por el Departamento de Transporte de Texas (Texas DOT) en EE.UU., para diseños de TWT (whitetopping delgados), debido a no poderse aplicar en este caso AASHTO 93 ya que la misma trataría al WT como un diseño de losa de pavimento de concreto (PC) convencional sobre un módulo de reacción mejorado. También se realizó un diseño de pavimentos rígidos (losas de concreto) según la metodología de AASHTO 93 para comparaciones futuras. Finalmente, se realizó un análisis económico entre los pavimentos compuestos diseñados vs los pavimentos tradicionales diseñados (flexible o rígido) y se comentaron sus ventajas y desventajas.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Pavimento

Es una estructura conformada por capas de diferentes materiales que se coloca sobre la subrasante y tiene como función permitir el tránsito de los vehículos en las distintas épocas del año (ver Figura 2.1) (Giordani & Leone, 2010). Un pavimento debe presentar las siguientes características:

- Superficie uniforme e impermeable
- Color y textura apropiados.
- Resistencia a la aplicación y repetición de cargas
- Resistencia a los factores climáticos del lugar.
- La transmisión de esfuerzos no exceda su resistencia.



Figura 2.1.- Perspectiva de un pavimento flexible.

Fuente: Manual Para La Inspección Visual De Pavimentos Flexibles
(Instituto Nacional de Vías, 2006)

2.2 Estructura de un pavimento

La estructura de un pavimento es una combinación de varias capas de materiales pétreos aglomerados o no que deben cumplir con varios parámetros para ser aceptados. A continuación se revisarán los más importantes.

2.2.1 Subrasante

Capa inferior de la estructura del pavimento, cuya finalidad es recibir los esfuerzos y deformaciones de las cargas del tráfico, provenientes de las capas superiores (sub-base, base, capa asfáltica, losa de concreto, etc.).

La subrasante en general está constituida por las últimas capas que conforman las explanadas, en una profundidad usual entre 30 y 60 cm. No obstante, ante tráficos pesados o materiales débiles pudieran emplearse capas de mejoramiento.

Según la norma MOP-001-F 2002 del Ministerio de Obras Públicas de Ecuador “ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES”, en el capítulo 400 “ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO”, sección 402 “MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE”, se mencionan las siguientes características:

El suelo seleccionado como capa de mejoramiento de subrasante debe ser suelo granular, rocoso o una combinación ente ellos, y libre de materia orgánica. Con respecto a la granulometría, todas sus partículas deberán pasar el tamiz de 4 pulgadas (100 mm), y no más de un 20% pasará el tamiz #200 (75 μ m), de acuerdo al ensayo NTE INEN 696. La parte del material que pase el tamiz #40 debe cumplir lo establecido en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1.- Exigencias para el mejoramiento de subrasante

Parámetro	Exigencia
Índice de Plasticidad (IP)	≤ 9
Límite Líquido (LL)	≤ 35
CBR	$\geq 20 \%$

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002)

2.2.2 Sub-base de agregados (SB)

Es la capa de la estructura del pavimento que se encuentra entre la subrasante y la base (en caso de existir).

Según la norma MOP-001-F 2002, en su sección 403: "SUB-BASES", se mencionan las siguientes características:

La capa de sub-base seleccionada se clasifica de acuerdo al material a emplear. No obstante, todos tipos de sub-bases deben cumplir con lo mostrado en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2.- Exigencia para sub-bases de agregados

Parámetro	Exigencia
Índice de Plasticidad (IP)	≤ 6
Límite Líquido (LL)	≤ 25
CBR	$\geq 30 \%$
Desgaste máximo (Abrasión LA)	$\leq 50 \%$

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002)

La sub-base de un pavimento se puede dividir en cuatro tipos:

- CLASE I: Sub-base conformada por agregados gruesos obtenidos por proceso de trituración de roca o gravas. Por lo menos un 30% del agregado debe obtenerse por trituración
- CLASE II: Sub-base conformada por agregados gruesos obtenidos por proceso de trituración o cribado en yacimientos de piedras o gravas fragmentadas naturalmente.
- CLASE III: Sub-base conformada por agregados gruesos obtenidos por de cribado de gravas o roca mezclados con material fino (arena).

Los agregados a utilizarse para las distintas clases de sub-base deben cumplir las exigencias granulométricas que se indican en la Tabla 2.3 por medio de los ensayos establecidos en la norma INEN 696 y 697.

Tabla 2.3.- Exigencias granulométricas para la sub-base de agregados.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
3" (76.2 mm.)	--	--	100
2" (50.4 mm.)	--	100	--
1 1/2 (38,1 mm.)	100	70 - 100	--
Nº 4 (4.75 mm.)	30 - 70	30 - 70	30 - 70
Nº 40 (0.425 mm.)	10 - 35	15 - 40	--
Nº 200 (0.075 mm.)	0 - 15	0 - 20	0 - 20

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002)

2.2.3 Base de agregados (BG)

Es la capa de la estructura del pavimento que se encuentra entre la sub-base y la capa asfáltica o la losa de concreto.

Según la norma MOP-001-F 2002 en su sección 404: "BASES", se mencionan las siguientes características:

La capa de base seleccionada se va a clasificar de acuerdo al material a emplear y al porcentaje de trituración de los agregados. No obstante, todas las bases de agregados deben cumplir con lo mostrado en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4.- Exigencia para bases de agregados

Parámetro	Exigencia
Índice de Plasticidad (IP)	≤ 6
Límite Líquido (LL)	≤ 25
CBR	$\geq 80 \%$
Desgaste máximo (Abrasión LA)	$\leq 40 \%$

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002).

Las bases de un pavimento se pueden clasificar en cuatro tipos:

- CLASE I: Base conformada por agregados gruesos y finos triturados en un 100%. Dependiendo del tipo debe cumplir las siguientes exigencias granulométricas de la Tabla 2.5.

Tabla 2.5.- Exigencias granulométricas para base de agregados – Clase I.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	
	Tipo A	Tipo B
2" (50.8 mm.)	100	--
1 1/2" (38,1mm.)	70 - 100	100
1" (25.4 mm.)	55 - 85	70 - 100
3/4"(19.0 mm.)	50 - 80	60 - 90
3/8"(9.5 mm.)	35 - 60	45 - 75
Nº 4 (4.76 mm.)	25 - 50	30 - 60
Nº 10 (2.00 mm.)	20 - 40	20 - 50
Nº 40 (0.425 mm.)	10 - 25	10 - 25
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 12	2 - 12

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002).

- CLASE II: Base conformada por agregados gruesos y finos triturados en al menos un 50%. Debe cumplir las siguientes exigencias granulométricas de la Tabla 2.6.

Tabla 2.6.- Exigencias granulométricas para base de agregados - Clase II.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
1" (25.4 mm.)	100
3/4"(19.0 mm.)	70 - 100
3/8"(9.5 mm.)	50 - 80
Nº 4 (4.76 mm.)	35 - 65
Nº 10 (2.00 mm.)	25 - 50
Nº 40 (0.425 mm.)	15 - 30
Nº 200 (0.075 mm.)	3 - 15

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002).

- CLASE III: Base conformada por agregados gruesos y finos triturados en al menos un 25%. Debe cumplir las siguientes exigencias granulométricas de la Tabla 2.7.

Tabla 2.7.- Exigencias granulométricas para base de agregados - Clase III.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
3/4"(19.0 mm.)	100
Nº 4 (4.76 mm.)	45 - 80
Nº 10 (2.00 mm.)	30 - 60
Nº 40 (0.425 mm.)	20 - 35
Nº 200 (0.075 mm.)	3 - 15

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002).

- CLASE IV: Base conformada por agregados gruesos y finos obtenidos por trituración o cribado de piedras fragmentadas. Debe cumplir las siguientes exigencias granulométricas de la Tabla 2.8.

Tabla 2.8.- Exigencias granulométricas para base de agregados - Clase IV.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
2" (50.8 mm.)	100
1" (25.4 mm.)	60 - 90
Nº 4 (4.76 mm.)	20 - 50
Nº 200 (0.075 mm.)	0 - 15

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002).

2.3 Tipos de pavimentos

Existen diversos tipos de pavimentos que se mencionan a continuación:

- Pavimento flexible
- Pavimento rígido
- Pavimento compuesto

2.3.1 Pavimento flexible

Está conformado por una capa de mezcla asfáltica delgada asentada sobre las capas que conforman la estructura de apoyo (ver Figura 2.2) (Giordani & Leone, 2010).

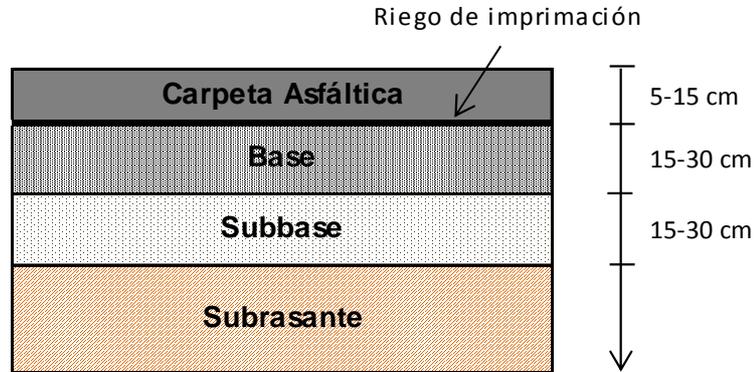


Figura 2.2.- Sección transversal típica de un pavimento flexible

Fuente: Elaboración propia

Las dos metodologías más importantes de diseño para estos pavimentos son:

- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993),
- Metodología del Instituto de Asfalto de los Estados Unidos.

2.3.2 Pavimento rígido

Está conformado por una losa de concreto de cemento Portland asentada sobre las capas que conforman la estructura de apoyo (ver Figura 2.3) (Giordani & Leone, 2010).

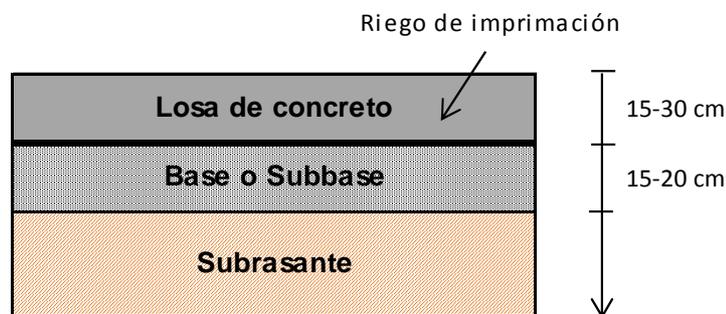


Figura 2.3.- Sección transversal típica de un pavimento rígido

Fuente: Elaboración propia

Las dos metodologías de diseño usuales en este tipo de pavimentos son:

- a) AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)
- b) Método de la Asociación de Cemento Portland (PCA).

2.3.3 Pavimento compuesto

2.3.3.1 Tipos

Es una estructura que comprende dos o más capas que combinan diferentes características y que actúan como un material compuesto (Flintsch, Diefenderfer, & Nunez., 2008). Los tipos de pavimentos compuestos más comunes son los que se muestran a continuación (ver Figuras 2.4, 2.5, y 2.6).

- 1. Capa asfáltica (CA) sobre base estabilizada de cemento (BEC)

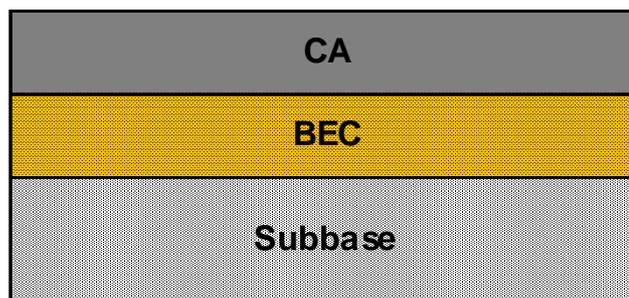


Figura 2.4.- Sección transversal típica #1 de un pavimento compuesto

Fuente: Elaboración propia

- 2. Losa de concreto de cemento Portland (whitetopping, WT) sobre capa asfáltica.

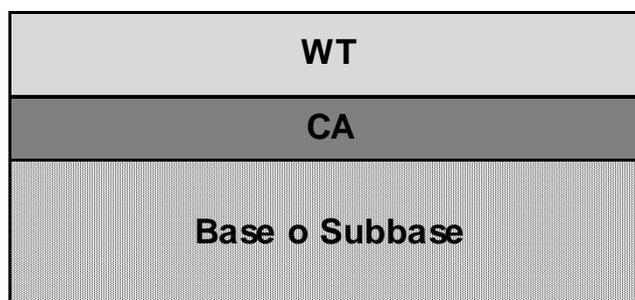


Figura 2.5.- Sección transversal típica #2 de un pavimento compuesto

Fuente: Elaboración propia.

- 3. Capa asfáltica sobre pavimento rígido.

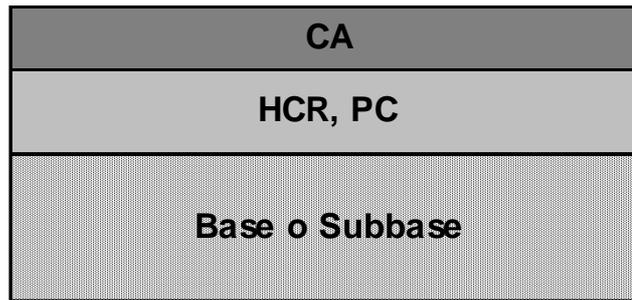


Figura 2.6.- Sección transversal típica #3 de un pavimento compuesto

Fuente: Elaboración propia

2.3.3.2. Ventajas del pavimento compuesto

Los pavimentos compuestos, cuando se comparan con los pavimentos flexibles o rígidos tradicionales, tienen el potencial de ofrecer mejores niveles de rendimiento tanto estructural como funcionalmente (aspectos técnicos), al tiempo que son una alternativa económicamente viable a los diseños tradicionales de pavimentos flexibles y rígidos (aspecto económico).

Según el reporte VTCR 09-CR2: “COMPOSITE PAVEMENT SYSTEMS: SYNTHESIS OF DESIGN AND CONSTRUCTION PRACTICES” del Departamento de Transporte de Virginia (Flintsch, Diefenderfer, & Nunez., 2008) y la “GUÍA PARA EL DISEÑO DE VÍAS DE ALTO VOLUMEN” (Asociación Dominicana de Productores de Cemento Portland, 2013), algunos de los beneficios generales que pueden proporcionar los pavimentos compuestos son:

- La capa rígida (bases tratadas) proporciona un fuerte soporte a la capa flexible.
- Adecuadas propiedades de fricción en la superficie del pavimento.
- Reduce el espesor de las capas de pavimento comparado con materiales no-tratados (por ejemplo, gravas), en especial el volumen de mezcla bituminosa utilizada.
- Mejora la resistencia a condiciones saturadas en comparación con materiales no-tratados.
- Mejora la resistencia a la fatiga de superficies bituminosas colocadas encima (comparado con materiales no-tratados).
- Excelente relación costo/vida útil (Díaz & Pinzón, 2014).

El tipo convencional de pavimento para tráfico pesado puede ser una capa asfáltica colocada sobre una base de agregados no tratada y una subbase granular. En este tipo de estructura de pavimento flexible convencional, la capa asfáltica es la que proporciona la mayor parte de la capacidad estructural. Por lo tanto, las tensiones por tracción en la parte inferior de dicha capa deben analizarse al diseñar un pavimento flexible.

Esto significa que debe considerarse el riesgo de agrietamiento por fatiga (fatiga por flexión) que se inicia en la parte inferior de la capa asfáltica y se propaga hacia arriba. En una estructura compuesta (ver Figura 2.7), la ubicación de la deformación que genera la fatiga en la CA pasa a ser una tensión por tracción en la parte inferior de la BEC, las cuales poseen un alto grado de soporte (Flintsch, Diefenderfer, & Nunez., 2008).

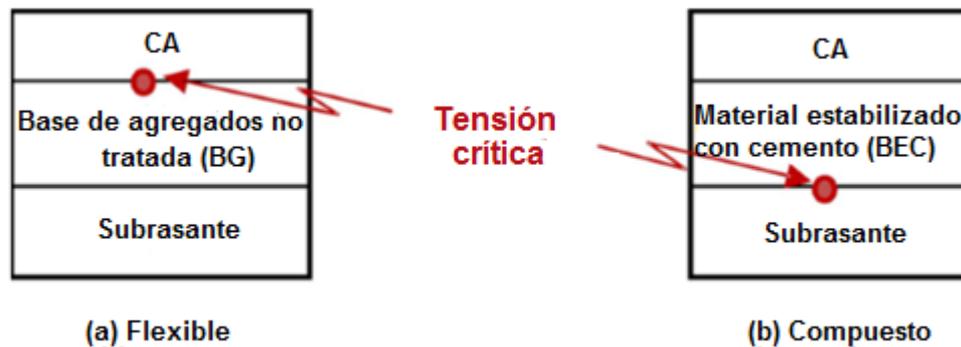


Figura 2.7.- Cambio en la ubicación de la tensión crítica de un pavimento flexible típico (a) a un pavimento compuesto (b)

Fuente: Sistemas compuestos de pavimentos: Síntesis de práctica de diseño y construcción (Flintsch, Diefenderfer, & Nunez., 2008)

2.3.4 Base de agregados estabilizada con cemento Portland

2.3.4.1 Definición

La estabilización de una base de agregados se logra al mezclarse con las cantidades necesarias de cemento y agua, compactándose adecuadamente con la energía de compactación requerida (ver Figura 2.8). El cemento Portland se puede incorporar al material de base para mejorar sus

propiedades, tales como: la resistencia mecánica, la resistencia a condiciones climáticas adversas (especialmente ante altos índices de saturación), los indicadores de plasticidad o la degradación de los agregados. Además permite el reciclado de pavimentos existentes severamente deteriorados, así como el uso de materiales que no cumplen con las especificaciones técnicas para base granular (Arce, 2011).



Figura 2.8.- Aplicación de la base estabilizada con cemento en obra

Fuente: Bases estabilizadas con cemento: Algunas comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes (Arce, 2011)

La variedad de posibilidades del uso de la técnica de estabilización con cemento es muy amplia, por eso algunas recomendaciones para aplicar la alternativa del cemento son (Arce, 2011):

- a) Que el índice de plasticidad (IP) sea \leq que 30 para suelos tipo arenosos.
- b) Que el IP sea \leq 20 y el límite líquido (LL) sea \leq 40 para suelos de grano fino (tipo limosos). Para agregados tipo gravas que el porcentaje que pasa el tamiz # 4 sea \geq a 45, y que adicionalmente se cumpla:

$$IP \leq 20 + (0.25) * (50 - \%pasante\ tamiz\#4)$$

- c) Para materiales que tengan menos de un 35% de pasante del tamiz #200 y que el IP sea \leq a 20.
- d) En suelos tipo A-4, A-5, A-6, y A-7 (clasificación AASHTO), se recomienda estabilizarlos con cal.

2.3.4.2 Ventajas del uso de base estabilizada con cemento

Según la conferencia Transport Our Highway to a Sustainable Future (ARRB Group Ltd., 2003) y el boletín técnico Vol.2, No. 19: “Bases estabilizadas con cemento: Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes” publicado (Arce, 2011), algunas de las ventajas del empleo de base estabilizada con cemento son:

- Proporciona un gran aporte estructural al pavimento, permitiendo construir capas de base con altas resistencia y altos valores de módulo. Puede disminuir el espesor de la capa asfáltica en función del típico.
- Mejora los índices de plasticidad y la capacidad de soporte (CBR) de los materiales (suelos y agregados).
- El alto grado de soporte proporcionado a la capa asfáltica por la base estabilizada con cemento significa que esta última se convierte en la capa estructural que gobierna en el diseño, en lugar de la fatiga de la capa asfáltica.
- Permite incorporar al pavimento agregados que no cumplen las especificaciones requeridas para base granular.
- Aportan gran resistencia a la socavación en bordes y esquinas en las losas de los pavimentos de concreto, lo cual sumado a los altos módulos, permiten diseñar losas de menor espesor.
- No presentan problemas de deformación permanente, los cuales son comunes en las bases granulares.

2.3.5 Whitetopping

2.3.5.1 Generalidades

El proceso de rehabilitación de un pavimento asfáltico con una capa refuerzo de concreto de cemento Portland se conoce como “whitetopping” (ver Figura 2.9) (Flintsch, Diefenderfer, & Nunez., 2008). No obstante, estos no solamente

pueden ser utilizados como parte de una solución de rehabilitación sino también como capas nuevas dentro de un proceso de diseño de una vía, como corresponde al objetivo del presente trabajo.

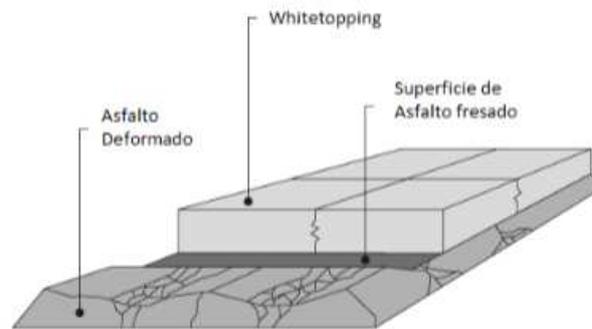


Figura 2.9.- Estructura típica de rehabilitación con whitetopping

Fuente: Whitetopping – una alternativa de rehabilitación (Gutiérrez, 2012)

Desde el punto de vista conceptual, el diseño de la losa de hormigón ha tenido cambios significativos con el pasar del tiempo. Inicialmente se consideraban solamente losas convencionales de espesores generalmente mayores a los 20 cm, En las últimas décadas, el espesor de losa se pudo reducir debido a tres importantes parámetros:

- a) **Adherencia:** Las losas convencionales, en sus inicios se diseñaban sin adherencia (unbounded, en inglés) y corresponden a casos cuyo espesor superan los 20 cm. Se construían directamente sobre la superficie de una capa asfáltica sin ningún tipo de trabajo previo para asegurar su adherencia, en tanto que actualmente para los whitetopping se contempla la adherencia con la capa asfáltica, mediante procedimientos que garanticen su adherencia, consiguiendo así una sección monolítica, que reduce las tensiones de trabajo de la capa de hormigón y hace posible la reducción de espesor (ver Figura 2.10).

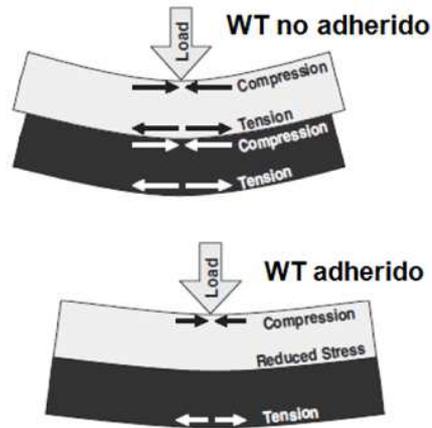
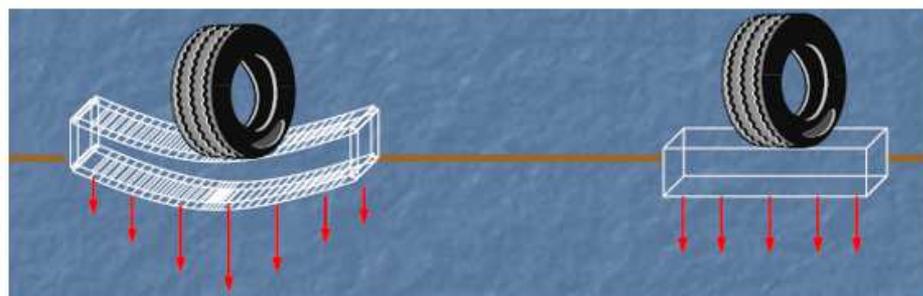


Figura 2.10.- Tipos de adherencia entre el whitetopping y la capa asfáltica

Fuente: Perspectivas de los pavimentos compuestos en Ecuador
(Vila, 2018)

- b) **Longitud de losas:** El empleo de longitudes de losas más pequeñas con respecto a las longitudes de las losas convencionales, usualmente de 120x120 cm ó 180x180 cm. De esta manera ante el paso de las cargas, el concreto trabajará más a compresión que a flexotracción (ver Figura 2.11).



Losas largas

Losas cortas

Figura 2.11.- Mecanismo de carga en losas largas y cortas

Fuente: Perspectivas de los pavimentos compuestos en Ecuador
(Vila, 2018)

- c) **Concreto reforzado con fibras:** Controlan la fisuración por contracción del concreto, y si se emplea en cantidades adecuadas

aumenta la resistencia al agrietamiento y abertura de fisuras (ver Figura 2.12).



Figura 2.12.- Empleo de fibras sintéticas en losas de concreto

Fuente: Guía para recubrimientos de concreto: soluciones sostenibles para repavimentación y rehabilitación de pavimentos existentes (3ª edición)
(Harrington & Fick, 2014)

2.3.5.2 Clasificación

Según el espesor:

Convencionales	<ul style="list-style-type: none">• Los espesores de la capa son igual a 20 cm o mayores
Delgados	<ul style="list-style-type: none">• También llamado Thin Whitetopping (TWT, por sus siglas en inglés). El espesor de losa luego va desde 10 a 20 cm, y el espaciado de juntas se recomienda que sean de 60 y 120 cm.
Ultradelgados	<ul style="list-style-type: none">• También llamado UltraThin Whitetopping (UWT, por sus siglas en inglés). El espesor de losa luego va desde 5 a 10 cm, y el espaciado de juntas se recomienda que sean de 60 y 180 cm.

Según la adherencia con la capa asfáltica:

- a) Adherido (Bounded): Los whitetopping delgados y ultradelgados aprovechan la adherencia para la reducción de espesor de losas.
- b) No adherido (Unbounded): Condición típica para whitetopping convencionales.

2.3.5.3 Ventajas del uso de whitetopping

Estructuralmente

Los recubrimientos de hormigón no desarrollan las fallas encontradas en el asfalto. Cuando ocurre ahuellamiento, éste no se elimina con la colocación de un recubrimiento de asfalto; el ahuellamiento reaparece por la incapacidad del concreto asfáltico de alcanzar la compactación adecuada en las huellas de las ruedas o la incapacidad del asfalto de soportar las presiones y cargas del tráfico.

El hormigón puede rellenar uniformemente las huellas existentes en el asfalto y así corregir el perfil de la superficie. El reflejo de las grietas es otra de las fallas que puede disminuir considerablemente la vida útil de la sobrecapa asfáltica. Esto no ocurre en las losas de hormigón por la facilidad de atender los problemas existentes en la capa inferior.

Para el empleo de barras de amarre o unión y pasadores en las juntas de las losas, la Guía de Refuerzos de Concreto (Harrington & Fick, 2014) determina que los pavimentos de menos de 7-8 pulgadas de espesor no deben usar pasadores.

Seguridad

Garantizan una superficie uniforme del pavimento y mejoran la seguridad durante la conducción. Las altas cargas causan desplazamientos y ahuellamientos en el asfalto, lo cual se convierte en un problema en sitios donde existe un constante frenado y arranque de vehículos, como las intersecciones, peajes, rampas y áreas de estacionamiento.

Economía

En temas económicos, con la reducción de espesores y el no uso de pasadores ni barras de amarre, por las razones antes mencionadas, se garantiza diseños rentables en comparación a los pavimentos rígidos convencionales. Este punto será también analizado en este estudio.

2.3.5.4 Métodos de diseño

Hay una serie de procedimientos para el diseño de whitetopping los cuales se muestran en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9.- Metodologías para el diseño de whitetopping

Whitetopping convencional	<ul style="list-style-type: none">- Guía AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).
Whitetopping delgado	<ul style="list-style-type: none">- Método del Departamento de Transporte de Colorado.- Método del Departamento de Transporte de Texas.
Whitetopping ultradelgado	<ul style="list-style-type: none">- La Asociación de Cemento Portland (PCA).- Método de la Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA).- Método ACPA modificado.

	<ul style="list-style-type: none"> - Método del Departamento de Transporte de Illinois. - Método del Departamento de Transporte de New Jersey.
--	--

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

3 METODOLOGÍAS DE DISEÑO

3.1 Matriz de diseño, características de los materiales

La estructuración del trabajo a desarrollar se basa en el empleo de dos tipos de diseño que permita diseñar y comparar soluciones flexibles y rígidas de pavimentos convencionales con soluciones de pavimentos compuestos. Para esto se ha establecido dos matrices de diseño que consideran las siguientes variables:

a) Tráfico

Se utilizará como dato de entrada las repeticiones acumuladas de ejes simples equivalentes de 8.2 ton con ruedas gemelas en el carril de diseño durante el período de diseño (ESAL, de acuerdo a sus siglas en inglés). En el estudio se emplean los siguientes niveles de ESAL para el diseño de pavimentos flexibles:

- 5×10^5 Tráfico medio. Confiabilidad AASHTO: 80%
- 5×10^6 Tráfico pesado. Confiabilidad: 90%
- 25×10^6 Tráfico muy pesado. Confiabilidad: 95%
- 50×10^6 Tráfico ultrapesado. Confiabilidad: 95%

Para el diseño de pavimentos rígidos se decidió utilizar los mismos niveles de ESAL, teniendo en cuenta su variación según el tipo de pavimento a diseñar:

$$ESAL_{FLEXIBLE} = 0.67 ESAL_{RÍGIDO}$$

Por lo tanto, se emplean los siguientes niveles de ESAL para el diseño de pavimentos rígidos y diseño de whitetopping:

- 7.5×10^5 Tráfico medio. Confiabilidad: 80%
- 7.5×10^6 Tráfico pesado. Confiabilidad: 90%
- 37.5×10^6 Tráfico muy pesado. Confiabilidad: 95%
- 75×10^6 Tráfico ultrapesado. Confiabilidad: 95%

b) Calidad de la subrasante

El módulo resiliente de la subrasante, que puede relacionarse con el CBR (ensayo de Relación Portante de California) y que es un parámetro resistente más fácil de evaluar, será la variable empleada para considerar las situaciones más representativas en este estudio:

- 250 kg/cm^2 (25 MPa) - Subrasante mala.
- 500 kg/cm^2 (50 MPa) - Subrasante regular.
- 750 kg/cm^2 (75 MPa) - Subrasante buena.
- 1000 kg/cm^2 (100 MPa) - Subrasante excelente.

De esta forma las matrices a emplear según las variables, son las que se muestran en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2, tanto para pavimentos flexibles como para pavimentos rígidos respectivamente:

Tabla 3.1.- Matriz de diseño para pavimentos flexibles

		NIVELES DE ESAL			
		5 x10 ⁵	5 x10 ⁶	25 x10 ⁶	50 x10 ⁶
Mr subrasante (MPa)	25	VARIANTE 1	VARIANTE 2	VARIANTE 3	VARIANTE 4
	50	VARIANTE 5	VARIANTE 6	VARIANTE 7	VARIANTE 8
	75	VARIANTE 9	VARIANTE 10	VARIANTE 11	VARIANTE 12
	100	VARIANTE 13	VARIANTE 14	VARIANTE 15	VARIANTE 16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2.- Matriz de diseño para pavimentos rígidos

		NIVELES DE ESAL			
		7,5 x10 ⁵	7,5 x10 ⁶	37,5 x10 ⁶	75 x10 ⁶
Mr subrasante (MPa)	25	VARIANTE 1	VARIANTE 2	VARIANTE 3	VARIANTE 4
	50	VARIANTE 5	VARIANTE 6	VARIANTE 7	VARIANTE 8
	75	VARIANTE 9	VARIANTE 10	VARIANTE 11	VARIANTE 12
	100	VARIANTE 13	VARIANTE 14	VARIANTE 15	VARIANTE 16

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la matriz de pavimentos flexibles, los diseños se realizarán con la metodología AASHTO 93 empleando sistemas con bases de agregados (BAG) y bases estabilizadas con cemento (BEC).

Para el caso de los pavimentos rígidos, se utilizará el método de diseño convencional por AASHTO 93 y para whitetopping la metodología correspondiente a WT delgados del Departamento de Transporte de Texas (Texas DOT, por sus siglas en inglés).

- Características de los materiales

Todos los materiales a utilizar en las diferentes capas estructurales deberán cumplir las exigencias de calidad que se muestran en las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, MOP, 001-F del 2002. En general, es necesario asignarle a cada uno de los mismos un valor de módulo elástico (E_i), un coeficiente de capa (a_i) y un coeficiente de drenaje (m_i) de acuerdo a la calidad exigida. Ver Tabla 3.3.

Tabla 3.3.- Características de los materiales considerados en los diseños

Material	Módulo elástico, E_i (kg/cm^2)	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de capa AASHTO, a_i	Coefficiente de drenaje, m_i
Mezcla asfáltica	30,000	0.30	0.43	xxx
Base estabilizada cemento	40,000	0.25	0.15	1.0
Base de agregados	2,000	0.35	0.13	1.0
Subbase de agregados	1,000	0.35	0.11	0.8 ó 0.9 (*)
Mejoramiento	900	0.35	0.10	0.8

(*) 0.8 sobre la subrasante ó 0.9 sobre la capa de mejoramiento.

Fuente: Catálogo de secciones estructurales representativas de pavimentos semirrígidos para la república del Ecuador (Vila, 2016)

Para el caso de la base de agregados estabilizada con cemento se parte de cumplir una resistencia a compresión sin confinar (UC) a los 7 días de 25 kg/cm^2 , lo que equivale a una resistencia a compresión a los 28 días de 37.5 kg/cm^2 , considerando que por lo general se aplica un valor de 1.5 veces la UC a los 7 días para obtener la UC a los 28 días. De acuerdo a relaciones ya expuestas entre UC y la resistencia a flexo-tracción, esta última será a los 28 días de 9.0 kg/cm^2 (0.9 MPa).

3.2 Diseños de pavimentos de acuerdo a la metodología AASHTO 93

Esta guía (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993) para el diseño de estructuras de pavimento proporciona un conjunto completo de procedimientos que se pueden utilizar para el diseño de

pavimentos nuevos y su rehabilitación; tanto rígido como flexible, así como superficies de agregados para carreteras de bajo volumen. Ver Figura 3.1.

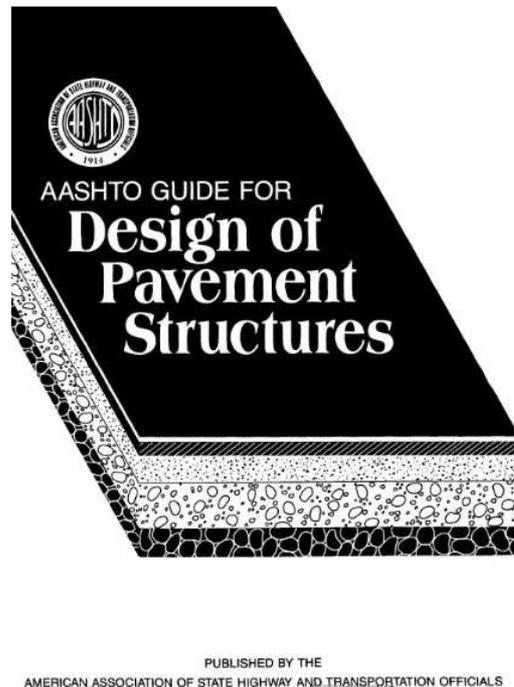


Figura 3.1.- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures

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

3.2.1 Diseño de pavimento flexible.

La ecuación de la Guía AASHTO de 1993 requiere una serie de parámetros relacionados con las cargas, sus repeticiones, la estructura del pavimento y el soporte de la subrasante. Estos son:

- **Carga y repeticiones esperadas.** Se sintetiza en la determinación de los ejes simples equivalentes de 8.2 t (18,000 lb.) que circularán por el carril de diseño durante el período de diseño (ESAL por sus siglas en inglés).
- **Confiabilidad.** Es la probabilidad de que una sección del pavimento diseñada se desempeñe satisfactoriamente durante el período de diseño. En otras palabras, debe haber cierta seguridad de que un pavimento funcionará según lo previsto dada la variabilidad en factores como la construcción, el medio ambiente y los materiales. Las variables

Z_R y S_o representan la confiabilidad y se mostrarán en las Tablas 3.4. y 3.5.

Tabla 3.4.- Valores del nivel de confianza R de acuerdo al tipo de camino.

Tipo de camino	Zonas urbanas	Zonas rurales
Autopistas	85-99.9	80-99.9
Carreteras de primer orden	80-99	75-95
Carreteras secundarias	80-95	75-95
Caminos vecinales	50-80	50-80

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993)

Tabla 3.5.- Factores de desviación normal.

Confiabilidad	Z_R	Confiabilidad	Z_R
50	0	92	-1.405
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.751
80	-0.841	97	-1.881
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993)

Una vez elegido un nivel de confianza y obtenidos los resultados del diseño, éstos deberán ser corregidos por dos tipos de incertidumbre: la confiabilidad de los parámetros de entrada, y de las propias ecuaciones de diseño basadas en los tramos de prueba. Para este fin, se considera un factor de corrección que representa la desviación estándar, de manera reducida y simple, este factor evalúa los datos dispersos que configuran la curva real de comportamiento del pavimento.

El rango de desviación estándar (S_o) sugerido por AASHTO se encuentra entre los siguientes valores:

$$0.40 \leq S_o \leq 0.50$$

- **Estructura de pavimento.** Se caracteriza por el denominado Número Estructural (SN) que es un valor relacionado con el espesor total de las capas del pavimento flexible y el módulo elástico que producen las mismas. En general, para un determinado módulo resiliente del suelo (M_r) y un determinado ESAL corresponderá cierto valor de SN.
- **Pérdida del índice de servicio.** Es un parámetro que se usa para medir el comportamiento del pavimento, el cual tiene que ver con el confort y la seguridad que brinda al conductor.

Índice de servicio inicial (P_o)

Es la condición original inmediatamente después de construirse el pavimento. De acuerdo a las consideraciones de AASHTO 93 se estableció un valor de 4.2 para estos diseños.

Índice de servicio final (P_t)

Es la condición cuando la superficie del pavimento no es óptima, por el tiempo de utilización y ya no cumple con los requerimientos de confort y seguridad. Según el tipo de vía, se consideran los siguientes valores mostrados en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6.- Valores de índice de servicio final según el tipo de vía.

Pt	Clasificación
3.00	Autopistas
2.50	Colectores
2.25	Calles comerciales e industriales
2.00	Calles residenciales y estacionamientos

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993)

Finalmente, la pérdida de servicio se la define como la diferencia entre el índice de servicio inicial y final.

$$\Delta PSI = P_o - P_t$$

- **Capacidad de soporte de la subrasante.** El soporte de subrasante se caracteriza por el módulo resiliente (Mr) de la subrasante. Intuitivamente, la cantidad de soporte estructural ofrecido por la subrasante debe ser un factor importante para determinar la estructura de pavimento requerida.

Esta metodología se basa en la siguiente expresión:

$$\log W_{8.2} = Z_R S_o + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log Mr - 8.07$$

Siendo:

$W_{8.2}$ = Ejes acumulados equivalentes de 8.2 t en el período de diseño

Z_R = Desviación estándar normal, relacionada con la confiabilidad

S_o Desviación estándar general, relacionada con el tráfico y el comportamiento

SN Número estructural requerido (SN_{fut})

ΔPSI Pérdida esperada en el nivel de servicio

Mr Módulo elástico (resiliente) de la subrasante (libras/pulgadas²)

En la hoja de cálculo desarrollada para la solución de esta expresión (ver figura 3.3) se calcula inicialmente el logaritmo de los ejes acumulados y luego se varía (por tanteos) el número estructural (SN) hasta lograr que el resultado de la ecuación coincida con logaritmo de los ejes. De esta forma se obtiene el SN futuro.

Para el caso de diseños de estructuras nuevas se debe respetar la estructuración por capas que se muestra en la siguiente Figura 3.2 de AASHTO 93, donde:

- a_1, a_2, a_3 : Coeficientes estructurales existentes de la capa asfáltica, base y sub-base respectivamente.
- D_1, D_2, D_3 : Espesores de las capas.
- m_2, m_3 : Coeficientes de drenaje de las capas.

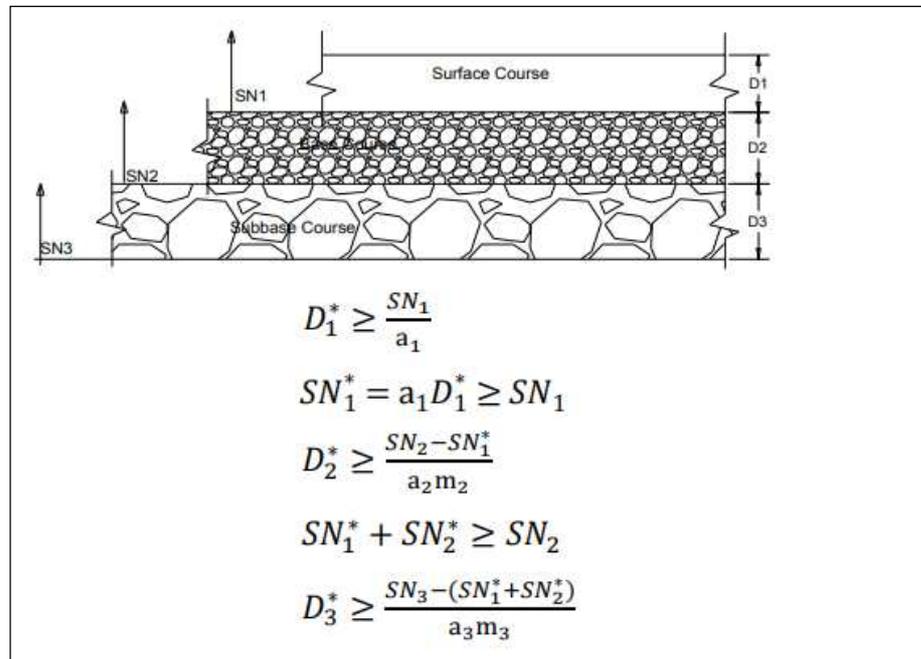


Figura 3.2.- Procedimiento para la estructuración de capas

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993)

A continuación, se muestra un ejemplo del diseño de un pavimento flexible empleando la hoja de cálculo desarrollada. Ver Figura 3.3.

MÉTODO AASHTO 93					
VARIANTE: 10					
DATOS :					
EJES ACUMULADOS 8,2 ton :	5,000,000				
CONFIABILIDAD (%) :	90	Tabla 2.2. Página II-9. AASHTO 93			
Zr:	-1.282	Tabla 4.1. Página II-62. AASHTO 93			
ERROR ESTÁNDAR COMBINADO :	0.45	Rango 0.40-0.5 en pavimentos flexibles. Pág. I-62			
MÓDULO SUBRASANTE (kg/cm ²) :	750				
MÓDULO SUBBASE (kg/cm ²) :	1,000	a 3 :	0.110	m 3 :	0.80
MÓDULO BEC (kg/cm ²) :	40,000	a 2 :	0.150	m 2 :	1.00
MÓDULO CA (kg/cm ²) :	30,000	a 1 :	0.430	m 1 :	x
PÉRDIDA TOTAL DE P S I :	1.5	Entre PSI inicial de 4.0 y PSI final de 2.5			
AJUSTE DEL:					
	SN3 (SR):	SN2 (SB):	SN1 (BG):		
NÚMERO ESTRUCT REQUERIDO :	4.1	3.6	0.7		
LOG (EJES ACUMULADOS) :	6.7	6.7	6.7		
ECUACIÓN DE COMPROBACIÓN :	6.7	6.7	6.7		
DETERMINACIÓN DE ESPESORES:					
CARPETA ASFÁLTICA :	D1* :	REAL,cm :	4.1	AJUST,cm :	10
	SN1* :	1.72			
BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO :	D2* :	REAL,cm :	31.3	AJUST,cm :	30
	SN2* :	3.52			
SUBBASE DE AGREGADOS :	D3* :	REAL,cm :	16.0	AJUST,cm :	15
	SN3* :	4.05			

Figura 3.3.- Ejemplo de diseño de un pavimento flexible por AASHTO 93

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Diseño de pavimentos rígidos

3.2.2.1 Variables de diseño

- **Desviación estándar combinado S_o**

Se recomienda utilizar valores de desviación estándar combinado que se encuentren entre los valores que se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7.- Rangos de valores para desviación estándar en pavimentos rígidos.

Para Pavimentos rígidos	0.30 - 0.40
En construcción nueva	0.35
En sobre-capas	0.40

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO. 1993)

- **ΔPSI**

Es la diferencia en el índice de servicio inicial, p_o , y el índice de servicio final del diseño, p_t . Para el caso de pavimentos rígidos se toman las mismas consideraciones de AASHTO 93 utilizadas para pavimentos flexibles (ver Tabla 3.6), para lo cual se estableció un valor de 4.5 para p_o y 2.5 para p_t .

- **Módulo de rotura del concreto**

También conocido como resistencia a la tracción del concreto por flexión. El módulo de rotura requerido es el valor medio determinado en el ensayo respectivo después de 28 días. Se encuentra relacionado con el f'_c (Resistencia a compresión) del concreto:

$$S'_c = k (f'_c)^{0.5}$$

Los valores de módulo de rotura generalmente están en el rango de 400 psi (2.8 MPa) a 700 psi (5 MPa).

- **Módulo de elasticidad del concreto**

Es el parámetro principal para indicar la rigidez del concreto, se lo puede determinar a través del f'_c , a partir de la siguiente ecuación:

$$E_c = 57000 (f'_c)^{0.5}$$

En donde, tanto E_c como f'_c están medidos en libras/pulgadas².

- **Coficiente de drenaje (C_d)**

El efecto del drenaje en el método AASHTO ha sido considerado por medio de un coeficiente que depende de la capacidad de las capas del pavimento para drenar el agua y del porcentaje del tiempo que el pavimento se encuentra con humedades cercanas a los niveles de saturación. Ver Tabla 3.8.

Tabla 3.8.- Rango de valores del coeficiente de drenaje

C _d	Tiempo transcurrido para que el suelo libere el 50 % de su agua libre	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad cercanas a la saturación.			
		< 1%	1 – 5 %	5 – 25 %	> 25 %
Calificación					
Excelente	2 horas	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1 día	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Regular	1 semana	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Pobre	1 mes	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy pobre	Nunca	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993)

- **Coeficiente de transferencia de carga (J)**

Este coeficiente considera la capacidad del pavimento de concreto en transmitir las cargas a través de juntas o grietas que se encuentren en los extremos de las losas. Su valor depende principalmente del tipo de pavimento rígido y el tipo de espaldón u hombro. AASHTO recomienda usar los rangos de valores dados en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9.- Valores del coeficiente de transferencia de carga

Tipo de pavimento	hombro			
	Elemento de transmisión de carga			
	Concreto asfáltico		Concreto hidráulico	
	si	no	si	no
No reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 – 4.2
Reforzado continuo	2.9 – 3.2	-----	2.3 – 2.9	-----

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993)

- **Pérdida de soporte (LS)**

Este factor es incluido en el diseño para considerar el efecto de la pérdida potencial de soporte provocado por la erosión que se produce en la base o subbase. AASHTO proporciona algunos rangos para este factor que depende directamente del tipo de material por medio de su módulo de elasticidad, que se encuentran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10.- Valores para el factor de pérdida de soporte

TIPO DE MATERIAL	PÉRDIDA DE SOPORTE
Base granular tratada con cemento (E = 1,000,000 a 2,000,000 psi)	0.0 – 1.0
Mezclas de agregados con cemento (E = 500,000 a 1,000,000 psi)	0.0 – 1.0
Bases tratadas con asfalto (E = 350,000 a 1,000,000 psi)	0.0 – 1.0
Mezclas bituminosas estabilizadas (E = 40,000 a 300,000 psi)	0.0 – 1.0
Estabilizados con cal (E = 20,000 a 70,000 psi)	1.0 – 3.0
Materiales granulares sin ligante (E = 15,000 a 45,000 psi)	1.0 – 3.0
Materiales granulares finos o subrasante natural (E = 3,000 a 40,000 psi)	2.0 – 3.0

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993)

3.2.2.2 Metodología de diseño.

La metodología AASHTO 93 proporciona para el diseño de pavimentos rígidos la siguiente ecuación:

$$\log(W_{18}) = Z_R \times S_o + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32p_t) \log \left[\frac{S'_c \times C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left(D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}} \right)} \right]$$

Donde:

- W_{18} = Ejes acumulados equivalentes de 8.2 t en el período de diseño
- Z_R = Desviación estándar normal, relacionada con la confiabilidad
- S_o = Desviación estándar general, relacionada con el tráfico.
- D = Espesor de la losa de concreto (pulgadas)
- ΔPSI = Diferencia entre el índice de servicio inicial p_o y final, p_t .
- S'_c = Módulo de rotura del concreto (libras/pulgadas²)
- J = Coeficiente de transferencia de carga
- C_d = Coeficiente de drenaje
- E_c = Módulo de elasticidad del concreto (libras/pulgadas²)
- k = Módulo de reacción de la subrasante (libras/pulgadas³)

A continuación se muestra un ejemplo de diseño en la hoja de cálculo desarrollada. Ver Figura 3.4.

DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO AASHTO 93	
DATOS	
EJES ACUMULADOS 8,2 ton :	7,500,000
MÓDULO SUBRASANTE (kg/cm²) :	750
CONFIABILIDAD (%) :	90
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (Zr) :	-1.282
ERROR ESTÁNDAR COMBINADO (So):	0.35
MÓDULO DE REACCIÓN EFECTIVO (kg/cm³) :	5.85
COEF. DE DRENAJE :	1.0
PSI FINAL:	2.5
PÉRDIDA TOTAL DE P S I :	2.0
RESISTENCIA COMPRESIÓN HORMIGÓN (kg/cm²):	300
MÓDULO DE ROTURA DEL HORMIGÓN (kg/cm²):	45.0
MÓDULO DEL HORMIGÓN (kg/cm²):	261,207
COEF. TRANSFERENCIA DE CARGAS :	2.7
PÉRDIDA DE SOPORTE:	2.0
AJUSTE DEL ESPESOR "D"	
ESPESOR "D" REQUERIDO (cm) :	22.0
LOG (EJES ACUMULADOS) :	6.9
ECUACION DE COMPROBACION :	6.9
ESQUEMA:	
NUEVA LOSA	Espesor (cm): 22
CIMIENTO	K cimiento (kg/cm ³) 5.85

Figura 3.4.- Ejemplo de diseño de un pavimento rígido por AASHTO 93

Fuente: Elaboración propia

3.2.2.3. Empleo de barras de amarre y pasadores.

Se van a considerar barras de amarre en las juntas longitudinales y pasadores en las juntas transversales del pavimento rígido. Su diseño se basó en las tablas 3.11 y 3.12.

Tabla 3.11.- Diámetros y longitudes recomendados en barras de amarre

Diámetros y Longitudes recomendados en Barras de Amarre

Espesor de losa (cm)	Barras de Φ 9.5 mm (3/8")			Barras de Φ 12.7 mm (1/2")			Barras de Φ 15.9 mm (5/8")					
	Longitud mm	Separación entre barras mm			Longitud mm	Separación entre barras mm			Longitud mm	Separación entre barras mm		
		Carril de 3.05 m	Carril de 3.35 m	Carril de 3.65 m		Carril de 3.05 m	Carril de 3.35 m	Carril de 3.65 m		Carril de 3.05 m	Carril de 3.35 m	Carril de 3.65 m
Acero de $f_y = 1.875 \text{ kg/cm}^2$ (40.000 psi)												
15	450	0.80	0.75	0.65	600	1.20	1.20	1.20	700	1.2	1.2	1.2
17.5		0.70	0.60	0.55		1.20	1.10	1.00		1.2	1.2	1.2
20		0.60	0.55	0.50		1.05	1.05	0.90		1.2	1.2	1.2
22.5		0.55	0.50	0.45		0.95	0.95	0.80		1.2	1.2	1.2
25		0.45	0.45	0.40		0.85	0.85	0.70		1.2	1.2	1.1
Acero de $f_y = 2.800 \text{ kg/cm}^2$ (60.000 psi)												
15	650	1.20	1.10	1.00	850	1.20	1.20	1.20	1000	1.20	1.20	1.20
17.5		1.05	0.95	0.85		1.20	1.20	1.20		1.20	1.20	1.20
20		0.90	0.80	0.75		1.20	1.20	1.20		1.20	1.20	1.20
22.5		0.80	0.75	0.65		1.20	1.20	1.20		1.20	1.20	1.20
25		0.70	0.65	0.60		1.20	1.20	1.10		1.20	1.20	1.20

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993)

Tabla 3.12.- Diámetros y longitudes recomendados en pasadores

Diámetros y Longitudes recomendados en pasadores

RANGO DE ESPESOR DE LOSA (MM)	DIÁMETRO		LONGITUD DEL PASAJUNTAS (MM)	SEPARACIÓN ENTRE PASADORES (MM)
	MM	PULGADA		
150 - 200	25	1"	450	300
200 - 300	32	1 ¼"	450	300
300 - 400	38	1 ½"	500	350

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures (AASHTO, 1993)

3.3 Análisis mecanicista de pavimentos.

3.3.1 Metodología

Se va a proceder a realizar un análisis basado en principios mecanicistas a cada una de las variantes obtenidas del diseño de pavimentos flexibles según AASHTO 93, tanto para variantes diseñadas con base de agregados y con base estabilizada con cemento. Para esto se van a revisar en las capas del pavimento sus respuestas (tensiones y deformaciones) ante una carga estándar de diseño, por medio de análisis de fallo con diferentes modelos de

desempeño. En el análisis se tomarán en cuenta dos regiones en el país: Costa y Sierra, debido a que el comportamiento del pavimento no será el mismo ante condiciones climáticas tan diferentes, especialmente la temperatura.

3.3.2. Análisis de las temperaturas en las regiones Sierra y Costa.

La variable que más implicación tiene en el análisis mecanicista, dependiendo de la región a analizar, será la temperatura de la mezcla asfáltica que incide directamente en el módulo dinámico y el coeficiente de Poisson.

A diferencia con el método AASHTO 93 que utiliza siempre una temperatura de 20°C para el diseño de pavimentos flexibles, para realizar un análisis mecanicista se necesita conocer la temperatura de la mezcla asfáltica, que está directamente relacionado con la temperatura del lugar. Para determinarla, valorando que el efecto de dicha temperatura respecto al desempeño de la mezcla está asociada también a las cargas que recibe, se procedió a calcular una temperatura media ponderada en función de la circulación del tráfico en vías principales, para ello:

- Del trabajo de titulación: “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CAPAS ASFÁLTICAS ANTE LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN LAS DIFERENTES REGIONES DEL ECUADOR” realizada por el Ing. José Jaramillo, se tomaron los resultados de las mediciones en campo de la temperatura de la mezcla asfáltica a distintas profundidades: Superficial, 5, 10 y 15 cm (Jaramillo, 2015).
- De la investigación: “ESPECTROS DE CARGA DE ESTACIONES DE PESAJE WIM EN ECUADOR” realizado en 2017 por la Ing. Carola Gordillo del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (Gordillo, 2017), se tomaron los resultados de la frecuencia horaria del tráfico pesado durante todo el año 2016 en dos vías principales de tráfico diariamente: Aloág-Santo Domingo (sierra) (ver Figura 3.4) y Nobol-Guayas (costa) (ver Figura 3.5). Esta última vía canaliza hacia

Guayaquil el tráfico proveniente de la provincia Manabí más otros que provienen de El Empalme, Balzar y Daule. La frecuencia horaria indicada se considera representativa para nuestro estudio.

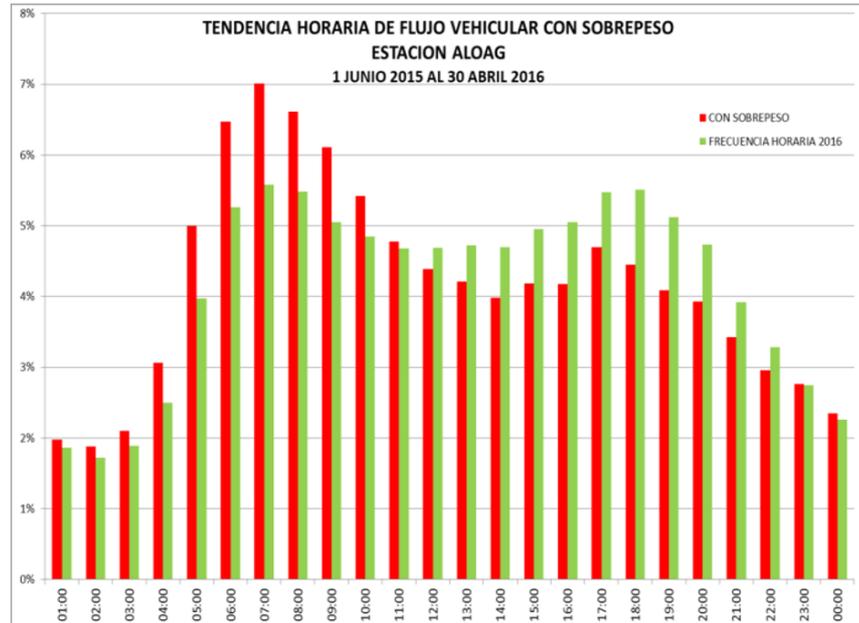


Figura 3.5.- Frecuencia horaria de vehículos pesados en la estación de peaje de Alóag (Sierra)

Fuente: Espectros de carga de estaciones de pesaje WIM en Ecuador (Gordillo, 2017)

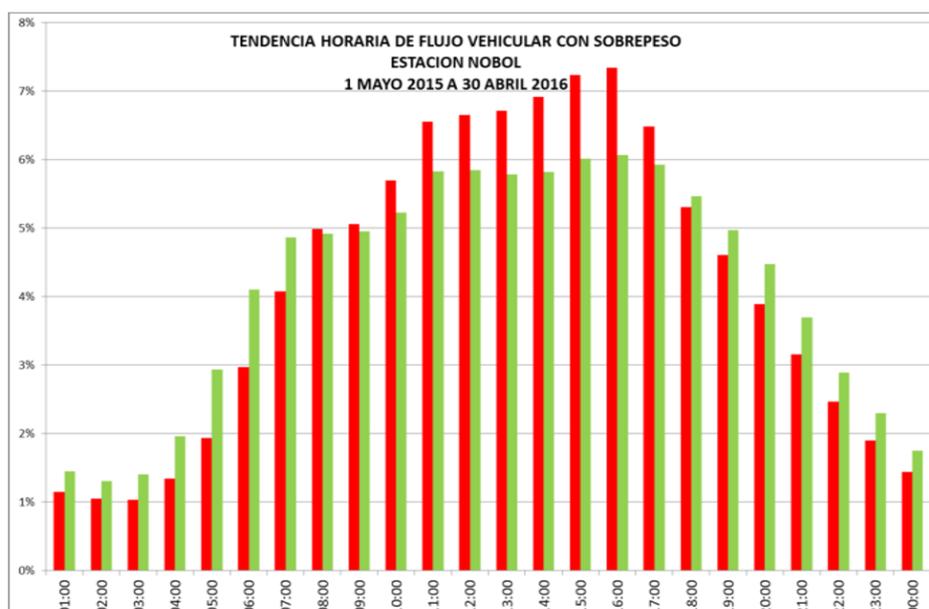


Figura 3.6.- Frecuencia horaria de vehículos pesados en la estación de peaje de Nobol (Costa)

Fuente: Espectros de carga de estaciones de pesaje WIM en Ecuador (Gordillo, 2017)

Con estos datos se calculó una temperatura media ponderada según el porcentaje de vehículos pesados y de la temperatura de la mezcla asfáltica a distintas profundidades para las dos regiones (costa y sierra). Ver resultados en la Tabla 3.13 y Figura 3.7.

Tabla 3.13.- Resultados de la temperatura media ponderada en función del tráfico y profundidad de medición

Temperatura		Temperatura	
Costa		Sierra	
z (cm)	T (°C)	z (cm)	T (°C)
0	38,3	0	23,7
5	35,1	5	23,1
10	34,2	10	22,6
15	33,7	15	21,8

Fuente: Elaboración propia

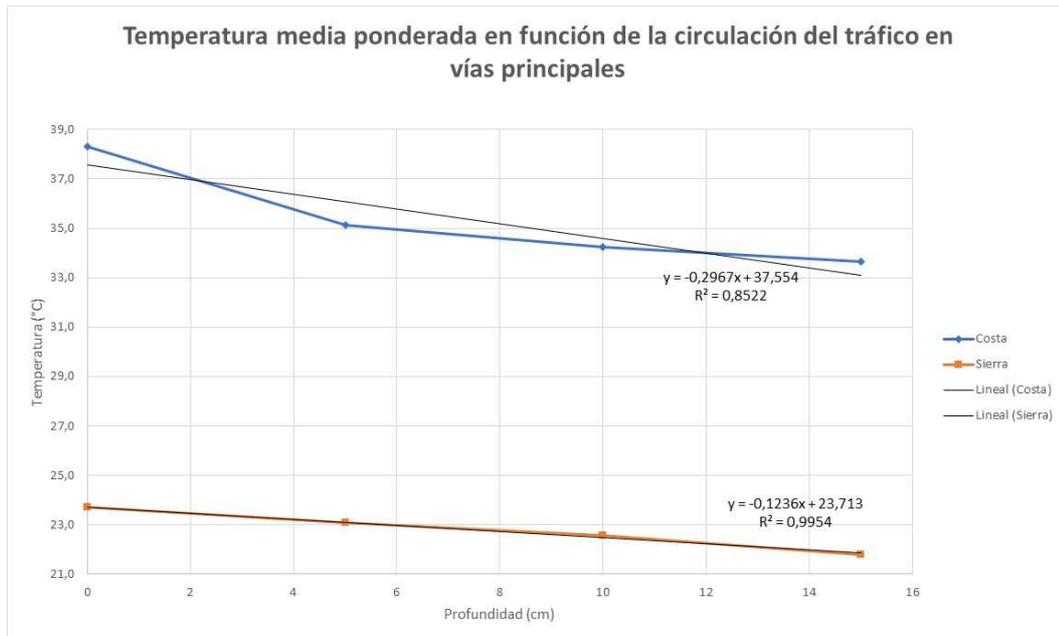


Figura 3.7.- Temperatura media ponderada en función del tráfico de pesados y la profundidad de medición

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que la profundidad escogida (z) para determinar la temperatura en la mezcla asfáltica para el análisis mecanicista a cada una de las variantes planteadas en este trabajo se estableció que sea al tercio de la profundidad del espesor, criterio empleado por el Instituto del Asfalto.

Con las temperaturas determinadas se analizaron las propiedades donde la misma incide: módulo dinámico y coeficiente de Poisson.

3.3.2.1. Módulo dinámico de la mezcla asfáltica

El módulo dinámico es una de las propiedades más importantes de las mezclas asfálticas. Está fuertemente correlacionado con el comportamiento del pavimento en una amplia gama de condiciones de tráfico y climáticas. La norma AASHTO TP62-03 define al módulo dinámico de la siguiente manera: “Es el valor absoluto del Módulo Complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal”. Existen tres distintas formas para determinar el módulo dinámico de una mezcla asfáltica:

- **Ensayos de laboratorio:** Se puede determinar por los siguientes ensayos: tracción indirecta, tracción de flexión de una viga cargada en el tercio central de la luz y tracción por compresión directa.
- **Nomogramas:** Utilizados por Shell, fue desarrollado por Van der Poel, Bonnaure entre otros. Se basan en las concentraciones volumétricas del asfalto y del agregado.
- **Fórmulas o modelos:** Se puede conocer su valor gracias a expresiones matemáticas mediante los siguientes métodos: Fórmula de Witczak, fórmula del Instituto del Asfalto, fórmulas de Bonnaure y las fórmulas de Heukelom y Klomp.

Se decidió utilizar para el estudio, luego de valorar seriamente el empleo del modelo de Witczak, valores de módulos dinámicos medidos directamente en el laboratorio de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE) a mezclas procedentes de distintas obras, información que se obtuvo de la siguiente fuente: "CONSTRUCCIÓN DE CURVAS MAESTRAS MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE OBTENIENDO EL MÓDULO DINÁMICO DE: PLANTAS ASFÁLTICAS DENTRO DE LA PROVINCIA DE IMBABURA". En donde se escogió los valores obtenidos de la Muestra 2 debido a que presentaba una clasificación granulométrica de agregados más representativa de nuestras mezclas asfálticas convencionales, datos que se presentan en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14.- Granulometría de la mezcla asfáltica escogida

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR					
FACULTAD DE INGENIERÍA					
LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN					
Obra		SOLICITADO POR			
Localización	Imbaya Ibarra	ENSAYADOR POR			
Muestra No	2	CALCULADO POR			
Profundidad		APROBADO POR			
Descripción	Mina Tahuando	FECHA			
NORMA			AASHTO T 27-06		
GRANULOMETRIA DE AGREGADOS					
MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL (gr)	MASA RETENIDA ACUMULADA (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
Serie Gruesa					
3"	76,2				
2 ½ "	64				
2"	50,8				
1 ½ "	38,1				
1 "	25,4				
¾ "	19	0,00	0,00	0,0	100,0
1/2 "	12,7	172,10	172,10	16,4	83,6
3/8 "	9,51	129,20	301,30	28,7	71,3
Nº4	4,76	184,60	485,90	46,3	53,7
Nº8	2,362	87,50	573,40	54,6	45,4
Nº16	1,19	91,40	664,80	63,3	36,7
Nº30	0,595	104,30	769,10	73,2	26,8
Nº50	0,297	101,60	870,70	82,9	17,1
Nº100	0,149	63,60	934,30	89,0	11,0
Nº200	0,074	41,40	975,70	92,9	7,1
Masa Total		975,70			
				Peso Inicial Seco	1050,0

Fuente: Construcción de curvas maestras mediante la caracterización de mezclas asfálticas en caliente obteniendo el módulo dinámico de: Plantas asfálticas dentro de la provincia de Imbabura (Avendaño & López, 2017)

Los ensayos en dicho estudio se realizaron a 9 muestras siguiendo lo establecido en la norma AASHTO TP62-03, la cual se trata de un método de prueba que cubre los procedimientos para determinar el módulo dinámico y el ángulo de fase en un rango de temperaturas y frecuencias de carga (Avendaño & López, 2017). Se decidió escoger los resultados de la muestra C9, debido a que sus resultados no diferían en más del 20% de los módulos dinámicos calculados por comprobación por el modelo de Witczak. Por lo tanto, se tuvo que determinar la frecuencia de carga con la cual se va a

trabajar, que fue establecida de la siguiente manera, según los criterios utilizados en el modelo de Witczak:

$$f = \frac{1}{2\pi t}$$

En dónde:

f = Frecuencia correspondiente a la velocidad de operación y a la altura de la muestra de asfalto, y

t = Tiempo de aplicación de la carga, segundos.

$$t = 10^{(0.005h - 0.2 - 0.94V_{op})}$$

En donde:

h = Espesor de análisis de la mezcla asfáltica, mm

V_{op} = Velocidad de operación, Km/h.

Para determinar la velocidad de operación se acudió a las leyes de la Agencia Nacional de Tránsito (ANT): REGLAMENTO GENERAL PARA LA APLICACIÓN DE LA LEY ORGÁNICA DE TRANSPORTE TERRESTRE, TRÁNSITO Y SEGURIDAD VIAL CAPÍTULO VI, DE LOS LÍMITES DE VELOCIDAD”, que establece los rangos de velocidades según el tipo de vía y/o carretera para el Ecuador, para este caso se va a usar una velocidad de operación igual a 70 km/h que corresponde a un tipo de vía de tráfico pesado (ver Figura 3.8).

Vehículos livianos, motocicletas y similares

Tipo de vía	Límite máximo	Rango moderado	Fuera del rango
Urbana	50 km/h	+ de 50 km/h- de 60 km/h	+ de 60 km/h
Perimetral	90 km/h	+ de 90 km/h- de 120 km/h	+ de 120 km/h
Rectas en carreteras	100 km/h	+ de 100 km/h- de 135 km/h	+ de 135 km/h
Curvas en carreteras	60 km/h	+ de 60 km/h- de 75 km/h	+ de 75 km/h

**Vehículos de transporte público de pasajeros**

Tipo de vía	Límite máximo	Rango moderado	Fuera del rango
Urbana	40 km/h	+ de 40 km/h- de 50 km/h	+ de 50 km/h
Perimetral	40 km/h	+ de 70 km/h- de 100 km/h	+ de 100 km/h
Rectas en carreteras	90 km/h	+ de 90 km/h- de 115 km/h	+ de 115 km/h
Curvas en carreteras	50 km/h	+ de 50 km/h- de 65 km/h	+ de 65 km/h

**Vehículos de transporte de carga**

Tipo de vía	Límite máximo	Rango moderado	Fuera del rango
Urbana	40 km/h	+ de 40 km/h- de 50 km/h	+ de 50 km/h
Perimetral	70 km/h	+ de 70 km/h- de 95 km/h	+ de 95 km/h
Rectas en carreteras	70 km/h	+ de 70 km/h- de 100 km/h	+ de 100 km/h
Curvas en carreteras	40 km/h	+ de 40 km/h- de 60 km/h	+ de 60 km/h



Figura 3.8.- Límites de velocidad según el tipo de vía.

Fuente: Reglamento general para la Aplicación de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial (ANT, 2018)

Entonces, con las variables ya definidas anteriormente, el tiempo de carga y la frecuencia de carga serán las siguientes:

$$t = 10^{(0.005h - 0.2 - 0.94V_{op})}$$

$$t = 10^{(0.005 \cdot 25 - 0.2 - 0.94 \cdot 70)} = 0.016 \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{2\pi t}$$

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot 0.016} = 10.3 \text{ Hz} \approx 10 \text{ Hz}$$

Finalmente, con los datos obtenidos de la frecuencia de carga calculada (10Hz), se seleccionaron los resultados de los módulos dinámicos a las distintas temperaturas de ensayos, valores que servirán de referencia para buscar el módulo dinámico a la temperatura de interés según la variante de diseño y su respectiva región, que se muestran en la Tabla 3.15.

Tabla 3.15.- Valores de módulo dinámico a distintas temperaturas a una frecuencia de carga de 10 Hz

Frecuencia 10 Hz	
TEMPERATURA (°C)	MÓDULO DINÁMICO (MPa)
-10	26.830
4	17.048
21	7.860
37	2.370
54	991

Fuente: Construcción de curvas maestras mediante la caracterización de mezclas asfálticas en caliente obteniendo el módulo dinámico de: Plantas asfálticas dentro de la provincia de Imbabura (Avendaño & López, 2017)

Finalmente, para el cálculo de los módulos dinámicos a distintas temperaturas, dependiendo de la variante que se esté analizando, se confeccionó un gráfico con los resultados de la Tabla 3.15 que permitiera obtener una ecuación de la línea de tendencia con la cual se facilitara el cálculo de esta variable (ver Figura 3.9).

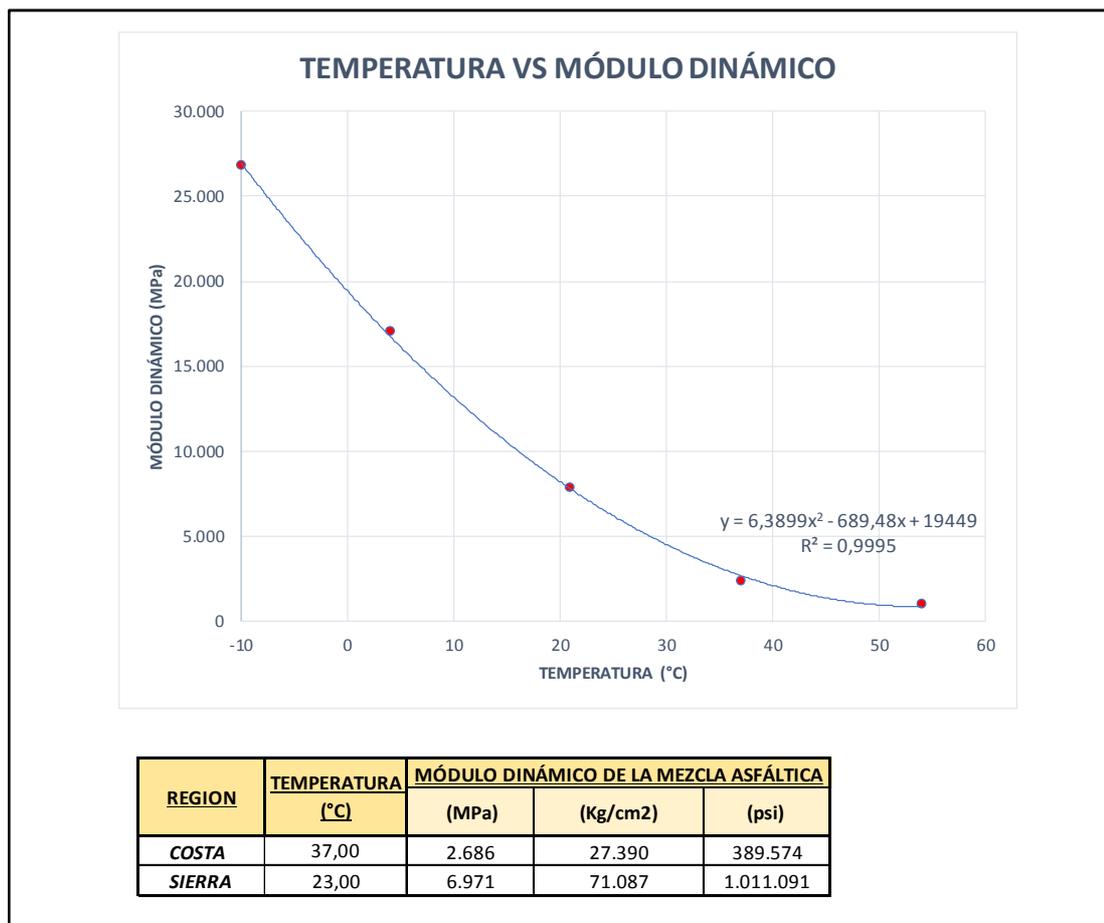


Figura 3.9. Resultados de módulos dinámicos según la región y la temperatura de análisis.

Fuente: Construcción de curvas maestras mediante la caracterización de mezclas asfálticas en caliente obteniendo el módulo dinámico de: Plantas asfálticas dentro de la provincia de Imbabura (Avendaño & López, 2017)

3.3.2.2. Coeficiente de Poisson

Es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de un material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. Esta constante varía dependiendo de la temperatura de la mezcla asfáltica. Ver Tabla 3.16.

Tabla 3.16.- Coeficiente de Poisson para capa asfáltica según su temperatura

Temperatura		Coeficiente de Poisson
°F	°C	μ
≤ 0	≤ 0	0.15
0-40	0-5	0.20
40-70	5-22	0.25
70-100	22-38	0.35
100-130	38-55	0.45
≥ 130	≥ 55	0.48

Fuente: Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista
(AASHTO, 2008)

Los valores del coeficiente de Poisson utilizados para las dos regiones: Costa y sierra, serán de 0.45 y 0.35 respectivamente según la temperatura promedio de la capa asfáltica en cada región, que se obtuvo de la Tabla 3.11 realizando el análisis a un tercio (2.5 cm) del espesor de diseño (7.5 cm) escogido para este trabajo.

3.3.3. Modelo de respuesta estructural del pavimento

El análisis tenso-deformacional se lo realizó con el programa BISAR 3.0, perteneciente a la compañía Shell Petroleum Company. Se consideraron los siguientes parámetros de carga para el análisis:

Presión de contacto: 7 kg/cm²

Radio de la rueda: 9.7 cm

Separación entre ejes de ruedas: 29.1 cm

En la Figura 3.10 puede observarse a manera de ejemplo un reporte de los resultados obtenidos con este programa.



BISAR 3.0 - Block Report

VARIANTE 10 - BEC

System 1: REGIÓN: COSTA

Structure

Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical		Horizontal (Shear)		Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
					Load (kN)	Stress (MPa)	Load (kN)	Stress (MPa)				
1	0,100	2,690E+03	0,45	1	2,031E+01	6,870E-01	0,000E+00	0,000E+00	9,700E-02	0,000E+00	1,455E-01	0,000E+00
2	0,300	4,000E+02	0,25	2	2,031E+01	6,870E-01	0,000E+00	0,000E+00	9,700E-02	0,000E+00	-1,455E-01	0,000E+00
3	0,150	1,000E+02	0,25									
4		7,500E+01	0,50									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	Stresses (MPa)			Strains (µstrain)			Displacements (µm)		
					XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ	UX	UY	UZ
1	1	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	-1,806E-01	-1,544E-01	0,000E+00	-4,133E+01	-2,717E+01	5,604E+01	0,000E+00	0,000E+00	2,113E+02
2	1	0,000E+00	1,455E-01	0,000E+00	-7,594E-01	-7,510E-01	-6,870E-01	-4,172E+01	-3,723E+01	-2,728E+00	0,000E+00	-5,390E+00	2,265E+02
3	1	0,000E+00	1,455E-01	5,000E-02	-3,851E-01	-3,895E-01	-6,400E-01	2,906E+01	2,670E+01	-1,084E+02	0,000E+00	-3,512E+00	2,231E+02
4	1	0,000E+00	1,455E-01	1,000E-01	-3,037E-01	-2,153E-01	-4,540E-01	1,392E+01	1,038E+01	-6,438E+01	0,000E+00	-2,138E+00	2,183E+02
5	2	0,000E+00	0,000E+00	4,000E-01	2,728E-01	2,414E-01	-1,368E-02	5,395E+01	4,415E+01	-2,554E+01	0,000E+00	0,000E+00	2,086E+02
6	4	0,000E+00	0,000E+00	5,501E-01	-3,130E-03	-2,247E-03	-1,022E-02	4,942E+01	4,503E+01	-3,451E+01	0,000E+00	0,000E+00	1,300E+02

Figura 3.10.- Reporte de resultados de análisis tenso-deformacional en el programa BISAR 3.0

3.3.4. Análisis de fallo a partir de modelos de desempeño de pavimentos flexibles

En Ecuador es muy común revisar solamente dos criterios de desempeño en pavimentos flexibles, los cuales son: agrietamiento por fatiga tipo piel de cocodrilo en capa asfáltica (fisuras de abajo hacia arriba) y deformación vertical permanente en la subrasante. Estos criterios fueron los usuales en todos los métodos de diseño hasta la aparición de la Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista (MEPDG, por sus siglas en inglés).

Esta guía describe una metodología de diseño de pavimentos que se basa en la ingeniería mecánica y se ha validado con datos extensos de desempeño y pruebas en carreteras. La MEPDG, tal como se conoce (ver Figura 3.11), se completó en 2004 y se publicó para su revisión y evaluación, siendo aprobada por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y representa un cambio importante. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008).

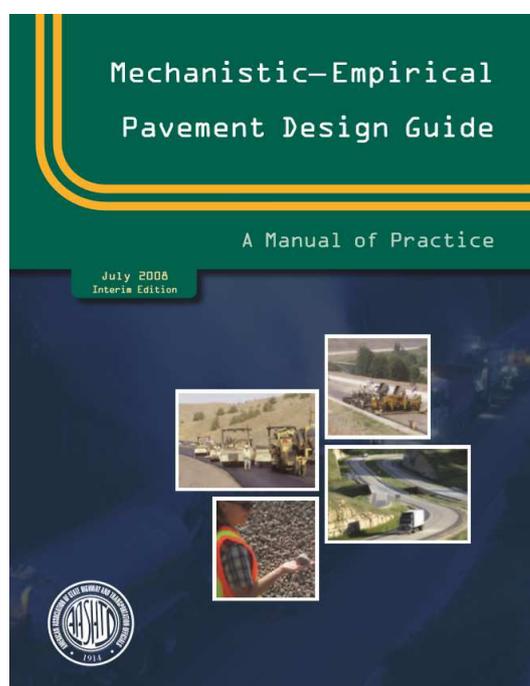


Figura 3.11.- Guía de Diseño de Pavimentos Empírico-Mecanicista

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

En la MEPDG se consideran como aspectos a analizar en los pavimentos flexibles:

- Deformación permanente en capa asfáltica
- Agrietamiento por fatiga en capa asfáltica:
 - Agrietamiento tipo piel de cocodrilo (Bottom-up)
 - Agrietamiento longitudinal (Top-down)
- Agrietamiento por fatiga en la base estabilizada con cemento
- Deformación permanente en la subrasante

Vale aclarar que por la complejidad experimental que algunos de estos criterios involucran, algunos fuera de nuestro alcance, solo se emplearán de dicha Guía los criterios de fallo para deformación y fatiga en capa asfáltica. Los restantes empleados en la base estabilizada y en la subrasante se detallarán más adelante.

A continuación se hará una descripción de cada criterio de fallo empleado y se mostrarán como ejemplos sus respectivos resultados correspondientes a la Variante 10 (región costa y sierra), según la matriz de diseño para pavimentos flexibles utilizando base estabilizada con cemento.

3.3.4.1. Deformación permanente en capa asfáltica

La deformación permanente, también llamada ahuellamiento es uno de los principales fallos en la carpeta asfáltica de pavimentos flexibles y pavimentos semirrígidos (ver Figura 3.12). Se trata de la deformación que va acumulando la mezcla asfáltica debido al paso de los vehículos, esta repetición de cargas va generando depresiones longitudinales en la trayectoria de las llantas.

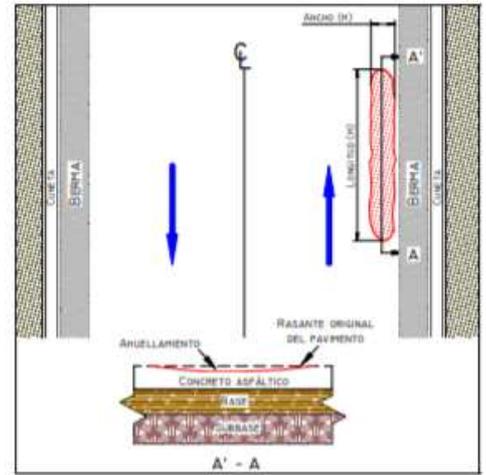


Figura 3.12.- Patrón de fallo para la deformación permanente en capa asfáltica

Fuente: Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles (Instituto Nacional de Vías, 2006).

La MEPDG, presenta la siguiente ecuación para predecir este fallo:

$$\Delta_{p(HMA)} = \epsilon_{p(HMA)} h_{HMA} = \beta_{1r} k_z \epsilon_{r(HMA)} n^{k_{2r}} \beta_{2r} T^{k_{3r}} \beta_{3r}$$

Dónde:

$\Delta_{p(HMA)}$ = Deformación acumulada permanente o deformación plástica vertical acumulada en la capa de HMA, en pulgadas.

$\epsilon_{p(HMA)}$ = Deformación unitaria permanente o plástica axial acumulada en la capa de HMA, en pulgada/pulgada.

$\epsilon_{r(HMA)}$ = Deformación unitaria resiliente o elástica calculada por el modelo de respuesta estructural a una profundidad media de cada capa de HMA, en pulgada/pulgada.

h_{HMA} = Espesor de la capa de HMA, en pulgada.

T = Temperatura de la mezcla asfáltica, en °F.

$k_{1r,2r,3r}$ = Parámetros de calibración global de campo ($k_{1r}=3.35412$, $k_{2r}=0.4791$, $k_{3r}=1.5606$).

$\beta_{1r,2r,3r}$ = Constantes de calibración locales o de mezclas en el campo, para la calibración global, estas constantes se establecieron en 1.

k_z =Factor de confinamiento de profundidad, siendo:

$$k_z = (C_1 + C_2 D) 0.328196^D$$

$$C_1 = -0.1039(h_{HMA})^2 + 2.4868 h_{HMA} - 17.342$$

$$C_2 = 0.0172(h_{HMA})^2 - 1.7331 h_{HMA} + 27.428$$

Donde:

D= Profundidad media de la capa asfáltica debajo de la superficie, en pulgada.

h_{HMA} = Espesor total de capa asfáltica, en pulgada.

A continuación se muestra la hoja de cálculo desarrollada para calcular la predicción del fallo por deformación permanente en capa asfáltica (ver Figuras 3.13 y 3.14).

DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LA CAPA ASFÁLTICA (COSTA)

Variante:	10 - BEC	Región:	Costa
Nivel de Tráfico (ESAL)	5.00E+06	Mr Subrasante (MPa)	75

$$\Delta_{p(HMA)} = \epsilon_{p(HMA)} h_{HMA} = \beta_{1r} k_z \epsilon_{r(HMA)} 10^{k_{1r}} n^{k_{2r}} T^{k_{3r}} \beta_{2r} \beta_{3r}$$

donde:

- $\Delta_{p(HMA)}$ = Deformación acumulada permanente o deformación plástica vertical acumulada en la subcapa/capa de HMA, en pulgadas.
- $\epsilon_{p(HMA)}$ = Deformación unitaria permanente o plástica axial acumulada en la subcapa/capa de HMA, en pulgada/pulgada.
- $\epsilon_{r(HMA)}$ = Deformación unitaria resiliente o elástica calculada por el modelo de respuesta estructural a una profundidad media de cada subcapa de HMA, en pulgada/pulgada.
- $h_{(HMA)}$ = Espesor de la subcapa/capa de HMA, en pulgada.
- n = Número de repeticiones de carga por eje.
- T = Temperatura de la mezcla o del pavimento, en °F.
- k_z = Factor de confinamiento de profundidad.
- k_{1r}, k_{2r}, k_{3r} = Parámetros de calibración global de campo ($k_{1r} = -3.35412$, $k_{2r} = 0.4791$, $k_{3r} = 1.5606$).
- $\beta_{1r}, \beta_{2r}, \beta_{3r}$ = Constantes de calibración locales o de mezclas en el campo; para la calibración global, estas constantes se establecieron en 1.0.

$\epsilon_r(HMA)$	1.08E-04
$h_{(HMA)} (pulg)$	3.94
n :	5,000,000
$T (°C)$:	37.00
$T (°F)$:	98.6
β_{1r}	1
β_{2r}	1
β_{3r}	1
k_{1r}	-3.35412
k_{2r}	0.4791
k_{3r}	1.5606

$$k_z = (C_1 + C_2 D) 0.328196^D$$

$$C_1 = -0.1039(H_{HMA})^2 + 2.4868H_{HMA} - 17.342$$

$$C_2 = 0.0172(H_{HMA})^2 - 1.7331H_{HMA} + 27.428$$

donde:

- D = Profundidad debajo de la superficie, en pulgada.
- H_{HMA} = Espesor total de HMA, en pulgada.

Deformación permanente	
$\Delta_{p(HMA)}$	0.36 <i>pulg.</i>
	9.09 <i>mm.</i>

$D (pulg)$:	1.97
$H_{HMA} (pulg)$	3.94
C_1 :	-9.16
C_2 :	20.87
K_z :	3.56

Figura 3.13.- Deformación permanente en la capa asfáltica correspondiente a la variante 10-BEC para la región costa

Fuente: Elaboración propia

DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LA CAPA ASFÁLTICA (SIERRA)

Variante:	10 - BEC	Región:	Sierra
Nivel de Tráfico (ESAL)	5,00E+06	Mr Subrasante (MPa)	75

$$\Delta_{p(HMA)} = \epsilon_{p(HMA)} h_{HMA} = \beta_{1r} k_z \epsilon_{r(HMA)} 10^{k_{1r}} n^{k_{2r}} T^{\beta_{2r}} \beta_{3r}$$

donde:

- $\Delta_{p(HMA)}$ = Deformación acumulada permanente o deformación plástica vertical acumulada en la subcapa/capa de HMA, en pulgadas.
- $\epsilon_{p(HMA)}$ = Deformación unitaria permanente o plástica axial acumulada en la subcapa/capa de HMA, en pulgada/pulgada.
- $\epsilon_{r(HMA)}$ = Deformación unitaria resiliente o elástica calculada por el modelo de respuesta estructural a una profundidad media de cada subcapa de HMA, en pulgada/pulgada.
- $h_{(HMA)}$ = Espesor de la subcapa/capa de HMA, en pulgada.
- n = Número de repeticiones de carga por eje.
- T = Temperatura de la mezcla o del pavimento, en °F.
- k_z = Factor de confinamiento de profundidad.
- $k_{1r,2r,3r}$ = Parámetros de calibración global de campo ($k_{1r} = -3.35412$, $k_{2r} = 0.4791$, $k_{3r} = 1.5606$).
- $\beta_{1r}, \beta_{2r}, \beta_{3r}$ = Constantes de calibración locales o de mezclas en el campo; para la calibración global, estas constantes se establecieron en 1.0.

$\epsilon_{r(HMA)}$	4,82E-05
$h_{(HMA)}$ (pulg)	3,94
n:	5.000.000
T (°C):	23,00
T (°F):	73,4
β_{1r}	1
β_{2r}	1
β_{3r}	1
k_{1r}	-3,35412
k_{2r}	0,4791
k_{3r}	1,5606

$$k_z = (C_1 + C_2 D) 0.328196^D$$

$$C_1 = -0.1039(H_{HMA})^2 + 2.4868H_{HMA} - 17.342$$

$$C_2 = 0.0172(H_{HMA})^2 - 1.7331H_{HMA} + 27.428$$

donde:

- D = Profundidad debajo de la superficie, en pulgada.
- H_{HMA} = Espesor total de HMA, en pulgada.

Deformación permanente	
$\Delta_{p(HMA)}$	0,05 pulg.
	1,21 mm.

D (pulg):	3,15
H_{HMA} (pulg)	3,94
C₁:	-9,16
C₂:	20,87
K_Z:	1,69

Figura 3.14.- Deformación permanente en la capa asfáltica correspondiente a la variante 10-BEC para la región sierra

Fuente: Elaboración propia

3.3.4.2. Agrietamiento por fatiga en capa asfáltica

Corresponde a una de las fallas estructurales dentro del pavimento asfáltico la cual es generada por el tránsito, es decir, por el peso y repeticiones de las cargas actuantes. La MEPDG considera dos tipos de fatiga:

- **Agrietamiento tipo piel de cocodrilo (Fisuras de abajo a arriba o “bottom-up”)**

Es una forma de fatiga que causa el agrietamiento a través de una serie de fisuras bajo un patrón de "piel de cocodrilo". Las grietas se muestran inicialmente como múltiples grietas cortas, longitudinales o transversales en la trayectoria de la rueda que se interconectan lateralmente bajo las cargas continuas de los vehículos pesados (ver Figura 3.15). Estas grietas se inician en la parte inferior de la carpeta asfáltica, en donde los esfuerzos y deformaciones por tensión son los máximos. (Díaz & Pinzón, 2014)

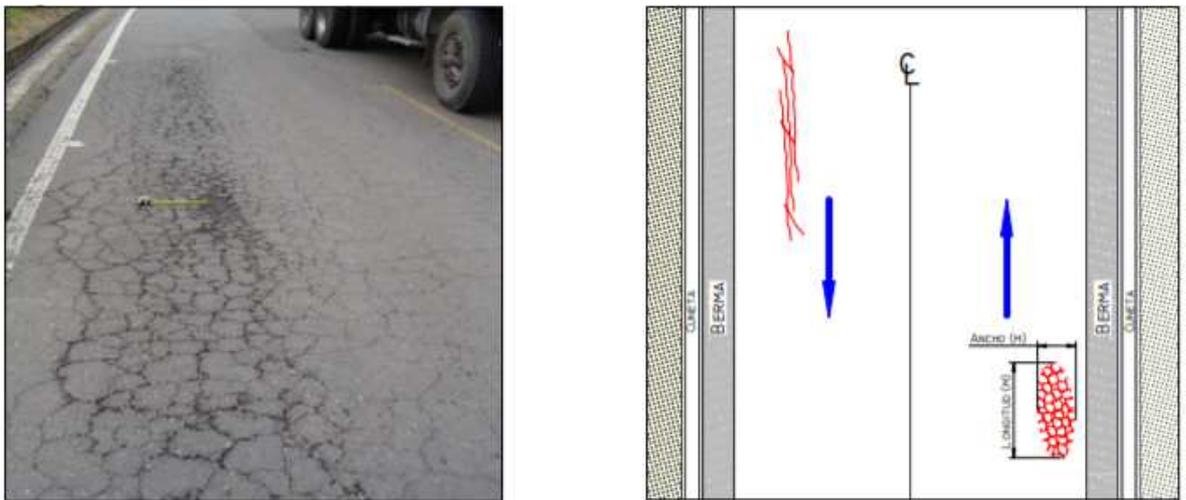


Figura 3.15.- Patrón de fallo para el agrietamiento "Piel de Cocodrilo"

Fuente: Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles (Instituto Nacional de Vías, 2006)

Las causas de este tipo particular de fallo son:

1. Capas asfálticas relativamente delgadas o débiles para las repeticiones de las cargas por rueda.
2. Cargas por rueda o presiones de inflado muy elevadas.

3. Zonas blandas en la capa de base de agregados, sub-base o subrasante.
 4. Capas débiles de base o sub-base granulares, debido a una inadecuada compactación, el incremento del contenido de humedad o el crecimiento del nivel del manto freático.
- **Agrietamiento longitudinal (fisuras de arriba a abajo o “top down”).**

Es una forma de fatiga o fisuramiento relacionado con la carga de la rueda que se produce dentro de la trayectoria de la rueda y se define como grietas predominantemente paralelas a la línea central del pavimento. Las grietas longitudinales se inician en la superficie del pavimento asfáltico y se muestran inicialmente como grietas longitudinales cortas que se conectan longitudinalmente con las cargas continuas de camiones (ver Figura 3.16). A lo largo de los bordes de estas grietas puede ocurrir un rozamiento o deterioro de grietas, pero no forman un patrón de piel de cocodrilo. (Díaz & Pinzón, 2014)

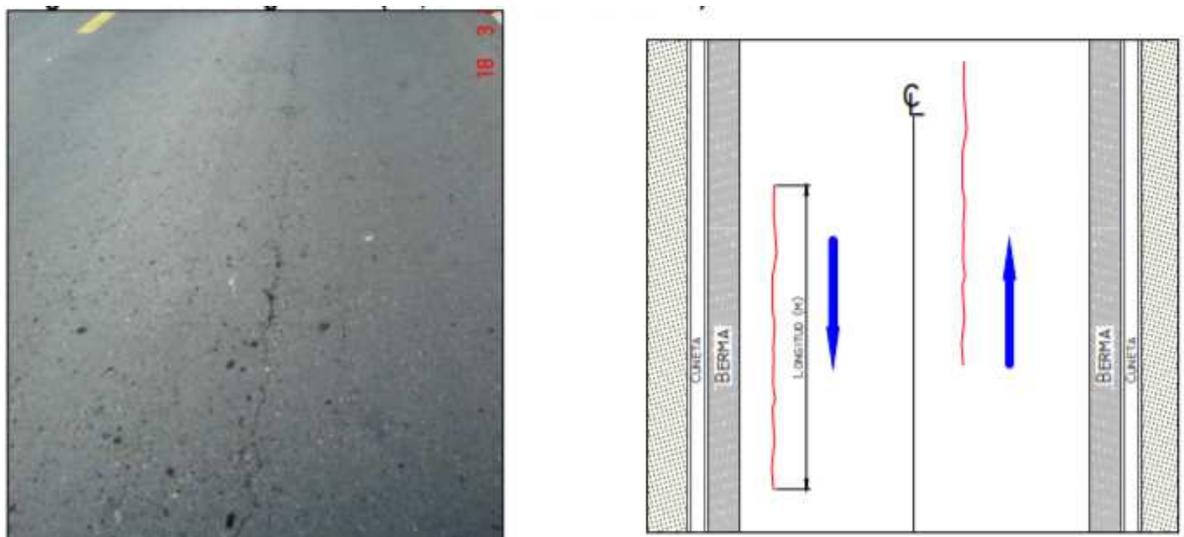


Figura 3.16.- Patrón de fallo para el agrietamiento longitudinal

Fuente: Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles (Instituto Nacional de Vías, 2006)

Los mecanismos que causan este tipo de grietas son:

- 1- La carga por rueda provoca tensiones y deformaciones por tracción que ocurren en la superficie y que causan que el agrietamiento se inicie en esa zona y se propague hacia abajo debido a las tracciones.
- 2- Los esfuerzos cortantes que ocurren en la superficie de la capa asfáltica causadas por las llantas radiales con alta presión de contacto cerca de los bordes. Esto indica que las grietas se inician y propagan tanto por cortante como por tracción.
- 3- El severo envejecimiento de la mezcla asfáltica cerca de la superficie provoca en ella una alta rigidez, que cuando se combina con una elevada presión de contacto de las llantas, causa el inicio de las grietas y su propagación.

Para el análisis de fatiga en general, la MEPDG, presenta la siguiente ecuación:

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\varepsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA})^{k_{f3}\beta_{f3}}$$

En dónde:

N_{f-HMA} = Número permitido de repeticiones de carga por eje para un pavimento flexible.

ε_t = Deformación unitaria por tensión en lugares críticos según el tipo de agrietamiento y calculados por el modelo de respuesta estructural, en pulgada/pulgada

E_{HMA} = Módulo dinámico de la carpeta asfáltica medido en compresión, en psi.

$k_{f1, f2, f3}$ = Coeficientes de calibración global de campo ($k_{f1}=0.007566$ $k_{f2}=3.9492$, $k_{f3}=1.281$).

$\beta_{f1,f2,f3}$ = Constantes de calibración locales o de mezclas en el campo, para la calibración global, estas constantes se establecieron en 1.00.

C_H = Factor de corrección de espesor, dependiendo del tipo de agrietamiento:

Para fisuramiento tipo piel de cocodrilo o de abajo hacia arriba:

$$C_{H1} = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49H_{HMA})}}}$$

Para fisuras longitudinales o de arriba hacia abajo

$$C_{H2} = \frac{1}{0.01 + \frac{12.00}{1 + e^{(15.676 - 2.8186H_{HMA})}}}$$

donde:
 H_{HMA} = Espesor total de mezcla asfáltica, en pulgada.

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69 \right)$$

donde:
 V_{be} = Contenido de asfalto efectivo por volumen, en %.
 V_a = Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.
 C_H = Factor de corrección de espesor, dependiente del tipo de fisura.

A continuación se muestra la hoja de cálculo desarrollada para chequear el fallo por fatiga en la capa asfáltica (ver Figuras 3.17 y 3.18).

FATIGA - CAPA ASFÁLTICA

Variante:	10 - BEC	Región:	Costa
Nivel de Tráfico (ESAL)	5.00E+06	Mr Subrasante (MPa)	75

$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\epsilon_t)^{k_{f2}\beta_{f2}}(E_{HMA})^{k_{f3}\beta_{f3}}$ <p>where:</p> <p>N_{fHMA} = Número permitido de repeticiones de carga por eje para un pavimento flexible y recapados de HMA.</p> <p>ϵ_t = Deformación unitaria por tensión en lugares críticos y calculados por el modelo de respuesta estructural, en pulgada/pulgada.</p> <p>E_{HMA} = Módulo dinámico del HMA medido en compresión, en psi.</p> <p>k_{f1}, k_{f2}, k_{f3} = Coeficientes de calibración global en campo ($k_{f1} = 0.007566, k_{f2} = -3.9492, k_{f3} = -1.281$).</p> <p>$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ = Constantes de calibración de campo local o específicas de la mezcla; para el esfuerzo de calibración global estas constantes fueron establecidas en 1.0.</p>			
k_{f1}	0.007566	C_{H1}	264.73
k_{f2}	-3.9492	C_{H2}	7.58
k_{f3}	-1.281	C	1.46
$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$	1	ϵ_t	
$E_{(HMA)}$ (psi)	389,574	Bottom-up	Top Down
		0.000014	0.000051
Número permitido de aplicaciones de carga por eje	Abajo - Arriba	N_{f-HMA}	3,039,915,889,553
	Arriba - Abajo	N_{f-HMA}	517,520,027

Para fisuramiento tipo piel de cocodrilo o de abajo hacia arriba:		PIEL DE COCODRILLO
$C_{H1} = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(1.02 - 3.49H_{HMA})}}}$		C_{H1} 264.73
Para fisuras longitudinales o de arriba hacia abajo		FISURA LONGITUDINAL
$C_{H2} = \frac{1}{0.01 + \frac{12.00}{1 + e^{(15.676 - 2.8186H_{HMA})}}}$		C_{H2} 7.58
donde: H_{HMA} = Espesor total de mezcla asfáltica, en pulgada.		H_{HMA} (in) 3.9

$C = 10^M$ $M = 4.84 \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69 \right)$	
donde: V_{be} = Contenido de asfalto efectivo por volumen, en %. V_a = Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica. C_H = Factor de corrección de espesor, dependiente del tipo de fisura.	
Vbe %	10.50%
Va %	4.00%
M	0.165
C	1.463

Figura 3.17.- Fatiga en la capa asfáltica correspondiente a la variante 10-BEC para la región Costa

Fuente: Elaboración propia

FATIGA - CAPA ASFÁLTICA

Variante:	10 - BEC	Región:	Sierra
Nivel de Tráfico (ESAL)	5,00E+06	Mr Subrasante (MPa)	75

$$N_{f-HMA} = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1}(\epsilon_t)^{k_{f2}}\beta_{f2}(E_{HMA})^{k_{f3}}\beta_{f3}$$

where:

N_{f-HMA} = Número permitido de repeticiones de carga por eje para un pavimento flexible y recapados de HMA.

ϵ_t = Deformación unitaria por tensión en lugares críticos y calculados por el modelo de respuesta estructural, en pulgada/pulgada.

E_{HMA} = Módulo dinámico del HMA medido en compresión, en psi.

k_{f1}, k_{f2}, k_{f3} = Coeficientes de calibración global en campo ($k_{f1} = 0.007566, k_{f2} = -3.9492, k_{f3} = -1.281$).

$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$ = Constantes de calibración de campo local o específicas de la mezcla; para el esfuerzo de calibración global estas constantes fueron establecidas en 1.0.

k_{f1}	0,007566	C_{H1}	264,73
k_{f2}	-3,9492	C_{H2}	7,58
k_{f3}	-1,281	C	1,46
$\beta_{f1}, \beta_{f2}, \beta_{f3}$	1	ϵ_t	
$E_{(HMA)}$ (psi)	1.011.091	Bottom-up	Top Down
		0,000019	0,000033
Número permitido de aplicaciones de carga por eje	Abajo - Arriba	N_{f-HMA}	288.465.827.735
	Arriba - Abajo	N_{f-HMA}	851.054.225

Para fisuramiento tipo piel de cocodrilo o de abajo hacia arriba:

$$C_{H1} = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(1.02-3.49H_{HMA})}}}$$

PIEL DE COCODRILO	
C_{H1}	264,73

Para fisuras longitudinales o de arriba hacia abajo

$$C_{H2} = \frac{1}{0.01 + \frac{12.00}{1 + e^{(0.5676-2.8186H_{HMA})}}}$$

FISURA LONGITUDINAL	
C_{H2}	7,58

donde:

H_{HMA} = Espesor total de mezcla asfáltica, en pulgada.

H_{HMA} (in)	3,9
----------------	-----

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0.69 \right)$$

donde:

V_{be} = Contenido de asfalto efectivo por volumen, en %.

V_a = Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.

C_H = Factor de corrección de espesor, dependiente del tipo de fisura.

Vbe %	10,50%
Va %	4,00%
M	0,165
C	1,463

Figura 3.18 Fatiga en la capa asfáltica correspondiente a la variante 10-BEC para la región Sierra

Fuente: Elaboración propia

3.3.4.3. Agrietamiento por fatiga en la base estabilizada con cemento

La primera comprobación para la fatiga a realizar será que de cumplirse que la relación entre el esfuerzo a la tracción en la fibra inferior de la capa estabilizada (punto crítico) y el esfuerzo de la ruptura por flexo-tracción del material tenga un valor entre 0.5 y 0.6 la capa puede soportar infinito número de pasadas de la carga que da origen a la tracción en la fibra inferior.

Diversos autores han propuesto leyes de fatiga para materiales cementados, de entre ellas se ha seleccionado una expresión bastante común en Francia y España, que con pequeños ajustes se emplea en varios otros países:

$$\frac{\sigma}{\sigma_o} = 1 - \frac{\log N}{a}$$

Dónde:

N: número de repeticiones de ejes equivalentes (8.2 ton) para la falla.

σ : Tensión producida en la fibra inferior de la capa cementada por una carga de eje equivalente de 8.2 ton.

σ_o : Resistencia de ruptura por flexotracción. Usualmente a los 28 días.

a: coeficiente de ajuste, depende del material y varía entre 12 y 15.

En general, la relación $1/12 = 0.083$ multiplicando el Log N es usual para capas de suelos-cemento y la relación $1/15 = 0.067$ para gravas-cemento. Analizando las particularidades de esos dos materiales en la normativa europea, se decidió emplear para este estudio un valor de "a" igual a 13.5, promedio de los anteriores y más cercano a nuestra base de agregados estabilizada. La comparación entre la N para la falla y la N esperada (de diseño) será la segunda comprobación a realizar para la fatiga.

A continuación se muestra la hoja de cálculo desarrollada para calcular la predicción del fallo por fisuramiento o fatiga en BEC (ver Figuras 3.19 y 3.20).

FATIGA - BASE ESTABILIZADA DE CEMENTO				
Variante:	10 - BEC		Región	Costa
Datos				
Número de ejes equivalentes acumulados de diseño de 8,2 ton (ESAL):				5,000,000
Resistencia a la flexotracción "σ _o " de la BEC (MPa):				0,9
Esfuerzo de tensión de "σ _n " en la fibra inferior de la BEC según BISAR 3.0 (MPa):				0,27
MODELO DE AGRIETAMIENTO POR FATIGA EN BEC				
σ _n /σ _o	0,30			(entre 0,5 y 0,6 = ILIMITADAS REPETICIONES)
Fuente: Guía Francesa para el diseño de Pavimentos				
N _{adm} (ESAL)	1,258,925,412			$\frac{\sigma}{\sigma_o} = 1 - \frac{\log N}{a}$
N _{adm} ≥ N _{diseño}				Si Cumple

Figura 3.19.- Fatiga en la base estabilizada con cemento correspondiente a la variante 10-BEC para la región Costa

Fuente: Elaboración propia

FATIGA - BASE ESTABILIZADA DE CEMENTO				
Variante:	1 - BEC		Región	Sierra
Datos				
Número de ejes equivalentes acumulados de diseño de 8,2 ton (ESAL):				5.000.000
Resistencia a la flexotracción "σ _o " de la BEC (MPa):				0,9
Esfuerzo de tensión de "σ _n " en la fibra inferior de la BEC según ALIZE (MPa):				0,25
MODELO DE AGRIETAMIENTO POR FATIGA EN BEC				
σ _n /σ _o	0,28			(entre 0,5 y 0,6 = ILIMITADAS REPETICIONES)
Fuente: Guía Francesa para el diseño de Pavimentos				
N _{adm} (ESAL)	2.448.436.747			$\frac{\sigma}{\sigma_o} = 1 - \frac{\log N}{a}$
N _{adm} ≥ N _{diseño}				Si Cumple

Figura 3.20.- Fatiga en la base estabilizada con cemento correspondiente a la variante 10-BEC para la región Sierra

Fuente: Elaboración propia

3.3.4.4. Deformación vertical sobre la subrasante

Para determinar la deformación vertical se utilizará la siguiente ecuación, propia del Instituto del Asfalto:

$$N_d = 1.365 * 10^{-9} * \epsilon_c^{-4.477}$$

En donde:

N_d: Número permitido de repeticiones de carga por eje

E_c= Deformación unitaria por compresión sobre la subrasante, en pulg/pulg.

A continuación se muestra la hoja de cálculo desarrollada para calcular la predicción del fallo por deformación vertical que llega a la subrasante (ver Figuras 3.21 y 3.22).

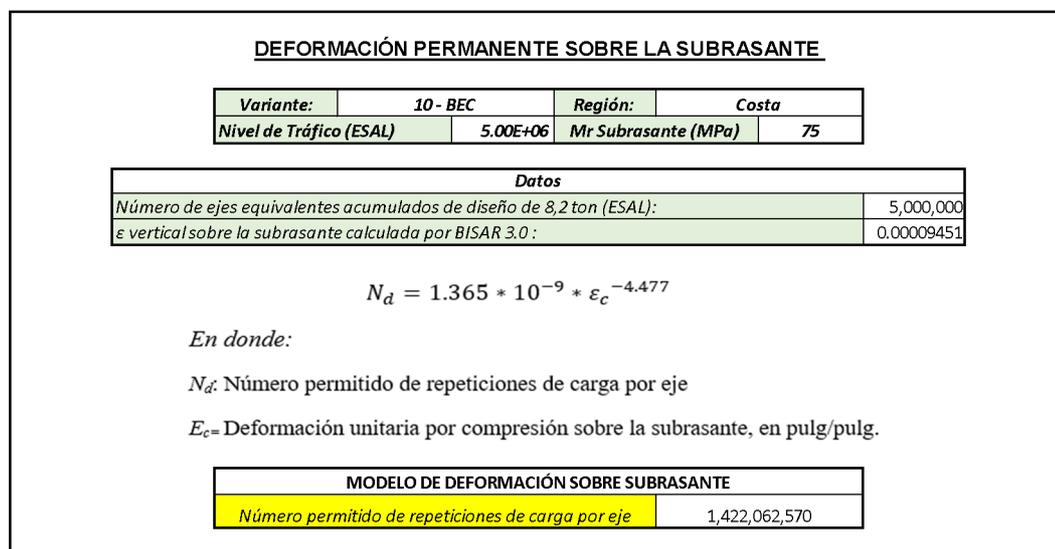


Figura 3.21.- Deformación permanente sobre la subrasante correspondiente a la variante 10-BEC para la región Costa

Fuente: Elaboración propia

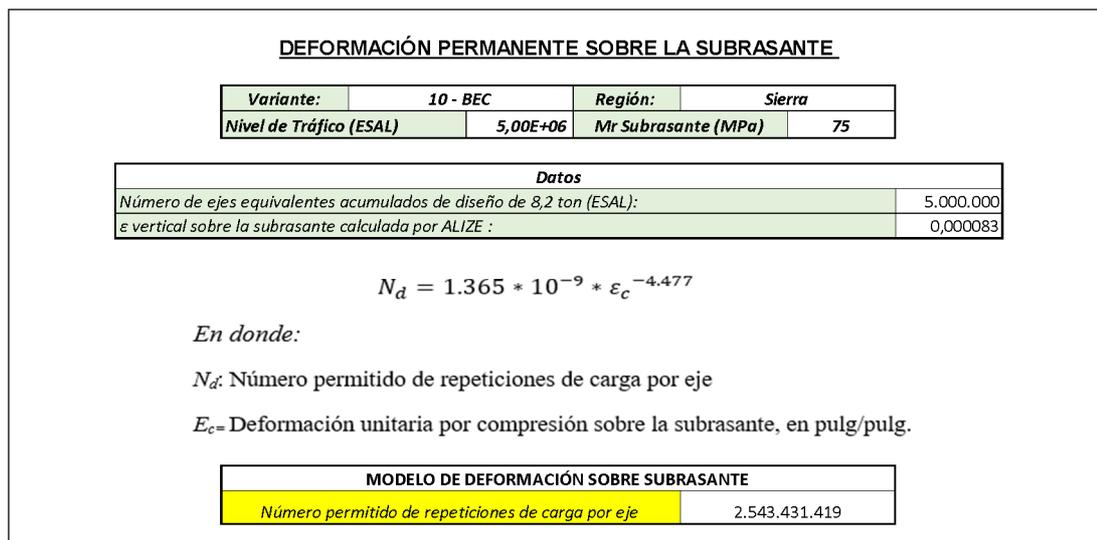


Figura 3.22 Deformación permanente sobre la subrasante correspondiente a la variante 10-BEC para la región Sierra

Fuente: Elaboración propia

3.4 Diseño de whitetopping según metodología del Departamento de Transporte de Texas

3.4.1 Filosofía de diseño

En 2008, (Chul, Kim, & Won., 2008) desarrollaron procedimientos mecanicistas para diseñar whitetopping delgados. En esta filosofía de diseño el whitetopping se comporta como pequeñas losas independientes, donde las tensiones debidas a la flexión son relativamente bajas en comparación a un pavimento de concreto convencional.

Los parámetros importantes a considerar son el espesor y los módulos elásticos de la sobrecapa de hormigón, capa asfáltica y base, el módulo de reacción de la subrasante (k) y la eficiencia de la transferencia de carga. Se establecieron paneles de 1.80m x 1.80m (6 pies x 6 pies). Esta puede ser una buena suposición para un whitetopping delgado pero no para un ultradelgado (UTW), ya que cuando el espesor es inferior a 10 cm (4 pulgadas) es necesario reducir el tamaño del panel.

3.4.2 Pasos de diseño

El procedimiento de Texas consta de cuatro pasos:

- Se recomienda que las condiciones estructurales y las propiedades de los materiales sean evaluadas usando un penetrómetro de cono dinámico (DCP) y un deflectómetro de impacto (FWD).
- El módulo resiliente de la subrasante es calculado mediante la siguiente ecuación:

$$M_R = \frac{438,000}{DCP^{1.12}}$$

Dónde:

MR = módulo resiliente (elástico), psi.

DCP = Índice DCP (mm / golpe).

Se recomienda el programa ELSYM5 para estimar el módulo de reacción de la subrasante con el valor de módulo calculado a partir de la ecuación anteriormente presentada. El valor del

módulo de la subrasante estático es la mitad del módulo elástico calculado.

- El módulo elástico obtenido en el paso anterior se utiliza en un programa de cálculo posterior para estimar el módulo elástico de la capa de subbase. El espesor de la capa asfáltica que tiene más de 7.5 cm (3 pulgadas) se la trata como una capa separada, de lo contrario la capa asfáltica se combina con la capa de base.
- Se utiliza la siguiente ecuación para determinar el espesor crítico de la capa de hormigón:

$$\begin{aligned} \log(t_{PCC}) = & 3.5615 + 0.1017 \log(ESAL) + 0.4982 \log(E_{PCC}) - 0.7232 \log(t_{AC}) \\ & - 0.3624 \log(E_{AC}) - 0.2695 \log(t_{BS}) - 0.0891 \log(E_{BS}) \\ & - 0.0287 \log(k) - 1.2250 \log(MR) \end{aligned}$$

Dónde:

t_{PCC}	Espesor requerido para el whitetopping, pulgadas.
ESAL	Ejes acumulados equivalentes de 8.2 ton.
E_{PCC}	Módulo de elasticidad del hormigón, (libras/pulgadas ²).
t_{AC}	Espesor de la capa asfáltica, pulgadas.
E_{AC}	Módulo de elasticidad del asfalto, (libras/pulgadas ²).
t_{BS}	Espesor de la capa de base, pulgadas.
E_{AC}	Módulo de elasticidad de la base, (libras/pulgadas ²).
k	Módulo de reacción de la subbase, (libras/pulgadas ³).
MR	Módulo de rotura del whitetopping, (libras/pulgadas ²).

Además interesantes recomendaciones constructivas para los diseños de Whitetopping por este método se encuentran en el capítulo 2.2.3 del reporte Extending Asphalt Pavement Life Using Thin Whitetopping (Hossain, 2010).

A continuación se muestra la hoja de cálculo desarrollada para el diseño de whitetopping delgado (ver Figura 3.25).

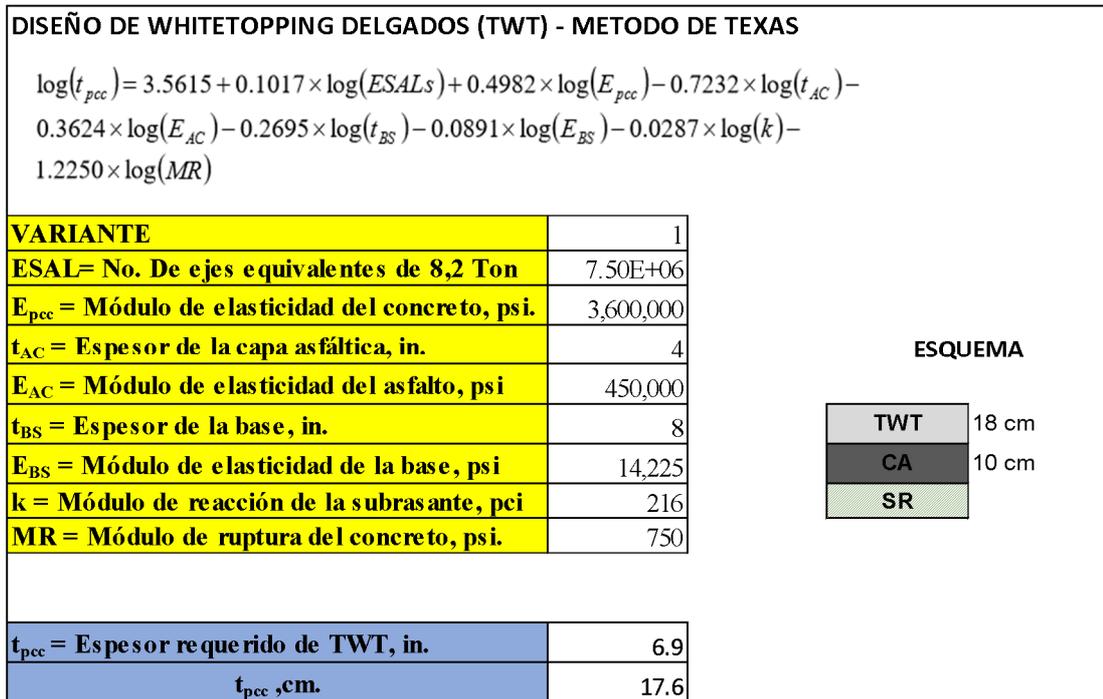


Figura 3.23.- Diseño de whitetopping delgado (TWT) correspondiente a la variante 10 de la matriz de diseño de pavimentos rígido.

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV

4 RESULTADOS

4.1. Diseño por AASHTO 93 de pavimentos flexibles con base de agregados y base estabilizada con cemento

Para el diseño de pavimentos flexibles por AASHTO 93 con base granular se utilizaron carpetas asfálticas con espesores de 10 a 25 cm, base de agregados de 15 a 30 cm, subbase de 25 a 30 cm. Además se utilizaron capas de mejoramiento en los niveles de tráfico alto y donde la calidad de la subrasante era muy baja, obteniendo así espesores de 30 y 32 cm.

AASHTO 93 - DISEÑOS CON BASE DE AGREGADOS							
TRÁFICO MEDIO		TRÁFICO PESADO		TRÁFICO MUY PESADO		TRÁFICO ULTRA PESADO	
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	5 X 10 ⁵	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	5 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	25 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	50 X 10 ⁶
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93
Base de agregados		Base de agregados		Base de agregados		Base de agregados	
25	CA 10 cm	25	CA 16 cm	25	CA 23 cm	25	CA 25 cm
	BAG 25 cm		BAG 25 cm		BAG 30 cm		BAG 30 cm
	SB 26 cm		SB 25 cm		SB 30 cm		SB 30 cm
	SR		ME 30 cm		ME 30 cm		ME 32 cm
			SR		SR		SR
50	CA 10 cm	50	CA 16 cm	50	CA 23 cm	50	CA 25 cm
	BAG 25 cm		BAG 20 cm		BAG 25 cm		BAG 25 cm
	SR		SB 25 cm		SB 28 cm		SB 30 cm
			SR		SR		SR
75	CA 10 cm	75	CA 16 cm	75	CA 23 cm	75	CA 25 cm
	BAG 15 cm		BAG 25 cm		BAG 30 cm		BAG 30 cm
	SR		SR		SR		SR
100	CA 10 cm	100	CA 16 cm	100	CA 23 cm	100	CA 25 cm
	BAG 15 cm (*)		BAG 20 cm		BAG 25 cm		BAG 25 cm
	SR		SR		SR		SR

SIMBOLOGÍA:

CA: Capa asfáltica
 BAG: Base de agregados
 SB: Subbase de agregados

ME: Mejoramiento de subrasante
 SR: Subrasante
 (*) Por razones constructivas

Figura 4.1.- Resultados del diseño de pavimentos flexible con BG según AASHTO 93

Fuente: Elaboración propia

Para el diseño de pavimentos flexibles por AASHTO 93 con base estabilizada con cemento los espesores de carpeta asfáltica se redujeron

considerablemente obteniéndose 6 a 30 cm, en la base estabilizada con cemento 15 a 30 cm y en la subbase 15 a 30 cm. Además se utilizaron capas de mejoramiento de 20 a 55 cm en las variantes donde la calidad de la subrasante era de 25 y 50 MPa.

AASHTO 93 - DISEÑOS CON BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO								
TRÁFICO MEDIO		TRÁFICO PESADO		TRÁFICO MUY PESADO		TRÁFICO ULTRA PESADO		
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	5 X 10 ⁵	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	5 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	25 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	50 X 10 ⁶	
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	
	BEC		BEC		BEC		BEC	
25	CA	25	CA	25	CA	25	CA	
	6 cm		10 cm		18 cm		22 cm	
	BEC		30 cm		30 cm		BEC	30 cm
	25 cm		30 cm		30 cm		SB	30 cm
	SB		40 cm		50 cm		55 cm	SR
20 cm	ME							
	SR		SR		SR		SR	
50	CA	50	CA	50	CA	50	CA	
	6 cm		10 cm		18 cm		22 cm	
	BEC		30 cm		30 cm		BEC	30 cm
	25 cm		30 cm		20 cm		SB	30 cm
	SB		20 cm		20 cm		SR	SR
15 cm	ME							
	SR		SR		SR		SR	
75	CA	75	CA	75	CA	75	CA	
	6 cm		10 cm		18 cm		30 cm	
	BEC		30 cm		30 cm		BEC	20 cm
	25 cm		15 cm		20 cm		SB	20 cm
	SB		15 cm		SR		SR	SR
15 cm (*)	ME							
	SR		SR		SR		SR	
100	CA	100	CA	100	CA	100	CA	
	6 cm		12 cm		18 cm		22 cm	
	BEC		28 cm		30 cm		BEC	30 cm
	22 cm		SR		SR		SR	
	SR		SR		SR		SR	

SIMBOLOGÍA:

CA: Capa asfáltica
 BEC: Base estabilizada con cemento Portland
 SB: Subbase de agregados

ME: Mejoramiento de subrasante
 SR: Subrasante
 (*) Por razones constructivas

Figura 4.2.- Resultados del diseño de pavimentos flexible con BEC según AASHTO 93

Fuente: Elaboración propia

4.2. Análisis mecanicista para Costa y Sierra de los pavimentos flexibles diseñados

Se procedió a realizar un primer análisis mecanicista a las variantes flexibles diseñadas por AASHTO 93, para luego efectuar el ajuste respectivo de espesores en caso de no cumplir algún criterio de fallo. Los resultados obtenidos para las variantes de BG (ver figuras 4.4 a 4.7) fueron muy críticos en la fatiga “top down” que se genera en la capa asfáltica, lo que impedía el ajuste de espesor para estas variantes ya que automáticamente el fallo se trasladada a otra posición o capa. Por ejemplo para mejorar el desempeño para la fatiga “top down” se recomienda disminuir el espesor de carpeta asfáltica, pero esto a su vez es perjudicial para la deformación permanente o ahuellamiento.

En cambio los resultados obtenidos para el caso de las variantes de BEC fueron muy favorables, en donde únicamente en 4 variantes se tuvo que hacer una pequeña disminución de espesor de carpeta asfáltica para que cumplan los criterios de fatiga. Esas variantes se presentan en la Figura 4.3.

Original				Ajustado			
TRÁFICO MUY PESADO		TRÁFICO ULTRA PESADO		TRÁFICO MUY PESADO		TRÁFICO ULTRA PESADO	
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	25 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	50 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	25 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:	50 X 10 ⁶
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93
	BEC		BEC		BEC		BEC
25	CA	18 cm	22 cm	15 cm	18 cm	18 cm	18 cm
	BEC	30 cm	30 cm	40 cm	40 cm	40 cm	40 cm
	SB	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm
	ME	50 cm	55 cm	45 cm	55 cm	55 cm	55 cm
50	CA	18 cm	22 cm	15 cm	18 cm	18 cm	18 cm
	BEC	30 cm	30 cm	40 cm	40 cm	40 cm	40 cm
	SB	20 cm	30 cm	20 cm	35 cm	20 cm	35 cm
	ME	20 cm	SR	20 cm	SR	20 cm	SR
	SR						

Figura 4.3.- Variantes ajustadas según el análisis mecanicista para BEC

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de los diseños con BEC, los resultados obtenidos se pueden consultar en las figuras 4.8 a 4.11. Estos últimos resultados ya incluyen la corrección antes mencionada.

TRÁFICO MEDIO					
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		5 X 10⁵			
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Análisis Mecanicista:			
Base de agregados		COSTA			
		Capa	Parámetro		
		Resultado			
25	VARIANTE 1	CA 10 cm	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,34
			Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	12.800.149
		BAG 25 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	254.411
			Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	571.502
		SB 26 cm	SIERRA		
		SR	Capa	Parámetro	Resultado
			Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,06
			Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	23.392.062
			Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	1.753.622
	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	1.106.890		
50	VARIANTE 5	COSTA			
		Capa	Parámetro	Resultado	
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,55	
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	11.041.852	
		CA 10 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	243.277
			Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	200.986
		BAG 25 cm	SIERRA		
		SR	Capa	Parámetro	Resultado
			Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	0,37
	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	20.794.203		
	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	1.710.468		
	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	598.204		
75	VARIANTE 9	COSTA			
		Capa	Parámetro	Resultado	
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,78	
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	9.211.589	
		CA 10 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	235.325
			Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	158.391
		BAG 15 cm	SIERRA		
		SR	Capa	Parámetro	Resultado
			Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	0,39
	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	18.720.257		
	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	1.668.637		
	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	637.121		
100	VARIANTE 13	COSTA			
		Capa	Parámetro	Resultado	
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,93	
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	10.757.738	
		CA 10 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	332.487
			Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	347.766
		BAG 15 cm (*)	SIERRA		
		SR	Capa	Parámetro	Resultado
			Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	0,40
	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	22.585.148		
	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	2.331.862		
	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	1.356.988		

SIMBOLOGÍA:

CA: Capa asfáltica

BAG: Base de agregados

BEC: Base estabilizada con cemento Portland

SB: Subbase de agregados

ME: Mejoramiento de subrasante

SR: Subrasante

(*) Por razones constructivas

Ilimitado: Mayor a 100 millones de ejes permitidos

Figura 4.4.- Resultados del análisis mecanicista con BG para tráfico medio

Fuente: Elaboración propia

TRÁFICO PESADO				
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		5 X 10 ⁶		
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Análisis Mecanicista:		
	Base de agregados	COSTA		
VARIANTE 2	CA 16 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	3,42
	BAG 25 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	83.419.777
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	19.308
	SB 25 cm	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	21.440.231
		SIERRA		
	ME 30 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,03
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	168.449
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	43.825.632	
VARIANTE 6	CA 16 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	3,51
	BAG 20 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	73.248.580
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	17.958
	SB 25 cm	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	7.552.875
		SIERRA		
	SR	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,05
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	161.554
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	23.817.923	
VARIANTE 10	CA 16 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	3,61
	BAG 25 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	77.810.482
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	21.991
	SR	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	4.224.344
		SIERRA		
	SR	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,07
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	200.009
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	18.492.985	
VARIANTE 14	CA 16 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	3,69
	BAG 20 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	80.553.972
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	25.655
	SR	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	5.399.832
		SIERRA		
	SR	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,08
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	228.663
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	26.629.842	

SIMBOLOGÍA:

CA: Capa asfáltica

BAG: Base de agregados

BEC: Base estabilizada con cemento Portland

SB: Subbase de agregados

ME: Mejoramiento de subrasante

SR: Subrasante

(*) Por razones constructivas

Ilimitado: Mayor a 100 millones de ejes permitidos

Figura 4.5.- Resultados del análisis mecanicista con BG para tráfico pesado

Fuente: Elaboración propia

		TRÁFICO MUY PESADO		
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		25 X 10⁶		
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Análisis Mecanicista:		
	Base de agregados	COSTA		
VARIANTE 3	CA 23 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,49
	BAG 30 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	115.374
	SB 30 cm	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	Ilimitado
		SIERRA		
	ME 30 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,51
	SR	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	1.079.783
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	Ilimitado	
VARIANTE 7	CA 23 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,52
	BAG 25 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	115.374
	SB 28 cm	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	82.517.933
		SIERRA		
	SR	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,53
	SR	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	1.157.959
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	Ilimitado	
VARIANTE 11	CA 23 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,55
	BAG 30 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	139.044
	SR	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	51.641.591
		SIERRA		
	SR	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,55
	SR	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	1.336.805
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	Ilimitado	
VARIANTE 15	CA 23 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,57
	BAG 25 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	163.585
	SR	Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	69.968.727
		SIERRA		
	SR	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,56
	SR	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	1.675.333
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	Ilimitado	

SIMBOLOGÍA:

CA: Capa asfáltica

BAG: Base de agregados

BEC: Base estabilizada con cemento Portland

SB: Subbase de agregados

ME: Mejoramiento de subrasante

SR: Subrasante

(*) Por razones constructivas

Ilimitado: Mayor a 100 millones de ejes permitidos

Figura 4.6.- Resultados del análisis mecanicista con BG para tráfico muy pesado

Fuente: Elaboración propia

TRÁFICO ULTRA PESADO			
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		5 X 10⁷	
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93 Base de agregados	Análisis Mecanicista:	
VARIANTE 4	CA 25 cm	COSTA	
		Capa	Parámetro
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)
	BAG 30 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)
		Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)
	SB 30 cm	SIERRA	
		Capa	Parámetro
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)
Capa Asfáltica		Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	
VARIANTE 8	CA 25 cm	COSTA	
		Capa	Parámetro
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)
	BAG 25 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)
		Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)
	SB 30 cm	SIERRA	
		Capa	Parámetro
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)
Capa Asfáltica		Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	
VARIANTE 12	CA 25 cm	COSTA	
		Capa	Parámetro
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)
	BAG 30 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)
		Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)
	SR	SIERRA	
		Capa	Parámetro
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)
Capa Asfáltica		Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	
VARIANTE 16	CA 25 cm	COSTA	
		Capa	Parámetro
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)
	BAG 25 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)
		Subrasante	Deformación subrasante(Ejes Permitidos)
	SR	SIERRA	
		Capa	Parámetro
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)
Capa Asfáltica		Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	
Subrasante		Deformación subrasante(Ejes Permitidos)	

SIMBOLOGÍA:

CA: Capa asfáltica

BAG: Base de agregados

BEC: Base estabilizada con cemento Portland

SB: Subbase de agregados

ME: Mejoramiento de subrasante

SR: Subrasante

(*) Por razones constructivas

Ilimitado: Mayor a 100 millones de ejes permitidos

Figura 4.7.- Resultados del análisis mecanicista con BG para tráfico ultra pesado

Fuente: Elaboración propia

		TRÁFICO MEDIO				
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		5 X 10⁵				
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Análisis Mecanicista:				
	BEC	COSTA				
25	CA	6 cm	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	0,92	
		BEC	25 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
	SB		20 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado
			BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	3.162.278	
	ME	20 cm	Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	56.838.722	
			SIERRA			
	SR	Capa	Parámetro	Resultado		
					Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
BEC		Fatiga: (Ejes Permitidos)	8.576.959			
Subrasante		Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
COSTA						
50	CA	6 cm	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,15	
		BEC	25 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
	SB		15 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado
				BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	4.410.059
	SR	15 cm	Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	92.511.062	
			SIERRA			
	SR	Capa	Parámetro	Resultado		
					Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
BEC		Fatiga: (Ejes Permitidos)	16.681.005			
Subrasante		Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
COSTA						
75	CA	6 cm	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,41	
		BEC	25 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
	SB		15 cm (*)	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado
				BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	11.961.283
	SR	15 cm (*)	Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
			SIERRA			
	SR	Capa	Parámetro	Resultado		
					Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
BEC		Fatiga: (Ejes Permitidos)	32.442.261			
Subrasante		Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
COSTA						
100	CA	6 cm	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,31	
		BEC	22 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
	SR		22 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado
				BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	2.267.543
	SR	22 cm	Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
			SIERRA			
	SR	Capa	Parámetro	Resultado		
					Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
BEC		Fatiga: (Ejes Permitidos)	8.576.959			
Subrasante		Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
COSTA						

SIMBOLOGÍA:

CA: Capa asfáltica

BAG: Base de agregados

BEC: Base estabilizada con cemento Portland

SB: Subbase de agregados

ME: Mejoramiento de subrasante

SR: Subrasante

(*) Por razones constructivas

Ilimitado: Mayor a 100 millones de ejes permitidos

Figura 4.8.- Resultados del análisis mecanicista con BEC para tráfico medio

Fuente: Elaboración propia

TRÁFICO PESADO							
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		5 X 10 ⁶					
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93		Análisis Mecanicista:				
	BEC		COSTA				
25	VARIANTE 2	CA	10 cm	Capa	Parámetro	Resultado	
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	8,51			
		BEC	30 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		SB	30 cm	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		SIERRA			Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,14			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado					
Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado					
50	VARIANTE 6	CA	10 cm	Capa	Parámetro	Resultado	
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	8,77			
		BEC	30 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		SB	30 cm	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		SIERRA			Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,17			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado					
Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado					
75	VARIANTE 10	CA	10 cm	Capa	Parámetro	Resultado	
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	9,09			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		BEC	30 cm	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		SIERRA			Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,21			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado					
Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado					
100	VARIANTE 14	CA	12 cm	Capa	Parámetro	Resultado	
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	6,90			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	81.395.757			
		BEC	28 cm	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		SIERRA			Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	1,23			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado					
Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado					

SIMBOLOGÍA:

CA: Capa asfáltica

BAG: Base de agregados

BEC: Base estabilizada con cemento Portland

SB: Subbase de agregados

ME: Mejoramiento de subrasante

SR: Subrasante

(*) Por razones constructivas

Ilimitado: Mayor a 100 millones de ejes permitidos

Figura 4.9.- Resultados del análisis mecanicista con BEC para tráfico pesado

Fuente: Elaboración propia

TRÁFICO MUY PESADO					
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		25 X 10⁶			
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Análisis Mecanicista:			
	BEC	COSTA			
25	VARIANTE 3	CA 15 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	9,80	
		BEC 40 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	75.553.479	
		SB 30 cm	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado
	Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
			SIERRA		
		ME 45 cm	Capa	Parámetro	Resultado
	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,88		
	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	63.923.200			
BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
50	VARIANTE 7	CA 15 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	9,97	
		BEC 40 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		SB 20 cm	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado
	Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
			SIERRA		
		ME 20 cm	Capa	Parámetro	Resultado
	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,53		
	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	76.814.945			
BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
75	VARIANTE 11	CA 18 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	5,39	
		BEC 30 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	32.775.614	
		SB 20 cm	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado
	Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
			SIERRA		
		SR	Capa	Parámetro	Resultado
	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,15		
	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	39.421.828			
BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
100	VARIANTE 15	CA 18 cm	Capa	Parámetro	Resultado
		Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	5,49	
		BEC 30 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	48.348.940	
		SR	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado
	Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
			SIERRA		
			Capa	Parámetro	Resultado
	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,18		
	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado		
Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	56.462.992			
BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado			
Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado			

SIMBOLOGÍA:

CA: Capa asfáltica

BAG: Base de agregados

BEC: Base estabilizada con cemento Portland

SB: Subbase de agregados

ME: Mejoramiento de subrasante

SR: Subrasante

(*) Por razones constructivas

Ilimitado: Mayor a 100 millones de ejes permitidos

Figura 4.10.- Resultados del análisis mecanicista con BEC para tráfico muy pesado

Fuente: Elaboración propia

TRÁFICO ULTRA PESADO					
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		50 X 10⁶			
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Análisis Mecanicista:			
VARIANTE 4	BEC	COSTA			
		Capa	Parámetro	Resultado	
	CA 18 cm	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	6,96	
	BEC 40 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	74.417.725	
	SB 30 cm	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
			SIERRA		
		ME 55 cm	Capa	Parámetro	Resultado
			Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	3,05
		SR	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
			Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	68.461.226
		BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
VARIANTE 8	BEC	COSTA			
		Capa	Parámetro	Resultado	
	CA 18 cm	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	7,10	
	BEC 40 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
	SB 35 cm	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
			SIERRA		
		SR	Capa	Parámetro	Resultado
			Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	3,05
			Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
			Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
VARIANTE 12	BEC	COSTA			
		Capa	Parámetro	Resultado	
	CA 22 cm	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,71	
	BEC 30 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	49.593.452,47	
	SB 20 cm	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
			SIERRA		
		SR	Capa	Parámetro	Resultado
			Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,34
			Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
			Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	82.723.772,21
		BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
VARIANTE 16	BEC	COSTA			
		Capa	Parámetro	Resultado	
	CA 22 cm	Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,76	
	BEC 30 cm	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	66.455.066	
	SR	BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
			SIERRA		
			Capa	Parámetro	Resultado
			Capa Asfáltica	Deformación CA (mm)	2,37
			Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up (Ejes Permitidos)	Ilimitado
			Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down (Ejes Permitidos)	Ilimitado
		BEC	Fatiga: (Ejes Permitidos)	Ilimitado	
		Subrasante	Deformación subrasante (Ejes Permitidos)	Ilimitado	

SIMBOLOGÍA:

CA: Capa asfáltica

BAG: Base de agregados

BEC: Base estabilizada con cemento Portland

SB: Subbase de agregados

ME: Mejoramiento de subrasante

SR: Subrasante

(*) Por razones constructivas

Ilimitado: Mayor a 100 millones de ejes permitidos

Figura 4.11.- Resultados del análisis mecanicista con BEC para tráfico ultra pesado

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se realizó un resumen de los resultados obtenidos del análisis mecanicista, en donde se puede apreciar que las alternativas con base de agregados no cumplen con todos los modelos de desempeños revisados, siendo la más crítica la fatiga “top down” en la capa asfáltica (ver Figura 4.12). Mientras que los resultados de las variantes con base estabilizadas con cemento (BEC), cumplen en su totalidad con todos los modelos de desempeño (ver Figura 4.13), comprobando de esta manera el excelente comportamiento que tendrá la BEC ante los distintos fallos que se presentan en el pavimento.

No obstante, vale la pena añadir que aparentemente el modelo para la evaluación de la fatiga top-down merece ser analizado y estudiado para nuestras condiciones ya que los resultados obtenidos no se relacionan con las observaciones que se tienen a partir de experiencias de campo para determinar los factores de calibración locales que impone la guía para predecir este fallo.

RESUMEN ANÁLISIS MECANICISTA - DISEÑOS CON BASE DE AGREGADOS											
TRÁFICO MEDIO			TRÁFICO PESADO			TRÁFICO MUY PESADO			TRÁFICO ULTRA PESADO		
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		5 X 10 ⁵	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		5 X 10 ⁵	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		25 X 10 ⁵	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		
Módulo resiliente de SR (MPa)	AASH TO 93 Base de agregados	Resultados	Módulo resiliente de SR (MPa)	AASH TO 93 Base de agregados	Resultados	Módulo resiliente de SR (MPa)	AASH TO 93 Base de agregados	Resultados	Módulo resiliente de SR (MPa)	AASH TO 93 Base de agregados	
25	VARIANTE 1	COSTA	25	VARIANTE 2	COSTA	25	VARIANTE 3	COSTA	25	VARIANTE 4	
		1			1			1			1
		2			2			2			2
		3			3			3			3
4	4	4	4								
1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA		
2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
50	VARIANTE 5	COSTA	50	VARIANTE 6	COSTA	50	VARIANTE 7	COSTA	50	VARIANTE 8	
		1			1			1			1
		2			2			2			2
		3			3			3			3
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA		
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
75	VARIANTE 9	COSTA	75	VARIANTE 10	COSTA	75	VARIANTE 11	COSTA	75	VARIANTE 12	
		1			1			1			1
		2			2			2			2
		3			3			3			3
4	4	4	4	4	4	4	4	4			
1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA		
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
100	VARIANTE 13	COSTA	100	VARIANTE 14	COSTA	100	VARIANTE 15	COSTA	100	VARIANTE 16	
		1			1			1			1
		2			2			2			2
		3			3			3			3
4	4	4	4	4	4	4	4	4			
1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA	1	SIERRA		
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		

SIMBOLOGÍA:
CA: Capa asfáltica
BAG: Base de agregados
BEC: Base estabilizada con cemento Portland
SB: Subbase de agregados
ME: Mejoramiento

	CUMPLE
	NO CUMPLE

Código	Capa	Parámetro
1	Capa Asfáltica	Deformación Permanente
2	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up
3	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down
4	Subrasante	Deformación

Figura 4.12.- Resumen del análisis mecanicista para diseños con BG.

Fuente: Elaboración propia

RESUMEN ANALISIS MECANICISTA - DISEÑOS CON BASE ESTABILIZADA DE CEMENTO											
TRÁFICO MEDIO			TRÁFICO PESADO			TRÁFICO MUY PESADO			TRÁFICO ULTRA PESADO		
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		5 X 10 ⁵	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		5 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		25 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		50 X 10 ⁶
Módulo resiliente de SR (MPa)	AASHTO 93 BEC	Resultados COSTA	Módulo resiliente de SR (MPa)	AASHTO 93 BEC	Resultados COSTA	Módulo resiliente de SR (MPa)	AASHTO 93 BEC	Resultados COSTA	Módulo resiliente de SR (MPa)	AASHTO 93 BEC	Resultados COSTA
25	CA 6 cm	1	25	CA 10 cm	1	25	CA 15 cm	1	25	CA 18 cm	1
	2	2		2	2		2	2			
	3	3		3	3		3	3			
	4	4		4	4		4	4			
	5	5		5	5		5	5			
	SIERRA	SIERRA		SIERRA	SIERRA		SIERRA	SIERRA			
SB 20 cm	1	VARIANTE 2	ME 40 cm	1	VARIANTE 3	ME 45 cm	1	VARIANTE 4	ME 55 cm	1	
2	2		2	2		2	2				
3	3		3	3		3	3				
4	4		4	4		4	4				
5	5		5	5		5	5				
SR	SR		SR	SR		SR	SR				
50	COSTA	COSTA	50	CA 10 cm	COSTA	50	CA 15 cm	COSTA	50	CA 18 cm	COSTA
	1	1		1	1		1	1			
	2	2		2	2		2	2			
	3	3		3	3		3	3			
	4	4		4	4		4	4			
	5	5		5	5		5	5			
SIERRA	SIERRA	VARIANTE 6	SR	1	VARIANTE 7	ME 20 cm	SIERRA	VARIANTE 8	SR	SIERRA	
SB 25 cm	1		2	2		2	2				
2	2		3	3		3	3				
3	3		4	4		4	4				
4	4		5	5		5	5				
5	5		SR	SR		SR	SR				
75	COSTA	COSTA	75	CA 10 cm	COSTA	75	CA 18 cm	COSTA	75	CA 22 cm	COSTA
	1	1		2	2		2	2			
	2	2		3	3		3	3			
	3	3		4	4		4	4			
	4	4		5	5		5	5			
	5	5		BEC 30 cm	5		5	5			
SIERRA	SIERRA	VARIANTE 10	SB 15 cm	1	VARIANTE 11	SB 20 cm	SIERRA	VARIANTE 12	SB 20 cm	SIERRA	
SB 15 cm (*)	1		2	2		2	2				
2	2		3	3		3	3				
3	3		4	4		4	4				
4	4		5	5		5	5				
5	5		SR	SR		SR	SR				
100	COSTA	COSTA	100	CA 12 cm	COSTA	100	CA 18 cm	COSTA	100	CA 22 cm	COSTA
	1	1		2	2		2	2			
	2	2		3	3		3	3			
	3	3		4	4		4	4			
	4	4		5	5		5	5			
	5	5		BEC 28 cm	5		5	5			
SIERRA	SIERRA	VARIANTE 14	SR	1	VARIANTE 15	SR	SIERRA	VARIANTE 16	SR	SIERRA	
SB 22 cm	1		2	2		2	2				
2	2		3	3		3	3				
3	3		4	4		4	4				
4	4		5	5		5	5				
5	5		SR	SR		SR	SR				

SIMBOLOGÍA:			
CA: Capa asfáltica	ME; Mejoramiento		CUMPLE
BAG: Base de agregados			NO CUMPLE
BEC: Base estabilizada con cemento Portland			
SB: Subbase de agregados			

Código	Capa	Parámetro
1	Capa Asfáltica	Deformación Permanente
2	Capa Asfáltica	Fatiga: Top-down
3	Capa Asfáltica	Fatiga: Bottom-up
4	BEC	Fatiga
5	Subrasante	Deformación

Figura 4.13.- Resumen del análisis mecanicista para diseños con BEC

Fuente: Elaboración propia

4.3. Diseño por AASHTO 93 de pavimentos rígidos

Para el diseño de las variantes de pavimentos rígidos por AASHTO 93, se obtuvo losas de concreto con espesores que van de 15 cm para el nivel de tráfico medio hasta 32 cm para tráfico ultrapesado. Adicionalmente se utilizó sub-base de agregados con espesores de 20 a 30 cm para tráfico medio y pesado y el empleo de base estabilizada con cemento con espesores de 15 a 25 cm, para prevenir excesivos espesores de losas de concreto para niveles de tráfico muy pesado y ultrapesado. En la Figura 4.14 se presentan estos resultados.

DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS - AASHTO 93							
TRÁFICO MEDIO		TRÁFICO PESADO		TRÁFICO MUY PESADO		TRÁFICO ULTRA PESADO	
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton: 7,5 X 10 ⁵		NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton: 7,5 X 10 ⁶		NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton: 37,5 X 10 ⁶		NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton: 75 X 10 ⁶	
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93
25 VARIANTE 1	LC 15 cm (*)	25 VARIANTE 2	LC 22 cm	25 VARIANTE 3	LC 28 cm	25 VARIANTE 4	LC 32 cm
	SB 20 cm		SB 30 cm		BEC 25 cm		BEC 25 cm
	SR		SR		SR		SR
50 VARIANTE 5	LC 15 cm (*)	50 VARIANTE 6	LC 20 cm	50 VARIANTE 7	LC 26 cm	50 VARIANTE 8	LC 30 cm
	SB 20 cm		SB 30 cm		BEC 25 cm		BEC 25 cm
	SR		SR		SR		SR
75 VARIANTE 9	LC 15 cm (*)	75 VARIANTE 10	LC 22 cm	75 VARIANTE 11	LC 27 cm	75 VARIANTE 12	LC 30 cm
	SR		SR		BEC 20 cm		BEC 20 cm
					SR		SR
100 VARIANTE 13	LC 15 cm (*)	100 VARIANTE 14	LC 20 cm	100 VARIANTE 15	LC 25 cm	100 VARIANTE 16	LC 28 cm
	SR		SR		BEC 15 cm		BEC 15 cm
					SR		SR

SIMBOLOGÍA:
 LC: Losa de concreto
 SB: Subbase de agregados sin estabilizar
 BEC: Base estabilizada con cemento Portland
 SR: Subrasante
 (*) Por razones constructivas

Figura 4.14.- Resultados del diseño de pavimentos rígidos según AASHTO 93

Fuente: Elaboración propia

4.4. Diseño de whitetopping según el procedimiento del Departamento de Transporte de Texas

Para el diseño de las variantes de whitetopping delgados por Texas DOT, se obtuvo losas de concreto con espesores que van desde 14 cm para el nivel de tráfico medio hasta 20 cm para tráfico ultrapesado. Adicionalmente se utilizó una capa asfáltica (CA) de 10 cm para todos los casos y capas de subbase de agregados con espesores de 20 a 30 cm para tráfico medio y pesado o capas de base estabilizada con cemento con espesores de 15 a 25 cm, para niveles de tráfico muy pesado y ultrapesado. También es importante agregar que en estos diseños se asumió un valor único de módulo de CA, ya que esta no estará sometida a cambios fuertes de temperatura por estar bajo una losa de concreto, el valor asumido fue de 3150 MPa. En la Figura 4.15 se presentan estos resultados.

DISEÑO DE WHITETOPPING DELGADOS (TWT) METODO DE TEXAS								
TRÁFICO MEDIO		TRÁFICO PESADO		TRÁFICO MUY PESADO		TRÁFICO ULTRA PESADO		
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton: 7,5 X 10 ⁵		NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton: 7,5 X 10 ⁶		NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton: 37,5 X 10 ⁶		NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton: 75 X 10 ⁶		
Módulo resiliente de SR (MPa)	Texas		Módulo resiliente de SR (MPa)	Texas		Módulo resiliente de SR (MPa)	Texas	
	TWT + CA			TWT + CA			TWT + CA	
25 VARIANTE 1	TWT	14 cm	25 VARIANTE 2	TWT	16 cm	25 VARIANTE 3	TWT	14 cm
	CA	10 cm		CA	10 cm		CA	10 cm
	SB	20 cm		SB	30 cm		BEC	25 cm
	SR			SR			SR	
50 VARIANTE 5	TWT	14 cm	50 VARIANTE 6	TWT	15 cm	50 VARIANTE 7	TWT	14 cm
	CA	10 cm		CA	10 cm		CA	10 cm
	SB	20 cm		SB	30 cm		BEC	25 cm
	SR			SR			SR	
75 VARIANTE 9	TWT	15 cm	75 VARIANTE 10	TWT	18 cm	75 VARIANTE 11	TWT	15 cm
	CA	10 cm		CA	10 cm		CA	10 cm
	SR			SR			BEC	20 cm
							SR	
100 VARIANTE 13	TWT	14 cm	100 VARIANTE 14	TWT	17 cm	100 VARIANTE 15	TWT	16 cm
	CA	10 cm		CA	10 cm		CA	10 cm
	SR			SR			BEC	15 cm
							SR	
25 VARIANTE 4	TWT	18 cm	50 VARIANTE 8	TWT	18 cm	75 VARIANTE 12	TWT	19 cm
	CA	10 cm		CA	10 cm		CA	10 cm
	BEC	25 cm		BEC	25 cm		BEC	20 cm
	SR			SR			SR	
50 VARIANTE 6	TWT	18 cm	75 VARIANTE 10	TWT	19 cm	100 VARIANTE 14	TWT	20 cm
	CA	10 cm		CA	10 cm		CA	10 cm
	BEC	25 cm		BEC	25 cm		BEC	15 cm
	SR			SR			SR	

SIMBOLOGÍA:
 SB: Subbase de agregados sin estabilizar TWT: Whitetopping delgado (10-20 cm) CA: Capa Asfáltica
 BEC: Base estabilizada con cemento Portland SR: Subrasante (*) Por métodos constructivos

Figura 4.15.- Resultados del diseño de whitetopping

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO V

5. ANÁLISIS ECONÓMICO

En el presente capítulo se realizará un análisis económico de las todas las alternativas diseñadas anteriormente, para poder realizar una comparación cuantitativa y poder determinar si el uso de los pavimentos compuestos son una alternativa rentable económicamente en comparación con los pavimentos tradicionales.

Para poder establecer los precios de los distintos materiales (Tabla 5.1) se consultó a varias entidades tanto públicas como privadas como: Cámara de la Construcción de Guayaquil, HOLCIM, etc., para así determinar precios referenciales de acuerdo al mercado. A continuación se muestra la lista de precios con los cuales se trabajará en el análisis económico:

Tabla 5.1.- Precios unitarios referenciales utilizados para el análisis económico

PRECIOS UNITARIOS REFERENCIALES - VIAS Y PAVIMENTOS			
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PRECIO UNITARIO
1	CARPETA ASFÁLTICA e=5cm	m2	\$6,00
2	CARPETA ASFÁLTICA e=7,5cm	m2	\$9,00
3	CARPETA ASFÁLTICA e=10 cm	m2	\$12,00
4	IMPRIMACIÓN ASFÁLTICA	litro/m2	\$0,45
5	RIEGO DE LIGA	litro/m2	\$0,12
6	MATERIAL DE BASE	m3	\$20,00
7	MATERIAL DE SUB-BASE	m3	\$18,00
8	MATERIAL DE MEJORAMIENTO	m3	\$16,00
9	BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO	m3	\$50,00
10	LOSA DE HORMIGON CLASE A f'c=35 Mpa (350Kg/cm2)	m3	\$140,00
11	ACERO PARA BARRA DE AMARRE DE PASADORES	kg	\$1,50

Fuente: Elaboración propia

Estos precios consultados se tratan de precios directos, es decir que incluyen equipo, material y mano de obra.

Consideraciones

Para el cálculo de cantidades de obras se tomaron las siguientes consideraciones para fijar nuestra unidad patrón.

- **# Carriles:** 2
- **Ancho de carriles:** 3.65 m.
- **Longitud de carretera:** 100 m.
- La cantidad de riego de imprimación o riego de liga va a depender del número de capas asfálticas a colocar en obra y de la cantidad de litros/m² recomendado por el MTOP (ver Tabla 5.2) (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002)

Tabla 5.2.- Dosificación asumida para riego de liga y riego de imprimación

Descripción	Unidad	Cantidad
Riego de Imprimación	litros/m2	1,5
Riego de liga	litros/m2	0,4

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002)

- Para el acero de refuerzo, se consideró barras de amarre en la unión de juntas longitudinales y pasadores en la unión de juntas transversales del pavimento rígido, las losas serán de 3,65 x 5,00 metros.

5.2. Resultados

A continuación se muestran los resultados de los cálculos económicos (ver Figuras 5.1 y 5.2), procediéndose a comparar lo siguiente:

- Pavimento flexible (base granular) vs pavimento compuesto (base estabilizada con cemento)
- Pavimento rígido (losa de concreto convencional) vs pavimento compuesto (whitetopping sobre capa asfáltica)

ANÁLISIS ECONÓMICO - BASE GRANULAR VS BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO																			
TRÁFICO MEDIO			TRÁFICO PESADO			TRÁFICO MUY PESADO			TRÁFICO ULTRA PESADO										
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		5 X 10 ⁵	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		5 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		25 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		50 X 10 ⁶								
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93		Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93		Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93		Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93									
	BG	BEC		BG	BEC		BG	BEC		BG	BEC								
25 VARIANTE 1	CA	10 cm	CA	6 cm	25 VARIANTE 2	CA	16 cm	CA	10 cm	25 VARIANTE 3	CA	23 cm	CA	15 cm	25 VARIANTE 4	CA	25 cm	CA	18 cm
	BAG	25 cm	BEC	25 cm		BAG	25 cm	BEC	30 cm		BAG	30 cm	BEC	40 cm		BAG	30 cm	BEC	40 cm
	SB	26 cm	SB	20 cm		SB	25 cm	SB	30 cm		SB	30 cm	SB	30 cm		SB	30 cm	SB	30 cm
	SR		ME	20 cm		ME	30 cm	ME	40 cm		ME	30 cm	ME	55 cm		ME	32 cm	ME	55 cm
			SR			SR		SR			SR		SR			SR		SR	
Total	\$16.154,90		\$18.286,50		Total	\$25.309,10		\$26.462,50		Total	\$32.477,70		\$34.434,10		Total	\$34.463,30		\$34.959,70	
50 VARIANTE 5	CA	10 cm	CA	6 cm	50 VARIANTE 6	CA	16 cm	CA	10 cm	50 VARIANTE 7	CA	23 cm	CA	15 cm	50 VARIANTE 8	CA	25 cm	CA	18 cm
	BAG	25 cm	BEC	25 cm		BAG	20 cm	BEC	30 cm		BAG	25 cm	BEC	40 cm		BAG	25 cm	BEC	40 cm
	SR		SB	15 cm		SB	25 cm	SB	30 cm		SB	28 cm	SB	20 cm		SB	30 cm	SB	55 cm
			SR			SR		SR			ME	20 cm	SR			SR		SR	
			SR			SR		SR			SR		SR			SR		SR	
Total	\$12.738,50		\$15.293,50		Total	\$21.075,10		\$21.790,50		Total	\$27.980,90		\$30.200,10		Total	\$29.995,70		\$28.535,70	
75 VARIANTE 9	CA	10 cm	CA	6 cm	75 VARIANTE 10	CA	16 cm	CA	10 cm	75 VARIANTE 11	CA	23 cm	CA	18 cm	75 VARIANTE 12	CA	25 cm	CA	22 cm
	BAG	15 cm	BEC	25 cm		BAG	25 cm	BEC	30 cm		BAG	30 cm	BEC	30 cm		BAG	30 cm	BEC	30 cm
	SR		SB	15 cm (*)		SB	15 cm	SB	15 cm		SB	20 cm	SB	20 cm		SB	20 cm	SB	20 cm
			SR			SR		SR			SR		SR			SR		SR	
			SR			SR		SR			SR		SR			SR		SR	
Total	\$11.278,50		\$15.293,50		Total	\$18.520,10		\$19.819,50		Total	\$25.031,70		\$27.134,10		Total	\$26.783,70		\$31.601,70	
100 VARIANTE 13	CA	10 cm	CA	6 cm	100 VARIANTE 14	CA	16 cm	CA	12 cm	100 VARIANTE 15	CA	23 cm	CA	18 cm	100 VARIANTE 16	CA	25 cm	CA	22 cm
	BAG	15 cm (*)	BEC	22 cm		BAG	20 cm	BEC	28 cm		BAG	25 cm	BEC	30 cm		BAG	25 cm	BEC	30 cm
	SR		SR			SR		SR			SR		SR			SR		SR	
			SR			SR		SR			SR		SR			SR		SR	
			SR			SR		SR			SR		SR			SR		SR	
Total	\$11.278,50		\$12.446,50		Total	\$17.790,10		\$19.454,50		Total	\$24.301,70		\$24.506,10		Total	\$26.053,70		\$28.973,70	

SIMBOLOGÍA:

CA: Capa asfáltica

BAG: Base de agregados

BEC: Base estabilizada con cemento Portland

SB: Subbase de agregados

SR: Subrasante

(*) Por razones constructivas

ME: Mejoramiento

Figura 5.1.- Resultados de análisis económico BG vs BEC

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS ECONÓMICO - PAVIMENTO RÍGIDO (AASHTO 93) VS WHITETOPPING DELGADO (TEXAS DOT)											
TRÁFICO MEDIO			TRÁFICO PESADO			TRÁFICO MUY PESADO			TRÁFICO ULTRA PESADO		
NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		7,5 X 10 ⁵	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		7,5 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		37,5 X 10 ⁶	NO. DE EJES EQUIVALENTES 8,2 ton:		75 X 10 ⁶
Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Texas DOT	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Texas DOT	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Texas DOT	Módulo resiliente de SR (MPa)	Diseño AASHTO 93	Texas DOT
	Pavimento rígido	TWT + CA		Pavimento rígido	TWT + CA		Pavimento rígido	TWT + CA		Pavimento rígido	TWT + CA
25	JRCP 15 cm (*)	TWT 14 cm CA 10 cm	25	JRCP 22 cm	TWT 16 cm CA 10 cm	25	JRCP 28 cm	TWT 14 cm CA 10 cm	25	JRCP 32 cm	TWT 18 cm CA 10 cm
	SB 20 cm	SB 20 cm		SB 30 cm	SB 30 cm		BEC 25 cm	BEC 25 cm			
	SR	SR		SR	SR		SR	SR			
Total	\$17.694,92	\$26.681,50	Total	\$29.862,84	\$29.054,00	Total	\$39.352,84	\$30.368,00	Total	\$43.612,04	\$34.456,00
50	JRCP 15 cm (*)	TWT 14 cm CA 10 cm	50	JRCP 20 cm	TWT 15 cm CA 10 cm	50	JRCP 26 cm	TWT 14 cm CA 10 cm	50	JRCP 30 cm	TWT 18 cm CA 10 cm
	SB 20 cm	SB 20 cm		SB 30 cm	SB 30 cm		BEC 25 cm	BEC 25 cm			
	SR	SR		SR	SR		SR	SR			
Total	\$20.717,12	\$26.024,50	Total	\$27.818,84	\$28.032,00	Total	\$37.308,84	\$30.368,00	Total	\$41.568,04	\$34.456,00
75	JRCP 15 cm (*)	TWT 15 cm CA 10 cm	75	JRCP 22 cm	TWT 18 cm CA 10 cm	75	JRCP 27 cm	TWT 15 cm CA 10 cm	75	JRCP 30 cm	TWT 19 cm CA 10 cm
	SR	SR		SR	SR		BEC 20 cm	BEC 20 cm			
							SR	SR			
Total	\$19.403,12	\$24.418,50	Total	\$25.920,84	\$27.156,00	Total	\$36.870,84	\$29.930,00	Total	\$40.108,04	\$34.018,00
100	JRCP 15 cm (*)	WT 14 cm CA 10 cm	100	JRCP 20 cm	WT 17 cm CA 10 cm	100	JRCP 25 cm	WT 16 cm CA 10 cm	100	JRCP 28 cm	WT 20 cm CA 10 cm
	SR	SR		SR	SR		BEC 15 cm	BEC 15 cm			
							SR	SR			
Total	\$19.403,12	\$23.396,50	Total	\$23.876,84	\$26.134,00	Total	\$36.870,84	\$29.492,00	Total	\$36.604,04	\$33.580,00

SIMBOLOGÍA:

JRCP: Pavimento de hormigón armado

BEC: Base estabilizada con cemento Portland

SR: Subrasante

TWT: Whitetopping delgado

SB: Subbase de agregados sin estabilizar

(*) Por razones constructivas

Figura 5.2.- Resultados de análisis económico losas de concreto convencionales vs whitetoppings

Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En general el empleo de la base estabilizada con cemento (BEC) tiende a disminuir el espesor de carpeta asfáltica (CA) necesario en el diseño flexible por AASHTO 93. La disminución puede oscilar entre 4 y 8 cm en las variables estudiadas, independientemente de los espesores de las capas restantes. Por otra parte, en el proceso de diseño realizado con BEC, técnicamente los espesores de capa asfáltica podían haber sido menores aún, lo que implicaría espesores excesivos en BEC.
2. Ya que la metodología AASHTO 93 posee ciertas limitaciones como trabajar con una temperatura de diseño para la capa asfáltica de 20°C, lo cual desfavorece un análisis para las distintas regiones de nuestro país, se determinaron por razones prácticas las temperaturas medias ponderadas de las regiones Costa y Sierra, vinculadas con porcentaje de vehículos pesados que circulan por vías representativas de ambas regiones, estos resultados fueron 35°C en la Costa y 23°C en la Sierra. Con estos valores se determinaron los módulos dinámicos representativos de trabajo en las capas asfálticas en la Costa y Sierra, los cuales son 3145 y 6971 Mpa respectivamente, valores que son básicos para los análisis mecanicistas.
3. En el análisis mecanicista realizado a las variantes mencionadas, se pudo evidenciar que para el caso de las variantes de los pavimentos convencionales con base granular (BG) no se cumplen con todos los modelos de desempeño, siendo el más crítico la fatiga “top down” en capa asfáltica. En cambio las variantes que utilizan BEC cumplen satisfactoriamente con todos los criterios de fallos estudiados, debido a que el empleo de la BEC proporciona un alto grado de soporte a la capa asfáltica gracias al elevado módulo que le genera la adición del cemento Portland a la capa de base de agregados. Además del hecho validado de que las capas asfálticas producidas en el Ecuador, con tendencia al envejecimiento prematuro, trabajan de manera más eficiente sobre un soporte rígido como el que ofrecen las BEC.

4. Evidentemente al emplear los whitetoppings se obtiene una disminución importante en los espesores de losa en comparación con los pavimentos rígidos. Dicha disminución es más significativa en los mayores niveles de ESAL, reduciéndose de 8 a 14 cm de espesor de losa. No obstante, la solución con whitetopping presenta un espesor de capa asfáltica debajo, lo que implica que la solución final debe tomarse a partir de criterios económicos.

5. Se realizó un análisis económico, con costos directos en el momento actual, para determinar si el uso de pavimentos compuestos representa una alternativa rentable ante los pavimentos convencionales. Se comparó: 1) las alternativas de BG vs BEC, y también 2) las alternativas de losas convencionales vs las de whitetoppings. Los resultados obtenidos en la primera comparación determinan que el precio de las alternativas con BEC, son ligeramente mayores que las alternativas con BG, por lo general de \$200 a \$4,000. Y en la segunda comparación el uso de whitetoppings es desfavorable solamente para el nivel de tráfico medio, ya que no logra una disminución de espesor considerable en la losa de concreto, mientras que para tráfico pesado logra un ahorro muy importante entre \$3,000 a \$9,500. La unidad de patrón fue para una carretera de 2 carriles de 3,65m de ancho c/carril por 100 metros de longitud.

RECOMENDACIONES

1. Si bien los precios de los diseños de pavimentos compuestos con base estabilizada con cemento (BEC) son ligeramente mayores que los precios de pavimentos flexibles con base granular (BG), Se recomienda el empleo de las estructuras con BEC ya que se pudo comprobar por medio del análisis mecanicista, que éstos responden favorablemente a los diversos problemas estructurales y funcionales que tienden a presentar los pavimentos convencionales. Por ejemplo, los pavimentos compuestos no van a necesitar a largo plazo acciones de mantenimiento que si existirán en los pavimentos flexibles, tales como como bacheo, recapeos, etc. Esto sin duda aumentará el precio de las alternativas de pavimentos flexibles.
2. Para el caso de los diseños utilizando whitetoppings, se recomienda el uso de éstas estructuras en lugar de los diseños de losas de concreto convencionales solamente para altos niveles de tráfico (≥ 10 millones de ESAL), ya que desde este nivel existe una diferencia económica a favor de los whitetoppings.
3. Se recomienda prestar más atención en el país en el empleo de pavimentos compuestos. Por ejemplo, se tiene que trabajar seriamente para afinar alguna metodología de diseño de whitetopping que más convenga, para lo cual evidentemente será necesario crear tramos de prueba a nivel de obra.

7. BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. (Enero de 2007). *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*. Obtenido de <https://standards.globalspec.com/std/1283471/aashto-tp-62>

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Obtenido de <https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>

American Association of State Highway and Transportation Officials. (Julio de 2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)*. Obtenido de A Manual of a Practice: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428712666/AASHTO08.pdf>

Arce, M. (19 de Agosto de 2011). *Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales - Universidad de Costa Rica*. Obtenido de Bases estabilizadas con cemento: Algunas comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes: http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/boletines/boletin_prita_20_bases_estabilizadas_con_cemento.pdf

ARRB Group Ltd. (2003). Transport. Our Highway to a Sustainable Future. *Proceedings of the 21st ARRB and 11th REAAA Conference*. Cairns.

Asociación Dominicana de Productores de Cemento Portland. (2013). *Guía para el diseño de vías de alto volumen - Pavimentos Semi-rígidos*. Obtenido de <http://ficem.org/boletines/boletin-tecnico-2013/Guia-de-Pavimentos-Semirigididos-para-Carreteras-Alto-Volumen.pdf>

Avendaño, K., & López, P. (Abril de 2017). *Pontificia Universidad Católica del Ecuador*. Obtenido de "CONSTRUCCIÓN DE CURVAS MAESTRAS MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE OBTENIENDO EL MÓDULO DINÁMICO DE: PLANTAS ASFÁLTICAS DENTRO DE LA PROVINCIA DE IMBABURA:

<http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/13455/CONSTRUCCI%C3%93N%20DE%20CURVAS%20MAESTRAS%20MEDIANTE%20LA%20CARACTERIZACI%C3%93N%20DE%20MEZCLAS%20ASF%C3%81LTICAS%20EN%20CALIENTE%20OBTENIENDO%20EL%20M%C3%93DULO%20DIN%C3%81MICO%20DE%20PLANTAS%20>

Chul, S., Kim, D., & Won., M. (2008). *Development of the Thickness Design for Concrete Pavement Overlays over Existing Asphalt Pavement Structures*. Austin.

Díaz, L., & Pinzón, E. (Enero de 2014). *Universidad Militar Nueva Granada*. Obtenido de EFECTO DEL ESPESOR DEL CONCRETO ASFÁLTICO EN EL AGRIETAMIENTO POR FATIGA: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/10842/DiazSuarezLennyFarley2014.pdf;jsessionid=E96BA165131151A2E91C50D52D91B5EE?sequence=1>

Flintsch, G. W., Diefenderfer, B. K., & Nunez., O. (Noviembre de 2008). *Virginia Department of Transportation*. Obtenido de Composite Pavement Systems: Synthesis of Design and Construction Practices: http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/09-cr2.pdf

Giordani, C., & Leone, D. (2010). *Pavimentos*. Cátedra, UTN - Facultad Regional Rosario, Departamento de Ingeniería Civil , Rosario. Obtenido de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_ano/civil1/files/IC%20I-Pavimentos.pdf

Gordillo, C. (2017). *ESPECTROS DE CARGA DE ESTACIONES DE PESAJE WIM EN ECUADOR*. Guayaquil.

Gutiérrez, E. (Septiembre de 2012). *WHITETOPPING –UNA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN*. Obtenido de Definición: <https://docplayer.es/16518430-Whitetopping-una-alternativa-de-rehabilitacion.html>

- Harrington, D., & Fick, G. (Mayo de 2014). *IOWA STATE UNIVERSITY*.
Obtenido de Guide to Concrete Overlays: Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements (3rd edition) :
https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/08/Overlays_3rd_edition.pdf
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (Octubre de 2006). *MANUAL PARA LA INSPECCIÓN VISUAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES*. Obtenido de Tipos de daños en pavimentos flexibles:
<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles/file>
- Jaramillo, J. (2015). *Universidad Católica de Santiago de Guayaquil*. Obtenido de Estudio del comportamiento de las capas asfálticas ante las deformaciones plásticas en las diferentes regiones del Ecuador”:
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/3577/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-114.pdf>
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones. (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes - MOP-001-F2002*. Obtenido de Capítulo 400 - Estructura del pavimento:
https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf
- Sánchez Portal, F. (2017). *Pavimento Compuesto*. Universidad Privada del Norte, Ingeniería Civil, Trujillo.
- Vila, R. (2018). *PERSPECTIVAS DE LOS PAVIMENTOS COMPUESTOS EN ECUADOR*. Guayaquil.



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, Andrade Triviño, Nati Malena, con C.C: #0931665368 y Franco Puga, Fernando Xavier, con C.C: #1206807560, autores del trabajo de titulación: LOS PAVIMENTOS COMPUESTOS COMO ALTERNATIVA CONSTRUCTIVA PARA VÍAS DE TRÁFICO PESADO, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaramos tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizamos a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 12 de marzo del 2019

LA AUTORA

EL AUTOR

f. _____

Andrade Triviño, Nati Malena

C.C: 0931665368

f. _____

Franco Puga, Fernando Xavier

C.C: 1206807560



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA		
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN		
TEMA Y SUBTEMA:	LOS PAVIMENTOS COMPUESTOS COMO ALTERNATIVA CONSTRUCTIVA PARA VÍAS DE TRÁFICO PESADO.	
AUTOR(ES)	Nati Malena Andrade Triviño Fernando Xavier Franco Puga	
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Ing. Rolando Vila, PhD.	
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil	
FACULTAD:	Facultad de Ingeniería	
CARRERA:	Ingeniería civil	
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero civil	
FECHA DE PUBLICACIÓN:	12 de marzo del 2019	No. DE PÁGINAS: 115
ÁREAS TEMÁTICAS:	Pavimentos, carreteras, ingeniería de costos.	
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	ESAL, pavimentos compuestos, flexible, rígido, base estabilizada con cemento, whitetopping.	
RESUMEN/ABSTRACT:	<p>Los pavimentos compuestos en los últimos años han ganado protagonismo en muchos países. En Europa son conocidos por su larga duración en carreteras principales, demostrando el potencial para convertirse en una solución de pavimento rentable para autopistas con altos niveles de tráfico.</p> <p>En este trabajo se analizó el empleo de diferentes estructuras de pavimentos compuestos en vías de tráfico pesado en Ecuador mediante la aplicación de criterios técnicos de diseño y económicos, y a partir de comparaciones se valoró el papel práctico de dichas soluciones.</p> <p>Se diseñaron dos tipos de pavimentos compuestos: 1) capa asfáltica sobre base estabilizada con cemento y 2) whitetopping sobre capa asfáltica, mediante una matriz de diseño que relaciona diferentes niveles de ESAL con distintas calidades de subrasante. Estos pavimentos fueron comparados con los pavimentos convencionales flexibles y rígidos.</p> <p>Para el análisis mecanicista de los diseños de pavimentos flexibles se consideraron dos regiones del país: Costa y Sierra para considerar las distintas condiciones climáticas a las que podría estar sometido el pavimento. Como resultado se obtuvo un excelente comportamiento de la BEC al no fallar ante ningún modelo de desempeño.</p> <p>El diseño de whitetopping fue realizado por la metodología del Departamento de Transporte de Texas, los cuales se compararon con diseños según AASHTO 93 para losas convencionales. Como resultado se obtuvo la disminución de espesores de losas para whitetopping en tráfico pesado.</p> <p>A partir de los resultados obtenidos se realizaron comparaciones técnicas y económicas para identificar sus ventajas y desventajas con respecto a los diseños convencionales.</p>	
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-98-573-4087 +593-96-718-0883	E-mail: nati_andrade2@hotmail.com fernando_xavier_96@hotmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Clara Glas Cevallos	
	Teléfono: +593-4 -2206956	
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec	
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA		
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):		
Nº. DE CLASIFICACIÓN:		
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):		