



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

TÍTULO:

**“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CAPAS
ASFÁLTICAS ANTE LAS DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN
LAS DIFERENTES REGIONES DEL ECUADOR”**

AUTOR:

JARAMILLO BRICEÑO, JOSÉ GABRIEL

INGENIERO CIVIL

TUTOR:

ING. ROLANDO VILA ROMANÍ, PhD.

GUAYAQUIL, ECUADOR

2015



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente Trabajo de Titulación fue realizado en su totalidad por **José Gabriel Jaramillo Briceño**, como requerimiento parcial para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. Rolando Vila Romaní, Ph.D.

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Stefany E. Alcívar Bastidas Mgs.

Guayaquil, a los 18 días del mes de Marzo de 2015



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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **José Gabriel Jaramillo Briceño**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **“Estudio del comportamiento de las capas asfálticas ante las deformaciones plásticas en las diferentes regiones del Ecuador”** previa a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 18 días del mes de Marzo de 2015

EL AUTOR

José Gabriel Jaramillo Briceño



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

AUTORIZACIÓN

Yo, **José Gabriel Jaramillo Briceño**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“Estudio del comportamiento de las capas asfálticas ante las deformaciones plásticas en las diferentes regiones del Ecuador”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Guayaquil, a los 18 días del mes de Marzo de 2015

EL AUTOR

José Gabriel Jaramillo Briceño

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ayudarme a culminar una nueva etapa en mi vida y brindarme su bendición día a día.

A mi familia por su apoyo y esfuerzo a lo largo de mi tiempo de estudio y ser un pilar fundamental en mi vida.

Al Dr. Rolando Vila, por brindarme su amistad y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

José Gabriel Jaramillo Briceño

DEDICATORIA

Este logro quiero dedicarle a una mujer maravillosa que siempre fue mi ejemplo de superación y cada día me demostró que con esfuerzo y ganas nada es imposible, gracias mami por ti he llegado a ser quien soy.

José Gabriel Jaramillo Briceño



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

CALIFICACIÓN

ING. ROLANDO VILA ROMANÍ, PH.D.

PROFESOR TUTOR

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Razones que motivaron el estudio.....	3
1.3. Justificación del tema.....	4
1.4. Descripción del problema de investigación.....	5
1.5. Objeto del estudio.....	5
1.6. Objetivos.....	6
1.6.1. Objetivo general.....	6
1.6.2. Objetivos específicos.....	6
1.7. Hipótesis o premisas.....	7
1.8. Metodología.....	7
2. MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CARRETERAS.....	9
2.1. Cemento asfáltico.....	9
2.2. Propiedades Físicas y Químicas del asfalto:.....	11
2.2.1. Propiedades químicas del asfalto:.....	11
2.2.2. Propiedades físicas del asfalto:.....	12
2.2.2.1. Adhesión y Cohesión:.....	12
2.2.2.2. Durabilidad:.....	12
2.2.2.3. Susceptibilidad a la temperatura:.....	13
2.2.2.4. Endurecimiento y Envejecimiento:.....	13
2.3. Agregados Minerales.....	13
2.4. Mezcla Asfáltica:.....	14
2.4.1. Generalidades.....	14
2.4.2. Tipos de mezclas asfálticas:.....	15
2.4.3. Propiedades de las mezclas asfálticas.....	16
2.4.3.1. Estabilidad.....	16
2.4.3.2. Resistencia a deformaciones plásticas.....	16
2.4.3.3. Resistencia al deslizamiento.....	17

2.4.3.4. Durabilidad.....	17
2.4.4. Características de la mezcla asfáltica representativa del país:	18
CAPÍTULO III	20
3. DEFORMACIONES PLÁSTICAS (AHUELLAMIENTO) EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	20
3.1. Generalidades	20
3.2. Características que inciden en la formación de deformaciones plásticas en la mezcla asfáltica:	21
3.2.1. Granulometría de los agregados:	22
3.2.2. Textura y Angularidad	23
3.2.3. Tipo de Asfalto	23
3.2.4. Tránsito	24
3.2.5. Clima	24
3.3. Método de Van de Loo para la predicción de deformaciones plásticas	25
CAPÍTULO IV	29
4. ESTUDIO TEÓRICO – EXPERIMENTAL	29
4.1. Generalidades	29
4.2. Módulo de rigidez del cemento asfáltico (S_{bit}):.....	29
4.2.1. Resultados obtenidos.....	30
4.3. Módulo de rigidez mediante Creep Estático	31
4.3.1. Procedimiento del Ensayo Creep Estático	31
4.3.2. Módulo de rigidez promedio ($S_{mixprom}$)	44
4.3.3. Relación $S_{mix} - S_{bit}$	45
4.3.4. Representación gráfica de la relación $S_{mix} - S_{bit}$	46
4.4. Módulo de rigidez (E_{ac}) bajo deformación controlada	47
4.4.1. Resultados	48
4.4.2. Representación gráfica de resultados	48
CAPÍTULO V	50
5. CÁLCULO Y ANÁLISIS DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS (AHUELLAMIENTOS).....	50
5.1. Generalidades	50
5.2. Análisis del tráfico representativo a utilizar	50
5.3. Análisis de las temperaturas representativas a utilizar	52

5.3.1.	Temperatura ambiente de la Región Costa.....	52
5.3.2.	Temperatura de la carpeta asfáltica en la Región Costa.....	55
5.3.3.	Temperatura ambiente de la Región Sierra	59
5.3.4.	Temperatura de la carpeta asfáltica en la Región Sierra.	62
5.3.5.	Temperatura ambiente de la Región Amazónica.	66
5.3.6.	Temperatura de la carpeta asfáltica en la Región Amazónica	69
5.4.	Viscosidad dinámica de la mezcla asfáltica	71
5.5.	Módulos de rigidez (Eac) de las mezclas asfálticas para las temperaturas de trabajo determinadas.....	75
5.6	Diseño de estructuras de pavimentos según Método AASHTO 93	78
5.7.	Determinación del esfuerzo promedio en capa asfáltica	84
5.7.1.	Esfuerzos promedio de estructuras de diseño	88
5.8.	Determinación del S_{mix} y $S_{bit(visc)}$ para las estructuras de pavimentos diseñadas	89
5.8.1.	Cálculo de $S_{bit(visc)}$ para las estructuras de pavimentos diseñadas	90
5.8.2.	Cálculo de S_{mix} para las estructuras de pavimentos diseñadas por AASTHO 93.....	91
5.9.	Cálculo de las deformaciones plásticas (ahuellamiento) en estructuras diseñadas por AASTHO 93.....	93
5.10.	Niveles de ahuellamiento admisibles en carreteras.....	97
6.	CONCLUSIONES	101
7.	RECOMENDACIONES.....	103
8.	BIBLIOGRAFIA.....	104
9.	ANEXO	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características del Cemento Asfáltico AC-20.	10
Tabla 2: Porcentaje de asfalto, RICE	18
Tabla 3: Granulometría	18
Tabla 4: Valores de IP, Punto de ablandamiento.....	30
Tabla 5: Valores de módulo de rigidez del asfalto Sbit	30
Tabla 6: Briqueta 1, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 30°C.....	35
Tabla 7: Briqueta 2, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 30°C.....	36
Tabla 8: Briqueta 3, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 30°C.....	37
Tabla 9: Briqueta 4, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 40°C.....	38
Tabla 10: Briqueta 5, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 40°C.....	39
Tabla 11: Briqueta 6, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 40°C.....	40
Tabla 12: Briqueta 7, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 50°C.....	41
Tabla 13: Briqueta 8, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 50°C.....	42
Tabla 14: Briqueta 9, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 50°C.....	43
Tabla 15: Valores promedios de Smix para briquetas ensayadas a 30°C, 40°C, 50°C.....	44
Tabla 16: Valores de Smixprom para briquetas a 30°C, 40°C, 50°C	45
Tabla 17: Módulo de Rigidez promedio para briquetas de mezclas de planta. .	48
Tabla 18: Porcentajes de vehículos pesados por hora para cada mes.....	51
Tabla 19: Temperatura horaria de la Región Costa	54
Tabla 20: Medición de temperatura de la carpeta asfáltica a diferentes profundidades y temperatura ambiente.	57
Tabla 21: Temperatura de la carpeta asfáltica a 5cm de profundidad en la Región Costa.	58
Tabla 22: Temperatura horaria de la Región Sierra.....	61

Tabla 23: Medición de temperatura de la carpeta asfáltica a diferentes profundidades y temperatura ambiente.	64
Tabla 24: Temperatura horaria de la Región Amazónica.....	68
Tabla 25: Temperatura de la carpeta asfáltica a 5cm de profundidad en la Región Amazónica.....	70
Tabla 26: Valores de viscosidad dinámica para mezcla de planta bajo temperaturas de la Región Costa.	72
Tabla 27: Valores de viscosidad dinámica para mezcla de planta bajo temperaturas de la Región Sierra.	73
Tabla 28: Valores de viscosidad dinámica para mezcla de planta bajo temperaturas de la Región Amazónica.	74
Tabla 29: Módulos de rigidez Eac para temperatura de trabajo en la Región Costa	75
Tabla 30: Módulos de rigidez Eac para temperatura de trabajo en la Región Sierra	76
Tabla 31: Módulos de rigidez Eac para temperatura de trabajo en la Región Amazónica	77
Tabla 32: Esfuerzo en la capa asfáltica para estructura con SR: 500 Kg/cm ² a una temperatura de 30°C.....	85
Tabla 33: Esfuerzo promedio ponderado por hora para una estructura de ESAL: 500.000 y SR: 500 en la Región Costa.....	87
Tabla 34: Esfuerzo promedio ponderado para todas las estructuras diseñadas en la Región Costa.	88
Tabla 35: Esfuerzo promedio ponderado para todas las estructuras diseñadas en la Región Sierra.....	88
Tabla 36: Esfuerzo promedio ponderado para todas las estructuras diseñadas en la Región Amazónica.....	89
Tabla 37: Cálculo de Sbit(visc) para una estructura en la Región Costa con MR: 500 kg/cm ² y ESAL: 500.000 en el mes de enero.	91
Tabla 38: Módulo de rigidez Smix para las estructuras de pavimento diseñadas por AASTHO 93 en la Región Costa.	92
Tabla 39: Módulo de rigidez Smix para las estructuras de pavimento diseñadas por AASTHO 93 en la Región Sierra.	92
Tabla 40: Módulo de rigidez Smix para las estructuras de pavimento diseñadas por AASTHO 93 en la Región Amazónica.	93
Tabla 41: Ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Costa	94

Tabla 42: Resumen de los valores de ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Costa	95
Tabla 43: Ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Sierra	95
Tabla 44: Resumen de los valores de ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Sierra	96
Tabla 45: Ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Amazónica.....	96
Tabla 46: Resumen de los valores de ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Amazónica.....	97
Tabla 47: Número de ESAL admisibles en la Región Costa.....	98
Tabla 48: Número de ESAL admisibles en la Región Sierra.....	98
Tabla 49: Número de ESAL admisibles en la Región Amazónica.....	99
Tabla 50: ESAL y espesores necesario por alcanzar los 12 mm de ahuellamiento.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curva granulométrica.....	19
Figura 2: Deformaciones permanentes (Ahuellamiento).....	20
Figura 3: Nomograma Temperatura - Viscosidad	27
Figura 4: Ensayo Crep Estático en el equipo NAT.....	33
Figura 5: Salida de resultados del Software Static Creep.....	34
Figura 6: Gráfico de la relación $S_{mix} - S_{bit}$ para mezclas de Planta.....	46
Figura 7: Relación $E_{ac} -$ Temperatura de mezclas de planta	48
Figura 8: Temperatura horaria del aire en el mes de Enero que corresponden a las diversas ciudades de la Región Costa	53
Figura 9: Temperatura de trabajo horaria del mes de Enero que corresponde a la Región Costa	53
Figura 10: Distribución de la temperatura horaria de la Región Costa.....	54
Figura 11: Medición de las temperaturas de la capa asfáltica a diferente profundidades in situ.....	56
Figura 12: Distribución de la temperatura a diferentes profundidades de la carpeta asfáltica.....	56
Figura 13: Temperatura horaria del mes de Enero que corresponden a las diversas ciudades de la Región Sierra.....	59
Figura 14: Temperatura de trabajo horaria del mes de enero que corresponde a la Región Sierra	60
Figura 15: Distribución de la temperatura horaria de la Región Sierra.	61
Figura 16: Medición de las temperaturas de la capa asfáltica a diferente profundidades in situ.....	63
Figura 17: Distribución de la temperatura a diferentes profundidades de la carpeta asfáltica en la Región Sierra.	63
Figura 18: Temperatura horaria del mes de Enero que corresponden a las diversas ciudades de la Región Amazónica.	66
Figura 19: Temperatura de trabajo horaria del mes de enero que corresponde a la Región Amazónica.	67
Figura 20: Distribución de la temperatura horaria de la Región Amazónica	68
Figura 21: Ejemplo de diseño por AAHTO 93 para ESAL 500.000 ejes y $MR=500 \text{ kg/cm}^2$	79
Figura 22: Estructuras de pavimento para $MR=250 \text{ kg/cm}^2$	80
Figura 23: Estructuras de pavimento para $MR=500 \text{ kg/cm}^2$	81

Figura 24: Estructuras de pavimento para $MR=750 \text{ kg/cm}^2$	82
Figura 25: Estructuras de pavimento para $MR=900 \text{ kg/cm}^2$	83
Figura 26: Entrada de datos de ALIZE.....	84
Figura 27: Salida de resultados de ALIZE	85

RESUMEN

El presente trabajo de titulación realiza una evaluación del comportamiento del pavimento ante las deformaciones plásticas en las diferentes regiones del Ecuador, considerando una mezcla asfáltica densa con tamaño máximo $\frac{1}{2}$ " (12,5 mm).

Las deformaciones plásticas constituyen uno de los principales tipos de fallas en los pavimentos flexibles, originando las llamadas rodaduras o ahuellamientos, que son perjudiciales a la circulación vehicular y crean zonas de peligro por acumulación de agua.

Las deformaciones permanentes representa la acumulación de deformaciones plásticas que es generada por la aplicación de cargas reiteradas como las que producen el paso de los vehículos, además las condiciones de temperatura tiene una gran importancia, debido a que el comportamiento de las mezclas asfálticas tienen una directa relación con la temperatura a la que está expuesta.

Para la predicción de los ahuellamientos se utiliza el método de estimación de deformaciones permanentes desarrollado por Van de Loo, que considera la temperatura y la aplicación de cargas reiteradas del tránsito como factores importantes para la formación de los ahuellamientos, el cual se empleara en nuestro estudio sobre una mezcla asfáltica típica, en diseños de estructuras de pavimentos realizadas para diferentes condiciones de temperatura, calidad de subrasante y ejes simples equivalente de 8,2 ton (ESAL).

Se considera a las temperaturas por hora de un día representativo de cada mes a lo largo de un año en cada una de las diferentes regiones del Ecuador. Se tomaron los datos reales de transito de la Carretera E 25 que corresponde al tramo "Durán – Jujan.

Los resultados de ahuellamientos obtenidos en el presente trabajo de investigación permitieron determinar y recomendar espesores adecuados

bajo ciertas condiciones de tráfico y temperatura en las diferentes regiones del Ecuador, y compararlos con los espesores que recomienda AASTHO 93 bajo las mismas condiciones de tráfico y temperatura.

Palabras Claves: deformación plástica, ahuellamiento, temperatura, mezcla asfáltica, transito, Van de Loo, estructura de pavimento.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En las diferentes regiones del país es muy común encontrar pavimentos con ahuellamientos a los pocos años de su construcción, la presencia de estas fallas se deben principalmente al tráfico, aunque la variación de temperatura que se presenta durante la vida útil del pavimento es un factor que contribuye a la aparición de fallas.

La importancia de estudiar las deformaciones plásticas se debe a que esta es una de las fallas más comunes que se puede observar en nuestros pavimentos. Se conoce que a pesar de que los ahuellamientos generalmente no incitan a las fallas estructurales que se produce en los pavimento, tienen una importancia en la disminución de la calidad de servicio, ya que comprometen la seguridad, y la calidad en la circulación de los vehículos, reduciendo la vida efectiva del pavimento para la cual fue diseñada.

En el análisis de las deformaciones permanentes, se debe considerar la interrelación entre la calidad de la mezcla asfáltica, dada por su diseño, con el espesor de capa que la misma tendrá en la estructura del pavimento.

En el año de 1920, se publicó un método de diseño para mezclas asfáltica conocido como The Hubbard-Field, este método despertó un gran interés porque empezó a evaluar los contenidos de vacíos tanto para la mezclas como para los agregados, es decir dió inicio a una nueva manera de ver e interpretar

el diseño para mezclas asfálticas, empleando además un valor de deformación en una prueba precaria. Este método funciono adecuadamente para evaluar mezclas con agregados pequeños, pero no fue adecuado para mezclas con agregados gruesos.

Para el año de 1930, aparecieron nuevos métodos de diseño, uno de ellos se basó en el ensayo Marshall. El método Marshall analiza algunos parámetros como lo son, la estabilidad y porcentajes de vacíos. Este método no ha sufrido cambios con excepción de ciertos variantes en las especificaciones. Posteriormente aparecieron nuevos métodos como el Estabilómetro Hveem, y el procedimiento California Bearing Radio (CBR),

Al inicio de la de la década de los 60 la Shell Oil Company vinculo al diseño de pavimentos con mecanismos de fallas, considerando a las deformaciones permanentes y a la fatiga. A partir de esta aportación y durante los siguientes años en los trabajos publicados por los congresos “Internacional Conference on the Structural Design of Asphalt”, varios investigadores presentaron métodos adicionales de diseño considerando las deformaciones permanentes y la fatiga como principales factores de análisis. A finales de los 70’s, se produjo un gran interés por conocer de una mejor manera el comportamiento de las deformaciones permanentes en los pavimentos, y en 1974, Hills y Van de Loo desarrollaron un análisis muy interesante sobre las deformaciones permanentes en las capas asfálticas.

A partir de 1982, las investigación se enfocaron en la características de los materiales y como pueden influir en el comportamientos de los pavimentos y en desarrollar métodos que permitan predecir las deformaciones permanentes en los pavimentos, destacando el estudio de Eckmann quien combinó ensayos dinámicos de rotura con el análisis de las deformaciones de capa para determinar las deformaciones permanentes. Posteriormente el método del

Sistema de Análisis de Agregados de Mezclas Asfálticas (AAMAS) aportó como punto de partida del método SUPERPAVE, que corresponde al diseño más avanzado y preciso existente actualmente.

Considerando el gran interés e importancia que ha existido durante muchos años por conocer el comportamiento de las mezclas asfálticas ante las deformaciones permanentes, durante los últimos años las investigaciones se han enfocado en la influencia de las propiedades de los materiales al igual que en las cargas producidas por el tráfico y en la temperatura, y debido a la variación de estos factores en cada país, es importante seguir aportando a estas investigaciones.

1.2. Razones que motivaron el estudio

En el Ecuador las estructuras de pavimento son una pieza clave para la economía del país ya que generan beneficio de traslado en menor tiempo e inducen directamente a las actividades de producción como a la de turismo, por lo cual son de gran importancia para el desarrollo y como tal, el servicio que brinden los pavimentos deben ser óptimos para la población.

Una de las principales fallas que se producen en los pavimentos asfálticos son las deformaciones plásticas, y a pesar de aquello aún existe gran incertidumbre sobre el comportamiento de nuestras mezclas asfálticas ante estas deformaciones por lo cual se busca generar una mayor información sobre un problema real que se puede observar en nuestras carreteras.

1.3. Justificación del tema

En el Ecuador, el método de diseño de pavimentos vigente (AASHTO 93) no toma en cuenta las variaciones de temperaturas que se presentan en cada región geográfica (Costa, Sierra, Amazonía). En las deformaciones plásticas del pavimento tienen una gran importancia la ubicación climática (rango de temperatura). En nuestro país se presentan diferentes zonas climáticas por lo cual es importante realizar un análisis de las deformaciones plásticas en los diferentes climas que se presentan.

En el trabajo de titulación de André López Urgiles se realizó un estudio sobre el comportamiento de las mezclas asfáltica ante deformaciones plásticas pero aplicado solo en la ciudad de Guayaquil, el presente trabajo se enfoca en un estudio más profundo y amplio analizando el comportamiento de las mezclas asfálticas a las diferentes regiones del Ecuador tomando datos reales de la variación de temperatura por hora a lo largo de un año representativo (2013) en diferentes ciudades de la costa, sierra, amazonia, así como los datos reales de tráfico de una vía principal del país, en este caso la Carretera E 25, en el tramo “Duran – Jujan”, empleada en la tesis de André López Urgiles.

Como análisis CIENTÍFICO es de gran importancia debido a que con los resultados que se obtengan al realizar los diferentes ensayos y cálculos de esta investigación se pueden brindar recomendaciones para espesores bajo ciertas situaciones de ESAL y condiciones climáticas.

Desde el punto de vista SOCIAL las carreteras tiene una gran influencia para la economía en el país, por lo cual la presencia de fallas como los ahuellamientos en los pavimentos puede generar una afectación para el comerciante ecuatoriano, al igual que para el turismo y para muchos ámbitos más, por lo

cual es de gran importancia mejorar la durabilidad y conocer el comportamiento de las carreteras del país.

1.4. Descripción del problema de investigación

El problema de investigación está enfocado en el cálculo de deformaciones permanentes en las capas asfálticas, y cómo las condiciones climáticas de cada región del país pueden variar el comportamiento de una mezcla asfáltica típica del país aplicado para diferentes estructuras comunes, diseñadas por AASHTO 93.

En las diferentes regiones del país es posible encontrar pavimentos con ahuellamientos a los pocos años de su construcción, la presencia de estas fallas se deben principalmente al tráfico, aunque la variación de temperatura que se presenta durante la vida útil del pavimento es un factor que debe ser considerado para la predicción de las fallas.

1.5. Objeto del estudio

El objeto de estudio del presente trabajo es contribuir al proceso de investigación en Ecuador y brindar una mayor información con respecto a las deformaciones plásticas en la capa asfáltica y su comportamiento en el pavimento, y contribuir con criterio para analizar y estudiar a más profundidad la

influencia del clima de cada región ante los diversos tipos de fallas como las deformaciones permanentes.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Determinar el comportamiento de las deformaciones permanentes de una mezcla asfáltica típica del país, mediante el método de predicción de deformaciones plástica realizado por Van de Loo, considerando las tres regiones climáticas principales: Costa, Sierra y Amazonía.

1.6.2. Objetivos específicos

- Determinar si estructuras típicas diseñadas en el país por AASHTO 93 son adecuadas para, bajo las condiciones de tráfico y temperatura comunes de cada región, tienen un buen comportamiento ante las deformaciones plásticas.
- Comparar los espesores de capa asfálticas diseñados por AASHTO 93 con los espesores admisibles para garantizar niveles de ahuellamientos dentro del rango permitido, obtenidos en esta investigación.

1.7. Hipótesis o premisas

Existe una relación directa entre los factores climáticos y el comportamiento de mezclas asfálticas por lo que el comportamiento de nuestros pavimentos en las diferentes regiones del país no será el mismo. Considerando la influencia de la temperatura no es recomendable utilizar un mismo espesor de capa asfáltica (para igual condiciones de ESAL y SR) en todas las regiones debido a que el tipo de intensidad de las fallas que se presenten en el pavimento dependerá de las condiciones climáticas específicas de dicha región.

1.8. Metodología

La presente investigación se realizará mediante un enfoque cuantitativo y pertenece al tipo experimental, debido a que se busca relacionar el cambio de los factores climáticos en las diferentes regiones del Ecuador y el tráfico a lo largo del año con las deformaciones plásticas ocurridas.

La investigación responderá al método teórico-práctico con análisis y síntesis, y un enfoque sistémico estructural. Constará de 3 etapas.

- 1) Marco teórico conceptual.
- 2) Desarrollo experimental.
- 3) Análisis de resultados.

En cada una de las etapas antes enunciadas se desarrollarán tareas específicas:

1) Marco teórico conceptual:

- ✓ Revisión bibliográfica.
- ✓ Análisis de Métodos a utilizar.
- ✓ Descripción de cada prueba y procedimiento de trabajo, parámetros involucrados y fórmulas de cálculo.

2) Desarrollo experimental:

- ✓ Análisis de una mezcla asfáltica de planta con granulometrías combinadas que cumplen el uso de 12 mm ($\frac{1}{2}$ pulgada), con asfalto nacional AC-20.
- ✓ Elaboración de briquetas tipo Marshall con diámetro 102 mm (4 pulgadas) y altura próxima a 63 mm ($2 \frac{1}{2}$ pulgadas).
- ✓ Realización de las pruebas de Modulo de Rigidez bajo deformación controlada sobre 3 briquetas a 10°C, 20°C, 30°C Y 40°C.
- ✓ Aplicación del método Van de Loo a diferentes diseños de espesores empleando los resultados experimentales obtenidos.

3) Análisis de resultados:

- ✓ Correlaciones entre los resultados obtenidos.
- ✓ Conclusiones.
- ✓ Recomendaciones.

CAPÍTULO II

2. MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CARRETERAS

2.1. Cemento asfáltico

El asfalto es un material negro, cementante, cuya consistencia varía dependiendo de la temperatura, a temperaturas ambientes normales se presenta en solido o semisólido (solido blando), mientras que la temperatura va aumentando el asfalto se ablanda hasta que se calienta lo suficiente y se vuelve líquido.

En ingeniería civil el asfalto es usado principalmente en pavimentación, es un material viscoso y pegajoso lo cual es de gran ayuda al mezclarlo con las partículas de agregado durante la producción de mezclas en caliente. Es un excelente cemento para unir las partículas porque se adhiere con una facilidad a las partículas además es un excelente material impermeabilizante.

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), en sus especificaciones indica que el cemento asfáltico a emplearse en todo el Ecuador, es el AC-20 según la ASTM D-3381 (Tabla 1).

PROPIEDAD	NORMA	UNIDAD	AC 20	
			Mínimo	Máximo
Penetración, 25 °C, 100g.,5s.	ASTM D-5	0.1 mm	60	-
Flash Point, Copa Cleveland	ASTM D-92	°C	232	-
Viscosidad Dinámica 60 °C	ASTM D-4402	cP	160.000	240.000
Viscosidad Cinemática, 135 °C	ASTM D 2170	cSt	300	
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%w	99	-
ENVEJECIMIENTO TFOT, 163 °C, 5h				
Ductilidad,25°C, 5cm/min	ASTM D 113	cm	50	-
Viscosidad Dinámica 60 °C	ASTM D 4402	cP	-	1.000.000

Tabla 1: Características del Cemento Asfáltico AC-20.

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (MTO, 2002).

Las propiedades del asfalto cambian cuando se endurece durante el proceso de mezclado y colocación en obra más el paso del tiempo una vez construida la capa (envejecimiento). Disminuye la capacidad de adherirse a las partículas de agregado, su ductilidad disminuye también por lo que tiende a hacerse más frágil. Es importante considerar estos cambios porque al conocer el comportamiento del asfalto se puede tomar medidas para retardar el proceso de endurecimiento.

2.2. Propiedades Físicas y Químicas del asfalto:

2.2.1. Propiedades químicas del asfalto:

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo hacen muy versátil como material de construcción de carreteras.

Una breve introducción de las propiedades más importantes ayudará a entender la naturaleza de los pavimentos de mezclas en caliente. Se puede observar que para el control de calidad del asfalto ninguna se basa en relacionar o mencionar composición química. Esto puede ser sorprendente, debido a que la composición química es ciertamente uno de los medios usados, más precisos, para identificar las propiedades de cualquier sustancia. Sin embargo, existen varias razones por las cuales la química no ha llegado a ser parte de los sistemas de control.

- En la actualidad no hay prueba normal para composición química de asfalto que se aceptada mutuamente por los vendedores, los compradores y los usuarios del material.
- Los ensayos existentes para analizar composición química requieren de equipos sofisticados pericia técnica que no está disponible en la mayoría de los laboratorios donde se hacen prueba de asfaltos.
- La relación entre la composición química del cemento asfáltico y su comportamiento en estructura del pavimento es todavía incierta. Respecto a esto todavía hay muchas preguntas sin contestar.

De todas maneras, una breve descripción de la química del asfalto ayudara a entender la naturaleza del material. Básicamente, el asfalto está compuesto por

varios hidrocarburos y algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. (Asphalt Institute).

2.2.2. Propiedades físicas del asfalto:

Las propiedades físicas del asfalto intervienen mayormente en el diseño y la construcción, entre las propiedades más importantes tenemos: adhesión, durabilidad, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

2.2.2.1. Adhesión y Cohesión:

Es la capacidad de poder adherirse a los agregados en las mezclas asfálticas y actuar en el pavimento como cemento para formar la capa de rodadura. Mientras que la cohesión es la propiedad que permite mantener firmemente las partículas de agregado una vez terminado el pavimento.

2.2.2.2. Durabilidad:

Es la propiedad que permite identificar que tanto un asfalto puede mantener sus características originales mientras es expuesto a medios normales de envejecimiento. Esta propiedad es tomada viendo cómo se comporta el pavimento por lo que no solo se puede tomar al pavimento para medirlo

2.2.2.3. Susceptibilidad a la temperatura:

Los asfalto son termoplásticos, cuando la temperatura disminuye se vuelven más viscosos toman una forma casi sólida, y mientras la temperatura aumenta los asfalto se vuelven más blandos tomando una forma casi líquida. Las propiedades del asfalto varían con la temperatura, dos asfaltos de diferente origen pueden tener la misma viscosidad una temperatura pero si aumentamos la temperatura la viscosidad será diferente en la nueva temperatura.

2.2.2.4. Endurecimiento y Envejecimiento:

El endurecimiento del asfalto en las mezclas asfálticas se debe principalmente a la oxidación, que ocurre cuando se encuentra a altas temperaturas, es decir mientras se produce el proceso de mezclado con los agregados. Cuando el pavimento está terminado, el endurecimiento continúa produciéndose solo que de forma más lenta.

2.3. Agregados Minerales

En Las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (MTO, 2002) los agregados se clasifican en tres tipos A, B y C.

- Tipo A: Son aquellos en los cuales las partículas que conforman el agregado grueso se obtienen por trituración. El agregado fino puede ser

arena natural o material triturado y, se puede añadir relleno mineral para cumplir las exigencias de graduación.

- Tipo B: Son aquellos en los cuales por lo menos el 50% de las partículas que conforman el agregado grueso se obtienen por trituración. El agregado fino y el relleno mineral pueden ser triturados o provenientes de depósitos naturales.
- Tipo C: Son aquellos provenientes de depósitos naturales o de trituración, según las disponibilidades propias de la región, siempre que se haya verificado que la estabilidad, medida en el ensayo de Marshall.

2.4. Mezcla Asfáltica:

2.4.1. Generalidades

La mezcla asfáltica en caliente es la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, buscando que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la ambiente. (Pliego de Prescripciones Técnicas Generales art. 542 y 543 PG-3.).

Comúnmente se utiliza dos métodos de diseño de mezclas asfálticas de pavimentación, ellos son el Método Marshall y el Método Hveem. Cualquiera de estos métodos puede usarse con resultados satisfactorio, realmente la elección

de cada método depende del gusto del diseñador, ya que cada uno tiene características particulares.

Las mezclas asfálticas es el material de pavimentación más popular que se usa en Ecuador. Cuando se usa en la construcción de carretera debe resistir las cargas que produce el tráfico con el fin de evitar fallas como las deformaciones permanentes o fatiga.

2.4.2. Tipos de mezclas asfálticas:

Las mezclas asfálticas se pueden clasificarlas de varias maneras, dependiendo de algunos parámetros como los siguientes:

- **Fracciones de agregado pétreo:** Las cuales dan origen a subdivisiones como el mástico asfáltico, mortero asfáltico, macadam asfáltico y concreto asfáltico.
- **Temperatura:** partiendo de este parámetro se pueden subdividir en mezclas en caliente y mezclas en frío
- **Porcentaje de vacíos de aire:** las mezclas pueden presentar como densas o cerradas (menos de 6%), semidensas o semicerradas (entre el 6% y 12%), abiertas y porosas (entre el 12% y 18% o más del 20%).
- **Granulometría:** Bajo este parámetro las mezclas asfálticas pueden ser continuas o discontinuas. (Garnica et al,2005).

2.4.3. Propiedades de las mezclas asfálticas

Las principales propiedades de las mezclas asfálticas pueden resumirse bajo las siguientes consideraciones, mencionadas en el trabajo de titulación de Andrés Andaluz en el 2013

2.4.3.1. Estabilidad

Es la capacidad de poder soportar el paso de las cargas y de resistir tensiones, las cuales se producen por deformaciones tolerables. Se suelen comprobar esta propiedad mediante ensayos empíricos, entre los principales se encuentran: Marshall, Hveem y Hubbard-Field.

El contenido del cemento asfáltico es uno de los factores que influyen en la estabilidad de la mezcla asfáltica, aunque hay otros factores que influyen como la angularidad y caras fracturadas del árido, tamaño, etc.

2.4.3.2. Resistencia a deformaciones plásticas

Esta propiedad es importante considerarla ya que debido al comportamiento visco-elástico del material asfáltico, el paso de las cargas vehiculares en condiciones de elevadas temperaturas o de menores velocidades puede producirse deformaciones en la mezcla.

2.4.3.3. Resistencia al deslizamiento

Las mezclas que se emplean en capas de rodadura deben de aportar una resistencia ante el deslizamiento, y que puedan mantenerse por mucho tiempo. Si se trata de carreteras con un mucha influencia de tráfico, los áridos que se van a emplear adquieren un alto coeficiente de pulido y que la macrotextura de la mezcla en obras sea áspera, pero no demasiado ruidosa.

2.4.3.4. Durabilidad

Existen factores que pueden afectar la durabilidad de la mezcla asfáltica, como son:

- ✓ Radiación solar.
- ✓ Oxidación del cemento asfáltico por efecto del aire y el agua.
- ✓ Derrame de aceites y combustibles.

El fenómeno llamado “envejecimiento” de las mezclas asfálticas puede llegar a ser muy complejo, ya que sus causas son varias, y las cuales pueden ser irreversibles.

La durabilidad se pone de manifiesto debido a sus micro-fisuras, migración del cemento, etc. De esta forma pueden producir baches, peladuras, calles averrugadas, etc.

2.4.4. Características de la mezcla asfáltica representativa del país:

ENSAYO RICE		Extracción de asfalto			
				Peso Mat. Antes	1220
				Peso Mat. Después	1123,1
Peso Material (A)	1500	Peso Filtro Antes	14,5		
Peso F. + Agua (B)	7124	Peso Filtro Después	16,5		
P.F + Agua + Mat (C)	8054	Diferencia de Filtro	3		
RICE = A/(A+B-C)	2,63	% Asfalto	6,00		

Tabla 2: Porcentaje de asfalto, RICE

Abertura de Tamices		Peso Ret. Acumulado (gr)	%Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado	Especif. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19	0	0	100	100	100
1/2"	12,7	76	6,72	93	90	100
# 4	4,75	449	39,77	60	44	74
# 8	2,36	643	57	43	28	58
# 50	0,3	945	83,79	16	5	21
# 200	0,1	1065	94,39	6	2	10
Fondo	Fondo	1128				
ESPECIFICACIÓN: 1/2" MOP- 001 F-2002. TABLA 405-5.1.						

Tabla 3: Granulometría

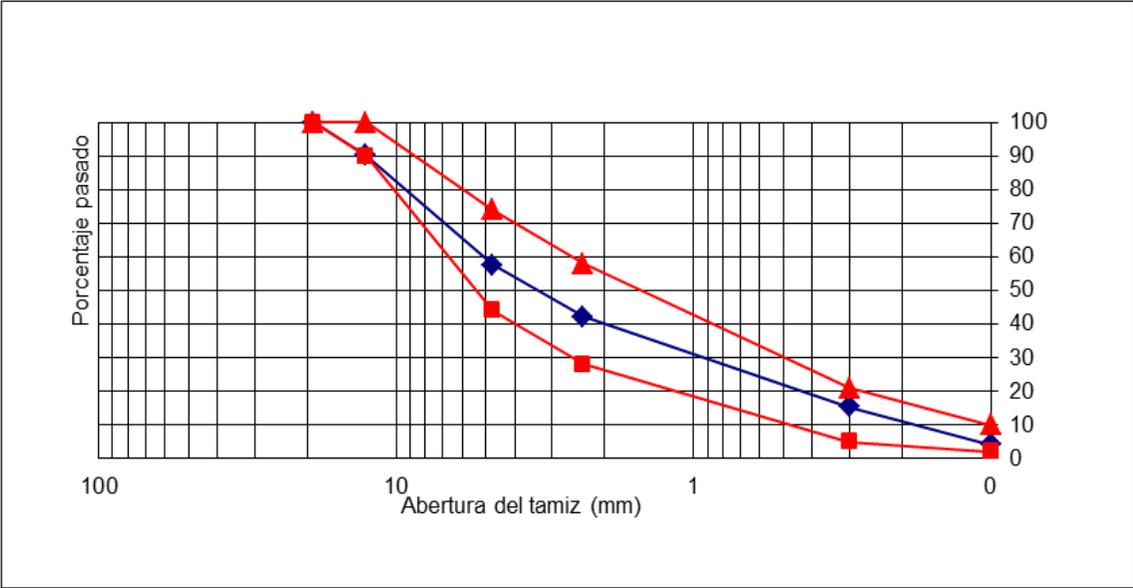


Figura 1: Curva granulométrica

CAPÍTULO III

3. DEFORMACIONES PLÁSTICAS (AHUELLAMIENTO) EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.1. Generalidades

Las deformaciones plásticas en las mezclas asfálticas, comúnmente se presente en el pavimento en forma de pequeños canales llamados ahuellamientos, ver Figura 2. Consiste en depresiones longitudinales a lo largo de la trayectoria de la circulación de los vehículos, que se producen por la acumulación de pequeñas deformaciones irrecuperables causadas por la aplicación de cargas producidas por el paso de los neumáticos sobre el pavimento.

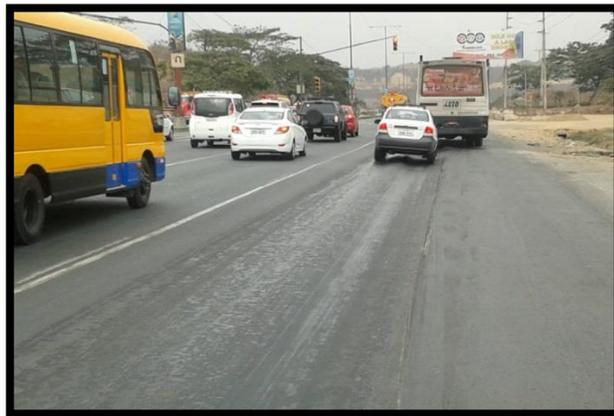


Figura 2: Deformaciones permanentes (Ahuellamiento)

Fuente: Manual de Evaluación de Pavimentos

Las deformaciones permanentes es uno de los tipos de deterioro más comunes por lo cual es de gran interés dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente. La principal características de las deformaciones plásticas es la presencia de una sección transversal de la superficie que ya no se encuentra en su posición original, este deterioro se presenta en mayor magnitud en ambientes con temperaturas relativamente altas. Por lo cual es de gran importancia tener una mezcla que esté diseñada con un cemento asfáltico consistente, lo más cercano a un sólido elástico mientras este expuesto a altas temperaturas para soportar esfuerzos de corte, y evitar que se comporte como líquido donde la resistencia al corte es casi nula, provocando los ahuellamientos. Las deformaciones por fallas en la capa asfáltica es el tipo más común que enfrenta los ingenieros civiles, y se produce por baja capacidad de soportar esfuerzos de corte, característicos de mezclas débiles, ya que va acumulando pequeñas deformaciones plásticas, al paso de cada vehículo, los ahuellamientos puede ocurrir en la parte superior de la capa asfáltica o debido a debilitamiento en la parte inferior de la capa asfáltica.

Hofstra y Klomp (1972) encontraron que la deformación a través de las capas de concreto asfáltico es mayor cerca de la superficie donde se aplican las cargas y gradualmente decrece en las capas inferiores.

3.2. Características que inciden en la formación de deformaciones plásticas en la mezcla asfáltica:

Existe una serie de características que intervienen en la formación de deformaciones permanente, entre las principales tenemos:

- Granulometría de los agregados
- Textura y Angularidad
- Tipo de Asfalto
- Transito
- Clima

3.2.1. Granulometría de los agregados:

La granulometría de una mezcla asfáltica es de gran importancia para tener una buena resistencia a las deformaciones. Existen investigaciones que han demostrado que las granulometrías densas proporcionan un mejor comportamiento frente a las deformaciones. Al compactar una mezcla con granulometría densa se obtiene mezclas con menor porcentaje de vacíos y por consiguiente existe un mayor contacto entre partículas, a diferencia de las mezclas asfálticas con granulometría abierta donde el contacto entre partícula es menor generando un mayor porcentaje de vacíos.

En 1974, Brown y Pell luego de una serie de investigaciones llegaron a la conclusión que las mezclas abiertas o de granulometría discontinua son más propensas a sufrir deformaciones plásticas y son aún más vulnerables a los ahuellamientos a temperaturas altas, que las mezclas densas o elaboradas con granulometrías continuas las cuales presentaban un mejor comportamiento.

3.2.2. Textura y Angularidad

La textura y angularidad del agregado es una característica que afecta la trabajabilidad de la mezcla asfáltica y también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida útil. Los agregados de textura rugosa proporcionan una mayor resistencia a las deformaciones que los agregados de caras lisas

Uge y Van de Loo en 1974 realizaron ensayos de laboratorio de deformaciones creep para dos mezclas con la misma curva granulométrica, con la diferencia que una fue elaborada con agregados triturados y la otra con agregados de caras redondeadas, llegando a la conclusión que las mezclas asfálticas elaboradas con agregados angulares tienen una mayor resistencia a deformaciones plásticas que las mezclas asfálticas que fueron elaboradas con agregados de cara lisas procedentes de río.

3.2.3. Tipo de Asfalto

Todos los asfaltos presentan un comportamiento termoplástico. A medida que la temperatura disminuye el asfalto tiene un comportamiento de un sólido elástico, mientras que a temperaturas altas se presenta como un fluido viscoso puro.

Debido a la susceptibilidad que presenta el asfalto ante la temperatura, es importante conocer las condiciones climáticas que soportara el pavimento, para poder diseñar mezclas adecuadas, y evitar que a altas temperaturas se presenten los ahuellamientos y a bajas temperaturas aparezcan fisuras.

3.2.4. Tránsito

Dentro de los diferentes factores que intervienen en el análisis de deformaciones plásticas, el tránsito vehicular es uno de los principales factores que se debe considerar.

Se conoce que los vehículos pesados son los que cumplen un papel preponderante en la formación de ahuellamientos. Las cargas que producen los vehículos pesados se pueden ver acrecentada por la circulación de camiones con peso mayor al permitido y a bajas velocidades. Las mezclas asfálticas se encuentra en un constante estado de carga y descarga, y estos estados se ven afectados cuando los vehículos pesados transitan a bajas velocidades disminuyendo el tiempo para relajar las tensiones producidas por la presión de las llantas, produciendo un aumento de la componente plástica de la mezcla que incrementan las deformaciones permanentes.

3.2.5. Clima

Es conocido que el comportamiento de las mezclas asfálticas cambia con la temperatura a la cual se encuentre, para temperaturas elevadas la mezcla presenta un comportamiento más viscoso y menos elástico, produciendo una reducción en la rigidez y por lo tanto exponiéndose a la aparición de deformaciones permanentes.

Por lo tanto el clima es un factor que influye directamente en las deformaciones permanentes presentes en los pavimentos, porque altera el comportamiento de las mezclas asfálticas aumentando la componente plástica que genera una reducción en la resistencia a las deformaciones.

Monismith et al. (1994) ratificaron que el aumento de la temperatura en las mezclas asfálticas genera un decremento en la resistencia a la generación de roderas.

3.3. Método de Van de Loo para la predicción de deformaciones plásticas

Para este método de predicción Van de Loo desarrollo una expresión en la cual relaciona tres factores que intervienen directamente con la presencia de ahuellamientos en los pavimentos flexibles, los cuales son la componente viscosa de la mezcla asfáltica, las tensiones que se presentan en la capa asfáltica producida por el paso de los vehículos y el espesor de la capa asfáltica, ver Ecuación 1.

Ecuación 1

$$\Delta h = h * \frac{\sigma_{prom}}{S_{mix}} * C_m$$

Donde:

Δh : Profundidad del ahuellamiento (mm).

h : Espesor de capa asfáltica (mm).

σ_{prom} : Tensión vertical promedio a compresión actuando capa asfáltica (MPa)

S_{mix} : Módulo de rigidez de la mezcla correspondiente componente viscosa de S_{bit} (MPa)

C_m : Factor de corrección dinámica (entre 1 y 2)

Un aspecto clave en el método de predicción desarrollado por Van de Loo es la relación establecida entre el módulo de rigidez de la mezcla (S_{mix}) contra el módulo de rigidez del betún (S_{bit}).

Se conoce que este método se basa en el ensayo creep estático el cual consiste en medir las deformaciones que ocurren en una briqueta de mezcla asfáltica, a cierta temperatura, debido a la acción de una tensión axial constante en un tiempo determinado. A partir de las lecturas realizadas en el ensayo de creep estático es posible calcular el módulo de rigidez de la mezcla asfáltica (S_{mix}), mientras que el módulo de rigidez del betún (S_{bit}) es calculado en base a las características del betún.

Como se mencionó anteriormente la relación entre $S_{mix} - S_{bit}$ es el pilar del método desarrollado por Van de Loo para la predicción de las deformaciones plásticas, la forma más efectiva de caracterizar el comportamiento creep es mediante una curva S_{mix} vs S_{bit} la cual es independiente del tiempo de carga, de la temperatura o del nivel de tensión, además permite hallar un valor de S_{mix} correspondiente a un valor de S_{bit} .

Se debe recordar que las deformaciones plásticas se desarrollan por la componente viscosa de la mezcla por lo cual se debe determinar un módulo de rigidez del betún viscoso, el cual está relacionado con las condiciones climáticas, la viscosidad del ligante y el número de cargas por ruedas estándar esperadas en la vida del pavimento ver Ecuación 2. A partir de esta nueva componente ($S_{bit,visc}$), se ingresa a la curva $S_{mix} - S_{bit}$ para encontrar el verdadero valor que corresponde al módulo de rigidez de la mezcla, mediante la curva.

Ecuación 2

$$S_{bit(visc)} = \frac{3}{t_w * \sum \left(\frac{N_i}{\eta}\right)_{T_i}}$$

Donde η es la viscosidad dinámica del ligante, la cual es función de la temperatura T y de la calidad del asfalto que se utilice, η se obtiene a partir del nomograma mostrado en la Figura 3. Mientras que N_i es el número de pases de cargas por ruedas estándar y t_w es el tiempo que dura cada pase.

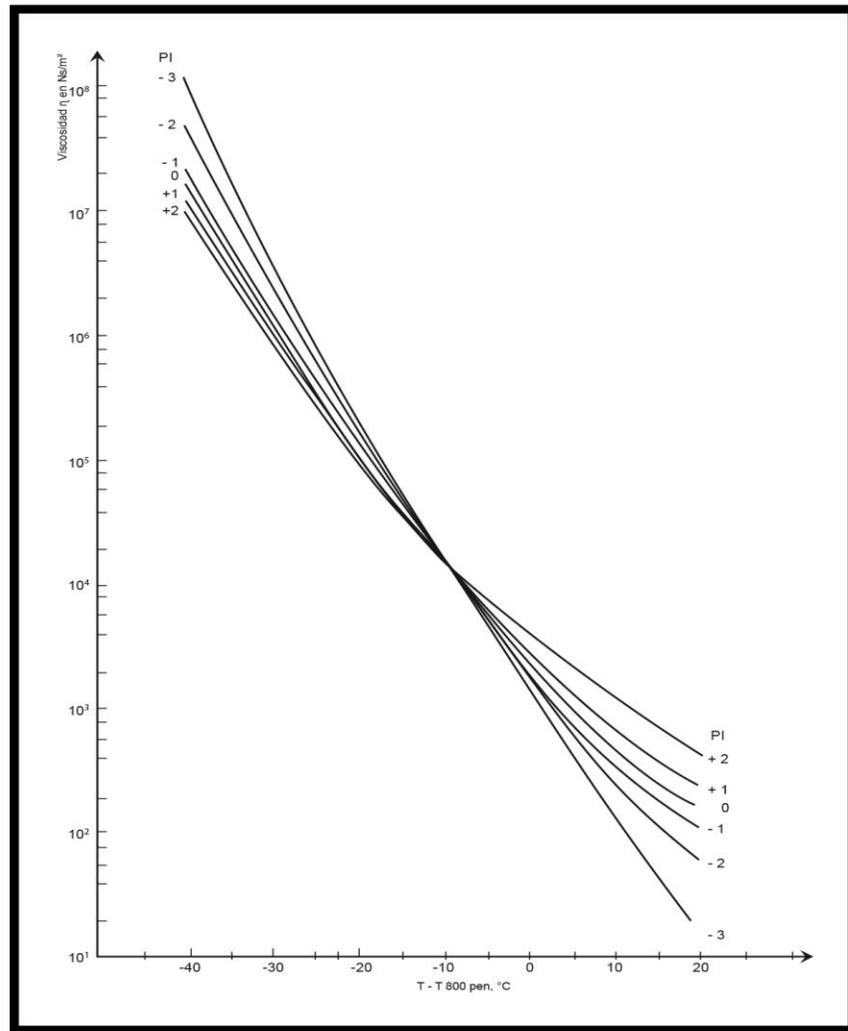


Figura 3: Nomograma Temperatura - Viscosidad

En el ensayo Creep que se realiza en el laboratorio se producen deformaciones iguales que en la capa de pavimento real a menores tensiones. Esto se debe a una distribución uniforme de tensiones aplicadas sin confinamiento lateral. Por esto, una tensión efectiva (σ_{ef}) la cual es menor que la tensión de contacto (σ_0) será definida de la manera que se muestra a continuación. Ver Ecuación 3.

Ecuación 3

$$\sigma_{ef} = Z * \sigma_0$$

Donde Z es la relación de las tensiones en la muestra creep y la tensión de contacto neumático-pavimento que causan una deformación similar en la capa de pavimento. No obstante, en la práctica usual σ_{ef} es considerada como la tensión vertical promedio actuante en la capa asfáltica (σ_{prom}) pudiéndose obtener ésta a través de cálculos tenso-deformacionales empleando algún software apropiado como el BISAR, ALIZE, CHEVROM, ROSY entre otros.

Por otro lado el valor de C_m es definido como un factor de corrección por efecto dinámico, en el cual se considera las diferencias entre creep estático y comportamiento dinámico, además de los diversos factores constructivos que se pueden encontrar en obra, su valor puede variar entre 1 y 2.

Es conveniente destacar que un interesante trabajo sobre el empleo de este método de predicción fue desarrollado en Cuba como parte del desarrollo de su normativa de diseño de pavimentos, el cual fue expuesto en el 8avo Congreso Ibero-Americano del Asfalto que se desarrolló en Bolivia por el Ing. Rolando Vila Romani, PhD. en 1995 .

CAPÍTULO IV

4. ESTUDIO TEÓRICO – EXPERIMENTAL

4.1. Generalidades

Para el presente trabajo de titulación se requiere conocer tres parámetros importantes:

- Módulo de rigidez del asfalto (S_{bit}).
- Módulo de rigidez de la mezcla determinado con ensayo Creep Estático (S_{mix}).
- Módulo de rigidez de la mezcla bajo deformación controlada (E_{ac}).

4.2. Módulo de rigidez del cemento asfáltico (S_{bit}):

Para determinar el S_{bit} , se requiere la ayuda del programa BANDS 2.0, del software de diseño de pavimento por el Método SHELL. Este programa determina los módulos del betún considerando cierta información sobre la calidad del asfalto obtenida a partir de los ensayos de control de calidad del betún, los cuales ya fueron mostrados en la Tabla.1, siendo los valores específicos a emplear los resumidos en la Tabla 4. Además de la información sobre el asfalto, el programa requiere conocer los diferentes tiempos de carga y las temperaturas de análisis.

Propiedad	Norma	Unidad	Asfalto de mezcla de planta
Índice de penetración	NLT 181		-0,3
Penetración, 25°C, 100 gr., 5s	ASTM D5	0,1mm	44
% Penetración del envejecido		%	69,8
Punto de ablandamiento	ASTM D-36	°C	55

Tabla 4: Valores de IP, Punto de ablandamiento

Fuente: Análisis de asfaltos, planta HeH del km26

Los tiempos de carga empleados fueron los mismos escogidos para el cálculo de Smix obtenido por la prueba Creep. Se consideraron diferentes temperaturas de análisis que fueron: 30°C, 40°C y a 50°C, como se observa en la Tabla 5.

4.2.1. Resultados obtenidos

Módulo de rigidez del cemento asfáltico			
Segundos	30°C	40°C	50°C
T	Sbit (MPa)		
2	2,17E-01	2,86E-02	4,49E-03
6	8,75E-02	1,06E-02	1,57E-03
10	5,45E-02	6,63E-03	1,06E-03
20	2,94E-02	3,43E-03	5,59E-04
40	1,59E-02	1,75E-03	2,82E-04
60	1,09E-02	1,28E-03	1,88E-04
100	6,80E-03	8,37E-04	1,14E-04
300	2,33E-03	2,89E-04	4,39E-05
600	1,31E-03	1,46E-04	2,29E-05
900	9,42E-04	9,84E-05	1,52E-05
1200	7,26E-04	7,71E-05	1,12E-05
1500	5,88E-04	6,39E-05	9,00E-06
1800	4,94E-04	5,58E-05	7,66E-06
2700	3,31E-04	3,79E-05	5,37E-06
3600	2,49E-04	2,89E-05	3,93E-06

Tabla 5: Valores de módulo de rigidez del asfalto Sbit

4.3. Módulo de rigidez mediante Creep Estático

El ensayo creep con carga estática puede utilizarse para evaluar el comportamiento de las mezclas asfálticas ante las deformaciones plásticas. Sus resultados pueden vincularse a métodos de predicción de deformaciones como el de Van de Loo.

Este ensayo tiene como ventaja su sencillez, proporcionando además información sobre el comportamiento de la mezcla ante las deformaciones permanentes en función del tiempo, de las cargas y de las temperaturas.

4.3.1. Procedimiento del Ensayo Creep Estático

El ensayo consiste en medir las deformaciones en una briqueta tipo Marshall o núcleo de mezcla asfáltica, producidos por un esfuerzo de compresión vertical originado por una carga estática en un tiempo determinado y para cierta condición de temperatura fijada.

Ecuación 4

$$S_{mix} = \sigma / \varepsilon$$

Dónde:

σ : Esfuerzo producido por la aplicación de la carga estática vertical

ε : Deformación unitaria

Para el desarrollo de nuestro trabajo se utilizaron briquetas hechas en planta con medidas tipo Marshall, que cumplen con las siguientes características:

- Un diámetro de 102mm
- La altura (h) varía entre 55 y 68mm

El ensayo se realizó bajo los siguientes parámetros:

- Carga: 0,1 MPa.
- Tiempo: 3600 segundos con 60 segundos de relajación.
- Temperatura: 30°C, 40°C y 50°C.

Las pruebas creep estáticas se realizaron a 9 briquetas de mezcla asfáltica, que se subdividieron en tres grupos de tres briquetas cada uno. El primer grupo se ensayó a una temperatura de 30°C, mientras que el segundo grupo de briqueta se ensayó a 40°C y finalmente el último fue ensayado a una temperatura de 50°C.



Figura 4: Ensayo Crep Estático en el equipo NAT.

Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la UCSG

Los ensayos se ejecutaron con el equipo Nottingham Asphalt Test (NAT), modelo NU-10, ver Figura 4, y con ayuda del software Static Creep, que proporciona información sobre la deformación en función del tiempo como se puede apreciar en la Figura 5.

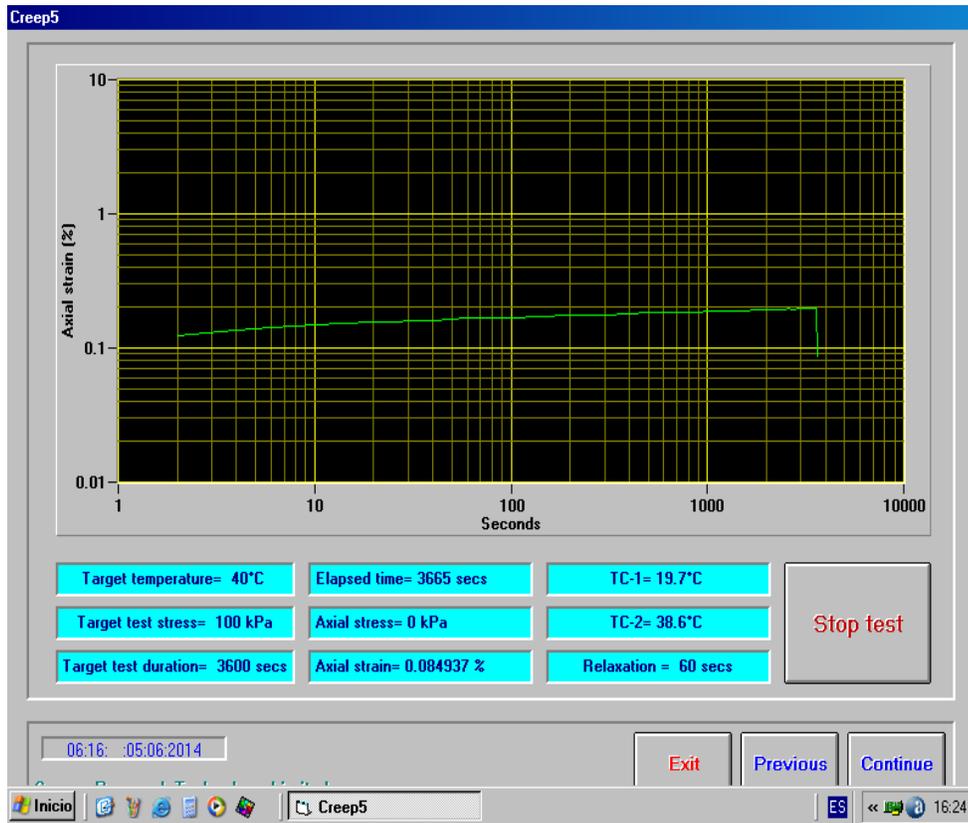


Figura 5: Salida de resultados del Software Static Creep

Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la UCSG

De los ensayos que se llevó a cabo en el laboratorio de carretera de la UCSG se obtuvieron los siguientes resultados:

➤ Ensayo creep estático a 30°C

30°C		BRIQUETA 1			MEZCLA DE PLANTA		
Segundos	h	Deformación	Δh	ϵ	Σ		S_{mix}
T	mm	%	(mm)	mm/mm	kpa	Mpa	σ/ϵ
2	67	0,145	0,097	1,45E-03	100,7	0,10	6,95E+01
6	67	0,177	0,119	1,77E-03	100,3	0,10	5,66E+01
10	67	0,194	0,130	1,94E-03	100,1	0,10	5,15E+01
20	67	0,221	0,148	2,21E-03	100,3	0,10	4,53E+01
40	67	0,246	0,165	2,46E-03	100,2	0,10	4,07E+01
60	67	0,264	0,177	2,64E-03	99,9	0,10	3,79E+01
100	67	0,285	0,191	2,85E-03	99,6	0,10	3,50E+01
300	67	0,332	0,222	3,32E-03	100	0,10	3,01E+01
600	67	0,360	0,241	3,60E-03	100,5	0,10	2,79E+01
900	67	0,377	0,252	3,77E-03	99,7	0,10	2,65E+01
1200	67	0,388	0,260	3,88E-03	100,1	0,10	2,58E+01
1500	67	0,400	0,268	4,00E-03	100	0,10	2,50E+01
1800	67	0,406	0,272	4,06E-03	100,4	0,10	2,48E+01
2700	67	0,421	0,282	4,21E-03	100	0,10	2,38E+01
3600	67	0,435	0,292	4,35E-03	99,8	0,10	2,29E+01

Tabla 6: Briqueta 1, Valores de S_{mix} determinado a partir del ensayo creep estático a 30°C.

➤ **Ensayo creep estático a 30°C**

30°C		BRIQUETA 2			MEZCLA DE PLANTA		
Segundos	h	Deformación	Δh	ϵ	σ		S_{mix}
T	mm	%	(mm)		kpa	Mpa	σ/ϵ
2	64	0,217	0,139	2,17E-03	100,2	1,00	4,62E+02
6	64	0,263	0,169	2,63E-03	100,5	1,01	3,82E+02
10	64	0,286	0,183	2,86E-03	99,9	1,00	3,50E+02
20	64	0,319	0,204	3,19E-03	100,4	1,00	3,15E+02
40	64	0,355	0,227	3,55E-03	100	1,00	2,82E+02
60	64	0,378	0,242	3,78E-03	100,5	1,01	2,66E+02
100	64	0,406	0,260	4,06E-03	99,7	1,00	2,46E+02
300	64	0,467	0,299	4,67E-03	99,9	1,00	2,14E+02
600	64	0,505	0,323	5,05E-03	99,7	1,00	1,98E+02
900	64	0,524	0,335	5,24E-03	100	1,00	1,91E+02
1200	64	0,536	0,343	5,36E-03	100,2	1,00	1,87E+02
1500	64	0,550	0,352	5,50E-03	99,9	1,00	1,82E+02
1800	64	0,559	0,358	5,59E-03	99,9	1,00	1,79E+02
2700	64	0,581	0,372	5,81E-03	99,9	1,00	1,72E+02
3600	64	0,578	0,370	5,78E-03	100	1,00	1,73E+02

Tabla 7: Briqueta 2, Valores de S_{mix} determinado a partir del ensayo creep estático a 30°C.

➤ **Ensayo creep estático a 30°C**

30°C		BRIQUETA 3			MEZCLA DE PLANTA		
Segundos	h	Deformación	Δh	ϵ	σ		S_{mix}
T	mm	%	(mm)	mm/mm	kpa	Mpa	σ/ϵ
2	66	0,351	0,232	3,51E-03	99,6	0,10	2,83E+01
6	66	0,429	0,283	4,29E-03	100,1	0,10	2,33E+01
10	66	0,465	0,307	4,65E-03	100,6	0,10	2,17E+01
20	66	0,511	0,337	5,11E-03	99,8	0,10	1,95E+01
40	66	0,556	0,367	5,56E-03	100	0,10	1,80E+01
60	66	0,581	0,383	5,81E-03	100,3	0,10	1,73E+01
100	66	0,614	0,405	6,14E-03	100,1	0,10	1,63E+01
300	66	0,681	0,449	6,81E-03	99,8	0,10	1,47E+01
600	66	0,720	0,475	7,20E-03	100,2	0,10	1,39E+01
900	66	0,743	0,490	7,43E-03	99,7	0,10	1,34E+01
1200	66	0,758	0,500	7,58E-03	100,4	0,10	1,33E+01
1500	66	0,769	0,508	7,69E-03	99,9	0,10	1,30E+01
1800	66	0,778	0,513	7,78E-03	100,2	0,10	1,29E+01
2700	66	0,796	0,526	7,96E-03	99,9	0,10	1,25E+01
3600	66	0,810	0,535	8,10E-03	100	0,10	1,23E+01

Tabla 8: Briqueta 3, Valores de S_{mix} determinado a partir del ensayo creep estático a 30°C.

➤ Ensayo del creep estático a 40°C

40°C		BRIQUETA 4			MEZCLA DEPLANTA		
Segundos	h	Deformación	Δh	ϵ	σ		S_{mix}
T	mm	%	(mm)		kpa	Mpa	
2	66	0,406	0,268	4,06E-03	100,4	0,10	2,47E+01
6	66	0,475	0,314	4,75E-03	100,2	0,10	2,11E+01
10	66	0,506	0,334	5,06E-03	100,2	0,10	1,98E+01
20	66	0,545	0,360	5,45E-03	100,3	0,10	1,84E+01
40	66	0,580	0,383	5,80E-03	100	0,10	1,72E+01
60	66	0,598	0,394	5,98E-03	100,1	0,10	1,68E+01
100	66	0,618	0,408	6,18E-03	99,8	0,10	1,61E+01
300	66	0,653	0,431	6,53E-03	99,5	0,10	1,52E+01
600	66	0,672	0,443	6,72E-03	100	0,10	1,49E+01
900	66	0,681	0,449	6,81E-03	100	0,10	1,47E+01
1200	66	0,689	0,454	6,89E-03	99,6	0,10	1,45E+01
1500	66	0,694	0,458	6,94E-03	100	0,10	1,44E+01
1800	66	0,698	0,461	6,98E-03	100	0,10	1,43E+01
2700	66	0,708	0,467	7,08E-03	99,9	0,10	1,41E+01
3600	66	0,729	0,481	7,29E-03	100,1	0,10	1,37E+01

Tabla 9: Briqueta 4, Valores de S_{mix} determinado a partir del ensayo creep estático a 40°C.

➤ **Ensayo del creep estático a 40°C**

40°C		BRIQUETA 5			MEZCLA DE PLANTA		
Segundos	h	Deformación	Δh	ϵ	σ		Smix
T	mm	%	(mm)		kpa	Mpa	
2	66	0,385	0,254	3,85E-03	100,2	0,10	2,61E+01
6	66	0,470	0,310	4,70E-03	100,4	0,10	2,14E+01
10	66	0,511	0,337	5,11E-03	100,4	0,10	1,96E+01
20	66	0,566	0,373	5,66E-03	100	0,10	1,77E+01
40	66	0,616	0,407	6,16E-03	100	0,10	1,62E+01
60	66	0,646	0,427	6,46E-03	100	0,10	1,55E+01
100	66	0,680	0,449	6,80E-03	100	0,10	1,47E+01
300	66	0,738	0,487	7,38E-03	100	0,10	1,36E+01
600	66	0,766	0,505	7,66E-03	99,7	0,10	1,30E+01
900	66	0,783	0,517	7,83E-03	99,8	0,10	1,27E+01
1200	66	0,796	0,525	7,96E-03	99,9	0,10	1,26E+01
1500	66	0,816	0,538	8,16E-03	100	0,10	1,23E+01
1800	66	0,781	0,515	7,81E-03	100	0,10	1,28E+01
2700	66	0,796	0,525	7,96E-03	100,3	0,10	1,26E+01
3600	66	0,839	0,554	8,39E-03	99,8	0,10	1,19E+01

Tabla 10: Briqueta 5, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 40°C.

➤ Ensayo del creep estático a 40°C

40°C		BRIQUETA 6			MEZCLA DE PLANTA		
Segundos	h	Deformación	Δh	ϵ	σ		Smix
T	mm	%	(mm)		kpa	Mpa	
2	68	0,243	0,165	2,43E-03	99,7	0,10	4,10E+01
6	68	0,294	0,200	2,94E-03	100,2	0,10	3,41E+01
10	68	0,317	0,215	3,17E-03	100,4	0,10	3,17E+01
20	68	0,345	0,235	3,45E-03	100,3	0,10	2,91E+01
40	68	0,374	0,254	3,74E-03	99,9	0,10	2,67E+01
60	68	0,390	0,265	3,90E-03	100,1	0,10	2,57E+01
100	68	0,384	0,261	3,84E-03	99,7	0,10	2,60E+01
300	68	0,422	0,287	4,22E-03	99,9	0,10	2,37E+01
600	68	0,439	0,298	4,39E-03	99,9	0,10	2,28E+01
900	68	0,445	0,303	4,45E-03	99,8	0,10	2,24E+01
1200	68	0,448	0,305	4,48E-03	99,6	0,10	2,22E+01
1500	68	0,452	0,308	4,52E-03	100	0,10	2,21E+01
1800	68	0,456	0,310	4,56E-03	100,1	0,10	2,20E+01
2700	68	0,465	0,316	4,65E-03	100,3	0,10	2,16E+01
3600	68	0,459	0,312	4,59E-03	99,8	0,10	2,18E+01

Tabla 11: Briqueta 6, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 40°C.

➤ Ensayo del creep estático a 50°C

50°C		BRIQUETA 7			MEZCLA DE PLANTA		
Segundos	h	Deformación	Δh	ϵ	σ		Smix
T	mm	%	(mm)		kpa	Mpa	
2	64	0,409	0,261	4,09E-03	98,9	0,10	2,42E+01
6	64	0,488	0,313	4,88E-03	99,5	0,10	2,04E+01
10	64	0,521	0,333	5,21E-03	100,2	0,10	1,92E+01
20	64	0,559	0,358	5,59E-03	100	0,10	1,79E+01
40	64	0,596	0,382	5,96E-03	100,2	0,10	1,68E+01
60	64	0,633	0,405	6,33E-03	100	0,10	1,58E+01
100	64	0,651	0,416	6,51E-03	100	0,10	1,54E+01
300	64	0,679	0,435	6,79E-03	100,4	0,10	1,48E+01
600	64	0,695	0,445	6,95E-03	100	0,10	1,44E+01
900	64	0,708	0,453	7,08E-03	99,9	0,10	1,41E+01
1200	64	0,718	0,459	7,18E-03	99,9	0,10	1,39E+01
1500	64	0,724	0,463	7,24E-03	99,9	0,10	1,38E+01
1800	64	0,712	0,456	7,12E-03	99,9	0,10	1,40E+01
2700	64	0,718	0,460	7,18E-03	99,9	0,10	1,39E+01
3600	64	0,721	0,462	7,21E-03	99,9	0,10	1,38E+01

Tabla 12: Briqueta 7, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 50°C.

➤ Ensayo del creep estático a 50°C

50°C		BRIQUETA 8			MEZCLA DE PLANTA		
Segundos	h	Deformación	Δh	ϵ	σ		Smix
T	mm	%	(mm)		kpa	Mpa	
2	64	0,351	0,224	3,51E-03	99,9	0,10	2,85E+01
6	64	0,403	0,258	4,03E-03	100,1	0,10	2,48E+01
10	64	0,426	0,273	4,26E-03	100	0,10	2,35E+01
20	64	0,449	0,287	4,49E-03	100	0,10	2,23E+01
40	64	0,470	0,301	4,70E-03	99,8	0,10	2,12E+01
60	64	0,482	0,308	4,82E-03	99,8	0,10	2,07E+01
100	64	0,493	0,315	4,93E-03	100	0,10	2,03E+01
300	64	0,515	0,330	5,15E-03	99,7	0,10	1,94E+01
600	64	0,523	0,334	5,23E-03	100	0,10	1,91E+01
900	64	0,538	0,344	5,38E-03	99,9	0,10	1,86E+01
1200	64	0,544	0,348	5,44E-03	99,9	0,10	1,84E+01
1500	64	0,543	0,348	5,43E-03	100,1	0,10	1,84E+01
1800	64	0,564	0,361	5,64E-03	100	0,10	1,77E+01
2700	64	0,530	0,339	5,30E-03	100,1	0,10	1,89E+01
3600	64	0,540	0,346	5,40E-03	99,9	0,10	1,85E+01

Tabla 13: Briqueta 8, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 50°C.

➤ Ensayo del creep estático a 50°C

50°C		BRIQUETA 4			MEZCLA DE PLANTA		
Segundos	h	Deformación	Δh	ϵ	σ		Smix
T	mm	%	(mm)		kpa	Mpa	
2	67	0,283	0,189	2,83E-03	100,4	0,10	3,55E+01
6	67	0,337	0,226	3,37E-03	100	0,10	2,97E+01
10	67	0,362	0,242	3,62E-03	100,2	0,10	2,77E+01
20	67	0,390	0,261	3,90E-03	100,2	0,10	2,57E+01
40	67	0,413	0,277	4,13E-03	100,1	0,10	2,43E+01
60	67	0,425	0,285	4,25E-03	99,9	0,10	2,35E+01
100	67	0,439	0,294	4,39E-03	100,2	0,10	2,28E+01
300	67	0,463	0,310	4,63E-03	100	0,10	2,16E+01
600	67	0,475	0,318	4,75E-03	100	0,10	2,11E+01
900	67	0,480	0,322	4,80E-03	100,1	0,10	2,08E+01
1200	67	0,485	0,325	4,85E-03	100,1	0,10	2,06E+01
1500	67	0,488	0,327	4,88E-03	100	0,10	2,05E+01
1800	67	0,491	0,329	4,91E-03	100	0,10	2,04E+01
2700	67	0,496	0,333	4,96E-03	100	0,10	2,01E+01
3600	67	0,499	0,335	4,99E-03	100	0,10	2,00E+01

Tabla 14: Briqueta 9, Valores de Smix determinado a partir del ensayo creep estático a 50°C.

4.3.2. Módulo de rigidez promedio ($S_{mixprom}$)

Se obtiene tres resultados de S_{mix} para cada temperatura, por lo cual se trabajó con los valores promedios obteniendo los siguientes resultados:

Valores de S_{mix} promedio					
30°C		40°C		50°C	
Periodo	S_{mix} promedio	Periodo	S_{mix} promedio	Periodo	S_{mix} promedio
(seg)	(Mpa)	(seg)	(Mpa)	(seg)	(Mpa)
2	48,9	2	30,6	2	29,4
6	40	6	25,5	6	24,9
10	36,6	10	23,7	10	23,5
20	32,4	20	21,7	20	21,9
40	29,3	40	20,1	40	20,8
60	27,6	60	19,3	60	20
100	25,7	100	18,9	100	19,5
300	22,4	300	17,5	300	18,6
600	20,9	600	16,9	600	18,3
900	19,9	900	16,6	900	17,8
1200	19,5	1200	16,4	1200	17,6
1500	19	1500	16,3	1500	17,6
1800	18,8	1800	16,4	1800	17,4
2700	18,1	2700	16,1	2700	17,7
3600	17,6	3600	15,8	3600	17,5

Tabla 15: Valores promedios de S_{mix} para briquetas ensayadas a 30°C, 40°C, 50°C

4.3.3. Relación S_{mix} – S_{bit}

Relación S_{mix} - S_{bit}					
30°C		40°C		50°C	
S_{bit}	S_{mix} promedio	S_{bit}	S_{mix} promedio	S_{bit}	S_{mix} promedio
(Pa)	(Mpa)	(Pa)	(Mpa)	(Pa)	(Mpa)
217.000	48,9	28.600	30,6	4.490	29,4
87.500	40	10.600	25,5	1.570	24,9
54.500	36,6	6.630	23,7	1.060	23,5
29.400	32,4	3.430	21,7	559	21,9
15.900	29,3	1.750	20,1	282	20,8
10.900	27,6	1.280	19,3	188	20
6.800	25,7	837	18,9	114	19,5
2.330	22,4	289	17,5	44	18,6
1.310	20,9	146	16,9	23	18,3
942	19,9	98	16,6	15	17,8
726	19,5	77	16,4	11	17,6
588	19	64	16,3	9	17,6
494	18,8	56	16,4	8	17,4
331	18,1	38	16,1	5	17,7
249	17,6	29	15,8	4	17,5

Tabla 16: Valores de $S_{mixprom}$ para briquetas a 30°C, 40°C, 50°C

4.3.4. Representación gráfica de la relación $S_{mix} - S_{bit}$

Internacionalmente la relación entre la rigidez de la mezcla y la rigidez del betún ($S_{mix} - S_{bit}$), se la representa de forma gráfica por su facilidad y comodidad de interpretar los resultados, además proporciona una mayor exactitud al analizar dicha relación.

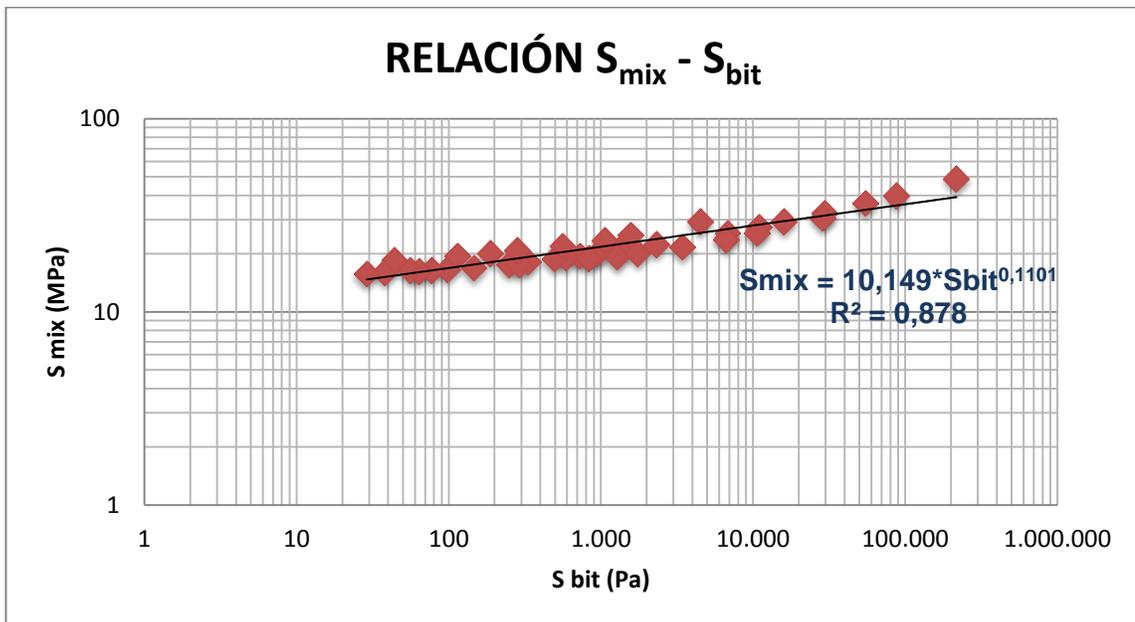


Figura 6: Gráfico de la relación $S_{mix} - S_{bit}$ para mezclas de Planta

Ecuación 5: Ecuación para $S_{mix} - S_{bit}$ de mezclas de Planta

$$S_{mix} = 10,149 * S_{bit}^{0,1101}$$

4.4. Módulo de rigidez (E_{ac}) bajo deformación controlada

El módulo de rigidez indica la capacidad de distribuir la carga y proteger las capas subyacentes por lo que es una propiedad importante en el comportamiento del pavimento.

Para determinar este módulo se realiza un ensayo de tensión indirecta no destructivo que cumple con la normativa europea EN 12697-26: 2006 anexo C, que permite determinar el módulo de rigidez bajo una deformación horizontal controlada de 5 micrones producido por una carga axial de compresión.

Este ensayo se realizó con briquetas tipo Marshall en el equipo N.A.T. que tiene un software llamado Stiffness-Micron que permite determinar el modulo con una mayor facilidad y precisión.

Se conoce que la temperatura altera el comportamiento de las mezclas asfálticas por lo cual se realizó este ensayo para diferentes temperaturas que fueron: 10°C, 20°C, 30°C, 40°C. Con la finalidad de encontrar una relación entre el módulo de rigidez y la temperatura.

Como se mencionó este procedimiento es un ensayo no destructivo por lo que se usaron 3 briquetas para trabajar con un promedio, el procedimiento se repitió para las diferentes temperaturas de ensayo.

En el software se debe ingresar los siguientes datos:

- Temperaturas de ensayos: 10°C, 20°C, 30°C y 40°C
- Relación de Poisson (μ): 0.35
- Plazo deseado para carga total: 120 milisegundos
- Deformación horizontal deseada: 5 μ m (para diámetros de 102 mm)
- Número de pulsos de preparación: 5

4.4.1. Resultados

Módulo de Rigidez Promedio	10°C	20°C	30°C	40°C
	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
	6.477	3.792	2.123	1.327

Tabla 17: Módulo de Rigidez promedio para briquetas de mezclas de planta.

4.4.2. Representación gráfica de resultados

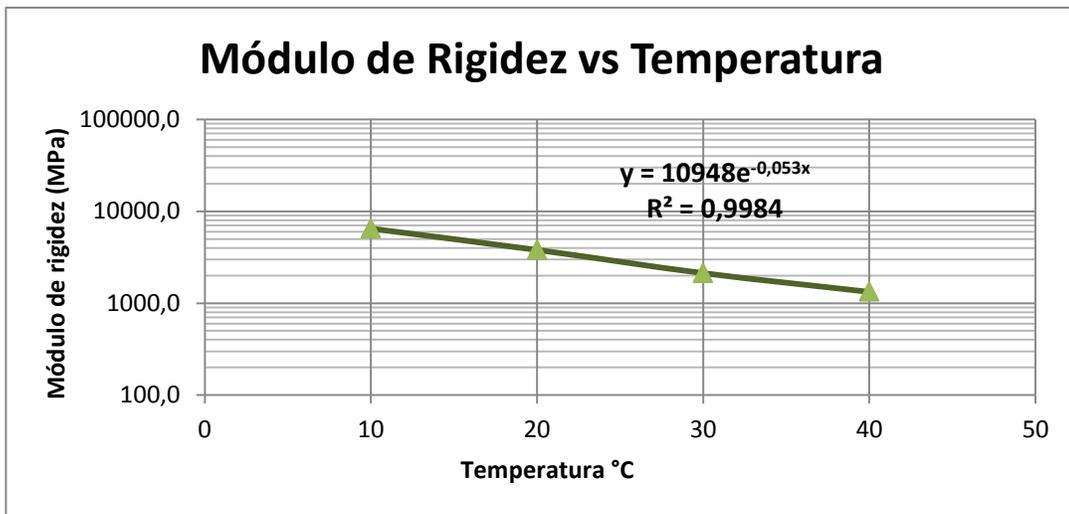


Figura 7: Relación Eac – Temperatura de mezclas de planta

Ecuación 6: Ecuación de módulo de rigidez para una mezcla de planta.

$$E_{ac} \text{ (MPa)} = 10.948 * e^{-0,053T(^{\circ}\text{C})}$$

CAPÍTULO V

5. CÁLCULO Y ANÁLISIS DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS (AHUELLAMIENTOS)

5.1. Generalidades

El comportamiento de las mezclas asfáltica está directamente relacionado con la temperatura, cuando se encuentran a elevadas temperatura disminuye la resistencia al corte ocasionando que sea más susceptible a sufrir deformaciones permanentes, esto se debe a que la mezcla tiene un comportamiento viscoelástico, es decir las deformaciones que sufre es una combinación de deformación elástica la cuales son recuperables con otras deformaciones irrecuperables como son las deformaciones plásticas.

Por lo tanto la temperatura es un factor importante en cuanto a la presencia de fallas en los pavimentos porque permite que una mezcla tengo una mayor o menor resistencia al corte y a las deformaciones plásticas.

5.2. Análisis del tráfico representativo a utilizar

Se conoce que el tránsito es uno de los principales factores que influye en la presencia de ahuellamientos en el pavimento asfáltico. Por lo cual para este estudio se decidió considerar el tránsito de una de las vías principales de nuestro país como es la carretera E25, en el tramo “Durán – Jujan” a lo largo

del año 2013. Dicho datos corresponden a una distribución horaria y por tipo de vehículos pesados circulando en las ambas direcciones.

Para el desarrollo de esta investigación se necesitó conocer el porcentaje de vehículos pesados horario correspondiente a un día representativo de cada mes. A continuación, se presentan los porcentajes horarios calculados para cada mes. Ver Tabla 18.

Porcentaje de vehículos pesados por hora												
Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Horas	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1:00	1,97	2,33	2,32	2,19	2,25	2,03	2,02	2,21	2,04	2,12	2,09	2,19
2:00	1,44	1,67	1,82	1,74	1,72	1,50	1,52	1,66	1,56	1,65	1,59	1,70
3:00	1,28	1,50	1,61	1,50	1,47	1,34	1,38	1,48	1,39	1,43	1,42	1,57
4:00	1,49	1,69	1,81	1,74	1,59	1,59	1,55	1,61	1,71	1,82	1,68	1,75
5:00	2,42	2,57	2,60	2,51	2,57	2,60	2,64	2,69	2,68	2,71	2,67	2,78
6:00	3,57	3,64	3,82	3,76	3,78	3,89	3,87	3,93	4,00	3,96	4,02	4,00
7:00	4,73	4,79	4,75	4,90	4,81	4,76	4,82	4,74	4,68	4,63	4,67	4,77
8:00	5,15	5,15	5,22	5,12	5,05	5,00	4,95	4,82	4,90	4,81	4,80	4,78
9:00	5,11	5,03	4,97	4,88	4,84	5,08	5,02	4,99	4,89	4,75	4,85	4,79
10:00	4,86	4,65	4,70	4,70	4,72	4,82	4,96	4,74	4,89	4,73	4,84	4,78
11:00	5,14	4,93	4,77	4,95	4,95	5,11	5,17	5,12	5,18	5,04	5,28	5,12
12:00	5,20	5,04	5,01	4,96	5,10	5,18	5,15	4,99	5,01	5,31	5,25	5,11
13:00	5,13	4,94	4,95	5,00	4,97	5,30	5,06	4,87	5,05	4,91	5,13	5,05
14:00	5,26	5,06	5,00	5,01	5,05	5,18	5,14	5,04	5,01	5,11	5,23	5,10
15:00	5,37	5,19	5,06	5,20	5,23	5,36	5,16	5,19	5,37	5,22	5,34	5,12
16:00	5,48	5,27	5,31	5,36	5,46	5,57	5,59	5,38	5,42	5,45	5,48	5,37
17:00	5,55	5,43	5,45	5,53	5,61	5,59	5,58	5,50	5,40	5,57	5,69	5,44
18:00	5,99	5,70	5,72	5,69	5,68	5,77	5,68	5,63	5,64	5,71	5,59	5,65
19:00	5,61	5,66	5,48	5,41	5,37	5,32	5,25	5,36	5,33	5,23	5,32	5,25
20:00	5,17	5,19	5,05	5,00	4,99	4,88	4,93	5,01	4,94	4,96	4,86	4,90
21:00	4,35	4,47	4,51	4,59	4,68	4,43	4,46	4,54	4,56	4,69	4,40	4,45
22:00	3,74	3,80	3,86	3,91	3,89	3,74	3,83	4,00	4,03	3,91	3,86	3,94
23:00	3,29	3,42	3,34	3,44	3,41	3,32	3,53	3,62	3,49	3,44	3,33	3,50
0:00	2,69	2,89	2,87	2,91	2,81	2,63	2,74	2,88	2,80	2,86	2,63	2,89

Tabla 18: Porcentajes de vehículos pesados por hora para cada mes.

5.3. Análisis de las temperaturas representativas a utilizar

A partir de la información adquirida en el DAC sobre las variaciones horarias de la temperatura del aire en los diferentes aeropuertos del país, y de las mediciones de temperatura a diferentes profundidades en capas asfálticas de las diferentes regiones realizadas por esta investigación, se obtuvieron los siguientes resultados.

5.3.1. Temperatura ambiente de la Región Costa

Como se mencionó anteriormente la información de temperatura del aire fueron adquiridos en el DAC, se consideró las temperaturas promedios horarias de cada mes durante el año 2013. Para el caso de la región costa se obtuvo información de las siguientes ciudades:

- Guayaquil (Prov. Guayas)
- Manta (Prov. Manabí)
- Esmeralda (Prov. Esmeralda)
- Santa Rosa (Prov. El Oro)

A continuación en la Figura 8, se presenta la información de temperatura para el mes de enero del año 2013 en las diferentes ciudades de la región costa antes mencionadas. El año 2013 al momento era el último con esta información completa y se tomó como representativa.

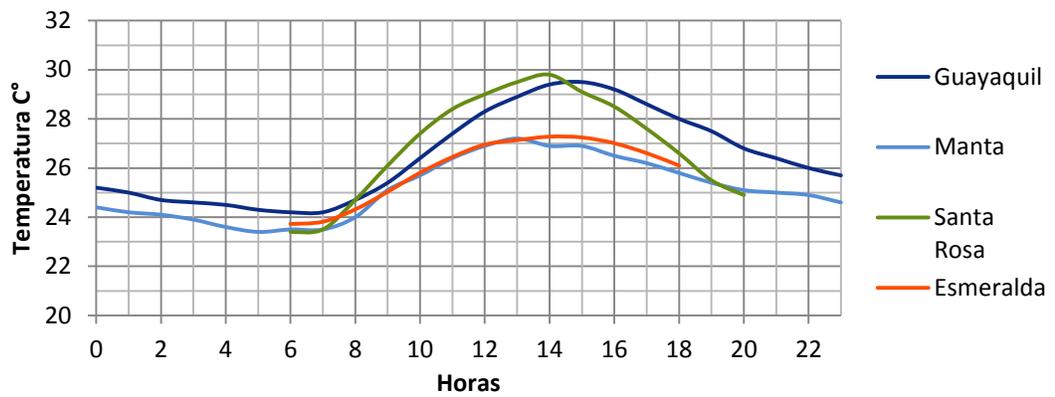


Figura 8: Temperatura horaria del aire en el mes de Enero que corresponden a las diversas ciudades de la Región Costa

A partir de dicha información de temperatura del aire se consideró trabajar con valores que representan el percentil 85% de la temperatura, es decir solo el 15% de los valores se encontrara por encima de la temperatura de trabajo dada por dicho percentil, ver Figura 9.

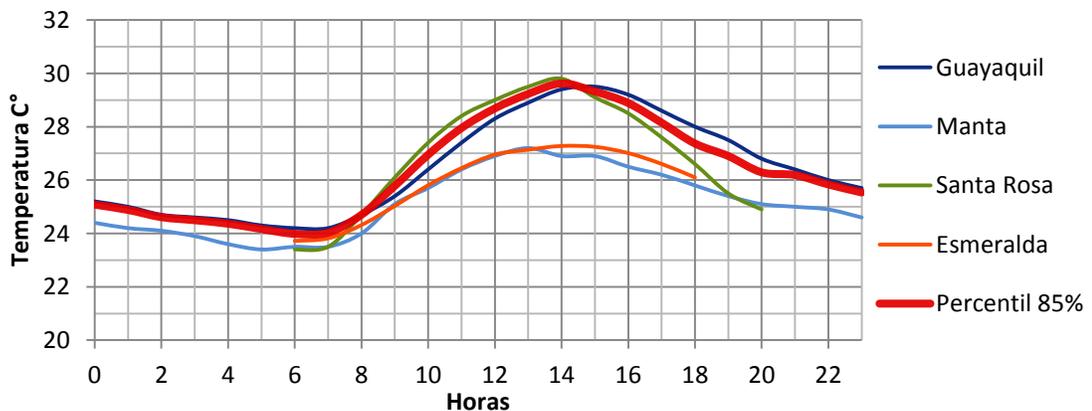


Figura 9: Temperatura de trabajo horaria del mes de Enero que corresponde a la Región Costa

El mismo análisis se realizó en los demás meses obteniendo una temperatura horaria para cada mes del año 2013, como se puede observar en la Tabla 19:

AÑO 2013	TEMPERATURA COSTA °C																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ENERO	25,1	24,9	24,6	24,5	24,4	24,2	24,0	24,0	24,7	25,8	27,0	28,0	28,7	29,2	29,6	29,3	28,9	28,2	27,4	26,9	26,3	26,2	25,8	25,5
FEBRERO	25,3	24,9	24,6	24,5	24,3	24,1	23,9	23,9	24,7	25,9	27,0	28,0	29,1	29,6	29,9	29,5	29,2	28,7	27,9	27,3	26,6	26,1	25,9	25,7
MARZO	25,6	25,3	25,1	25,0	24,8	24,8	24,4	24,5	25,3	26,5	27,4	28,5	29,2	29,6	30,0	30,0	29,6	29,0	28,1	27,3	26,7	26,5	25,9	25,9
ABRIL	24,9	24,7	24,5	24,4	24,2	24,2	24,2	24,4	25,3	26,6	27,8	28,9	29,7	30,3	30,6	30,4	30,0	29,3	28,4	27,5	26,9	26,3	25,7	25,2
MAYO	23,6	23,2	23,2	22,9	22,8	22,7	23,0	23,2	24,1	25,2	26,3	27,2	28,1	28,5	28,8	28,5	28,1	27,5	26,8	26,3	25,6	25,2	24,5	24,0
JUNIO	22,4	22,3	22,1	22,0	22,0	21,9	22,7	22,9	23,7	24,7	25,8	26,8	27,4	27,7	27,9	27,8	27,6	27,1	26,3	24,9	24,4	23,8	23,2	22,6
JULIO	21,6	21,3	21,2	21,1	21,0	21,0	22,0	22,2	23,0	24,0	25,0	26,0	26,8	27,3	27,5	27,5	27,2	26,6	25,8	24,1	23,5	23,0	22,4	21,9
AGOSTO	21,4	21,2	21,0	20,9	21,0	21,0	22,0	22,1	22,8	23,9	25,1	26,3	27,2	27,8	28,1	28,3	28,0	27,5	26,4	24,6	23,7	23,0	22,3	21,7
SEPTIEMBRE	22,0	21,9	21,7	21,6	21,6	21,5	22,4	22,6	23,5	24,7	25,8	27,1	27,8	28,4	28,8	29,1	28,8	28,2	26,8	25,0	24,1	23,4	22,8	22,3
OCTUBRE	22,5	22,3	22,1	22,0	22,0	22,0	22,8	23,1	23,9	25,0	26,2	27,1	27,7	28,4	28,8	28,8	28,4	27,9	26,5	25,1	24,2	23,6	23,0	22,8
NOVIEMBRE	22,7	22,5	22,4	22,5	22,4	22,5	23,2	23,4	24,0	25,4	26,6	27,6	28,2	28,6	28,8	28,6	28,6	28,0	26,9	25,2	24,3	23,8	23,2	22,9
DICIEMBRE	23,9	23,0	23,4	23,2	23,2	23,1	23,4	23,6	24,6	25,8	27,0	28,0	28,9	29,7	30,2	30,3	29,8	29,1	28,3	27,6	26,8	25,9	25,0	24,4

Tabla 19: Temperatura horaria de la Región Costa

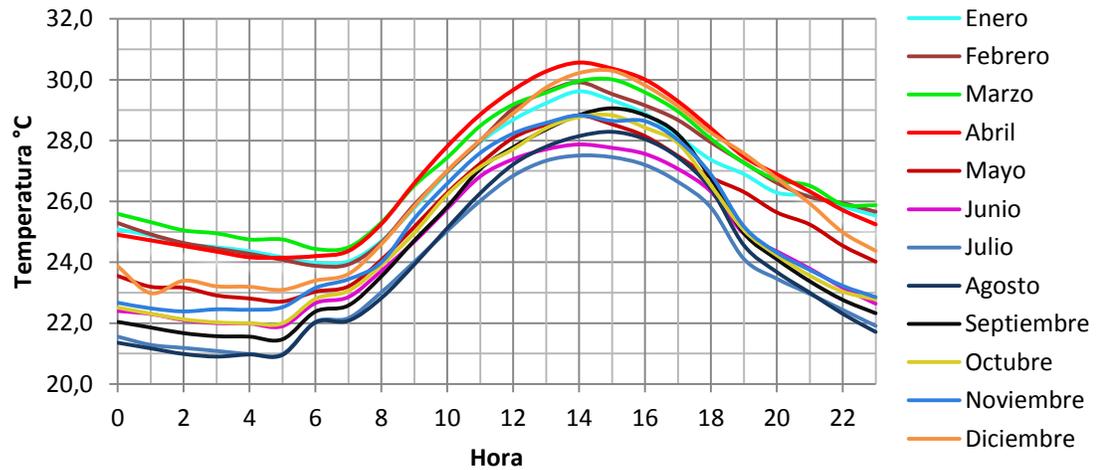


Figura 10: Distribución de la temperatura horaria de la Región Costa

5.3.2. Temperatura de la carpeta asfáltica en la Región Costa

Se pueden encontrar varios procedimientos y fórmulas empleadas por investigadores para determinar la temperatura de la carpeta asfáltica a partir de la temperatura del aire con buenos resultados, sin embargo estas investigaciones se han realizado en condiciones climáticas muy diferentes a la que pueden encontrar en Ecuador. Por ejemplo, se han llevado a cabo investigaciones en países donde las temperaturas bajas se encuentran por debajo de los 0°C, es decir, donde se registran heladas y partiendo de estas condiciones climáticas surgen ecuaciones de transferencia de temperatura, lo cual no sería muy real considerarlas para nuestras condiciones.

Por este motivo, se procedió a realizar mediciones en el sitio para la temperatura ambiente y las temperaturas de la carpeta asfáltica a diferentes profundidades, para encontrar una relación entre ambas más acorde a nuestras regiones.

Dicha investigación de campo se realizó en el peaje de la vía Durán – Boliche, Figura 11, la cual consistió en realizar tres agujeros en la carpeta asfáltica a diferentes profundidades que fueron: 5cm, 10cm y 15cm, y se llevó un registro horario de las temperaturas a las diferentes profundidades mencionadas durante 24 horas al igual que la temperatura ambiente y superficial de la carpeta asfáltica, las mediciones se realizaron el día 22 de Noviembre del 2014. Los valores que se obtuvieron se muestran a continuación en la Tabla 20:



Figura 11: Medición de las temperaturas de la capa asfáltica a diferente profundidades in situ

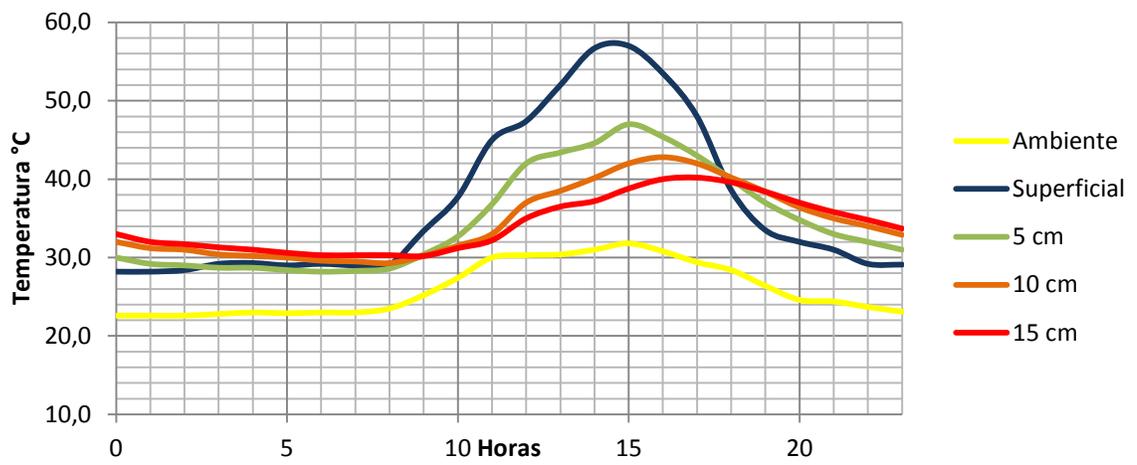


Figura 12: Distribución de la temperatura a diferentes profundidades de la carpeta asfáltica.

DATOS DE CAMPO					
Horas	Temperatura °C				
	Ambiente	Superficial	5 cm	10 cm	15 cm
0:00	22,6	28,2	30	32	33
1:00	22,6	28,2	29,2	31,2	32
2:00	22,6	28,4	29	31	31,7
3:00	22,8	29,2	28,7	30,4	31,3
4:00	23	29,3	28,7	30,2	31
5:00	22,9	29	28,4	30	30,6
6:00	23	29,2	28,2	29,6	30,3
7:00	23	29	28,3	29,5	30,3
8:00	23,5	29,1	28,6	29,3	30,3
9:00	25,2	33,4	30,4	30,2	30,2
10:00	27,4	37,7	32,7	31,5	31,2
11:00	30	45	36,8	33	32,2
12:00	30,3	47,4	42	37	35
13:00	30,4	52	43,4	38,5	36,5
14:00	31	56,7	44,6	40,2	37,2
15:00	31,8	57	47	42	38,8
16:00	30,8	53,5	45,4	42,8	40
17:00	29,4	48	43	42	40,2
18:00	28,4	38,6	40	40,2	39,6
19:00	26,4	33,5	37	38,4	38,4
20:00	24,6	32	34,8	36,4	37
21:00	24,4	31	33	35	35,8
22:00	23,7	29,2	32	34	34,8
23:00	23,1	29,1	31	32,9	33,7

Tabla 20: Medición de temperatura de la carpeta asfáltica a diferentes profundidades y temperatura ambiente.

Se consideró tomar la relación de la temperatura ambiente con la temperatura a 5cm de profundidad como la relación representativa para el análisis de la presente investigación, debido a que en el rango de 0 a 5cm de profundidad se puede observar las mayores temperaturas del pavimento y por lo tanto existe una mayor posibilidad que se presenten deformaciones permanentes, es decir

el análisis será conservador considerando la temperatura a 5cm como la temperatura representativa del pavimento.

En la Tabla 21 puede observarse la distribución de las temperaturas a 5cm de profundidad ajustadas para todos los meses de un año en la Región Costa.

AÑO 2013	TEMPERATURA DE CAPA ASFALTICA °C (Profundidad: 5CM)																							
HORAS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ENERO	33	32	32	31	30	30	29	30	30	31	32	34	40	42	43	43	43	41	39	38	37	35	35	34
FEBRERO	34	32	32	31	30	30	29	29	30	31	32	34	40	42	43	44	43	42	39	38	38	35	35	34
MARZO	34	33	32	31	31	31	30	30	31	32	33	35	40	42	43	44	44	42	40	38	38	36	35	35
ABRIL	33	32	31	31	30	30	30	30	31	32	33	35	41	43	44	45	44	43	40	38	38	36	35	34
MAYO	31	30	30	29	28	28	28	29	29	30	31	33	39	41	41	42	41	40	38	37	36	34	33	32
JUNIO	30	29	28	28	27	27	28	28	29	30	31	33	38	40	40	41	41	40	37	35	34	32	31	30
JULIO	29	28	27	27	26	26	27	27	28	29	30	32	37	39	40	41	40	39	36	34	33	31	30	29
AGOSTO	28	27	27	26	26	26	27	27	28	29	30	32	38	40	40	42	41	40	37	34	33	31	30	29
SEPTIEMBRE	29	28	28	27	27	27	27	28	29	30	31	33	39	40	41	43	43	41	38	35	34	32	31	30
OCTUBRE	30	29	28	28	27	27	28	28	29	30	31	33	38	41	41	43	42	41	37	35	34	32	31	31
NOVIEMBRE	30	29	29	28	28	28	28	29	29	31	32	34	39	41	41	42	42	41	38	35	34	32	31	31
DICIEMBRE	32	30	30	29	29	29	29	29	30	31	32	34	40	42	43	45	44	43	40	39	38	35	34	33

Tabla 21: Temperatura de la carpeta asfáltica a 5cm de profundidad en la Región Costa.

Para la Región Costa, puede observarse que las temperaturas en el pavimento están en el rango entre 26 y 45°C, incluidos dichos valores. Estas pueden considerarse las temperaturas de trabajo para dicha región.

5.3.3. Temperatura ambiente de la Región Sierra

Al igual que en la región costa, en la región de la sierra se consideró el promedio horario de la temperatura del aire para cada mes del año 2013 considerando la información de las siguientes ciudades:

- Quito (Prov. Pichincha)
- Riobamba (Prov. Chimborazo)
- Latacunga (Prov. Cotopaxi)
- Cuenca (Prov. Azuay)
- Tulcán (Prov. Carchi)

A continuación se presenta la información de temperatura para el mes de enero del año 2013 en las diferentes ciudades de la región sierra antes mencionada.

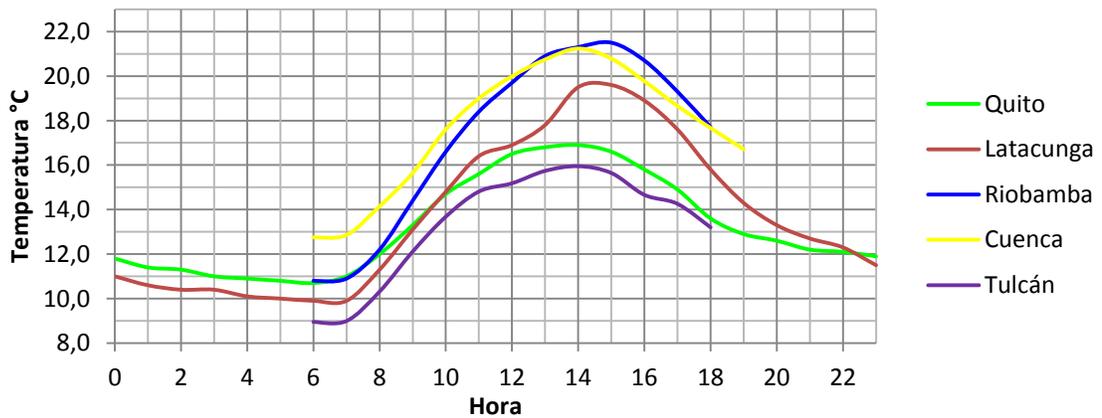


Figura 13: Temperatura horaria del mes de Enero que corresponden a las diversas ciudades de la Región Sierra

A partir de dicha información de temperatura del aire de igual manera que en la Región Costa se consideró trabajar con valores que representan el percentil 85%, ver Figura 14

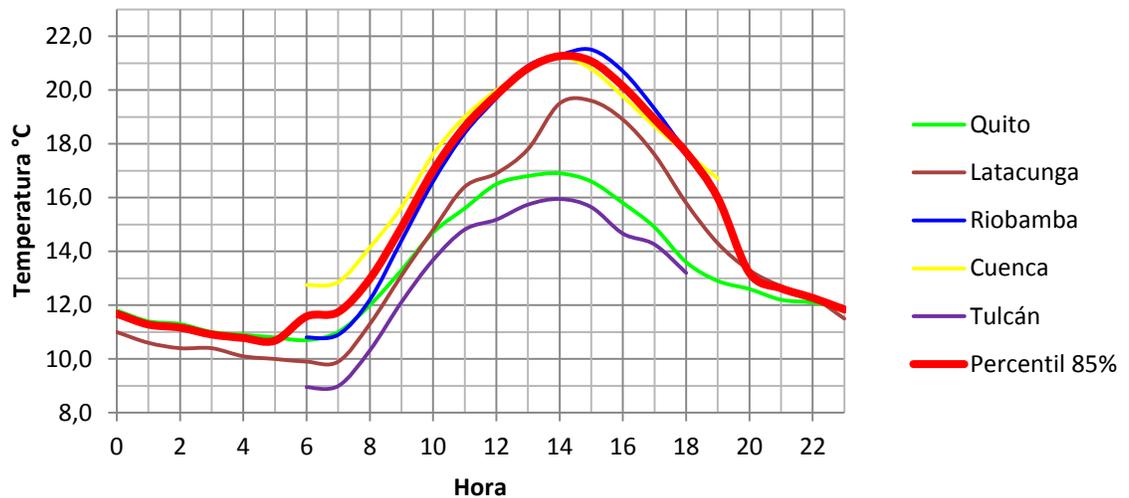


Figura 14: Temperatura de trabajo horaria del mes de enero que corresponde a la Región Sierra

El mismo análisis se realizó en los demás meses obteniendo una temperatura horaria para cada mes del año 2013, como se puede observar a continuación:

AÑO 2013	REGIÓN SIERRA °C																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ENERO	11,7	11,3	11,2	10,9	10,8	10,7	11,6	11,7	13,0	14,9	17,0	18,6	19,8	20,8	21,3	21,1	20,1	18,9	17,7	16,0	13,2	12,6	12,3	11,8
FEBRERO	11,6	11,3	11,1	10,9	10,8	10,6	11,4	11,4	12,5	13,8	15,8	17,6	18,9	19,5	19,7	19,2	18,6	17,8	16,8	15,2	13,0	12,5	11,9	11,7
MARZO	11,9	11,5	11,0	11,0	10,7	10,6	11,7	11,8	13,5	15,3	17,0	18,6	19,4	20,2	20,4	19,9	19,3	18,4	17,1	16,2	13,7	13,4	12,9	12,3
ABRIL	11,5	11,2	10,8	10,6	10,4	10,3	10,8	11,1	12,8	14,6	16,2	17,5	18,8	19,7	20,1	20,0	19,6	18,7	17,1	15,9	13,2	12,5	12,0	11,6
MAYO	11,9	11,5	11,1	10,9	10,6	10,3	11,5	11,7	13,8	15,4	17,0	18,1	18,9	19,5	20,1	19,7	19,0	17,9	16,4	15,6	13,3	12,5	12,2	12,1
JUNIO	11,5	10,8	10,6	10,2	9,8	9,5	10,1	11,0	13,1	14,8	16,4	17,7	18,7	19,2	19,3	18,9	18,3	17,3	16,1	15,1	13,2	12,5	12,0	11,8
JULIO	12,0	11,6	11,4	11,3	10,9	10,6	10,5	11,1	12,6	14,3	16,0	17,2	18,2	18,9	19,1	18,6	18,2	17,1	15,8	14,7	13,6	13,1	12,7	12,2
AGOSTO	12,1	11,5	11,2	11,0	10,6	10,3	10,3	11,0	12,8	14,7	16,5	18,0	18,8	19,4	19,4	19,1	18,5	17,3	15,8	14,8	13,7	13,0	12,3	12,1
SEPTIEMBRE	12,0	11,6	11,2	10,6	10,2	10,0	10,2	11,1	13,2	15,2	17,4	18,9	19,7	19,8	19,9	19,5	18,7	17,6	16,2	15,3	13,8	13,2	12,7	12,1
OCTUBRE	12,0	11,6	11,2	10,6	10,2	10,0	10,2	11,1	13,2	15,2	17,4	18,9	19,7	19,8	19,9	19,5	18,7	17,6	16,2	15,3	13,8	13,2	12,7	12,1
NOVIEMBRE	11,6	11,3	10,9	10,8	10,5	10,3	10,2	11,1	13,4	15,6	17,4	19,1	20,6	21,5	21,5	20,3	19,2	17,9	16,4	15,0	13,1	12,5	12,1	11,9
DICIEMBRE	11,2	11,0	10,5	10,1	9,8	9,6	10,6	11,3	13,7	15,5	17,1	18,8	20,0	20,5	21,1	20,6	19,5	18,1	16,7	15,2	13,1	12,6	12,1	11,7

Tabla 22: Temperatura horaria de la Región Sierra.

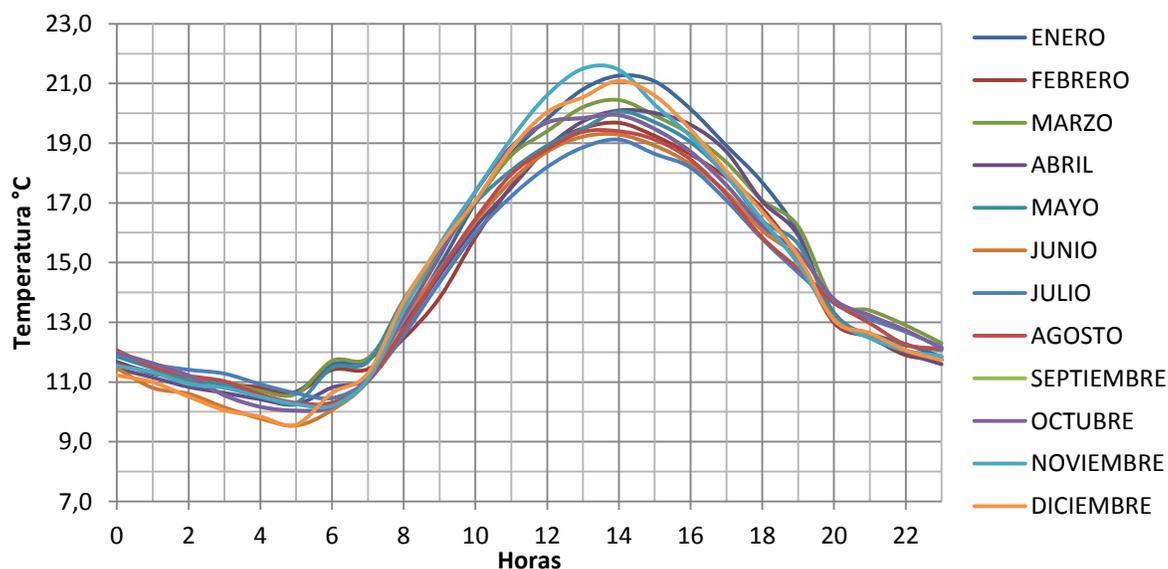


Figura 15: Distribución de la temperatura horaria de la Región Sierra.

5.3.4. Temperatura de la carpeta asfáltica en la Región Sierra.

En la Región Sierra se puede observar una mayor variación de la temperatura la cual se debe a diversos parámetros climáticos que no se encuentran en la Región Costa. En las diferentes fórmulas y procedimientos existentes para determinar la temperatura del pavimento partiendo de la temperatura del aire tampoco se pudo encontrar alguna donde los parámetros climáticos sean muy parecidos a los que se encuentran en la Región Sierra, lo más cercano fueron fórmulas que partieron de condiciones donde ciertos meses se presentaban épocas de heladas lo cual no es tan real en nuestra Región Sierra.

Por lo cual se procedió a realizar un registro de la temperatura ambiente y la temperatura de la carpeta asfáltica a diferentes profundidades para encontrar una relación real de la temperatura ambiente con la de la carpeta asfáltica.

Dicha investigación se realizó en el peaje de la vía Alóag – Santo Domingo, ver Figura 16, consistió en realizar tres agujeros en la carpeta asfáltica a diferentes profundidades que fueron: 5cm, 10cm y 15cm, y se llevó un registro horario de las temperaturas a las diferentes profundidades mencionadas durante 24 horas al igual que la temperatura ambiente y superficial de la carpeta asfáltica. Los valores que se obtuvieron se muestran a continuación, ver Tabla 23.

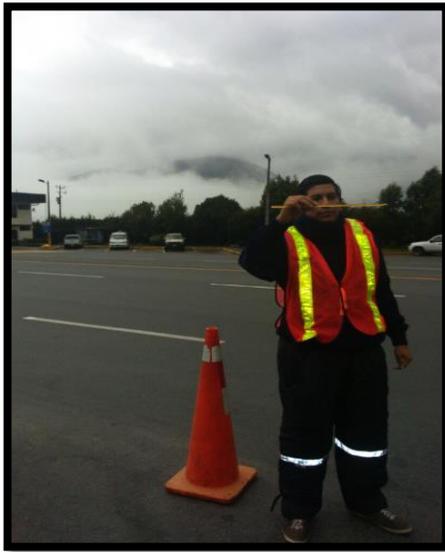


Figura 16: Medición de las temperaturas de la capa asfáltica a diferentes profundidades in situ

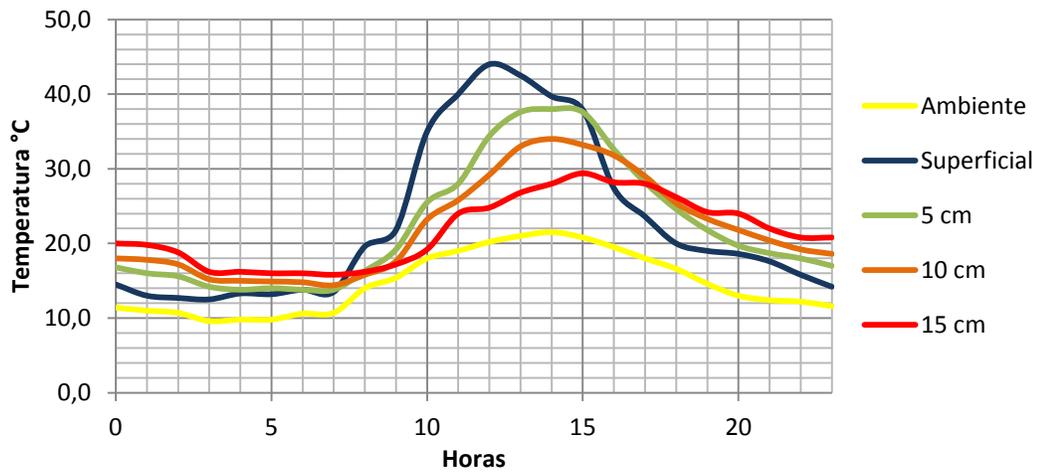


Figura 17: Distribución de la temperatura a diferentes profundidades de la carpeta asfáltica en la Región Sierra.

DATOS DE CAMPO					
Horas	Temperatura °C				
	Ambiente	Superficial	5 cm	10 cm	15 cm
0:00	11,4	14,5	16,8	18,0	20,0
1:00	11,0	13,0	16,0	17,8	19,8
2:00	10,7	12,7	15,6	17,2	18,8
3:00	9,6	12,5	14,2	15,2	16,2
4:00	9,8	13,3	13,8	15,0	16,2
5:00	9,8	13,2	14,0	14,9	16,0
6:00	10,6	13,8	13,8	14,8	16,0
7:00	10,7	13,5	13,8	14,4	15,8
8:00	14,0	19,6	16,3	15,8	16,2
9:00	15,4	21,8	19,2	17,6	17,2
10:00	18,0	35,0	25,5	23,2	19,2
11:00	19,0	40,0	28,0	25,8	24,0
12:00	20,2	44,0	34,4	29,2	24,8
13:00	21,0	42,5	37,6	33,0	26,8
14:00	21,5	39,7	38,0	34,0	28,0
15:00	20,8	37,9	37,6	33,2	29,4
16:00	19,5	27,4	32,6	31,8	28,2
17:00	18,0	23,6	28,2	29,0	28,0
18:00	16,6	20,0	24,6	25,4	26,2
19:00	14,6	19,0	21,8	23,3	24,2
20:00	13,0	18,6	19,7	21,8	24,0
21:00	12,4	17,6	18,7	20,4	22,0
22:00	12,2	15,8	18,0	19,2	20,8
23:00	11,6	14,2	17,0	18,6	20,8

Tabla 23: Medición de temperatura de la carpeta asfáltica a diferentes profundidades y temperatura ambiente.

Al igual que en la Región Costa se consideró tomar la relación de la temperatura ambiente con la temperatura a 5cm de profundidad como la relación representativa para el análisis de la presente investigación, debido a que en este punto se puede observar las mayores temperaturas del pavimento

y por lo tanto tiene una mayor posibilidad de presentar deformaciones permanentes, es decir el análisis será conservador considerando la temperatura a 5cm como la temperatura representativa del pavimento.

A continuación se puede observar la distribución de las temperaturas a 5cm de profundidad en la Región Sierra para todos los meses de un año.

AÑO 2013	TEMPERATURA DE CAPA ASFALTICA °C (Profundidad: 5cm)																							
HORAS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ENERO	17	16	16	16	15	15	15	15	15	19	24	27	34	37	38	38	34	30	26	24	20	19	18	17
FEBRERO	17	16	16	16	15	15	15	15	15	17	22	26	32	35	35	35	31	28	25	23	20	19	18	17
MARZO	18	17	16	16	15	15	15	15	16	19	24	27	33	36	36	36	32	29	25	24	21	20	19	18
ABRIL	17	16	16	16	15	15	14	14	15	18	23	26	32	35	36	36	33	29	25	24	20	19	18	17
MAYO	17	17	16	16	15	15	15	15	16	19	24	27	32	35	35	36	32	28	24	23	20	19	18	18
JUNIO	17	16	15	15	14	14	13	14	15	18	23	26	32	34	34	34	31	27	24	23	20	19	18	17
JULIO	18	17	17	17	15	15	14	14	15	18	23	25	31	34	34	34	30	27	23	22	21	20	19	18
AGOSTO	18	17	16	16	15	15	13	14	15	18	23	26	32	35	34	35	31	27	23	22	21	20	18	18
SEPTIEMBRE	18	17	16	16	14	14	13	14	15	19	25	28	34	36	35	35	31	28	24	23	21	20	19	18
OCTUBRE	18	17	16	16	14	14	13	14	15	19	25	28	34	36	35	35	31	28	24	23	21	20	19	18
NOVIEMBRE	17	16	16	16	15	15	13	14	16	19	25	28	35	38	38	37	32	28	24	22	20	19	18	17
DICIEMBRE	17	16	15	15	14	14	14	15	16	19	24	28	34	37	37	37	33	28	25	23	20	19	18	17

Temperatura de la carpeta asfáltica a 5cm de profundidad en la Región Sierra.

Para la Región Sierra, se puede observar que las temperaturas en el pavimento están en el rango de 13 y 39°C, incluidos dichos valores. Estas pueden considerarse las temperaturas de trabajo para dicha región.

5.3.5. Temperatura ambiente de la Región Amazónica.

Al igual que en el análisis de las anteriores regiones, en la Región Amazónica se consideró el promedio horario de la temperatura del aire para cada mes del año 2013 considerando la información de las siguientes ciudades:

- Tena (Prov. Napo)
- Nueva Loja (Prov. Sucumbíos)

A continuación en la Figura 18, se presenta la información de temperatura para el mes de enero del año 2013 en las diferentes ciudades de la Región Amazónica.

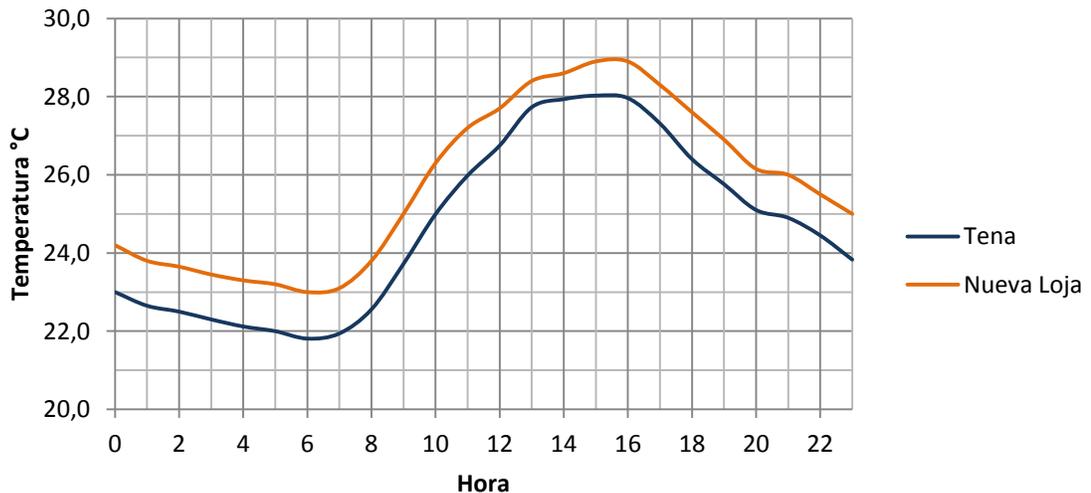


Figura 18: Temperatura horaria del mes de Enero que corresponden a las diversas ciudades de la Región Amazónica.

Al igual que en los anteriores análisis de temperatura de trabajo se consideró trabajar con valores que representan el 85% de la temperatura del aire de las ciudades de la Región Amazónica.

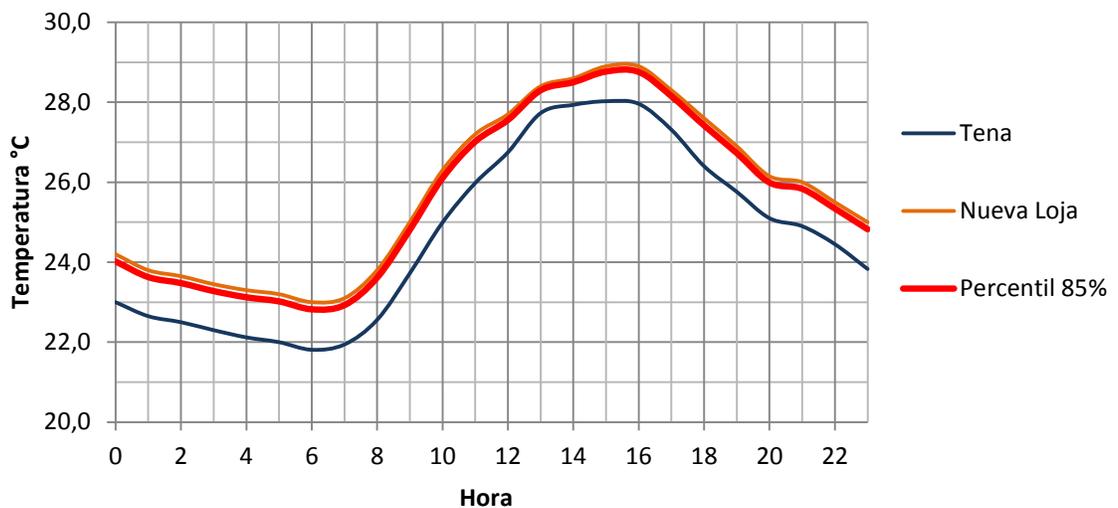


Figura 19: Temperatura de trabajo horaria del mes de enero que corresponde a la Región Amazónica.

El mismo análisis se realizó en los demás meses obteniendo una temperatura horaria para cada mes del año 2013, como se puede observar a continuación en la Tabla 24:

AÑO 2013	Región Amazónica																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ENERO	24,0	23,6	23,5	23,3	23,1	23,0	22,8	22,9	23,6	24,8	26,1	27,0	27,6	28,3	28,5	28,8	28,8	28,2	27,4	26,7	26,0	25,8	25,3	24,8
FEBRERO	23,5	23,3	23,0	22,9	22,8	22,5	22,3	22,3	22,9	23,7	24,6	25,6	26,5	27,1	27,2	27,0	27,1	26,7	26,1	25,5	24,9	24,4	24,2	23,8
MARZO	23,4	23,1	22,9	22,8	22,5	22,5	22,1	22,3	23,0	23,9	24,9	25,7	26,4	27,1	27,5	27,6	27,7	27,6	26,9	26,2	25,7	25,4	24,8	24,7
ABRIL	22,9	22,7	22,4	22,2	22,0	21,8	21,9	22,3	23,5	25,0	26,2	27,0	27,4	27,8	28,3	28,3	28,2	27,5	26,7	25,7	25,0	24,4	23,5	23,0
MAYO	23,3	22,8	22,8	22,4	22,2	21,8	22,2	22,5	23,3	24,3	25,3	25,9	26,6	27,0	27,6	27,6	27,2	26,8	25,8	25,3	24,6	24,2	23,6	23,3
JUNIO	21,7	21,5	21,4	21,3	21,2	21,1	21,8	22,1	22,9	23,7	24,5	25,2	25,9	26,6	27,0	27,2	27,0	26,5	25,6	24,3	23,9	23,6	23,0	22,3
JULIO	21,0	20,7	20,5	20,4	20,3	20,3	21,3	21,4	22,0	23,0	24,0	25,0	25,8	26,3	26,6	26,8	26,4	26,0	25,2	23,9	23,5	23,0	22,4	21,7
AGOSTO	20,7	20,4	20,4	20,3	20,6	20,6	21,3	21,5	22,1	23,1	24,2	25,2	26,2	26,8	27,1	27,3	27,3	26,6	26,0	24,4	23,6	23,0	22,5	21,9
SEPTIEMBRE	22,5	22,4	22,2	22,3	22,3	22,1	22,0	22,2	23,2	24,6	26,0	27,1	28,1	28,6	28,9	29,0	28,8	28,2	27,2	25,8	25,1	24,4	23,7	23,2
OCTUBRE	21,7	21,6	21,5	21,4	21,2	21,2	22,0	22,5	23,8	25,3	26,1	28,7	29,4	29,7	29,6	29,2	28,1	27,5	26,4	24,6	23,8	23,0	22,1	21,8
NOVIEMBRE	21,5	21,4	21,5	21,6	21,5	21,7	22,3	23,0	24,0	25,4	26,5	27,7	28,7	29,3	29,5	29,2	29,0	28,0	26,7	24,9	24,2	23,5	22,9	22,3
DICIEMBRE	23,0	22,3	22,6	22,3	22,3	22,2	22,4	22,8	24,1	25,7	27,0	28,2	28,4	29,3	29,2	29,2	28,9	28,4	27,0	26,3	25,2	24,5	23,9	23,3

Tabla 24: Temperatura horaria de la Región Amazónica

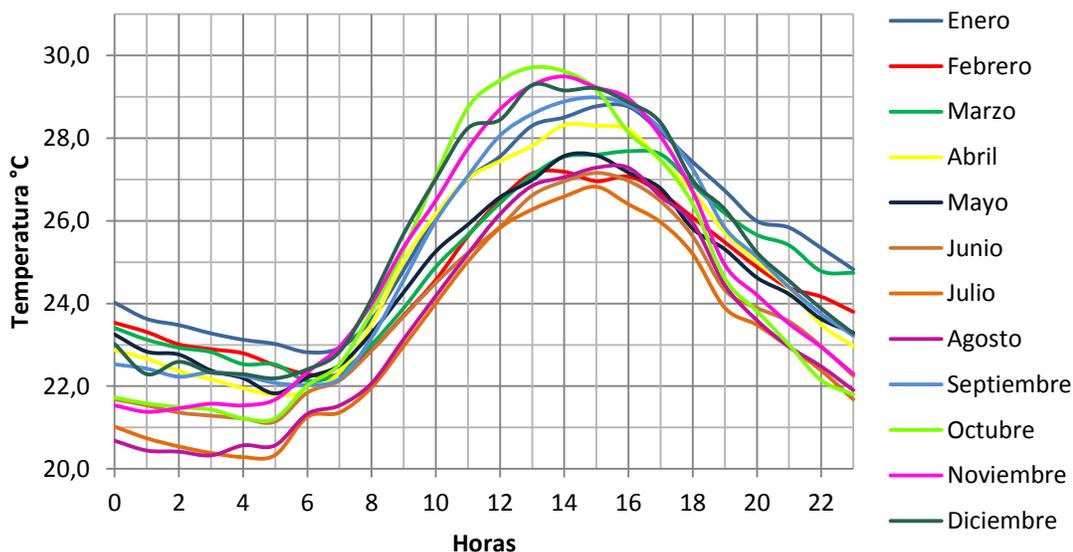


Figura 20: Distribución de la temperatura horaria de la Región Amazónica

5.3.6. Temperatura de la carpeta asfáltica en la Región Amazónica

Se puede observar, si se comparan los resultados de las figuras 20 y 10 que las temperaturas de la Región Amazónica tienen una distribución muy parecida a las temperaturas de la región costa, además las condiciones climáticas que analiza esta investigación son las temperaturas del aire y la relación con las temperaturas del pavimento a diferentes profundidades sin considerar otros factores climáticos como lluvias, neblina y otras.

Considerando las pocas diferencias en las variaciones de temperatura que existen en estas dos regiones, se decidió tomar la relación entre temperatura del aire con la temperatura del pavimento de la Región Costa también para la Región Amazónica, dicha relaciones se pueden observar en la Tabla 20

De igual manera se toma la relación de la temperatura ambiente con la temperatura a 5cm de profundidad como la relación representativa para el análisis de la presente investigación, por el mismo principio que en este rango se puede observar las mayores temperaturas del pavimento y por lo tanto tiene una mayor posibilidad de presentar deformaciones permanentes.

En la tabla 25 se puede observar la distribución de la temperatura a 5cm de profundidad en la Región Amazónica para todos los meses de un año.

AÑO 2013	TEMPERATURA DE CAPA ASFALTICA °C (Profundidad: 5cm)																							
HORAS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ENERO	32	31	30	29	29	29	28	28	29	30	31	33	38	40	41	43	42	41	39	37	37	35	34	33
FEBRERO	31	30	30	29	28	28	27	27	28	29	29	31	37	39	39	40	40	39	37	36	35	33	33	32
MARZO	31	30	29	29	28	28	27	27	28	29	30	31	37	39	40	41	41	40	38	37	36	34	33	33
ABRIL	30	29	29	28	27	27	27	27	29	30	31	33	38	40	41	42	42	40	38	36	35	33	32	31
MAYO	31	30	29	28	28	27	27	28	28	29	30	32	37	39	40	41	40	39	36	35	35	33	32	31
JUNIO	29	28	27	27	26	26	27	27	28	29	29	31	36	38	39	40	40	39	36	34	34	32	31	30
JULIO	28	27	26	26	25	25	26	26	27	28	29	31	36	38	38	40	39	38	35	33	33	31	30	29
AGOSTO	27	26	26	26	26	26	26	26	27	28	29	31	36	38	39	40	40	39	37	34	33	31	30	29
SEPTIEMBRE	30	29	29	28	28	27	27	27	28	30	31	33	39	41	42	43	42	41	38	36	36	33	32	31
OCTUBRE	29	28	28	27	26	26	27	28	29	31	32	35	41	42	43	43	41	40	37	34	34	31	30	29
NOVIEMBRE	29	28	28	27	27	27	27	28	29	31	32	34	40	42	42	43	43	41	38	35	34	32	31	30
DICIEMBRE	31	29	29	28	28	28	27	28	29	31	32	35	39	42	42	43	43	41	38	37	36	33	32	31

Tabla 25: Temperatura de la carpeta asfáltica a 5cm de profundidad en la Región Amazónica

Para la Región Amazónica, puede observarse que las temperaturas en el pavimento están en el rango de 25 y 43°C, incluidos dichos valores. Estas pueden considerarse las temperaturas de trabajo para dicha región.

5.4. Viscosidad dinámica de la mezcla asfáltica

Las mezclas asfálticas son materiales que contienen componentes elásticas y componentes viscosas. La presencia de deformaciones plásticas es producida por las acumulaciones de deformaciones irreversibles que se producen por la componente viscosa S_{bit} (viscosa).

Para encontrar la componente de viscosidad dinámica de la mezcla asfáltica (η) es necesario considerar la temperatura del pavimento y la calidad del asfalto a utilizar.

A partir de las pruebas de control de calidad del asfalto, correspondientes a los ensayos de película delgada (TFOT), se considera las siguientes parámetros del asfalto: Índice de penetración (IP) y Punto de ablandamiento (T_{800pen}).

Conociendo dichos parámetros del asfalto, se accede a un nomograma desarrollado por la Shell mostrado en la Figura 3, que muestra la viscosidad del betún como una función de $T - T_{800pen}$, la diferencia entre la temperatura que estará expuesto el betún y la temperatura a la que el valor de penetración es igual a 800.

➤ **Región Costa**

Mezcla de Planta	IP:	-0,3
	T800pen	55
T. Media Pav. (°C)	Tpav. -T800pen	Visc (Ns/m ²)
26	-29	1.200.000
27	-28	900.000
28	-27	700.000
29	-26	550.000
30	-25	400.000
31	-24	300.000
32	-23	270.000
33	-22	170.000
34	-21	130.000
35	-20	120.000
36	-19	100.000
37	-18	80.000
38	-17	55.000
39	-16	53.000
40	-15	42.000
41	-14	34.000
42	-13	30.000
43	-12	24.000
44	-11	20.000
45	-10	15.500

Tabla 26: Valores de viscosidad dinámica para mezcla de planta bajo temperaturas de la Región Costa.

➤ **Región Sierra**

Mezcla de Planta	IP:	-0,3
	T800pen	55
T. Media Pav. (°C)	Tpav. -T800pen	Visc (Ns/m ²)
13	-42	29.000.000
14	-41	20.000.000
15	-40	17.000.000
16	-39	13.000.000
17	-38	9.500.000
18	-37	8.000.000
19	-36	6.500.000
20	-35	5.000.000
21	-34	3.700.000
22	-33	2.900.000
23	-32	2.400.000
24	-31	1.800.000
25	-30	1.300.000
26	-29	1.200.000
27	-28	900.000
28	-27	700.000
29	-26	550.000
30	-25	400.000
31	-24	300.000
32	-23	270.000
33	-22	170.000
34	-21	130.000
35	-20	120.000
36	-19	100.000
37	-18	80.000
38	-17	55.000
39	-16	53.000

Tabla 27: Valores de viscosidad dinámica para mezcla de planta bajo temperaturas de la Región Sierra.

➤ **Región Amazónica**

Mezcla de Planta	IP:	-0,3
	T800pen	55
T. Media Pav. (°C)	Tpav. -T800pen	Visc (Ns/m ²)
25	-30	1.300.000
26	-29	1.200.000
27	-28	900.000
28	-27	700.000
29	-26	550.000
30	-25	400.000
31	-24	300.000
32	-23	270.000
33	-22	170.000
34	-21	130.000
35	-20	120.000
36	-19	100.000
37	-18	80.000
38	-17	55.000
39	-16	53.000
40	-15	42.000
41	-14	34.000
42	-13	30.000
43	-12	24.000

Tabla 28: Valores de viscosidad dinámica para mezcla de planta bajo temperaturas de la Región Amazónica.

5.5. Módulos de rigidez (Eac) de las mezclas asfálticas para las temperaturas de trabajo determinadas

A partir de la Ecuación 6 determinada por los ensayos de módulo bajo deformación controlada a diferentes temperaturas, se calcularon los módulos de la mezcla asfáltica para cada una de la temperatura que presentara el pavimento en las diferentes regiones del Ecuador.

Los módulos de rigidez que presenta cada región se presenta a continuación:

➤ Región Costa

T. del Pavimento (°C)	Módulos de rigidez Eac (Mpa)
26	2.760
27	2.618
28	2.483
29	2.354
30	2.233
31	2.118
32	2.008
33	1.905
34	1.806
35	1.713
36	1.625
37	1.541
38	1.461
39	1.386
40	1.314
41	1.247
42	1.182
43	1.121
44	1.063
45	1.008

Tabla 29: Módulos de rigidez Eac para temperatura de trabajo en la Región Costa

➤ **Región Sierra**

T. del Pavimento (°C)	Módulos de rigidez Eac (Mpa)
13	5.497
14	5.213
15	4.944
16	4.689
17	4.447
18	4.218
19	4.000
20	3.793
21	3.598
22	3.412
23	3.236
24	3.069
25	2.910
26	2.760
27	2.618
28	2.483
29	2.354
30	2.233
31	2.118
32	2.008
33	1.905
34	1.806
35	1.713
36	1.625
37	1.541
38	1.461
39	1.386
40	1.314
41	1.247
42	1.182
43	1.121
44	1.063
45	1.008

**Tabla 30: Módulos de rigidez Eac para temperatura de trabajo en la Región
Sierra**

➤ **Región Amazónica**

T. del Pavimento (°C)	Módulos de rigidez Eac (Mpa)
26	2.760
27	2.618
28	2.483
29	2.354
30	2.233
31	2.118
32	2.008
33	1.905
34	1.806
35	1.713
36	1.625
37	1.541
38	1.461
39	1.386
40	1.314
41	1.247
42	1.182
43	1.121

Tabla 31: Módulos de rigidez Eac para temperatura de trabajo en la Región Amazónica

Se puede visualizar que algunas temperaturas se repiten en las tres regiones y por consiguiente los módulos también. Es importante aclarar que los módulos presentados en estas tablas no son determinados con el equipo N.A.T, sino por la ecuación de ajuste obtenido previamente, ver Ecuación 6

5.6 Diseño de estructuras de pavimentos según Método AASHTO 93

Se diseñaron 24 estructuras de acuerdo a la normativa AASHTO 93 (“Guide for design of Pavement Structures”, Washington D.C.), las cuales corresponden a una matriz que relaciona 6 valores de ESAL de diseño con 4 módulos resilientes de subrasante. Los valores de ESAL seleccionados fueron: 20.000, 50.000, 500.000, 5.000.000, 25.000.000, 50.000.000 y los módulos resilientes fueron: 250, 500, 750, 900 Kg/cm².

Los materiales de base y sub-base de agregados considerados para el diseño cumplen las exigencias del MTOP (2002) asumiéndose para este un módulo elástico de 2.100 Kg/cm² para la base (CBR ≈ 80%) y de 1.200 Kg/cm² para la subbase (CBR ≈ 30%).

Para el diseño de las 24 estructuras por el método AASHTO 93 se utilizó una hoja de cálculo de EXCEL la cual se muestra a continuación en la Figura 21

MÉTODO AASHTO 93					
EJEMPLO DE DISEÑO PARA 5 X 10⁶ EJES Y MR DE 50 MPa.					
DATOS :					
EJES ACUMULADOS 8,2 ton :	5,000,000				
CONFIABILIDAD (%) :	85				
DESVIACION ESTANDAR :	-1.037				
ERROR ESTANDAR COMBINADO :	0.49				
MODULO SUBRASANTE (kg/cm ²) :	500	(50 MPa)			
MODULO SUBBASE AGREG. (kg/cm ²) :	1,200	a 3 :	0.120	m 3 :	0.90
MOD. BASE AGREGADOS (kg/cm ²) :	2,100	a 2 :	0.135	m 2 :	1.00
MOD. CARPETA ASFALTICA (kg/cm ²) :	32,000	a 1 :	0.440	m 1 :	x
PERDIDA TOTAL DE P S I :	2.2				
AJUSTE DEL:		SN3 (SR):		SN2 (SB):	
NUMERO ESTRUCT REQUERIDO :	4.2			3.1	
LOG (EJES ACUMULADOS) :	6.7			6.7	
ECUACION DE COMPROBACION :	6.7			6.7	
AJUSTE DEL:				SN1 (BA):	
NUMERO ESTRUCT REQUERIDO :				2.5	
LOG (EJES ACUMULADOS) :				6.7	
ECUACION DE COMPROBACION :				6.7	
DETERMINACION DE ESPESORES:					
CARPETA ASFALTICA :	D1* :	REAL,cm :	14.2	AJUST,cm :	14
	SN1* :	2.4			
BASE DE AGREGADOS :	D2* :	REAL,cm :	12.5	AJUST,cm :	15
	SN2* :	3.2			
SUBBASE DE AGREGADOS :	D3* :	REAL,cm :	22.6	AJUST,cm :	25
	SN3* :	4.3			

Figura 21: Ejemplo de diseño por AAHTO 93 para ESAL 500.000 ejes y MR= 500 kg/cm²

El mismo procedimiento se realizó para determinar el diseño de las demás estructuras, las cuales se muestran a continuación:

ESAL: 20.000		
25 mm	e = 50 mm	C.A.
25 mm		
e = 150 mm		Base
e = 150 mm		Sub-base
SR = 250 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 50.000		
40 mm	e = 75 mm	C.A.
35 mm		
e = 150 mm		Base
e = 150 mm		Sub-base
SR = 250 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 500.000		
30 mm	e = 100 mm	C.A.
30 mm		
40 mm		
e = 150 mm		Base
e = 300 mm		Sub-base
SR = 250 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 5.000.000		
50 mm	e = 140 mm	C.A.
50 mm		
40 mm		
e = 280 mm		Base
e = 300 mm		Sub-base
SR = 250 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 25.000.000		
60 mm	e = 180 mm	C.A.
60 mm		
60 mm		
e = 300 mm		Base
e = 400 mm		Sub-base
SR = 250 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 50.000.000		
60 mm	e = 200 mm	C.A.
60 mm		
80 mm		
e = 300 mm		Base
e = 450 mm		Sub-base
SR = 250 Kg/cm ²		Sub-rasante

Figura 22: Estructuras de pavimento para MR=250 kg/cm²

ESAL: 20.000		
25 mm	e = 50 mm	C.A.
25 mm		
e = 180 mm		Base
SR = 500 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 50.000		
40 mm	e = 75 mm	C.A.
35 mm		
e = 150 mm		Base
SR = 500 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 500.000		
30 mm	e = 100 mm	C.A.
30 mm		
40 mm		
e = 150 mm		Base
e = 150 mm		Sub-base
SR = 500 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 5.000.000		
50 mm	e = 140 mm	C.A.
50 mm		
40 mm		
e = 150 mm		Base
e = 150 mm		Sub-base
SR = 500 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 25.000.000		
60 mm	e = 180 mm	C.A.
60 mm		
60 mm		
e = 200 mm		Base
e = 250 mm		Sub-base
SR = 500 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 50.000.000		
60 mm	e = 200 mm	C.A.
60 mm		
80 mm		
e = 200 mm		Base
e = 300 mm		Sub-base
SR = 500 Kg/cm ²		Sub-rasante

Figura 23: Estructuras de pavimento para MR=500 kg/cm²

ESAL: 20.000		
25 mm	e = 50 mm	C.A.
25 mm		
e = 120 mm		Base
SR = 750 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 50.000		
40 mm	e = 75 mm	C.A.
35 mm		
e = 120 mm		Base
SR = 750 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 500.000		
30 mm	e = 100 mm	C.A.
30 mm		
40 mm		
e = 180 mm		Base
SR = 750 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 5.000.000		
50 mm	e = 140 mm	C.A.
50 mm		
40 mm		
e = 230 mm		Base
SR = 750 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 25.000.000		
60 mm	e = 180 mm	C.A.
60 mm		
60 mm		
e = 280 mm		Base
SR = 750 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 50.000.000		
60 mm	e = 200 mm	C.A.
60 mm		
80 mm		
e = 300 mm		Base
SR = 750 Kg/cm ²		Sub-rasante

Figura 24: Estructuras de pavimento para MR=750 kg/cm²

ESAL: 20.000		
25 mm	e = 50 mm	C.A.
25 mm		
e = 100 mm		Base
SR = 900 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 50.000		
40 mm	e = 75 mm	C.A.
35 mm		
e = 100 mm		Base
SR = 900 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 500.000		
30 mm	e = 100 mm	C.A.
30 mm		
40 mm		
e = 150 mm		Base
SR = 900 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 5.000.000		
50 mm	e = 140 mm	C.A.
50 mm		
40 mm		
e = 180 mm		Base
SR = 900 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 25.000.000		
60 mm	e = 180 mm	C.A.
60 mm		
60 mm		
e = 220 mm		Base
SR = 900 Kg/cm ²		Sub-rasante

ESAL: 50.000.000		
60 mm	e = 200 mm	C.A.
60 mm		
80 mm		
e = 250 mm		Base
SR = 900 Kg/cm ²		Sub-rasante

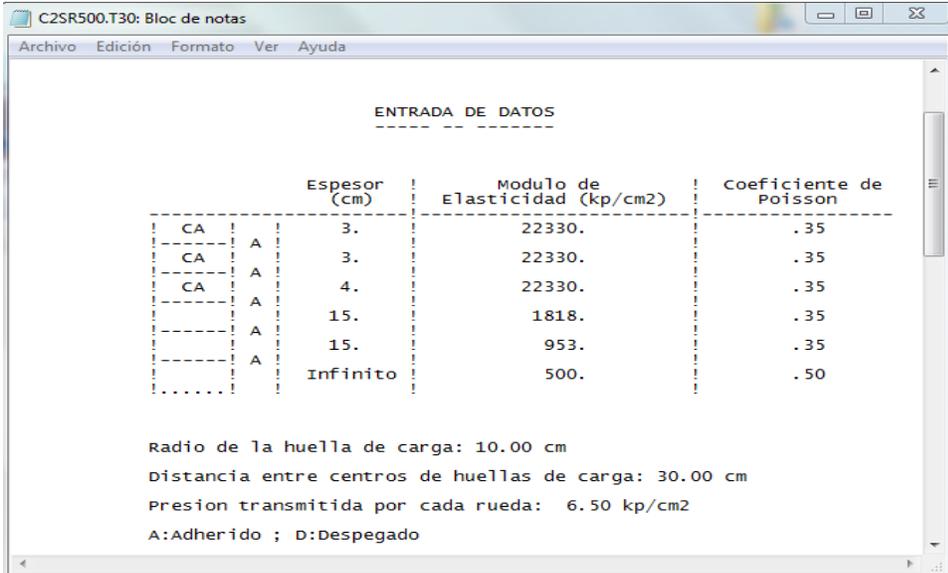
Figura 25: Estructuras de pavimento para MR=900 kg/cm²

5.7. Determinación del esfuerzo promedio en capa asfáltica

Para el cálculo de los esfuerzos promedio se empleó el programa ALIZE 3 desarrollado en Francia. Para cada una de las estructuras se realizaron diversas corridas que abarcaron cada una de las temperaturas esperadas en cada región, considerando la incidencia de la misma en el módulo de rigidez de la capa asfáltica. Se recuerda que para el diseño AASHTO 93 se emplea un único módulo que corresponde a una temperatura de diseño de 20°C.

A continuación se muestra el cálculo para una estructura de pavimento con ESAL: 500.000 y un módulo resiliente de $SR= 500 \text{ Kg/cm}^2$, considerando el módulo de la mezcla correspondiente a una temperatura de 30°C.

Datos de entrada en ALIZE:



		Espesor (cm)	Modulo de Elasticidad (kp/cm2)	Coeficiente de Poisson
CA	A	3.	22330.	.35
CA	A	3.	22330.	.35
CA	A	4.	22330.	.35
	A	15.	1818.	.35
	A	15.	953.	.35
	A	Infinito	500.	.50

Radio de la huella de carga: 10.00 cm
Distancia entre centros de huellas de carga: 30.00 cm
Presion transmitida por cada rueda: 6.50 kp/cm2
A:Adherido ; D:Despegado

Figura 26: Entrada de datos de ALIZE

Fuente: Software ALIZE

Z (cm)	Adherido	Deformacion Tangencial (1/1000)	Tension Tangencial (kp/cm2)	Deformacion Vertical (1/1000)	Tension Vertical (kp/cm2)
0.	CA	.4141 B	16.508 B	-.2572 C	6.500 A
3.	Adherido	.1502 C	7.359 B	-.1346 C	5.713 B
6.	Adherido	.1502 C	7.359 B	-.1346 C	5.713 B
6.	CA	-.0783 B	-.694 C	.1828 A	3.818 B
6.	CA	-.0783 B	-.694 C	.1828 A	3.818 B
10.	Adherido	-.3893 B	-11.274 B	.4022 B	1.819 B
10.	Adherido	-.3893 B	-.044 C	.9750 B	1.819 B
25.	Adherido	-.4178 C	-.678 C	.6136 C	.711 C
25.	Adherido	-.4178 C	-.173 C	.8347 C	.711 C
40.	Adherido	-.3903 C	-.325 C	.6469 C	.408 C
40.	Adherido	-.3903 C	.042 C	.7063 C	.408 C

Figura 27: Salida de resultados de ALIZE

Fuente: Software ALIZE

Luego que el programa arrojo los resultados se proceden a determinar los esfuerzos que corresponden solo a la carpeta asfáltica.

Profundidad de capa asfáltica (cm)	Esfuerzo (Kg/cm2)
0	6,5
3	5,71
6	3,82
10	1,82

Tabla 32: Esfuerzo en la capa asfáltica para estructura con SR: 500 Kg/cm2 a una temperatura de 30°C

Con los esfuerzos que se producen en la capa asfáltica se calcula el esfuerzo promedio

$$\sigma_{prom(MR\ 500;30^{\circ}C)} = 4.46 \frac{kg}{cm^2}$$

Considerando las temperaturas para la Región Costa en el mes de enero bajo un ESAL de 500.000 se obtuvo:

REGIÓN COSTA						
Mes: Enero		ESAL 5E+05			MR=500Kg/cm ²	
HORA	TEMPERATURA (°C)	σ_1 (Kg/cm ²)	σ_2 (Kg/cm ²)	σ_3 (Kg/cm ²)	σ_4 (Kg/cm ²)	σ por hora (Kg/cm ²)
0	33	6,50	5,72	3,85	1,88	4,49
1	32	6,50	5,71	3,82	1,84	4,47
2	32	6,50	5,71	3,82	1,84	4,47
3	31	6,50	5,70	3,79	1,80	4,45
4	30	6,50	5,69	3,76	1,76	4,43
5	30	6,50	5,69	3,76	1,76	4,43
6	29	6,50	5,68	3,72	1,72	4,40
7	30	6,50	5,69	3,76	1,76	4,43
8	30	6,50	5,69	3,76	1,76	4,43
9	31	6,50	5,70	3,79	1,80	4,45
10	32	6,50	5,71	3,82	1,84	4,47
11	34	6,50	5,74	3,89	1,93	4,51
12	40	6,50	5,81	4,10	2,20	4,65
13	42	6,50	5,84	4,17	2,30	4,70
14	43	6,50	5,85	4,21	2,35	4,73
15	43	6,50	5,85	4,21	2,35	4,73
16	43	6,50	5,85	4,21	2,35	4,73
17	41	6,50	5,82	4,13	2,25	4,68
18	39	6,50	5,80	4,06	2,16	4,63
19	38	6,50	5,79	4,03	2,11	4,60
20	37	6,50	5,77	3,99	2,06	4,58
21	35	6,50	5,75	3,92	1,97	4,54
22	35	6,50	5,75	3,92	1,97	4,54
23	34	6,50	5,74	3,89	1,93	4,51
σ prom (Kg/cm ²)		4,54				

Tabla 33: Esfuerzo promedio ponderado por hora para una estructura de ESAL: 500.000 y SR: 500 en la Región Costa.

Donde σ_{prom} es la media ponderada de los esfuerzos promedios por hora considerando las repeticiones por hora.

5.7.1. Esfuerzos promedio de estructuras de diseño

REGIÓN COSTA	MR (MPa)			
	25	50	75	90
ESAL	Esfuerzo prom (Mpa)			
20.000	4,95	5,05	5,17	5,20
50.000	4,30	4,34	4,49	4,17
500.000	4,40	4,56	4,52	4,55
5.000.000	3,93	4,01	3,95	3,97
25.000.000	3,81	3,87	3,82	3,83
50.000.000	3,88	3,93	3,88	3,89

Tabla 34: Esfuerzo promedio ponderado para todas las estructuras diseñadas en la Región Costa.

REGIÓN SIERRA	MR (MPa)			
	25	50	75	90
ESAL	Esfuerzo prom (Mpa)			
20.000	4,60	4,69	4,80	4,85
50.000	4,02	4,06	4,19	4,23
500.000	4,18	4,31	4,28	4,31
5.000.000	3,74	3,79	3,75	3,83
25.000.000	3,67	3,72	3,67	3,68
50.000.000	3,76	3,79	3,76	3,77

Tabla 35: Esfuerzo promedio ponderado para todas las estructuras diseñadas en la Región Sierra

REGIÓN AMAZÓNICA	MR (MPa)			
	25	50	75	90
ESAL	Esfuerzo prom (Mpa)			
20.000	4,92	5,02	5,13	5,17
50.000	4,27	4,31	4,46	4,51
500.000	4,38	4,53	4,49	4,53
5.000.000	3,91	3,98	3,93	3,95
25.000.000	3,80	3,86	3,80	3,81
50.000.000	3,86	3,91	3,86	3,88

Tabla 36: Esfuerzo promedio ponderado para todas las estructuras diseñadas en la Región Amazónica.

5.8. Determinación del S_{mix} y $S_{bit(visc)}$ para las estructuras de pavimentos diseñadas

Para el uso del método de Van de Loo para la predicción de deformaciones permanentes se debe determinar el S_{mix} de la componentes viscosa de la mezcla, la cual es la comkponente que sufre deformaciones irre recuperables.

Para calcular el S_{mix} de la componente viscosa primero se debe encontrar el $S_{bit(visc)}$, el cual se lo obtiene a partir de la Ecuación 2 que se encuentra en función de la temperatura, de la viscosidad dinámica del cemento asfaltico y del número de ejes equivalentes.

Con el valor de $S_{bit (visc)}$ calculado para cada estructura, se utiliza la Ecuación 5 que representa la relación de $S_{mix} - S_{bit}$ para determinar el valor respectivo de S_{mix} para cada estructura de pavimento diseñada.

5.8.1. Cálculo de $S_{bit(visc)}$ para las estructuras de pavimentos diseñadas

Para el cálculo de $S_{bit(visc)}$ se realizó un análisis mensual para cada estructura de pavimento, obteniendo 12 valores los cuales se sumaron para obtener el $S_{bit(visc)}$ con el cual se trabajó en cada estructura, utilizando los siguientes datos:

- Temperatura de la capa asfáltica
- Viscosidad dinámica del cemento asfáltico (η_i)
- N_i = número de pases de la carga
- Tiempo de pase de una rueda estándar ($t_w = 0,02\text{seg}$)

En la tabla 34 se observa el procedimiento de análisis que se utilizó para calcular del $S_{bit(visc)}$ para una estructura de pavimento diseñada para soportar un ESAL: 500.000 con una SR de 500 Kg/cm^2

REGIÓN COSTA		tw: 0,02 seg		ESAL: 500.000		Hca (mm): 100		MES DE ENERO				
HORAS	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
% Vehículos pesados	1,97	1,44	1,28	1,49	2,42	3,57	4,73	5,15	5,11	4,86	5,14	5,20
Ni	823	601	535	621	1008	1489	1970	2145	2129	2025	2142	2166
T. Media Pav. (°C)	33	32	32	31	30	30	29	30	30	31	32	34
η (Ns/m ²)	170.000	270.000	270.000	300.000	400.000	400.000	550.000	400.000	400.000	300.000	270.000	130.000
Ni/ η	0,0048	0,0022	0,0020	0,0021	0,0025	0,0037	0,0036	0,0054	0,0053	0,0067	0,0079	0,0167
HORAS	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
% Vehículos pesados	5,13	5,26	5,37	5,48	5,55	5,99	5,61	5,17	4,35	3,74	3,29	2,69
Ni	2136	2192	2237	2281	2314	2498	2338	2155	1814	1558	1372	1120
T. Media Pav. (°C)	40	42	43	43	43	41	39	38	37	35	35	34
η (Ns/m ²)	42.000	30.000	24.000	24.000	24.000	34.000	53.000	55.000	80.000	120.000	120.000	130.000
Ni/ η	0,0509	0,0731	0,0932	0,0951	0,0964	0,0735	0,0441	0,0392	0,0227	0,0130	0,0114	0,0086
Sbit visc (Pa) =		0,68										

Tabla 37: Cálculo de $S_{bit}(visc)$ para una estructura en la Región Costa con MR: 500 kg/cm² y ESAL: 500.000 en el mes de enero.

El mismo procedimiento se realizó para las demás estructuras de pavimentos en las diferentes condiciones de temperatura que presentan las Regiones del Ecuador en todos los meses del año.

5.8.2. Cálculo de S_{mix} para las estructuras de pavimentos diseñadas por AASTHO 93

Para el cálculo de los valores de S_{mix} de cada estructura se utilizó la ecuación de la línea ajuste de la gráfica $S_{mix} - S_{bit}$ (Ecuación 5), en la cual se ingresó con los valores de $S_{bit, visc}$ de cada estructura para las principales regiones del país como se observa a continuación.

➤ **Región Costa**

REGIÓN COSTA									
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	20.000				ESAL:	50.000			
Hca (mm):	50				Hca (mm):	75			
S bit visc (Pa)	523,92				S bit visc (Pa)	209,57			
S mix (MPa)	20,22				S mix (MPa)	18,28			
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	500.000				ESAL:	5.000.000			
Hca (mm):	100				Hca (mm):	140			
S bit visc (Pa)	20,96				S bit visc (Pa)	2,10			
S mix (MPa)	14,19				S mix (MPa)	11,01			
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	25.000.000				ESAL:	50.000.000			
Hca (mm):	180				Hca (mm):	200			
S bit visc (Pa)	0,42				S bit visc (Pa)	0,21			
S mix (MPa)	9,22				S mix (MPa)	8,54			

Tabla 38: Módulo de rigidez S_{mix} para las estructuras de pavimento diseñadas por AASTHO 93 en la Región Costa.

➤ **Región Sierra**

REGIÓN SIERRA									
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	20.000				ESAL:	50.000			
Hca (mm):	50				Hca (mm):	75			
S bit visc (Pa)	3121,51				S bit visc (Pa)	1248,60			
S mix (MPa)	24,61				S mix (MPa)	22,25			
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	500000				ESAL:	5000000			
Hca (mm):	100				Hca (mm):	140			
S bit visc (Pa)	124,86				S bit visc (Pa)	12,49			
S mix (MPa)	17,27				S mix (MPa)	13,40			
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	25000000				ESAL:	50000000			
Hca (mm):	180				Hca (mm):	200			
S bit visc (Pa)	2,50				S bit visc (Pa)	1,25			
S mix (MPa)	11,22				S mix (MPa)	10,40			

Tabla 39: Módulo de rigidez S_{mix} para las estructuras de pavimento diseñadas por AASTHO 93 en la Región Sierra.

➤ **Región Amazónica**

REGIÓN AMAZÓNICA									
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	25.000				ESAL:	50.000			
Hca (mm):	75				Hca (mm):	75			
S bit visc (Pa)	668,74				S bit visc (Pa)	267,49			
S mix (MPa)	20,77				S mix (MPa)	18,78			
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	500.000				ESAL:	5.000.000			
Hca (mm):	100				Hca (mm):	140			
S bit visc (Pa)	26,75				S bit visc (Pa)	2,67			
S mix (MPa)	14,57				S mix (MPa)	11,31			
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	25.000.000				ESAL:	50.000.000			
Hca (mm):	180				Hca (mm):	200			
S bit visc (Pa)	0,53				S bit visc (Pa)	0,27			
S mix (MPa)	9,47				S mix (MPa)	8,78			

Tabla 40: Módulo de rigidez S_{mix} para las estructuras de pavimento diseñadas por AASTHO 93 en la Región Amazónica.

5.9. Cálculo de las deformaciones plásticas (ahuellamiento) en estructuras diseñadas por AASTHO 93.

Para el cálculo de los ahuellamientos en la capa asfálticas de las diferentes estructuras se emplea la Ecuación 1, en la cual se utiliza la información ya calculada de los esfuerzos promedios que se producen en la capa de pavimento y el módulo de rigidez (S_{mix}) correspondiente al módulo de rigidez del betún viscoso ($S_{bit\ visc}$) para cada estructura de pavimentos. Es importante aclarar que el valor de factor de corrección por efecto dinámico (C_m) será igual a 2 en el cálculo de ahuellamiento.

En las tablas que se muestran a continuación se observa los cálculos de ahuellamientos producidos en las capas asfálticas de las estructuras diseñadas bajo la condiciones de temperatura de las principales regiones del Ecuador:

REGIÓN COSTA									
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	20.000				ESAL:	50.000			
Hca (mm):	50				Hca (mm):	75			
Esfuerzo prom (Mpa)	0,49	0,50	0,51	0,51	Esfuerzo prom (Mpa)	0,42	0,43	0,44	0,41
S bit visc (Pa)	523,92	523,92	523,92	523,92	S bit visc (Pa)	209,57	209,57	209,57	209,57
S mix (MPa)	20,22	20,22	20,22	20,22	S mix (MPa)	18,28	18,28	18,28	18,28
Deformación (mm):	2,40	2,45	2,51	2,52	Deformación (mm):	3,46	3,49	3,61	3,35
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	500.000				ESAL:	5.000.000			
Hca (mm):	100				Hca (mm):	140			
Esfuerzo prom (Mpa)	0,43	0,45	0,44	0,45	Esfuerzo prom (Mpa)	0,39	0,39	0,39	0,39
S bit visc (Pa)	20,96	20,96	20,96	20,96	S bit visc (Pa)	2,10	2,10	2,10	2,10
S mix (MPa)	14,19	14,19	14,19	14,19	S mix (MPa)	11,01	11,01	11,01	11,01
Deformación (mm):	6,09	6,30	6,25	6,29	Deformación (mm):	9,81	9,99	9,86	9,90
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	25.000.000				ESAL:	50.000.000			
Hca (mm):	180				Hca (mm):	200			
Esfuerzo prom (Mpa)	0,37	0,38	0,37	0,38	Esfuerzo prom (Mpa)	0,38	0,39	0,38	0,38
S bit visc (Pa)	0,42	0,42	0,42	0,42	S bit visc (Pa)	0,21	0,21	0,21	0,21
S mix (MPa)	9,22	9,22	9,22	9,22	S mix (MPa)	8,54	8,54	8,54	8,54
Deformación (mm):	14,60	14,83	14,60	14,65	Deformación (mm):	17,80	18,04	17,79	17,85

Tabla 41: Ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Costa

REGIÓN COSTA								
Mr (MPa)	Deformación Permanente (mm) para ESAL de:						X: ESAL	Y: Deformacion, mm
	20.000	50.000	500.000	5.000.000	25.000.000	50.000.000		
25	2,40	3,46	6,09	9,81	14,60	17,80	$y = 0,2300x^{0,245}$	
50	2,45	3,49	6,30	9,99	14,83	18,04	$y = 0,2351x^{0,2447}$	
75	2,51	3,61	6,25	9,86	14,60	17,79	$y = 0,2559x^{0,2387}$	
90	2,52	3,35	6,29	9,90	14,65	17,85	$y = 0,2384x^{0,2432}$	

Tabla 42: Resumen de los valores de ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Costa

REGIÓN SIERRA									
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	20.000				ESAL:	50.000			
Hca (mm):	50				Hca (mm):	75			
Esfuerzo prom (Mpa)	0,45	0,46	0,47	0,48	Esfuerzo prom (Mpa)	0,39	0,40	0,41	0,41
S bit visc (Pa)	3121,51	3121,51	3121,51	3121,51	S bit visc (Pa)	1248,60	1248,60	1248,60	1248,60
S mix (MPa)	24,61	24,61	24,61	24,61	S mix (MPa)	22,25	22,25	22,25	22,25
Deformación (mm):	1,83	1,87	1,91	1,93	Deformación (mm):	2,66	2,68	2,77	2,80
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	500.000				ESAL:	5.000.000			
Hca (mm):	100				Hca (mm):	140			
Esfuerzo prom (Mpa)	0,41	0,42	0,42	0,42	Esfuerzo prom (Mpa)	0,37	0,37	0,37	0,38
S bit visc (Pa)	124,86	124,86	124,86	124,86	S bit visc (Pa)	12,49	12,49	12,49	12,49
S mix (MPa)	17,27	17,27	17,27	17,27	S mix (MPa)	13,40	13,40	13,40	13,40
Deformación (mm):	4,75	4,89	4,86	4,89	Deformación (mm):	7,66	7,77	7,69	7,84
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	25.000.000				ESAL:	50.000.000			
Hca (mm):	180				Hca (mm):	200			
Esfuerzo prom (Mpa)	0,36	0,36	0,36	0,36	Esfuerzo prom (Mpa)	0,37	0,37	0,37	0,37
S bit visc (Pa)	2,50	2,50	2,50	2,50	S bit visc (Pa)	1,25	1,25	1,25	1,25
S mix (MPa)	11,22	11,22	11,22	11,22	S mix (MPa)	10,40	10,40	10,40	10,40
Deformación (mm):	11,53	11,68	11,55	11,58	Deformación (mm):	14,17	14,31	14,17	14,20

Tabla 43: Ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Sierra

REGIÓN SIERRA								
Mr (MPa)	Deformación Permanente (mm) para ESAL de:						ECUACION	
	20.000	50.000	500.000	5.000.000	25.000.000	50.000.000	X: ESAL	Y: Deformacion, mm
25	1,83	2,66	4,75	7,66	11,53	14,17		$y = 0,1674x^{0,2499}$
50	1,87	2,68	4,89	7,77	11,68	14,31		$y = 0,1721x^{0,2491}$
75	1,91	2,77	4,86	7,69	11,55	14,17		$y = 0,1856x^{0,2438}$
90	1,93	2,80	4,89	7,84	11,58	14,20		$y = 0,1892x^{0,2431}$

Tabla 44: Resumen de los valores de ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Sierra

REGIÓN AMAZÓNICA									
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	20000				ESAL:	50000			
Hca (mm):	50				Hca (mm):	75			
Esfuerzo prom (Mpa)	0,48	0,49	0,50	0,51	Esfuerzo prom (Mpa)	0,42	0,42	0,44	0,44
S bit visc (Pa)	668,74	668,74	668,74	668,74	S bit visc (Pa)	267,49	267,49	267,49	267,49
S mix (MPa)	20,77	20,77	20,77	20,77	S mix (MPa)	18,78	18,78	18,78	18,78
Deformación (mm):	2,32	2,37	2,42	2,44	Deformación (mm):	3,34	3,37	3,49	3,53
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	500000				ESAL:	5000000			
Hca (mm):	100				Hca (mm):	140			
Esfuerzo prom (Mpa)	0,43	0,44	0,44	0,44	Esfuerzo prom (Mpa)	0,38	0,39	0,39	0,39
S bit visc (Pa)	26,75	26,75	26,75	26,75	S bit visc (Pa)	2,67	2,67	2,67	2,67
S mix (MPa)	14,57	14,57	14,57	14,57	S mix (MPa)	11,31	11,31	11,31	11,31
Deformación (mm):	5,90	6,10	6,04	6,09	Deformación (mm):	9,50	9,67	9,54	9,58
Mr (Mpa):	25	50	75	90	Mr (Mpa):	25	50	75	90
ESAL:	25000000				ESAL:	50000000			
Hca (mm):	180				Hca (mm):	200			
Esfuerzo prom (Mpa)	0,37	0,38	0,37	0,37	Esfuerzo prom (Mpa)	0,38	0,38	0,38	0,38
S bit visc (Pa)	0,53	0,53	0,53	0,53	S bit visc (Pa)	0,27	0,27	0,27	0,27
S mix (MPa)	9,47	9,47	9,47	9,47	S mix (MPa)	8,78	8,78	8,78	8,78
Deformación (mm):	14,15	14,37	14,16	14,20	Deformación (mm):	17,27	17,49	17,26	17,32

Tabla 45: Ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Amazónica

REGIÓN AMAZÓNICA								
Mr (MPa)	Deformación Permanente para ESAL de:						ECUACION	
	20.000	50.000	500.000	5.000.000	25.000.000	50.000.000	X: ESAL	Y: Deformacion, mm
25	2,32	3,34	5,90	9,50	14,15	17,27		$y = 0,221x^{0,2455}$
50	2,37	3,37	6,10	9,67	14,37	17,49		$y = 0,2264x^{0,2451}$
75	2,42	3,49	6,04	9,54	14,16	17,26		$y = 0,2461x^{0,2392}$
90	2,44	3,53	6,09	9,58	14,20	17,32		$y = 0,2505x^{0,2384}$

Tabla 46: Resumen de los valores de ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento en la Región Amazónica.

5.10. Niveles de ahuellamiento admisibles en carreteras

Los valores obtenidos de deformaciones deben ser comparados con ciertos criterios de admisibilidad. De acuerdo a la metodología PAVER, ampliamente utilizada en el país, un ahuellamiento es calificado de la siguiente manera:

- ✓ Bajo entre 6 y 13 mm
- ✓ Medio entre 13 y 25 mm
- ✓ Alto mayores a 25 mm

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas en el Ecuador (MTOPE) admite ahuellamientos máximos hasta 12 mm. Dicho valor, considerado como referencia, se cumplirá en las estructuras diseñadas por AASTHO 93 con el número de ESAL que se muestra en las tablas 47, 48 y 49:

REGIÓN COSTA	
Mr (MPa)	ESAL (12 mm ahuellamiento)
25	10.232.000
50	9.543.000
75	10.021.000
90	9.950.000

Tabla 47: Número de ESAL admisibles en la Región Costa

REGIÓN SIERRA	
Mr (MPa)	ESAL (12 mm ahuellamiento)
25	26.590.000
50	25.130.000
75	26.705.000
90	25.925.000

Tabla 48: Número de ESAL admisibles en la Región Sierra

REGIÓN AMAZÓNICA	
Mr (MPa)	ESAL (12 mm ahuellamiento)
25	11.654.000
50	10.843.000
75	11.408.000
90	11.183.000

Tabla 49: Número de ESAL admisibles en la Región Amazónica

Como se observa de dichas tablas, puede apreciarse una notable diferencia en el comportamiento a las deformaciones plásticas de la capa asfáltica, entre la Región Sierra y las regiones Costa y Amazónica.

Por otra parte, no es considerable la incidencia de la calidad de la SR con los ESAL necesario por alcanzar los 12 mm de ahuellamiento.

Regiones	ESAL promedio (para 12 mm de ahuellamiento)	Mr (MPa)	Espesor de capa asfáltica necesario
Costa	9.936.500	Todos	16 cm
Sierra	26.087.500	Todos	19 cm
Amazonía	11.272.000	Todos	17 cm

Tabla 50: ESAL y espesores necesario por alcanzar los 12 mm de ahuellamiento.

6. CONCLUSIONES

- ✓ El incremento de los nivel de ahuellamientos son directamente proporcional al aumentan de los espesores de capa asfáltica e indirectamente a los ESAL de diseño.

- ✓ Las condiciones de temperatura que se presentan en el pavimento tiene una gran influencia en el comportamiento de los ahuellamientos en las diferentes carreteras del país.

- ✓ Se detecta una gran diferencia entre los módulos de las mezclas asfálticas a diferentes temperaturas, y en la Región Costa la temperatura promedio en el pavimento es de 30°C, y los módulos que obtuvimos mediante los ensayos en laboratorio nos reflejó que los módulos a esta temperatura son bajos por lo cual las deformaciones son mayores.

- ✓ Puede observarse que en la región Sierra el fallo por deformación máxima admisible se encontraría en las estructuras diseñadas para ESAL entre 25 y 27 millones aproximadamente, que si bien son valores altos, son aceptables para vías de tráfico muy pesado.

- ✓ Para la Región Costa y Amazónica el problema surgiría para diseños AASHTO 93 con número de ejes mucho menores que en la Región Sierra, entre 9 y 11 millones, que pudiera considerarse representativos de tráfico medio a pesado.

- ✓ Los resultados indican que de acuerdo al criterios de Predicción de Van de Loo y considerando las temperaturas horarias representativas de las regiones analizadas, en general existen excesos de espesores de capa en algunas de las estructuras diseñadas, siendo estos mayores para la Región Sierra y número de ESAL pequeños (menores de 5 millones).

7. RECOMENDACIONES

- ✓ Analizar mezclas asfálticas que contengan 100% de material triturado, con el fin de mejorar módulos de rigidez y así evaluar mediante el método de Van de Loo las deformaciones plásticas que se producirían, pudiéndose comparar entonces la incidencia de esta condición con las mezclas estudiadas.

- ✓ Para diseñar espesores de capa asfáltica mayores a los admisibles, se deben utilizar mezclas no convencionales, es decir, empleando asfaltos modificados con polímeros, o pavimentos semirrígidos, con bases estabilizadas con cemento.

- ✓ Debe de tomarse en serio la evaluación del comportamiento ante las deformaciones plásticas en nuestras mezclas, en especial ante tráfico pesado.

- ✓ El método de predicción de deformaciones plásticas de Van de Loo y reconocido por Shell, es totalmente aplicable en el Ecuador por su sencillez y por la posibilidad de trabajarse con el ensayo creep estático, lo que puede realizarse con un consolidómetro convencional de suelos.

8. BIBLIOGRAFIA

Vila, R. (2013). Revista Alternativas no. 18, "Deformaciones plásticas en la capa asfáltica de una vía primaria en la región costa del Ecuador". Universidad Católica de Santiago de Guayaquil

AASHTO 93. "Guide for design of Pavement Structures", Washington D.C.

Vila, R. (1995). "Experiencias cubanas en el empleo del ensayo creep estático para evaluar la rigidez de los hormigones asfálticos". 8vo Congreso Ibero-Americano del Asfalto, Bolivia.

Asphalt Institute, 1982. "Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Normal MS-1 Ninth edition "Research Report n° 82-2 ". Lexington, KY).

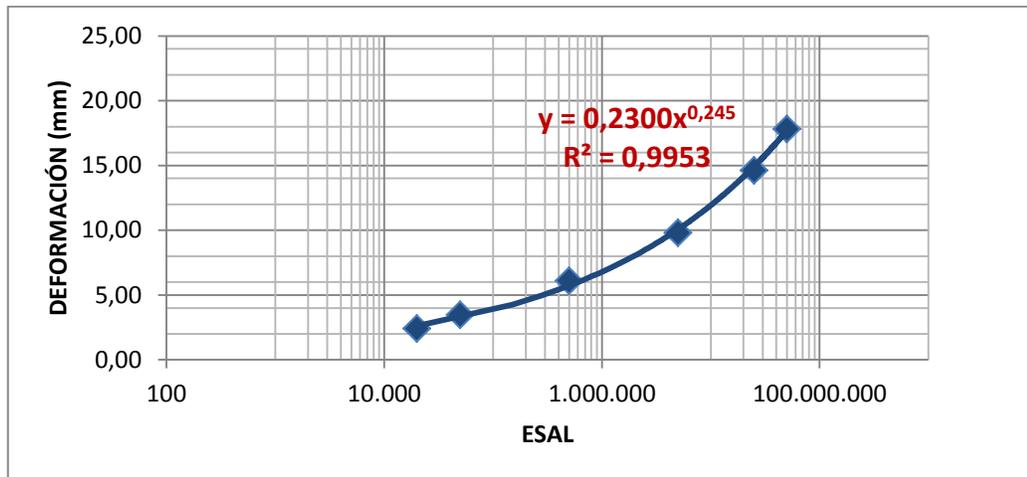
Rodríguez, A & Castillo, H. "La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas". Volumen 2. Editorial Limusa.

Crespo, C. "Vías de comunicación caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos". 3 Edición.

9. ANEXO

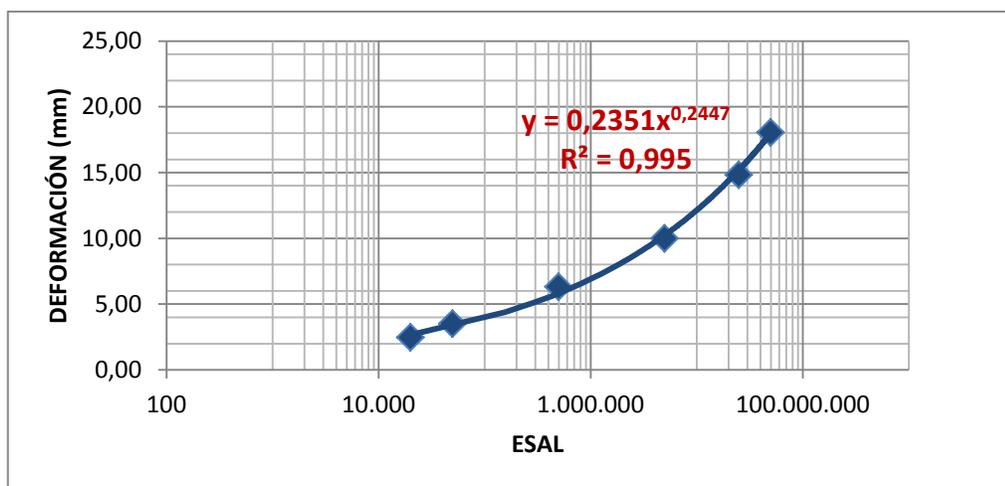
REGIÓN COSTA

SR: 25MPa



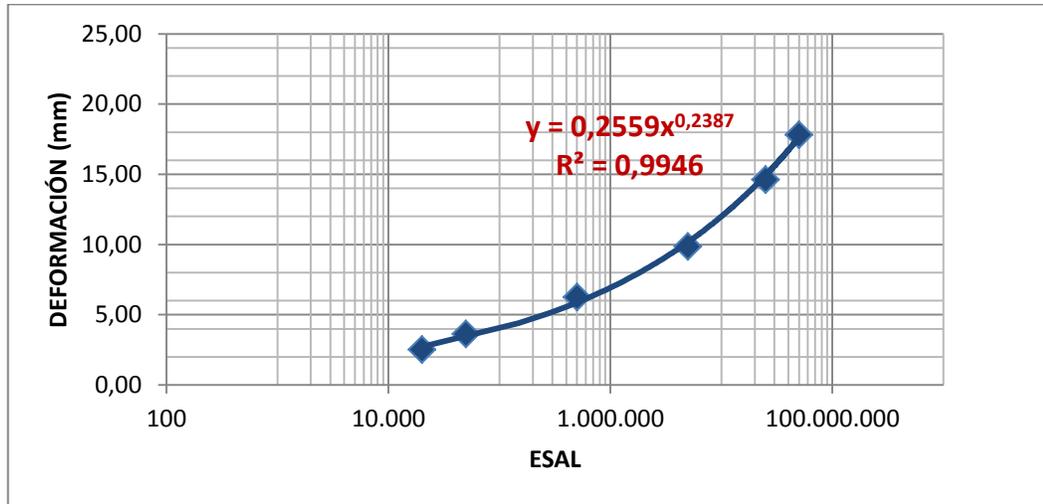
Relación ESAL vs deformación, SR: 25 MPa, Región Costa

SR: 50MPa



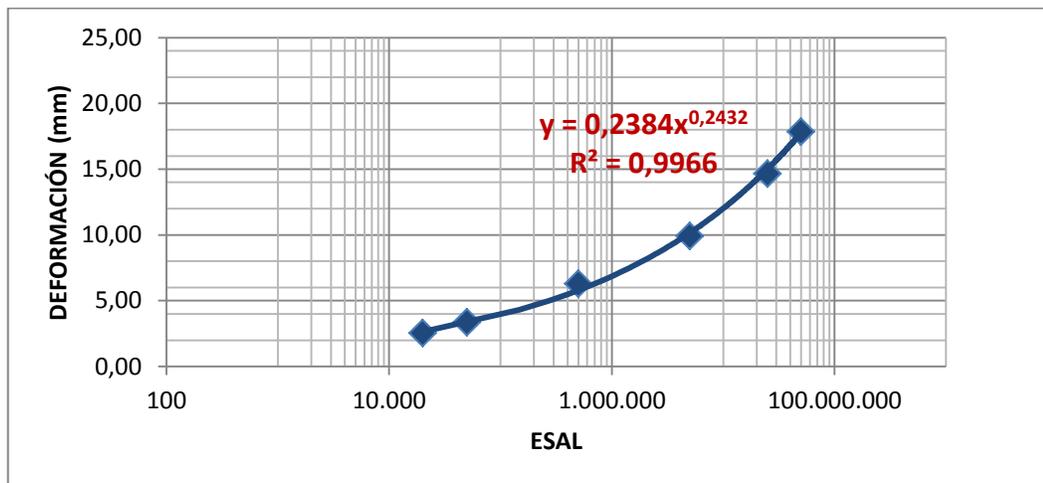
Relación ESAL vs deformación, SR: 50 MPa, Región Costa

SR: 75MPa



Relación ESAL vs deformación, SR: 75 MPa, Región Costa

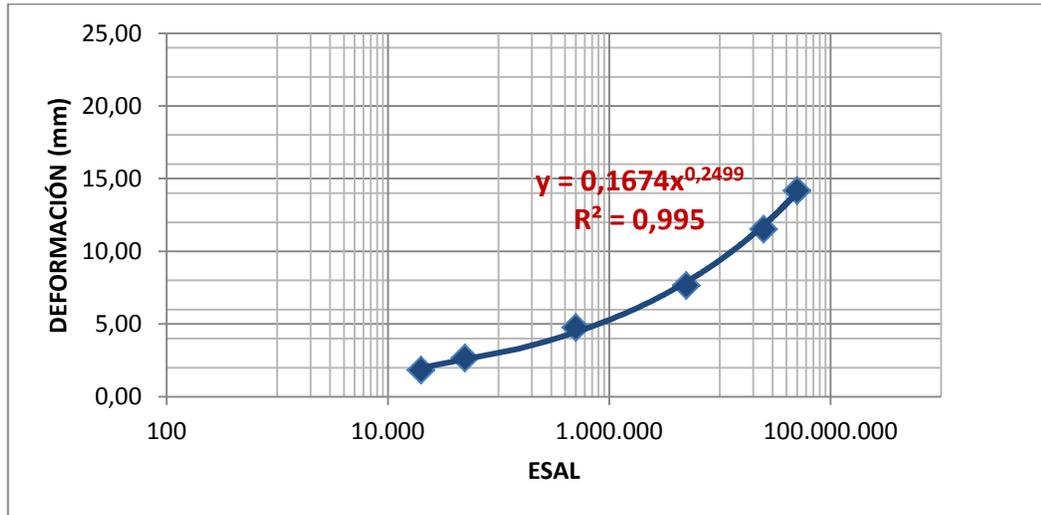
SR: 90MPa



Relación ESAL vs deformación, SR: 90 MPa, Región Costa

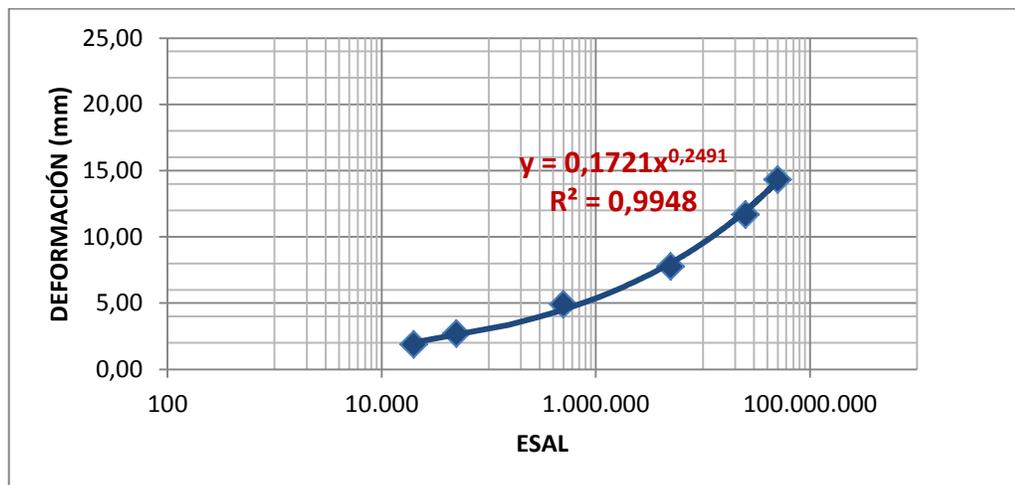
REGIÓN SIERRA

SR: 25MPa



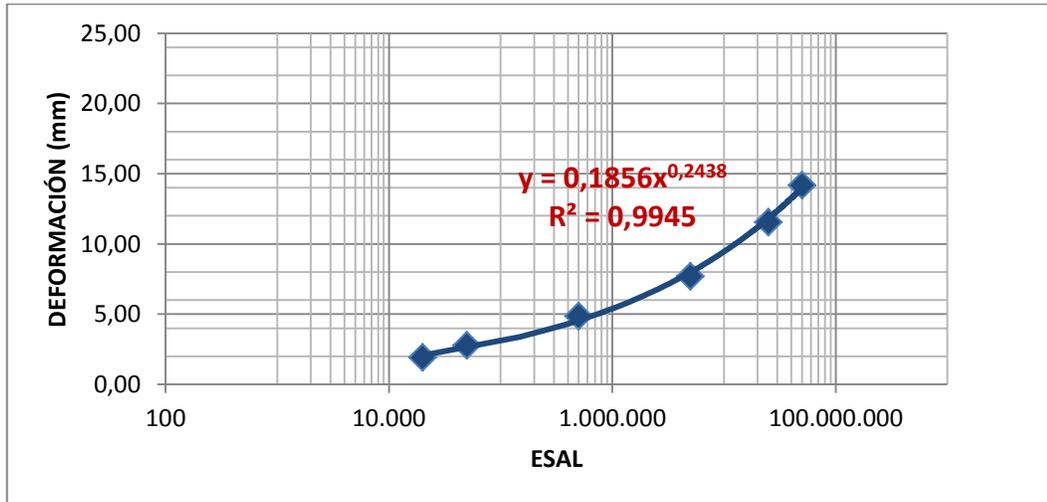
Relación ESAL vs deformación, SR: 25 MPa, Región Sierra

SR: 50MPa



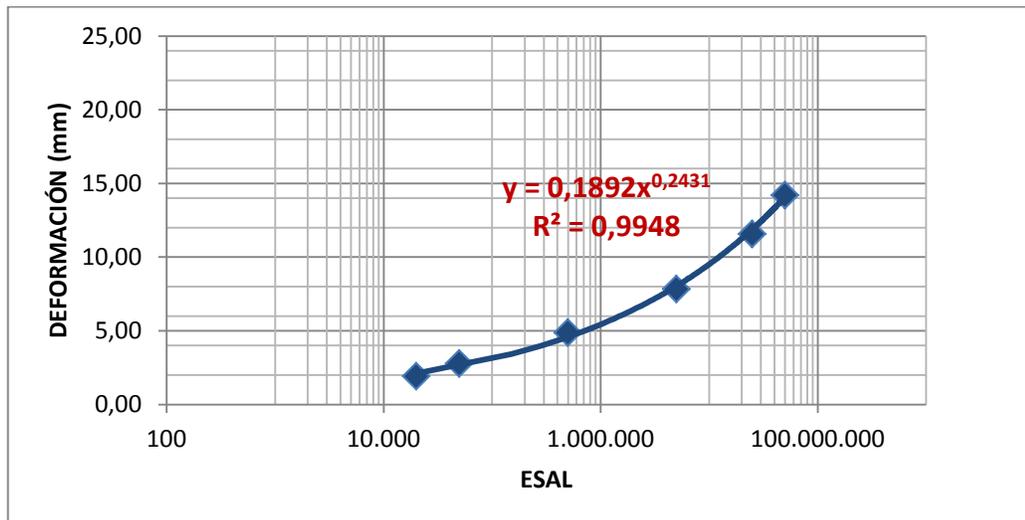
Relación ESAL vs deformación, SR: 50 MPa, Región Sierra

SR: 75MPa



Relación ESAL vs deformación, SR: 75 MPa, Región Sierra

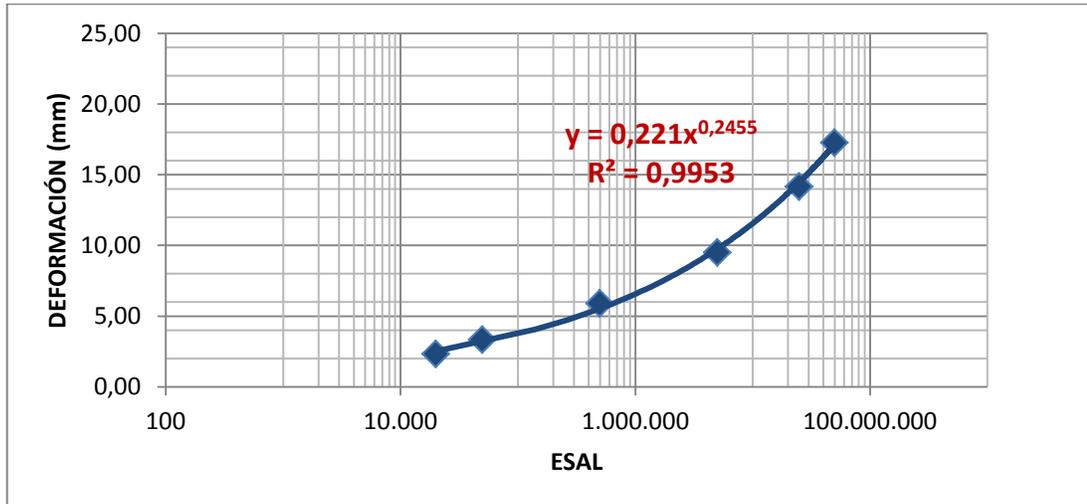
SR: 90MPa



Relación ESAL vs deformación, SR: 90 MPa, Región Sierra

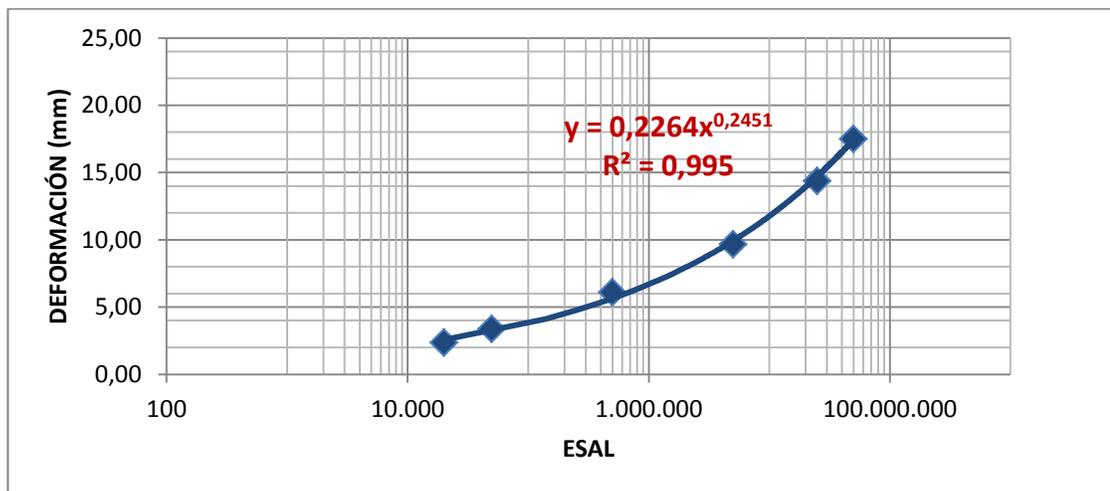
REGIÓN AMAZÓNICA

SR: 25 MPa



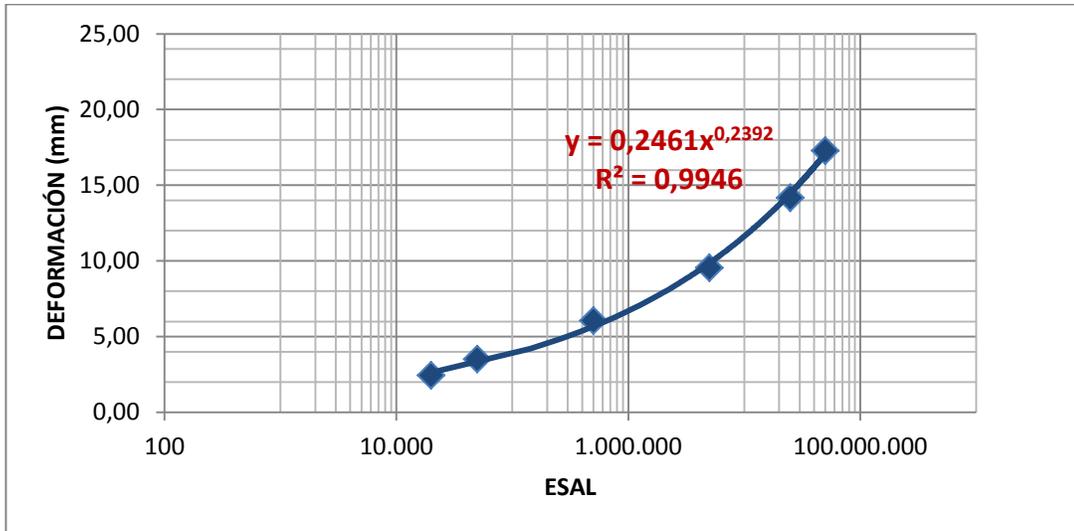
Relación ESAL vs deformación, SR: 25 MPa, Región Amazónica

SR: 50 MPa



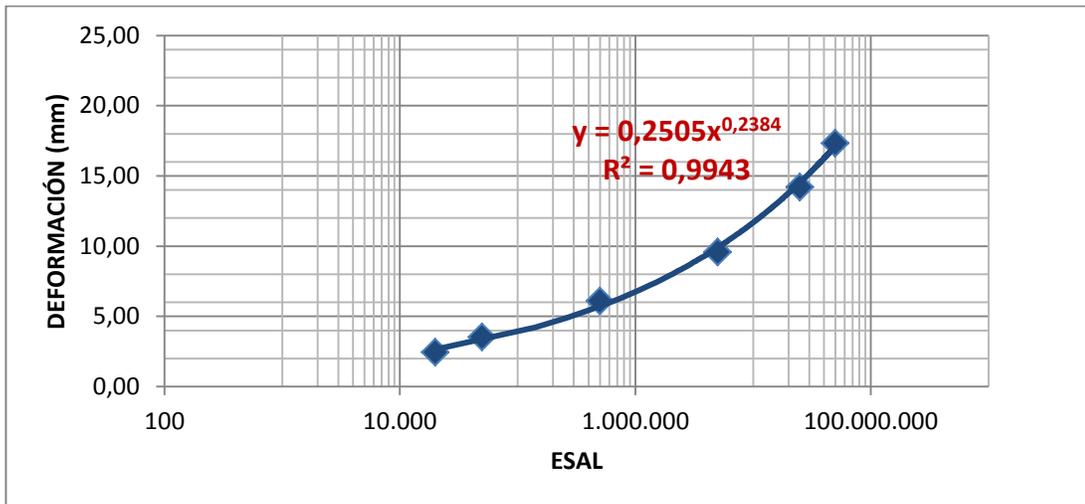
Relación ESAL vs deformación, SR: 50 MPa, Región Amazónica

SR: 75 MPa



Relación ESAL vs deformación, SR: 75 MPa, Región Amazónica

SR: 90 MPa



Relación ESAL vs deformación, SR: 90 MPa, Región Amazónica