



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

**TRABAJO DE TITULACIÓN:**

**TEMA:**

**“EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE  
PRUEBAS CREEP ESTÁTICAS”**

**AUTOR:**

**LÓPEZ URGILES, ANDRÉ WANTHERLEY**

**Previo a la obtención del Título  
INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

**ING. ROLANDO VILA ROMANÍ, PhD.**

**GUAYAQUIL, ECUADOR**

**2014**



**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 el Sr. ANDRÉ WANTHERLEY LÓPEZ URGILES como requerimiento parcial para la obtención del título de INGENIERO CIVIL

### **TUTOR**

---

**Ing. Rolando Vila Romaní, Ph.D.**

### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

---

**Ing. Mario Dueñas Rossi**

**Guayaquil, a los 24 días del mes de Septiembre del 2014**



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

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **André Wantherley López Urgiles**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación **“EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE PRUEBAS CREEP ESTÁTICAS”**, 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 24 días del mes de Septiembre del 2014**

**EL AUTOR**

---

**André Wantherley López Urgiles**



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

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **André Wantherley López Urgiles**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE PRUEBAS CREEP ESTÁTICAS”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

**Guayaquil, a los 24 días del mes de Septiembre del 2014**

**EL AUTOR**

---

**André Wantherley López Urgiles**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por permitirme seguir esta carrera y por las bendiciones, fuerza, valor que me ha dado día a día.

A mis padres por su paciencia y esfuerzo a lo largo de mi tiempo de estudio.

A mi esposa Jessenia Ortega por su comprensión y apoyo.

Al Dr. Rolando Vila, por su apoyo día a día y su excelente guía en el desarrollo de este trabajo.

**André Wantherley López Urgiles**

**DEDICATORIA**

*A mis Padres...*

**André Wantherley López Urgiles**

## **DECLARACIÓN**

Yo, André Wantherley López Urgiles declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

**André Wantherley López Urgiles**

## **AUTORÍA**

Las ideas expuestas en el presente trabajo de investigación y que aparecen como propias son en su totalidad de absoluta responsabilidad del autor.

**André Wantherley López Urgiles**

# **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**ING. ROLANDO VILA ROMANÍ, PH.D.**

PROFESOR TUTOR

---

**ING. MARIO DUEÑAS ROSSI**

PROFESOR DELEGADO



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

## **CALIFICACIÓN**

---

**ING. ROLANDO VILA ROMANÍ, PH.D.**

PROFESOR TUTOR

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Razones que motivaron el estudio.....	1
1.2 Justificación del tema .....	1
1.3 Descripción del problema de investigación .....	2
1.4 Objeto del estudio.....	2
1.5 Antecedentes .....	2
1.6 Contextualización en tiempo y espacio .....	2
1.7 Objetivo .....	3
1.8 Hipótesis o premisas .....	3
1.9 Metodología.....	4
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>6</b>
<b>MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CARRETERAS</b> .....	<b>6</b>
2.1 Generalidades .....	6
2.2 Cemento Asfáltico .....	6
2.3 Agregados Minerales.....	8
2.4 Mezcla Asfáltica.....	10
2.4.1 Generalidades .....	10
2.4.2 Propiedades de las mezclas asfálticas .....	10
2.4.2.1 Estabilidad.....	10
2.4.2.2 Resistencia a deformaciones plásticas .....	11
2.4.2.3 Resistencia al deslizamiento .....	11
2.4.2.4 Durabilidad .....	11
2.4.3 Elaboración de briquetas para efectuar los ensayos correspondientes.....	11
2.4.4 Características de las mezclas confeccionadas.....	14
2.4.4.1 Mezclas de agregados de cantera triturados .....	14
2.4.4.2 Mezclas de agregados aluviales triturados .....	15

<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>17</b>
<b>DEFORMACIONES PLÁSTICAS (AHUELLAMIENTO) EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....</b>	<b>17</b>
3.1 Generalidades .....	17
3.2 Incidencia de las características de la mezcla asfáltica en las deformaciones plásticas .....	18
3.2.1 Granulometría de los agregados .....	18
3.2.2 Textura y Angularidad .....	19
3.2.3 Tipo de Asfalto .....	19
3.2.4 Tránsito .....	20
3.2.5 Clima.....	20
3.3 Método de Van de Loo para la predicción de deformaciones plásticas.....	21
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>27</b>
<b>ENSAYOS LABORATORIO.....</b>	<b>27</b>
4.1 Generalidades .....	27
4.2 Módulo de rigidez del cemento asfáltico (Sbit).....	27
4.2.1 Resultados obtenidos .....	28
4.3 Módulo de rigidez mediante Creep Estático.....	29
4.3.1 Procedimiento del Ensayo Creep Estático.....	30
4.3.2 Creep Estático a Briquetas con Agregados de Cantera.....	31
4.3.3 Creep Estático a Briquetas con Agregados Aluviales .....	33
4.3.4 Módulo de rigidez promedio (Smixprom) .....	35
4.3.5 Representación gráfica de la relación Smix – Sbit.....	37
4.4 Módulo de rigidez (Eac) bajo deformación controlada .....	38
4.4.1 Resultados .....	39
4.4.2 Representación gráfica de resultados .....	39
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>41</b>
<b>CÁLCULO Y ANÁLISIS DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS (AHUELLAMIENTOS).....</b>	<b>41</b>
5.1 Generalidades .....	41
5.2 Determinación de temperaturas y tránsito a utilizar .....	41
5.2.1 Tránsito .....	42
5.2.2 Temperatura.....	43

5.2.2.1 Temperatura en Carpeta Asfáltica .....	44
5.3 Viscosidad dinámica de la mezcla asfáltica .....	47
5.3.1 Valores de la viscosidad dinámica de la mezcla con agregados de cantera... ..	48
5.3.2 Valores de la viscosidad dinámica de la mezcla con agregados aluviales .....	49
5.4 Módulos de rigidez (Eac) de las mezclas asfálticas para las temperaturas de trabajo determinadas .....	49
5.5 Diseño de estructuras de pavimentos según Método ASSHTO 93 (vigente) .....	50
5.5.1 Determinación del esfuerzo promedio en capa asfáltica.....	55
5.5.1.1 Cálculo del esfuerzo promedio en estructura de pavimento...56	
5.5.1.2 Esfuerzos promedio de estructuras de diseño .....	58
5.6 Determinación del Smix y Sbit (visc) para las estructuras de pavimentos diseñadas.....	59
5.6.1 Cálculo de Sbit (visc) para las estructuras de pavimentos diseñadas.....	59
5.6.2 Resultados de Sbit (visc) para las estructuras de pavimentos diseñadas.....	60
5.6.3 Cálculo de Smix para las estructuras de pavimentos diseñadas.....	61
5.7 Cálculo de las deformaciones plásticas (ahuellamiento).....	61
5.8 Criterios sobre los niveles de ahuellamiento permisibles en carreteras.....	63
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>65</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>66</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Asfalto AC-20 (ASTM D-3381, Tabla 2) .....	8
Tabla 2: Resultados de ensayos de los dos tipos de asfalto utilizados .....	13
Tabla 3: Porcentaje de asfalto, RICE, Granulometría para agregados de cantera .....	14
Tabla 4: Porcentaje de Asfalto, RICE, Granulometría para agregados aluviales .....	15
Tabla 5: Gravedades específicas de briquetas con agregados de cantera ..	16
Tabla 6: Gravedades específicas de briquetas con agregados aluviales .....	16
Tabla 7: Valores de IP, Punto de ablandamiento .....	27
Tabla 8: Valores de Sbit para briquetas con agregados de cantera .....	28
Tabla 9: Valores de Sbit para briquetas con agregados aluviales .....	29
Tabla 10: Valores de Smix para briquetas con agregados de cantera a 30°C .....	32
Tabla 11: Valores de Smix para briquetas con agregados de cantera a 40°C .....	32
Tabla 12: Valores de Smix para briquetas con agregados de cantera a 50°C .....	33
Tabla 13: Valores de Smix para briquetas con agregados aluviales a 30°C	34
Tabla 14: Valores de Smix para briquetas con agregados aluviales a 40°C	34
Tabla 15: Valores de Smix para briquetas con agregados aluviales a 50°C	35
Tabla 16: Valores de Smixprom para briquetas a 30°C, 40°C, 50°C con agregados de cantera .....	36
Tabla 17: Valores de Smixprom para briquetas a 30°C, 40°C, 50°C con agregados aluviales .....	36
Tabla 18: Módulos de rigidez promedio para cada tipo de briquea .....	39
Tabla 19: Porcentaje de vehículos pesados por hora actuantes correspondientes al mes de Enero 2013 .....	42
Tabla 20: Porcentaje de vehículos pesados por hora actuantes correspondientes al año 2013 .....	43
Tabla 21: Temperaturas promedio, máximas y mínimas del año 2013 .....	44
Tabla 22: Temperaturas del aire por hora representativas de cada mes .....	45
Tabla 23: Temperaturas del aire por hora representativas de cada mes .....	46

Tabla 24: Temperaturas media de capa asfáltica para espesores de diseño .....	47
Tabla 25: Valores de viscosidad dinámica para mezclas con agregados de cantera .....	48
Tabla 26: Valores de viscosidad dinámica para mezclas con agregados aluviales .....	49
Tabla 27: Módulos de rigidez $E_{ac}$ para temperaturas de trabajo .....	50
Tabla 28: Diseño ASSHTO 93 para ESAL 500,000 ejes y $MR= 500 \text{ kg/cm}^2$	51
Tabla 29: Esfuerzo promedio ponderado por hora .....	58
Tabla 30: Esfuerzo promedio ponderado para todas las estructuras diseñadas .....	58
Tabla 31: $S_{bit}(visc)$ para estructura de pavimento con $MR=500 \text{ kg/cm}^2$ y ESAL $5 \times 10^5$ .....	60
Tabla 32: $S_{bit}(visc)$ para las estructuras de pavimento diseñadas .....	60
Tabla 33: Módulo de rigidez $S_{mix}$ para las estructuras de pavimento diseñadas .....	61
Tabla 34: Ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento diseñadas .....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cantera Chiveria.....	12
Figura 2: Cantera Zozoranga.....	12
Figura 3: Curva Granulométrica de agregados de cantera.....	14
Figura 4: Curva Granulométrica de agregados aluviales .....	15
Figura 5: Ahuellamiento .....	18
Figura 6: Nomograma Temperatura - Viscosidad .....	24
Figura 7: Ensayo Creep Estático en NAT .....	30
Figura 8: Salida de resultados del Software Static Creep .....	31
Figura 9: Gráfico de la relación $S_{mix}$ – $S_{bit}$ para mezclas con agregados de cantera .....	37
Figura 10: Gráfico de la relación $S_{mix}$ – $S_{bit}$ para mezclas con agregados aluviales .....	38
Figura 11: Relación $E_{ac}$ – Temperatura para mezclas con agregados de cantera .....	39
Figura 12: Relación $E_{ac}$ – Temperatura para mezclas con agregados aluviales .....	40
Figura 13: Estructuras de pavimento para $MR= 250 \text{ kg/cm}^2$ .....	52
Figura 14: Estructuras de pavimento para $MR= 500 \text{ kg/cm}^2$ .....	53
Figura 15: Estructuras de pavimento para $MR=750 \text{ kg/cm}^2$ .....	54
Figura 16: Estructuras de pavimento para $MR=900 \text{ kg/cm}^2$ .....	55
Figura 17: Entrada de datos de ALIZE.....	56
Figura 18: Salida de datos de ALIZE .....	57

## RESUMEN

Las fallas en pavimentos flexibles más comunes en nuestro país son las deformaciones plásticas que conducen a la formación de ahuellamientos, estas comprometen la seguridad, el confort y la calidad de circulación de los usuarios. Los ahuellamientos se producen por la aplicación reiterada de las cargas del tránsito. También tiene una incidencia directa la temperatura ambiental.

En este trabajo se describen los criterios del método de estimación de deformaciones permanentes desarrollado por Van de Loo que precisamente considera los dos factores antes mencionados, aplicado a dos tipos de mezclas asfálticas usadas muy a menudo en nuestros diseños de estructuras de pavimentos en la Región Costa.

Analizando la variabilidad de la temperatura por hora a lo largo de un año en la ciudad de Santiago de Guayaquil, los datos reales de tránsito de la Carretera E 25, en el tramo “Durán – Jujan” y los resultados de los diferentes ensayos de laboratorio practicados a las mezclas asfálticas utilizadas, se determinaron los ahuellamientos correspondientes.

Se compararon los resultados obtenidos bajo el método antes mencionado con los valores de ahuellamiento que admite el Ministerio de Transporte y Obras Públicas MTOP.

**Palabras Claves:** deformación plástica, ahuellamiento, temperatura, mezcla asfáltica, tránsito, estructura de pavimento.

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Razones que motivaron el estudio**

Valorar el comportamiento de las deformaciones plásticas en carpetas asfálticas con diferentes espesores, según el diseño del pavimento y para tráficos diferentes, elaboradas con mezclas típicas compuestas de agregados de cantera triturados y agregados aluviales triturados, considerando una situación climática (temperatura) de la región Costa del Ecuador.

### **1.2 Justificación del tema**

En nuestro país existe cierta incertidumbre sobre el verdadero comportamiento ante las deformaciones plásticas de nuestras mezclas asfálticas en función de la variación de temperatura a lo largo del día, en las vías tanto de la Costa, como de la Sierra y el Oriente.

Este estudio se enfoca en la región Costa tomando como datos la variación de temperatura por hora a lo largo de un año representativo (2013) en la ciudad de Guayaquil, así como los datos reales de tráfico de una vía principal de esta región, en este caso la Carretera E 25, en el tramo “Durán - Jujan” a lo largo de ese mismo año.

Como análisis CIENTÍFICO es importante porque una vez obtenido los resultados de este trabajo se pueden generar recomendaciones sobre los espesores de carpeta asfáltica atendiendo a la deformación calculada. Por otra parte el formato de cálculo presentado en hojas Excel, permite analizar el trabajo con otras temperaturas representativas de otras regiones y el uso de diferentes porcentajes de tráfico horario.

Desde el punto de vista SOCIAL el trabajo es importante para mejorar comportamiento y durabilidad de la infraestructura vial del país.

### **1.3 Descripción del problema de investigación**

El problema de investigación consiste en determinar cuan variable pueden ser las deformaciones plásticas de las mezclas asfálticas en función de la variación de temperatura horaria anual para diferentes diseños.

### **1.4 Objeto del estudio**

El objeto de estudio del presente trabajo son las deformaciones plásticas en las mezclas asfálticas. Se tomara a consideración dos tipos de mezclas, una diseñada con agregados de cantera triturados y otra con agregados aluviales triturados, se las ensayara mediante el Ensayo de Creep Estático y estos resultados serán correlacionados a partir del efecto de la variación de temperatura .

### **1.5 Antecedentes**

Ya que existe un comportamiento visco-elasto-plástico de las mezclas bituminosas, el paso de los ejes, en condiciones de temperaturas variable, va produciendo una acumulación de deformaciones de tipo plástico o permanente. Si la mezcla no tiene unas características reológicas adecuadas, puede producirse una fluencia del material.

Las deformaciones plásticas o permanentes son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Es uno de los tipos de deterioros que más afecta las carreteras de todo el mundo.

### **1.6 Contextualización en tiempo y espacio**

Este estudio considerará dos mezclas asfálticas de tamaño máximo nominal 12 mm (½ pulgada) que se diferenciarán por el tipo de agregados minerales a emplear: una producida con materiales de cantera triturados y la otra con cantos rodados de río (aluviales) triturados, más asfalto tipo AC-20

procedente de la Refinería de Esmeraldas. Las mezclas con piedras de cantera fueron diseñadas y producidas en planta de mezcla en caliente en el campamento de Chivería de la Empresa H e H en la Vía a Daule. Las mezclas con materiales aluviales fueron diseñadas y producidas en la planta del campamento del Km 26 de la misma empresa constructora, cerca de la población de Virgen de Fátima. Luego de fabricadas las briquetas necesarias, todas las pruebas involucradas en este estudio se realizarán en el Laboratorio de Carreteras de la Facultad de Ingeniería de la UCSG.

### **1.7 Objetivo**

Determinar el comportamiento de las deformaciones plásticas de las mezclas asfálticas evaluadas a través del Ensayo Creep Estático, considerando la variación de temperatura de la carpeta asfáltica y aplicando el método de predicción de deformaciones de Shell (Van de Loo,1976).

### **1.8 Hipótesis o premisas**

Existen incertidumbres en el diseño de pavimentos nuevos y de capas de refuerzo en el Ecuador, ya que no se toma en consideración la variabilidad de la temperatura en el transcurso del día y en las estaciones del año. Si bien en la Región Costa los valores de temperatura no varían significativamente, en la Región Sierra estos no presentan el mismo comportamiento.

Aplicando el Método de Van de Loo y considerando tanto el módulo de rigidez de la mezcla determinado por la prueba Creep Estática, como el módulo de rigidez del betún, se puede determinar el nivel de deformación plástica respecto a las temperaturas de la carpeta asfáltica a lo largo del día en correspondencia con el tráfico actuante.

## 1.9 Metodología

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que se busca relacionar la variabilidad de temperatura de la carpeta asfáltica y el tráfico a lo largo del día con las deformaciones permanentes ocurridas en la misma.

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 dos mezclas asfálticas con granulometrías combinadas que cumplen el huso de 12 mm ( $\frac{1}{2}$  pulgada), con los agregados de cantera y aluviales, más asfalto nacional AC-20.
  - ✓ Elaboración de 12 briquetas tipo Marshall con diámetro 102 mm (4 pulgadas) y altura próxima a 63 mm ( $2 \frac{1}{2}$  pulgadas).
  - ✓ Realización de ensayos Creep Estático a 9 briquetas a 30°C, 40°C Y 50°C con los cuales se determinó posteriormente un módulo de rigidez bajo carga estática (S mix). Además se realizaron 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**

### **MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA CARRETERAS**

#### **2.1 Generalidades**

Las mezclas asfálticas basan su composición principalmente en materiales pétreos y ligante asfáltico en determinadas proporciones que permitan configurar una estructura de pavimento resistente, utilizable en pasajes urbanos, carreteras autopistas interurbanas, estacionamientos, aeropuertos, ciclovías, patios de carga, etc.

Además estos materiales tienen calidades particulares, cuyas proporciones en la mezcla más la efectividad del proceso de compactación determinarán propiedades que serán muy variables y de las que se puede destacar factores como la resistencia al fisuramiento (fatiga) , a las deformaciones plásticas (ahuellamiento) y el daño provocado por la humedad.

#### **2.2 Cemento Asfáltico**

Es una sustancia negra, pegajosa, sólida o semisólida según la temperatura ambiente; a la temperatura de ebullición del agua tiene consistencia pastosa, por lo que se extiende con facilidad. Se utiliza para revestir carreteras, impermeabilizar estructuras, como depósitos, techos o tejados, y en la fabricación de baldosas, pisos y tejas. No se debe confundir con el alquitrán, que es también una sustancia negra, pero derivada del carbón, la madera y otras sustancias. El asfalto se encuentra en depósitos naturales, pero casi todo el que se utiliza hoy es artificial, derivado del petróleo.

Para pavimentar se emplean asfaltos de destilación, hechos con los hidrocarburos no volátiles que permanecen después de refinar el petróleo para obtener gasolina y otros productos. Los asfaltos son materiales

aglomerantes de color oscuro, constituidos por complejas cadenas de hidrocarburos no volátiles y de elevado peso molecular.

El cemento asfáltico ha sido empleado con éxito en la pavimentación de vías ya que es un material altamente cementante, repelente del agua, termoplástico y es resistente al ataque álcalis, sales y ácidos. Además posee alta elasticidad a altas temperaturas, suficiente ductilidad a bajas temperaturas, buena adhesión y cohesión, baja susceptibilidad al cambio de temperatura, y bajo contenido de parafina (alta resistencia al envejecimiento), por lo que:

- ❖ Resiste la acción mecánica de disgregación producida por las cargas aplicadas, gracias a la flexibilidad dada a la estructura.
- ❖ Impermeabiliza la carpeta asfáltica, haciéndola poco sensible a la acción del agua y eficaz contra penetración proveniente de la lluvia.
- ❖ Proporciona una excelente unión y cohesión entre los agregados, incrementando la resistencia con la adición de espesores relativamente pequeños.

El cemento asfáltico a emplearse en todo el Ecuador, según el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), es el AC-20 (ASTM D-3381, Tabla 2).

**Tabla 1: Asfalto AC-20 (ASTM D-3381, Tabla 2)**

PROPIEDAD	NORMA	UNIDA D	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	160.00 0	240.000
Viscosidad Cinemática, 135 °C	ASTM D-2170	cSt	300	
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%w	99	-
<b>ENVEJECIMIENTO TFOT, 163 °C, 5h</b>				
Ductilidad,25°C, 5cm/min	ASTM D-113	cm	50	-
Viscosidad Dinámica 60 °C	ASTM D-4402	cP	-	1.000.000

Fuente: Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOB)

### **2.3 Agregados Minerales**

De acuerdo con las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (MTOB, 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 la norma.

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 provenir de depósitos naturales o triturados

Tipo C: Son aquellos provenientes de canteras naturales o de trituración, según las disponibilidades propias de cada zona.

Además de los requerimientos granulométricos y los referentes a su producción, los agregados deben cumplir con las siguientes exigencias:

Los agregados gruesos no deberán tener un desgaste mayor de 40% luego de 500 revoluciones de la máquina de Los Ángeles, cuando sean ensayados a la abrasión, según norma INEN 860.

La porción de los agregados que pasa por el tamiz INEN 0.425mm. (N°40), deberá tener un índice de plasticidad menor a 4, según lo establecido en las Normas INEN 691 y 692.

El agregado no debe experimentar desintegración ni pérdida total mayor del 12%, cuando se lo someta a 5 ciclos de inmersión y lavado con sulfato de sodio, en la prueba de durabilidad, como lo dispone la Norma INEN 863, a menos que las especificaciones especiales indiquen otra cosa.

Los agregados deberán tener características tales que, al ser impregnados con material bituminoso, más de un 95% de betún permanezca adherido a las partículas, después de realizado el ensayo de resistencia a la peladura, según la Norma AASHTO T 182.

El relleno mineral deberá cumplir con los requisitos especificados en la Norma AASHTO M 17 (Luis Naveda, Tesis 2014)

## **2.4 Mezcla Asfáltica**

### **2.4.1 Generalidades**

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

Se emplean tanto en la construcción de vías urbanas, aeropuertos, carreteras y se utilizan tanto para carpetas asfálticas como para capas inferiores de los terraplenes. Existe una sub-clasificación dentro de este conjunto de mezclas con diversas características. Se fabrican con asfaltos, aunque alguna veces se emplea el uso de cementos asfálticos modificados, las cantidades pueden variar entre 3% y 6% de contenido de asfalto en relación al volumen de los agregados.

### **2.4.2 Propiedades de las mezclas asfálticas**

En general, estas pueden clasificarse de la siguiente forma (Luis Naveda, Tesis 2014).

#### **2.4.2.1 Estabilidad**

Es la capacidad de poder soportar repetidamente el paso de las cargas y de resistir tensiones, las cuales se producen por deformaciones admisibles. Los ensayos empíricos para la comprobación de esta propiedad son: 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.

#### **2.4.2.2 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.

#### **2.4.2.3 Resistencia al deslizamiento**

Las mezclas utilizadas en carpetas asfálticas deben aportar una resistencia ante el deslizamiento, además de mantener la misma por mucho tiempo. Si se trata de vías con un alto nivel de tráfico, los áridos que se van a emplear toman un coeficiente de pulido alto. Se debe pretender que la macrotextura de la mezcla asfáltica en obra sea áspera.

#### **2.4.2.4 Durabilidad**

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

- ✓ Radiación solar.
- ✓ Oxidación del cemento asfáltico por efecto del agua y el aire
- ✓ 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 estas comúnmente son irreversibles.

La durabilidad se expone debido a la migración del betún, microfisuras, etc. Debido a esto se pueden producir, peladuras, calles averrugadas, baches, etc.

#### **2.4.3 Elaboración de briquetas para efectuar los ensayos correspondientes**

Las briquetas fueron fabricadas, como ya se ha mencionado, con mezclas producidas en planta. La preparación de las mismas se realizó

empleando los procedimientos convencionales del método Marshall. Se emplearon 75 golpes / cara en el proceso de compactación de la mezcla, a una temperatura de 135°C.

Los agregados empleados corresponden en un caso a la Cantera de Chivería, constituidos por rocas basálticas duras de alta densidad y baja absorción. (Ver Fig. 1). En el segundo caso corresponden a materiales aluviales extraídos de la Mina Zozoranga, que también corresponden a piedras muy duras de baja absorción (Ver Fig. 2). Ambos sitios están debidamente calificados por el MTOP.

**Figura 1: Cantera Chiveria**



Fuente: Investigación directa

**Figura 2: Cantera Zozoranga**



Fuente: Investigación directa

El cemento asfáltico empleado corresponde a un AC 20 producido en la Refinería de Esmeraldas. Se tomaron muestras en cada planta en el momento de la fabricación de las mezclas: el 27 de mayo del 2014 en la Planta de Chivería y el 3 de junio del mismo año en la planta del Km 26. Los resultados de estas pruebas se muestran a continuación.

**Tabla 2: Resultados de ensayos de los dos tipos de asfalto utilizados**

FECHA TOMA DE MUESTRA:			27-may-14	03-JUNIO_14
PROPIEDAD	NORMA	UNIDAD	Agregado de Cantera	Agregado Aluvial
PENETRACION, 25°C,100 GR.,5S	ASTM D-5	0.1MM	63	60
PUNTO DE ABLANDAMIENTO A y B	ASTM D-36	°C	47	49.5
INDICE DE PENETRACION	NLT 181		-0.3	-0.6
DENSIDAD RELATIVA ,25°C	ASTM D-70			
DUCTILIDAD , 25°C,5m/min	ASTM D-113	CM		
FLASH POINT, COPA CLEVELAND	ASTM D-92	°C	271	288
CONTENIDO DE AGUA. DESTILACION	ASTM D-95	%V		
VISCOSIDAD DINAMICA 60°C	ASTM D-4402	Cp	227.500	216.700
VISCOSIDAD CINEMATICA, 135°C	ASTM D 2170	CST		
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	ASTM D-2042	%W		
<b>ENVEJECIMIENTO TFOT , 163 °C, 5H</b>				
PERDIDA DE MASA	ASTM D-1754	%W		
PENETRACION, 25°C,100 GR.,5S	ASTM D 5	0.1MM	44	43
% PENETRACION DEL ENVEJECIDO		%	69.8	71.7
PUNTO DE ABLANDAMIENTO A y B	ASTM D-36	°C	55.0	53.5
DUCTILIDAD , 25°C,5m/min	ASTM D 113	CM	61	66
VISCOSIDAD DINAMICA 60°C	ASTM D 4402	CP	608.9	564.6
VISCOSIDAD CINEMATICA, 135°C	ASTM D 2170	CST		
RESISTENCIA AL ENDURECIMIENTO				
			2.68	2.61

Fuente: Laboratorio de asfaltos de la compañía H e H km 26  
Elaborado por: El Autor

## 2.4.4 Características de las mezclas confeccionadas

### 2.4.4.1 Mezclas de agregados de cantera triturados

Tabla 3: Porcentaje de asfalto, RICE, Granulometría para agregados de cantera

ENSAYO RICE		EXTRACCION DE ASFALTO			
		PESO MAT. ANTES =			1220
		PESO MAT. DESPUES =			1123.1
PESO MATERIAL (A) =	1500	PESO FILTRO ANTES =			14.5
PESO F. + AGUA (B) =	7124	PESO FILTRO DESPUES =			16.5
P.F + AGUA + MAT( C ) =	8054	DEFERENCIA DE FILTRO =			3
<b>RICE = A/(A+B+C) =</b>	<b>2.63</b>	<b>% ASFALTO =</b>			<b>6.00</b>

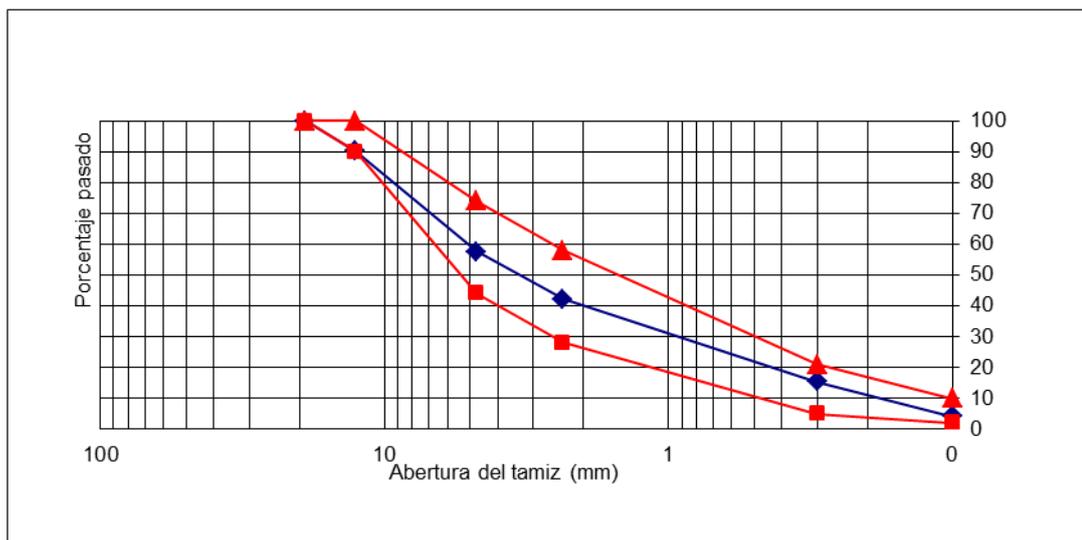
CHEQUEO GRANULOMÉTRICO EN AGREGADOS EXTRAIDOS.						
ABERTURA DE TAMICES		PESO RET.	% RETENIDO	% PASADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm	ACUM. (gr)	ACUMULADO	ACUMULADO	Mínimo	Máximo
3/4"	19	0	0	100	100	100
1/2"	12.7	76	6.72	93	90	100
# 4	4.75	449	39.77	60	44	74
# 8	2.36	643	57.00	43	28	58
# 50	0.3	945	83.79	16	5	21
# 200	0.1	1065	94.39	6	2	10
<b>FONDO</b>	<b>FONDO</b>	<b>1128</b>				

ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.

Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

Figura 3: Curva Granulométrica de agregados de cantera



Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

### 2.4.4.2 Mezclas de agregados aluviales triturados

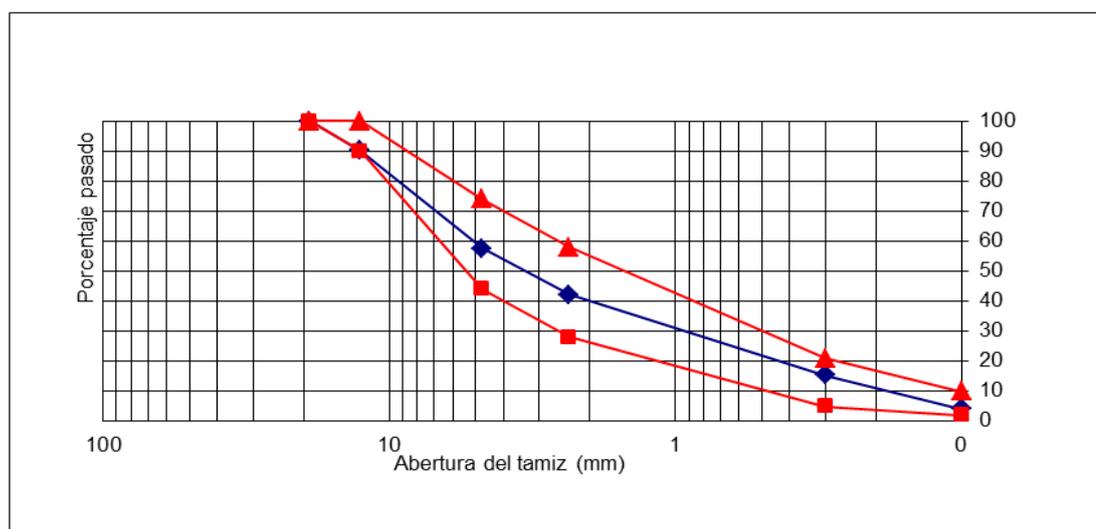
Tabla 4: Porcentaje de Asfalto, RICE, Granulometría para agregados aluviales

ENSAYO RICE		EXTRACCION DE ASFALTO				
		PESO MAT. ANTES =				
		PESO MAT. ANTES =			1096	
		PESO MAT. DESPUES =			1022	
PESO MATERIAL (A) =	1501	PESO FILTRO ANTES =			12	
PESO F. + AGUA (B) =	7191	PESO FILTRO DESPUES =			14	
P.F + AGUA + MAT( C ) =	8092	DEFERENCIA DE FILTRO =			2	
<b>RICE = A/(A+B+C)</b> =	<b>2502</b>	<b>% ASFALTO</b> =			<b>6.20</b>	
CHEQUEO GRANULOMÉTRICO EN AGREGADOS EXTRAIDOS.						
ABERTURA DE TAMICES		PESO RET.	% RETENIDO	% PASADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm	ACUM. (gr)	ACUMULADO	ACUMULADO	Mínimo	Máximo
3/4"	19	0	0	<b>100</b>	100	100
1/2"	12.7	101	9.86	<b>90</b>	90	100
# 4	4.75	437	42.49	<b>58</b>	44	74
# 8	2.36	595	57.92	<b>42</b>	28	58
# 50	0.3	871	84.71	<b>15</b>	5	21
# 200	0.1	986	95.88	<b>4</b>	2	10
<b>FONDO</b>	<b>FONDO</b>	<b>1028</b>				
ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.						

Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

Figura 4: Curva Granulométrica de agregados aluviales



Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

Las gravedades específicas brutas obtenidas en los juegos de briquetas se resumen a continuación:

✓ **Briquetas con Agregados de Cantera**

**Tabla 5: Gravedades específicas de briquetas con agregados de cantera**

Agregados de cantera							
BRIQUETA	h prom (mm)	Peso aire (gr)	P. agua (gr)	P.Sat. Sup. Seca (gr)	Vol. Bulk (cm <sup>3</sup> )	Gmb	Va
1	66	1357.2	819.3	1358.2	538.9	2.518	4.3
2	66	1336.9	807.5	1337.9	530.4	2.521	4.2
3	68	1397.4	848.2	1398.4	550.2	2.540	3.5
4	64	1319.8	798.7	1320.8	522.1	2.528	4.0
5	64	1312.9	796.1	1313.9	517.8	2.536	3.7
6	67	1361.5	821.9	1362.5	540.6	2.518	4.3
7	67	1288.5	780.2	1289.5	509.3	2.530	3.9
8	64	1307.9	791.5	1308.9	517.4	2.528	4.0
9	66	1368.8	827.4	1369.8	542.4	2.524	4.1
10	65	1334.9	805.3	1335.9	530.6	2.516	4.4
11	65	1337	807.5	1338.0	530.5	2.520	4.2
12	66	1369.2	827.8	1370.2	542.4	2.524	4.1

Fuente: Investigación Directa

Elaborado por: El Autor

✓ **Briquetas con Agregados Aluviales**

**Tabla 6: Gravedades específicas de briquetas con agregados aluviales**

Agregados aluviales							
BRIQUETA	h prom (mm)	Peso aire (gr)	P. agua (gr)	P.Sat. Sup. Seca (gr)	Vol. Bulk (cm <sup>3</sup> )	Gmb	Va
1	52	1164.0	680.9	1165.0	484.1	2.404	3.6
2	62	1291.1	755.8	1292.1	536.3	2.407	3.4
3	58	1246.3	727.2	1247.3	520.1	2.396	3.9
4	54	1289.1	750.1	1290.1	540.0	2.387	4.2
5	53	1286.3	746.5	1287.3	540.8	2.379	4.6
6	62	1287.9	750.1	1288.9	538.8	2.390	4.1
7	51	1242.8	722.2	1243.8	521.6	2.383	4.4
8	52	1281.2	736	1281.2	540.2	2.372	4.9
9	61	1243.1	724.1	1244.1	520.0	2.391	4.1
10	59	1281.9	749.3	1282.9	533.6	2.402	3.6
11	60	1316.9	768.9	1317.9	549.0	2.399	3.8
12	56	1237.1	722.3	1238.1	515.8	2.398	3.8

Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

## CAPÍTULO III

# DEFORMACIONES PLÁSTICAS (AHUELLAMIENTO) EN LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 3.1 Generalidades

Las deformaciones plásticas o ahuellamientos son el deterioro caracterizado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original. Se llama deformación "plástica" pues representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga que son irreversibles.

Aparecen como depresiones longitudinales en la trayectoria de la rueda, acompañados por una pequeña elevación a los lados de la huella. Esto es causado por una combinación de la densificación (reducción en el volumen y por consiguiente un incremento en la densidad) y deformación cortante, y puede ocurrir en una o más capas del pavimento así como también en la subrasante, aunque nuestro trabajo estará dirigido a la carpeta asfáltica.

Las deformaciones plásticas se producen primero con un cambio de volumen debido a la compactación por el paso del tránsito; luego se producen deformaciones a volumen constante por flujo de la mezcla. Finalmente, se produce un tercer estado denominado tercer flujo en el cual la mezcla pierde la capacidad de tomar carga y se deforma rápidamente, este proceso está asociado con cambios de volumen en la mezcla asfáltica.

El promedio de vida de los pavimentos asfálticos ante las deformaciones plásticas, que se ha obtenido a través de la experiencia en agencias de investigación de carreteras de los EE.UU. es de 11 años, donde se reporta que menos del 1% de los pavimentos fallan durante el primer año de servicio, el 14% de los pavimentos fallan antes de los 5 años y el 42% de los pavimentos fallan entre los 6 y 10 años.

**Figura 5: Ahuellamiento**



Fuente: Investigación directa

### **3.2 Incidencia de las características de la mezcla asfáltica en las deformaciones plásticas**

Las características que más influyen en las deformaciones permanentes son:

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

#### **3.2.1 Granulometría de los agregados**

Los agregados de una mezcla asfáltica deben ser de buena calidad y cumplir determinadas características para asegurar un buen comportamiento frente al ahuellamiento. Entre las propiedades de los agregados las más importantes relacionadas a un mejor desempeño del pavimento son la angularidad del agregado grueso, la angularidad del agregado fino, la presencia de partículas planas y alargadas y el contenido de arcillas. A

demás propiedades de la roca de origen como la resistencia y la presencia de materiales deletéreos son también importantes.

Existe suficiente evidencia que indica que las granulometrías densas son las deseables en la elaboración de las mezclas asfálticas debido a que mitigan los efectos de las deformaciones plásticas. Cuando las mezclas asfálticas densas se compactan propiamente se logran mezclas con porcentaje de vacíos bajos y con mayores puntos de contacto entre las partículas que las mezclas de granulometría abierta.

Brown y Pell (1974) concluyeron que las mezclas abiertas o de granulometría discontinua exhiben una mayor susceptibilidad a las deformaciones plásticas y son aún más vulnerables a las roderas a temperaturas altas, que las mezclas densas o elaboradas con granulometrías continuas.

### **3.2.2 Textura y Angularidad**

La textura y angularidad del agregado juegan un papel importante en el comportamiento de la mezcla. Se ha visto que mezclas con agregados triturados y de textura rugosa, son menos deformables que aquellas que se han elaborado con agregados redondeados, aún con la misma graduación.

### **3.2.3 Tipo de Asfalto**

El asfalto tiene una interesante propiedad con la variación de temperatura, su susceptibilidad térmica. A bajas temperaturas el ligante tiene el comportamiento de un sólido elástico mientras que a altas temperaturas el mismo es el de un fluido viscoso puro.

En el medio se produce una transición entre los dos estados presentando un comportamiento visco-elástico, Debido a esto es importante tener en cuenta las condiciones de temperatura a las que será expuesto el pavimento, a bajas temperaturas se tendrá una mezcla que puede sufrir fisuración y a altas temperaturas ahuellamientos.

### **3.2.4 Tránsito**

Las cargas pesadas cumplen un papel preponderante en el ahuellamiento ya que aumentan la magnitud de las deformaciones y por lo tanto aumentan la tasa de deformación de la mezcla. Las cargas pesadas las producen los camiones, que se ve acrecentado si los mismos circulan a bajas velocidades. Este es otro factor que también aporta al problema del ahuellamiento.

A bajas velocidades la respuesta del ligante asfáltico se da con una menor rigidez, producto de que tiene tiempo para relajar las tensiones, y así se aumenta la componente plástica e irrecuperable de las deformaciones. Otro factor que influye en la formación de ahuellamientos es la distribución de carga lateral debido a que produce un reacomodamiento de las partículas progresivo en función de la frecuencia de la carga de la rueda al pasar por el mismo punto.

### **3.2.5 Clima**

La exposición de la mezcla asfáltica a las diferentes temperaturas favorece el mecanismo de las deformaciones plásticas en la carpeta asfáltica.

El ahuellamiento de las mezclas asfálticas débiles es, por tanto, un fenómeno asociado a las altas temperaturas para el pavimento, y es más probable que ocurra en verano (en ocasiones el ahuellamiento se puede producir en forma parcial en dos o tres veranos consecutivos). En altas temperaturas el asfalto se comporta más como un fluido viscoso que como un sólido elástico, lo que provoca un aumento en la componente plástica de deformación del mismo y aumentan en consecuencia las deformaciones remanentes.

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

Este investigador de Shell para el desarrollo de su método se basó en el ensayo Creep Estático, donde es aplicada una fuerza constante que actúa perpendicularmente a las caras paralelas de una briqueta cilíndrica, midiéndose la deformación axial como una función del tiempo de carga para una temperatura constante.

En un tiempo largo de carga como el del ensayo Creep o en la carpeta asfáltica, la estructura de la mezcla sufre un cambio. Bajo la carga aplicada el ligante entre los agregados minerales es comprimido hacia los vacíos, obteniéndose como resultado un mayor contacto partícula-partícula, ocurriendo una transferencia de fuerza del ligante al sistema de agregados.

Hills desarrolló un modelo físico teórico para describir el comportamiento Creep matemáticamente. En su aproximación se calculó el desplazamiento relativo de un par de partículas adyacentes del agregado mineral en la matriz viscoelástica.

#### Ecuación 1

$$\frac{Em}{Fy} = 2^q \left(1 + \frac{E'b}{Fx}\right)^{2^{1/q}} - 1$$

Donde:

$Em$  = deformación en la mezcla asfáltica.

$Fy, Fx$  = factores que son constantes para un ensayo Creep en particular.

$q$  = exponente mayor o igual a 1 el cual es determinado según la granulometría de los áridos.

$E'b$  = deformación calculada en el ligante.

Un aspecto clave en el método que se explica a continuación (Transportation Research Record No. 616, Soil Mechanics: Rutting in Asphalt Pavement, Embankments on Varved Clays, and Foundations, 1976), es la relación establecida entre el módulo de rigidez de la mezcla ( $S_{mix}$ ) contra el módulo de rigidez del betún ( $S_{bit}$ ). El resultado es una curva, la cual fija el modelo teórico. Así, una curva  $S_{mix}$  vs  $S_{bit}$  es una forma de caracterizar el comportamiento Creep el cual es independiente del tiempo de carga, de la temperatura o del nivel de tensión.

La curva  $S_{mix}$  -  $S_{bit}$  es la base del método desarrollado por Van de Loo para la predicción de las deformaciones plásticas (ahuellamiento), éste permite hallar un valor de  $S_{mix}$  (obteniendo del ensayo creep) correspondiente al valor de  $S_{bit}$ , calculado en base a la viscosidad del betún, al tráfico y a las condiciones climáticas. Ya que el  $S_{mix}$  es determinado de un ensayo Creep, éste realmente representa sólo la porción viscosa o irreversible del módulo de rigidez y por esto puede ser usado para calcular la profundidad de la rodera.

En el ensayo Creep una igual reducción relativa en el espesor de las capas,  $\delta h/h$ , es alcanzada a menores tensiones que en la capa de pavimento real. Esto es debido a una distribución uniforme de tensiones aplicadas sin confinamiento lateral. Por esto, una tensión efectiva ( $\sigma_{ef}$ ) la cual es menor que la tensión de contacto ( $\sigma_0$ ) será definida como:

#### **Ecuación 2**

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

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  $\sigma_{ef}$  es considerada como la tensión vertical promedio actuante en la capa asfáltica ( $\sigma_{prom}$ ) pudiéndose obtener ésta a través de cálculos tenso-

deformacionales empleando algún software apropiado como el BISAR, ALIZE, CHEVROM, ROSY entre otros.

La deformación de una capa de pavimento puede ser calculada entonces como:

### Ecuación 3

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

Donde  $S_{mix}$  se obtiene del Ensayo Creep y  $h$  es el espesor de la carpeta asfáltica.

Muchas deformaciones permanentes calculadas se compararon con la profundidad de roderas reales producidas sobre muestras sometidas a ensayos en pista en el Koninklijke Shell Laboratory. El valor real y el calculado de la profundidad de rodera siempre difieren por un factor menor o igual que dos. Por esta razón ha sido introducido un factor de corrección empírico,  $C_m$ , que se encuentra entre 1 y 2 en la ecuación anterior. Para determinar  $S_{mix}$  habría primero que analizar una expresión para calcular una componente elástica, otra visco-elástica y una última viscosa.

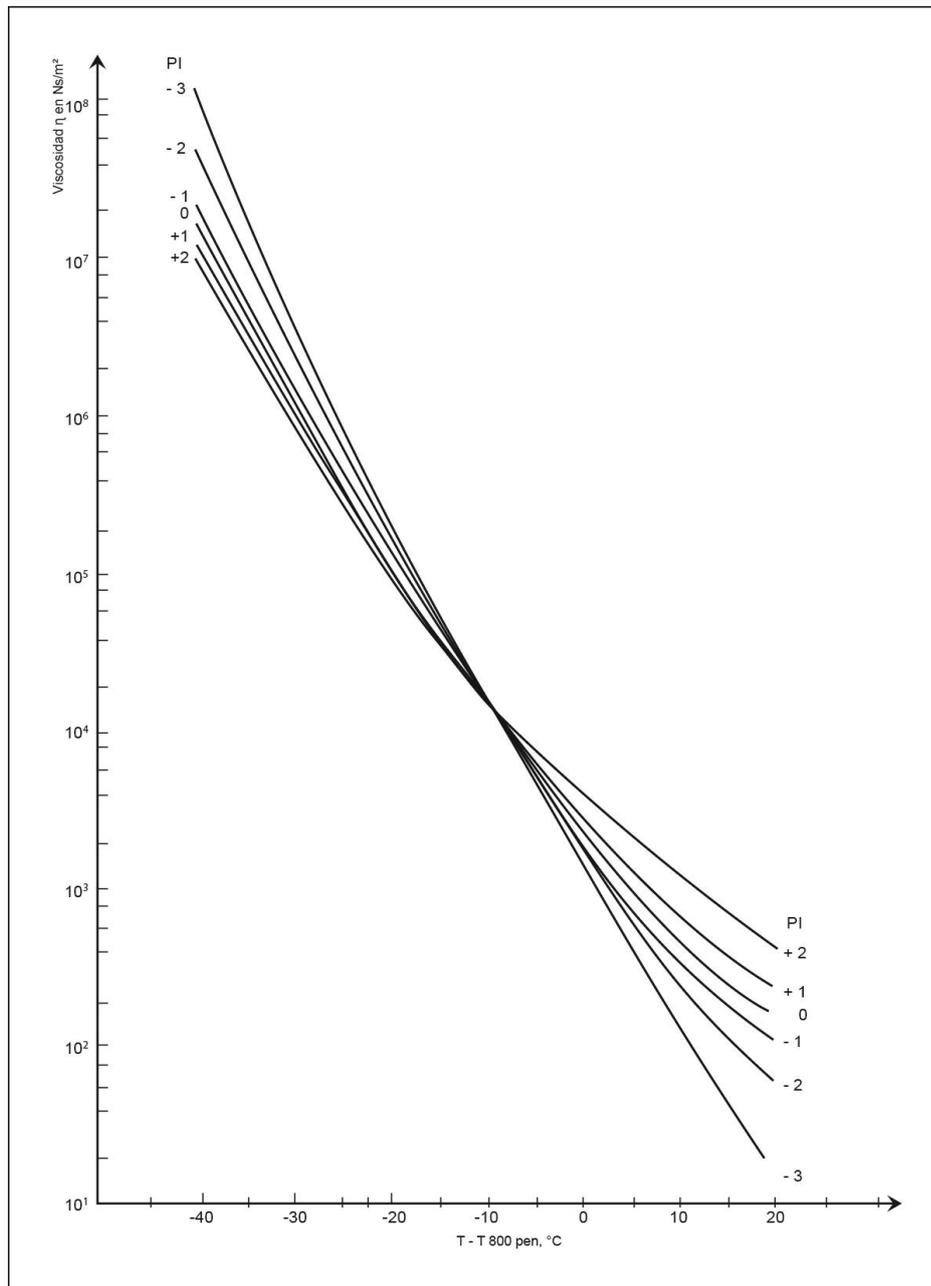
La parte que corresponde a la deformación permanente o porción irreversible de  $S_{bit}$  es la componente viscosa  $S_{bit}$  (viscosa). Para un fluido incompresible, puramente viscoso tendremos:

### Ecuación 4

$$S_{bit(visc)} = \frac{3\eta}{t}$$

Donde  $\eta$  es la viscosidad dinámica del ligante, la cual es función de la temperatura  $T$  y de la calidad del asfalto que se utilice.  $\eta$  puede obtenerse del nomograma mostrado en la Figura 6.

**Figura 6: Nomograma Temperatura - Viscosidad**



Fuente: Shell ,Ámsterdam

Para relacionar el comportamiento de la deformación con el número de pases de la rueda se asume que la deformación permanente de la mezcla es una función del componente viscoso de Sbit.

Las deformaciones irreversibles del ligante se comportan linealmente en relación con el tiempo a temperatura constante; para unas pruebas de cargas cíclicas los tiempos de carga pueden superponerse.

El tiempo total de carga,  $t$ , es entonces:

**Ecuación 5**

$$t = N * t_w$$

Donde  $N$  es el número de pases de cargas por ruedas estándar y  $t_w$  es el tiempo de cada pase. Si la temperatura cambia, el número de pases de la rueda a las diferentes temperaturas o viscosidades podrían sumarse según:

**Ecuación 6**

$$Sbit_{(visc)} = \frac{3}{t_w * \sum (\frac{N_i}{\eta})_{T_i}}$$

La profundidad de la rodera puede ahora ser calculada a través de un simple procedimiento. Usando los valores del ensayo creep, un diagrama  $S_{mix} - S_{bit}$  puede ser trazado.

Entonces, se calcularía  $S_{bit}$  (viscosa) conociendo las condiciones climáticas, la viscosidad del ligante y el número de cargas por ruedas estándar esperadas en la vida del pavimento.

Entrando en el diagrama  $S_{mix} - S_{bit}$  con  $S_{bit}(visc)$ , se encuentra el valor correspondiente de  $S_{mix}$ . Con este, la tensión promedio, el espesor de la capa asfáltica y un  $C_m$  adecuado, se puede calcular la profundidad de la rodera.

Estos valores son solamente deformaciones que ocurrirían en la mezcla asfáltica de la capa de superficie de pavimento. Es conveniente destacar que la profundidad de una deformación plástica total en un

pavimento puede incluir además, la deformación de otras capas estructurales como son la base, sub-base y subrasante.

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 Romaní, PhD. en 1995 .

## CAPÍTULO IV

### ENSAYOS LABORATORIO

#### 4.1 Generalidades

Se requieren tres tipos de ensayos: módulo de rigidez del asfalto (Sbit), módulo de rigidez determinado con ensayo Creep Estático (Smix) y módulo de rigidez bajo deformación controlada (Eac). Para determinar el Sbit con diferentes tiempos de carga se empleó la información sobre la calidad del asfalto reportada en la Tabla 2. Para el Smix se utilizaron 9 briquetas de cada juego. Las 3 briquetas restantes se utilizaron para los ensayos de Eac.

El equipo a utilizar es el Nottingham Asphalt Tester (NAT) del Laboratorio de Asfalto de la UCSG. Además, se recurrió al software BANDS 2.0 para el análisis del Sbit.

#### 4.2 Módulo de rigidez del cemento asfáltico (Sbit)

A partir de los ensayos de los cementos asfálticos utilizados para la confección de las briquetas tanto de agregados de cantera como aluviales se seleccionan los siguientes datos del betún envejecido:

**Tabla 7: Valores de IP, Punto de ablandamiento**

Propiedad	Norma	Unidad	Agregados de Cantera	Agregados Aluviales
INDICE DE PENETRACION			-0.3	-0.6
PENETRACION, 25°C,100 GR.,5S	ASTM D 5	0.1mm	44	43
% PENETRACION DEL ENVEJECIDO		%	69.8	71.7
PUNTO DE ABLANDAMIENTO A y B	ASTM D-36	°C	55.0	53.5

Fuente: Análisis de asfaltos, planta H e H km26

Elaborado por: El Autor

Con la ayuda del programa BANDS 2.0 (Shell Bitumen Asphalt Nomographs), del software de diseño de pavimentos por el Método Shell, se determinaron los módulos del betún (Sbit) considerando lo siguiente:

- ✓ Penetración
- ✓ Punto de Ablandamiento
- ✓ Tiempo y Temperatura

Los valores de tiempo a usar son los mismos que se seleccionaron para el cálculo de  $S_{mix}$  de acuerdo a la prueba Creep. Además, las temperaturas consideradas para estos análisis fueron: 30°C, 40°C y 50°C.

#### 4.2.1 Resultados obtenidos

- ✓  $S_{bit}$  (MPa) para briquetas con Agregados de Cantera

Tabla 8: Valores de  $S_{bit}$  para briquetas con agregados de cantera

<b>AGREGADOS DE CANTERA</b>			
<b>Segundos</b>	<b>30°C</b>	<b>40°C</b>	<b>50°C</b>
	<b><math>S_{bit}</math></b>		
<b>T</b>	<b>MPa</b>		
<b>2</b>	2.17E-01	2.86E-02	4.49E-03
<b>6</b>	8.75E-02	1.06E-02	1.57E-03
<b>10</b>	5.45E-02	6.63E-03	1.06E-03
<b>20</b>	2.94E-02	3.43E-03	5.59E-04
<b>40</b>	1.59E-02	1.75E-03	2.82E-04
<b>60</b>	1.09E-02	1.28E-03	1.88E-04
<b>100</b>	6.80E-03	8.37E-04	1.14E-04
<b>300</b>	2.33E-03	2.89E-04	4.39E-05
<b>600</b>	1.31E-03	1.46E-04	2.29E-05
<b>900</b>	9.42E-04	9.84E-05	1.52E-05
<b>1200</b>	7.26E-04	7.71E-05	1.12E-05
<b>1500</b>	5.88E-04	6.39E-05	9.00E-06
<b>1800</b>	4.94E-04	5.58E-05	7.66E-06
<b>2700</b>	3.31E-04	3.79E-05	5.37E-06
<b>3600</b>	2.49E-04	2.89E-05	3.93E-06

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

✓ **Sbit (MPa) para muestra con Agregados Aluviales**

**Tabla 9: Valores de Sbit para briquetas con agregados aluviales**

<b>AGREGADOS ALUVIALES</b>			
<b>Segundos</b>	<b>30°C</b>	<b>40°C</b>	<b>50°C</b>
	<b>Sbit</b>		
<b>T</b>	<b>MPa</b>		
<b>2</b>	2.01E-01	2.55E-02	3.78E-03
<b>6</b>	7.95E-02	8.93E-03	1.37E-03
<b>10</b>	4.99E-02	5.74E-03	9.02E-04
<b>20</b>	2.68E-02	2.88E-03	4.67E-04
<b>40</b>	1.42E-02	1.53E-03	2.32E-04
<b>60</b>	9.43E-03	1.12E-03	1.55E-04
<b>100</b>	6.00E-03	7.05E-04	9.47E-05
<b>300</b>	2.04E-03	2.38E-04	3.62E-05
<b>600</b>	1.16E-03	1.20E-04	1.87E-05
<b>900</b>	8.20E-04	8.30E-05	1.25E-05
<b>1200</b>	6.25E-04	6.51E-05	9.22E-06
<b>1500</b>	5.05E-04	5.40E-05	7.55E-06
<b>1800</b>	4.23E-04	4.59E-05	6.42E-06
<b>2700</b>	2.80E-04	3.12E-05	4.32E-06
<b>3600</b>	2.10E-04	2.37E-05	3.09E-06

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

Se aclara que posteriormente para la confección de los gráficos Smix-Sbit las unidades de Sbit se convertirán en Pascal.

### **4.3 Módulo de rigidez mediante Creep Estático**

Para determinar la mayor o menor tendencia de una mezcla a deformarse plásticamente, se ha usado el ensayo en pista de laboratorio, el cual necesita de un equipamiento costoso, incluso para la preparación de las muestras a ensayar. Sin embargo, la correlación de sus resultados con los del Ensayo Creep, pone a nuestro alcance una técnica novedosa para enfrentar el fenómeno de las deformaciones.

#### 4.3.1 Procedimiento del Ensayo Creep Estático

Esta prueba consiste en medir las deformaciones ( $\delta h$ ) que ocurren en una briqueta cilíndrica de mezcla asfáltica, a cierta temperatura, debido a la acción de una tensión axial constante en un tiempo determinado.

##### Ecuación 7

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

Donde:

$\sigma$  = Esfuerzo producido por la aplicación de la carga tensionante.

$\varepsilon$  = Deformación unitaria.

**Figura 7: Ensayo Creep Estático en NAT**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la UCSG

### 4.3.2 Creep Estático a Briquetas con Agregados de Cantera

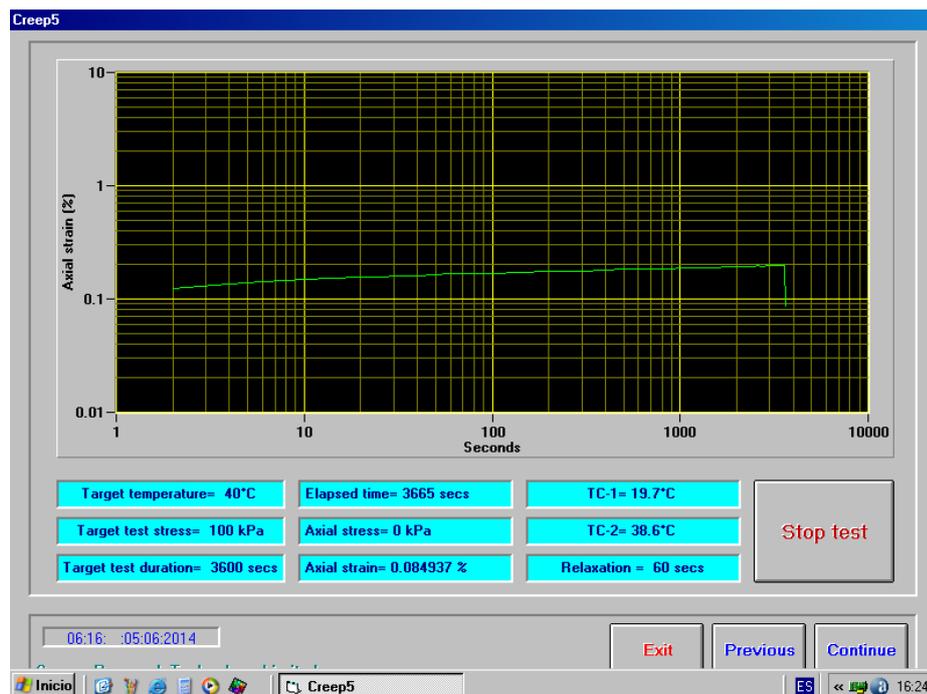
Utilizando briquetas tipo Marshall, con las siguientes características:

- ✓ Diámetro 102mm
- ✓ Altura (h) entre 50 y 70 mm
- ✓ Tensión constante de 0.1 MPa durante 3600 segundos y 60 segundos de relajación.

Se ensayó de la siguiente manera: Tres briquetas a 30°C, tres a 40°C y tres a 50°C.

Se consideraron intervalos de tiempo (seg) representativos a lo largo del ensayo. Una salida de resultados del software Static Creep para la prueba creep estática del NAT puede apreciarse en la Figura 8.

**Figura 8: Salida de resultados del Software Static Creep**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos de la UCSG  
Elaborado por: El Autor

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

✓ **Smix (MPa) a 30°C**

**Tabla 10: Valores de Smix para briquetas con agregados de cantera a 30°C**

Briqueta #7		30°C		AGREGADOS DE CANTERA				
Segundos	h	Deformacion %	Δh	ε	σ		Sbit	Smix
T	mm	%	(mm)	mm/mm	kpa	MPa	Pa	MPa
2	67	0.145	0.097	1.45E-03	100.7	0.10	2.17E+05	6.95E+01
6	67	0.177	0.119	1.77E-03	100.3	0.10	8.75E+04	5.66E+01
10	67	0.194	0.130	1.94E-03	100.1	0.10	5.45E+04	5.15E+01
20	67	0.221	0.148	2.21E-03	100.3	0.10	2.94E+04	4.53E+01
40	67	0.246	0.165	2.46E-03	100.2	0.10	1.59E+04	4.07E+01
60	67	0.264	0.177	2.64E-03	99.9	0.10	1.09E+04	3.79E+01
100	67	0.285	0.191	2.85E-03	99.6	0.10	6.80E+03	3.50E+01
300	67	0.332	0.222	3.32E-03	100	0.10	2.33E+03	3.01E+01
600	67	0.360	0.241	3.60E-03	100.5	0.10	1.31E+03	2.79E+01
900	67	0.377	0.252	3.77E-03	99.7	0.10	9.42E+02	2.65E+01
1200	67	0.388	0.260	3.88E-03	100.1	0.10	7.26E+02	2.58E+01
1500	67	0.400	0.268	4.00E-03	100	0.10	5.88E+02	2.50E+01
1800	67	0.406	0.272	4.06E-03	100.4	0.10	4.94E+02	2.48E+01
2700	67	0.421	0.282	4.21E-03	100	0.10	3.31E+02	2.38E+01
3600	67	0.435	0.292	4.35E-03	99.8	0.10	2.49E+02	2.29E+01

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

✓ **Smix (MPa) a 40°C**

**Tabla 11: Valores de Smix para briquetas con agregados de cantera a 40°C**

Briqueta #1		40°C		AGREGADOS DE CANTERA				
Segundos	h	Deformacion %	Δh	ε	σ		Sbit	Smix
T	mm	%	(mm)	mm/mm	kPa	MPa	Pa	MPa
2	66	0.406	0.268	4.06E-03	100.4	0.10	2.86E+04	2.47E+01
6	66	0.475	0.314	4.75E-03	100.2	0.10	1.06E+04	2.11E+01
10	66	0.506	0.334	5.06E-03	100.2	0.10	6.63E+03	1.98E+01
20	66	0.545	0.360	5.45E-03	100.3	0.10	3.43E+03	1.84E+01
40	66	0.580	0.383	5.80E-03	100	0.10	1.75E+03	1.72E+01
60	66	0.598	0.394	5.98E-03	100.1	0.10	1.28E+03	1.68E+01
100	66	0.618	0.408	6.18E-03	99.8	0.10	8.37E+02	1.61E+01
300	66	0.653	0.431	6.53E-03	99.5	0.10	2.89E+02	1.52E+01
600	66	0.672	0.443	6.72E-03	100	0.10	1.46E+02	1.49E+01
900	66	0.681	0.449	6.81E-03	100	0.10	9.84E+01	1.47E+01
1200	66	0.689	0.454	6.89E-03	99.6	0.10	7.71E+01	1.45E+01
1500	66	0.694	0.458	6.94E-03	100	0.10	6.39E+01	1.44E+01
1800	66	0.698	0.461	6.98E-03	100	0.10	5.58E+01	1.43E+01
2700	66	0.708	0.467	7.08E-03	99.9	0.10	3.79E+01	1.41E+01
3600	66	0.729	0.481	7.29E-03	100.1	0.10	2.89E+01	1.37E+01

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

✓ **Smix (MPa) a 50°C**

**Tabla 12: Valores de Smix para briquetas con agregados de cantera a 50°C**

Briqueta #4		50°C		AGREGADOS DE CANTERA				
Segundos	h	Deformacion %	Δh	ε	σ		Sbit	Smix
T	mm	%	(mm)	mm/mm	kPa	MPa	Pa	MPa
2	64	0.409	0.261	4.09E-03	98.9	0.10	4.49E+03	2.42E+01
6	64	0.488	0.313	4.88E-03	99.5	0.10	1.57E+03	2.04E+01
10	64	0.521	0.333	5.21E-03	100.2	0.10	1.06E+03	1.92E+01
20	64	0.559	0.358	5.59E-03	100	0.10	5.59E+02	1.79E+01
40	64	0.596	0.382	5.96E-03	100.2	0.10	2.82E+02	1.68E+01
60	64	0.633	0.405	6.33E-03	100	0.10	1.88E+02	1.58E+01
100	64	0.651	0.416	6.51E-03	100	0.10	1.14E+02	1.54E+01
300	64	0.679	0.435	6.79E-03	100.4	0.10	4.39E+01	1.48E+01
600	64	0.695	0.445	6.95E-03	100	0.10	2.29E+01	1.44E+01
900	64	0.708	0.453	7.08E-03	99.9	0.10	1.52E+01	1.41E+01
1200	64	0.718	0.459	7.18E-03	99.9	0.10	1.12E+01	1.39E+01
1500	64	0.724	0.463	7.24E-03	99.9	0.10	9.00E+00	1.38E+01
1800	64	0.712	0.456	7.12E-03	99.9	0.10	7.66E+00	1.40E+01
2700	64	0.718	0.460	7.18E-03	99.9	0.10	5.37E+00	1.39E+01
3600	64	0.721	0.462	7.21E-03	99.9	0.10	3.93E+00	1.38E+01

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

### 4.3.3 Creep Estático a Briquetas con Agregados Aluviales

Utilizando Briquetas tipo Marshall, con las siguientes características:

- ✓ Diámetro 102mm
- ✓ Altura (h) entre 50 y 70 mm
- ✓ Tensión de 0,1 MPa CONSTANTE durante 3600 segundos ,60 segundos de relajación.

Se ensayó de la siguiente manera: Tres briquetas a 30°C, tres a 40°C y tres a 50°C.

Arrojando los siguientes resultados:

✓ **Smix (MPa) a 30°C**

**Tabla 13: Valores de Smix para briquetas con agregados aluviales a 30°C**

<b>Briqueta #7</b>		<b>30°C</b>		<b>AGREGADOS ALUVIALES</b>				
<b>Segundos</b>	<b>h</b>	<b>Deformacion %</b>	<b>Δh</b>	<b>ε</b>	<b>σ</b>		<b>Sbit</b>	<b>Smix</b>
T	mm	%	(mm)	mm/mm	kpa	MPa	Pa	MPa
2	51	0.202	0.103	2.02E-03	99.7	0.10	2.01E+05	4.93E+01
6	51	0.255	0.130	2.55E-03	99.9	0.10	7.95E+04	3.92E+01
10	51	0.281	0.143	2.81E-03	100.2	0.10	4.99E+04	3.57E+01
20	51	0.318	0.162	3.18E-03	99.9	0.10	2.68E+04	3.15E+01
40	51	0.355	0.181	3.55E-03	100.3	0.10	1.42E+04	2.82E+01
60	51	0.375	0.191	3.75E-03	99.8	0.10	9.43E+03	2.66E+01
100	51	0.401	0.205	4.01E-03	99.8	0.10	6.00E+03	2.49E+01
300	51	0.450	0.229	4.50E-03	100.4	0.10	2.04E+03	2.23E+01
600	51	0.475	0.242	4.75E-03	99.8	0.10	1.16E+03	2.10E+01
900	51	0.488	0.249	4.88E-03	100.5	0.10	8.20E+02	2.06E+01
1200	51	0.499	0.254	4.99E-03	99.7	0.10	6.25E+02	2.00E+01
1500	51	0.506	0.258	5.06E-03	100.6	0.10	5.05E+02	1.99E+01
1800	51	0.512	0.261	5.12E-03	99.3	0.10	4.23E+02	1.94E+01
2700	51	0.524	0.267	5.24E-03	99.3	0.10	2.80E+02	1.90E+01
3600	51	0.535	0.273	5.35E-03	99.7	0.10	2.10E+02	1.86E+01

Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

✓ **Smix (MPa) a 40°C**

**Tabla 14: Valores de Smix para briquetas con agregados aluviales a 40°C**

<b>Briqueta #1</b>		<b>40°C</b>		<b>AGREGADOS ALUVIALES</b>				
<b>Segundos</b>	<b>h</b>	<b>Deformacion %</b>	<b>Δh</b>	<b>ε</b>	<b>σ</b>		<b>Sbit</b>	<b>Smix</b>
T	mm	%	(mm)	mm/mm	kPa	MPa	Pa	MPa
2	52	0.977	0.508	9.77E-03	99.4	0.10	2.55E+04	1.02E+01
6	52	1.060	0.551	1.06E-02	99.3	0.10	8.93E+03	9.37E+00
10	52	1.095	0.570	1.10E-02	100.3	0.10	5.74E+03	9.16E+00
20	52	1.136	0.591	1.14E-02	99.8	0.10	2.88E+03	8.78E+00
40	52	1.170	0.608	1.17E-02	100.1	0.10	1.53E+03	8.56E+00
60	52	1.186	0.617	1.19E-02	99.6	0.10	1.12E+03	8.40E+00
100	52	1.208	0.628	1.21E-02	99.8	0.10	7.05E+02	8.26E+00
300	52	1.264	0.657	1.26E-02	100.2	0.10	2.38E+02	7.93E+00
600	52	1.227	0.638	1.23E-02	99.9	0.10	1.20E+02	8.14E+00
900	52	1.234	0.642	1.23E-02	99.8	0.10	8.30E+01	8.09E+00
1200	52	1.235	0.642	1.23E-02	99.7	0.10	6.51E+01	8.07E+00
1500	52	1.244	0.647	1.24E-02	99.6	0.10	5.40E+01	8.01E+00
1800	52	1.245	0.647	1.24E-02	100.2	0.10	4.59E+01	8.05E+00
2700	52	1.254	0.652	1.25E-02	100.2	0.10	3.12E+01	7.99E+00
3600	52	1.280	0.666	1.28E-02	99.7	0.10	2.37E+01	7.79E+00

Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

✓ **Smix (MPa) a 50°C**

**Tabla 15: Valores de Smix para briquetas con agregados aluviales a 50°C**

Briqueta #4		50°C		AGREGADOS ALUVIALES				
Segundos	h	Deformacion %	Δh	ε	σ		Sbit	Smix
T	mm	%	(mm)	mm/mm	kPa	MPa	Pa	MPa
2	54	0.817	0.441	8.17E-03	100.4	0.10	3.78E+02	1.23E+01
6	54	0.867	0.468	8.67E-03	100.4	0.10	1.37E+02	1.16E+01
10	54	0.887	0.479	8.87E-03	100.4	0.10	9.02E+01	1.13E+01
20	54	0.909	0.491	9.09E-03	99.9	0.10	4.67E+01	1.10E+01
40	54	0.927	0.501	9.27E-03	99.7	0.10	2.32E+01	1.08E+01
60	54	0.939	0.507	9.39E-03	100	0.10	1.55E+01	1.06E+01
100	54	0.950	0.513	9.50E-03	100.1	0.10	9.47E+00	1.05E+01
300	54	0.974	0.526	9.74E-03	99.7	0.10	3.62E+00	1.02E+01
600	54	0.983	0.531	9.83E-03	99.9	0.10	1.87E+00	1.02E+01
900	54	0.982	0.530	9.82E-03	99.9	0.10	1.25E+00	1.02E+01
1200	54	0.994	0.537	9.94E-03	99.9	0.10	9.22E-01	1.01E+01
1500	54	0.997	0.538	9.97E-03	100.1	0.10	7.55E-01	1.00E+01
1800	54	0.999	0.540	9.99E-03	100	0.10	6.42E-01	1.00E+01
2700	54	1.003	0.542	1.00E-02	99.7	0.10	4.32E-01	9.94E+00
3600	54	1.006	0.543	1.01E-02	100	0.10	3.09E-01	9.94E+00

Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

#### 4.3.4 Módulo de rigidez promedio (Smixprom)

Al tener para cada temperatura tres resultados de Smix, estos se promediaron de tal forma que se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 16: Valores de Smixprom para briquetas a 30°C, 40°C, 50°C con agregados de cantera**

AGREGADOS DE CANTERA					
30°C		40°C		50°C	
Sbit (Pa)	Smix prom (MPa)	Sbit (Pa)	Smix prom (MPa)	Sbit (Pa)	Smix prom (MPa)
217000	49	28600	31	4490	29
87500	40	10600	26	1570	25
54500	37	6630	24	1060	23
29400	32	3430	22	559	22
15900	29	1750	20	282	21
10900	28	1280	19	188	20
6800	26	837	19	114	19
2330	22	289	17	44	19
1310	21	146	17	23	18
942	20	98.4	17	15	18
726	20	77.1	16	11	18
588	19	63.9	16	9	18
494	19	55.8	16	8	17
331	18	37.9	16	5	18
249	18	28.9	16	4	17

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

**Tabla 17: Valores de Smixprom para briquetas a 30°C, 40°C, 50°C con agregados aluviales**

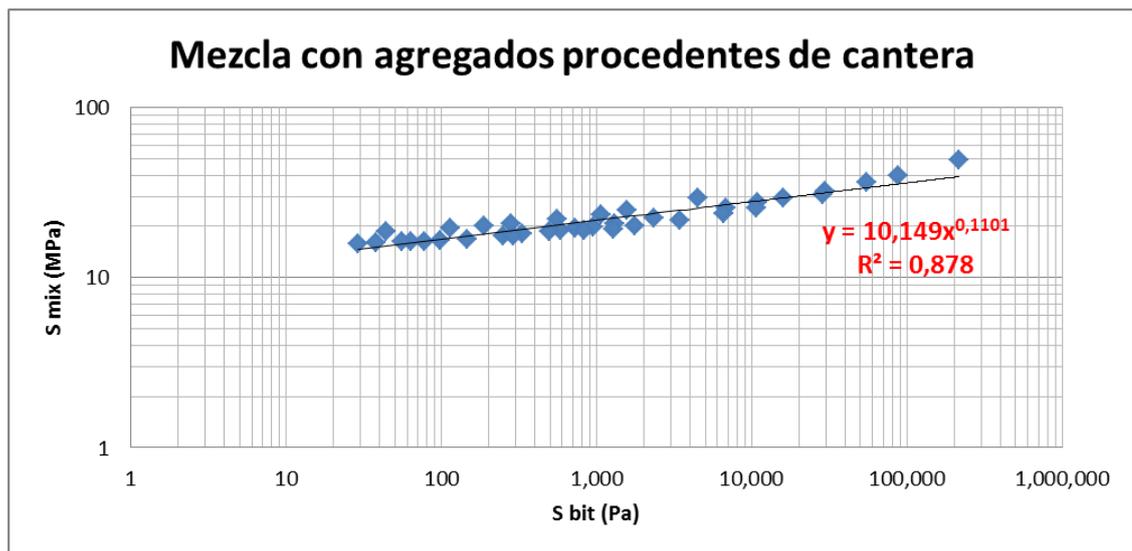
AGREGADOS ALUVIALES					
30°C		40°C		50°C	
Sbit (Pa)	Smix prom (MPa)	Sbit (Pa)	Smix prom (MPa)	Sbit (Pa)	Smix prom (MPa)
201000	47	25500	32	3780	26
79500	37	8930	25	1370	23
49900	33	5740	23	902	22
26800	29	2880	21	467	21
14200	25	1530	20	232	20
9430	24	1120	19	155	20
6000	22	705	19	95	20
2040	19	238	17	36	19
1160	18	120	17	19	18
820	18	83	17	13	18
625	17	65.1	17	9	18
505	17	54	17	8	18
423	17	45.9	16	6	18
280	17	31.2	16	4	18
210	16	23.7	16	3	18

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

#### 4.3.5 Representación gráfica de la relación Smix – Sbit

La forma más común y efectiva de mostrar estos resultados es a través de representar gráficamente la relación entre la rigidez de la mezcla (Smix) y la del betún (Sbit) conocida internacionalmente como relación Smix - Sbit.

**Figura 9: Gráfico de la relación Smix – Sbit para mezclas con agregados de cantera**

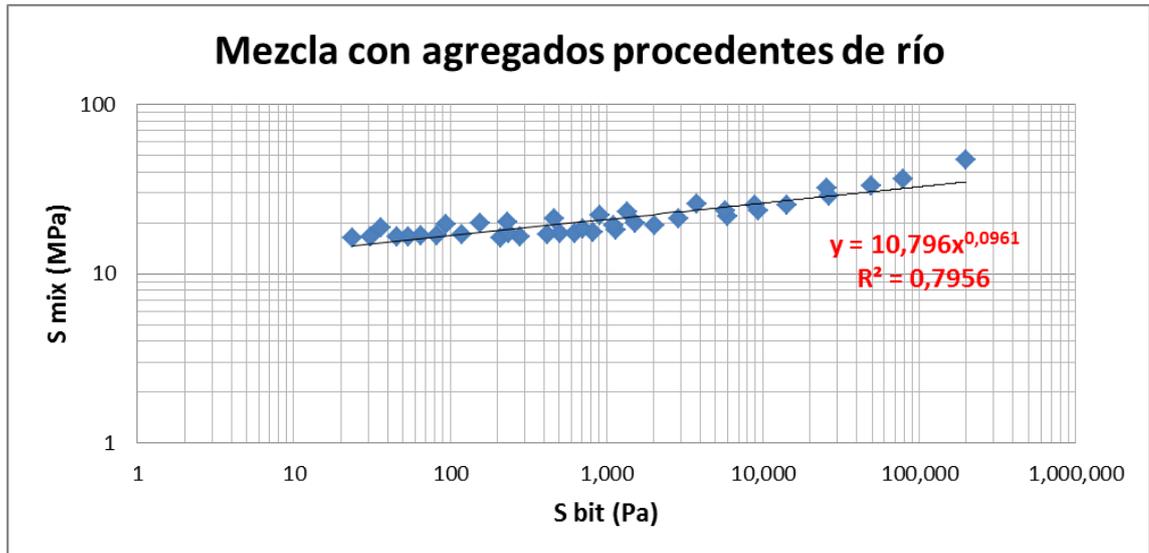


Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

**Ecuación 8: Ecuación para Smix – Sbit de mezclas con agregados de cantera triturados**

$$y = 10.149 * x^{0.1101}$$

**Figura 10: Gráfico de la relación  $S_{mix}$  –  $S_{bit}$  para mezclas con agregados aluviales**



Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

**Ecuación 9: Ecuación para  $S_{mix}$  –  $S_{bit}$  de mezclas con agregados aluviales triturados**

$$y = 10.796 * x^{0.0961}$$

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

Este ensayo se basa en la normativa europea CEN 12697-26: 2006 anexo C, pruebas de tensión indirecta en probetas cilíndricas. Esta prueba es un método no destructivo, con el cual se determina el módulo de rigidez de las mezclas asfálticas ante la deformación controlada. Se utilizó el Software Stiffness-Micron.

Los datos que se deben ingresar son:

- ✓ Temperaturas de ensayos: 10°C, 20°C, 30°C y 40°C
- ✓ Relación de Poisson ( $\mu$ ) = 0.35

- ✓ Plazo deseado para carga total: 120 milisegundos
- ✓ Deformación horizontal deseada: 5 um (para diámetros de 102 mm)
- ✓ Número de pulsos de preparación: 5

#### 4.4.1 Resultados

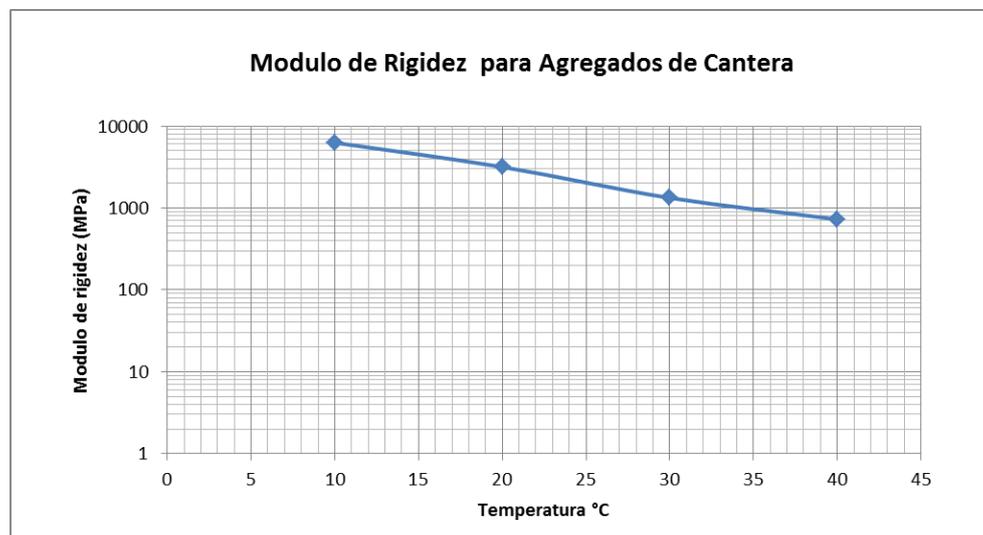
**Tabla 18: Módulos de rigidez promedio para cada tipo de briqueta**

TIPO	BRIQUETA	10°C		20°C		30°C		40°C	
		MPa		MPa		MPa		MPa	
AGREGADO CANTERA	B10	6813	<b>6269</b>	3035	<b>3167</b>	1231	<b>1328</b>	676	<b>726</b>
	B11	5803		3181		1329		738	
	B12	6192		3284		1424		765	
AGREGADO ALUVIAL	B10	6011	<b>5574</b>	2959	<b>2984</b>	1244	<b>1292</b>	591	<b>563</b>
	B11	5351		3073		1278		571	
	B12	5359		2921		1355		526	

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

#### 4.4.2 Representación gráfica de resultados

**Figura 11: Relación Eac – Temperatura para mezclas con agregados de cantera**

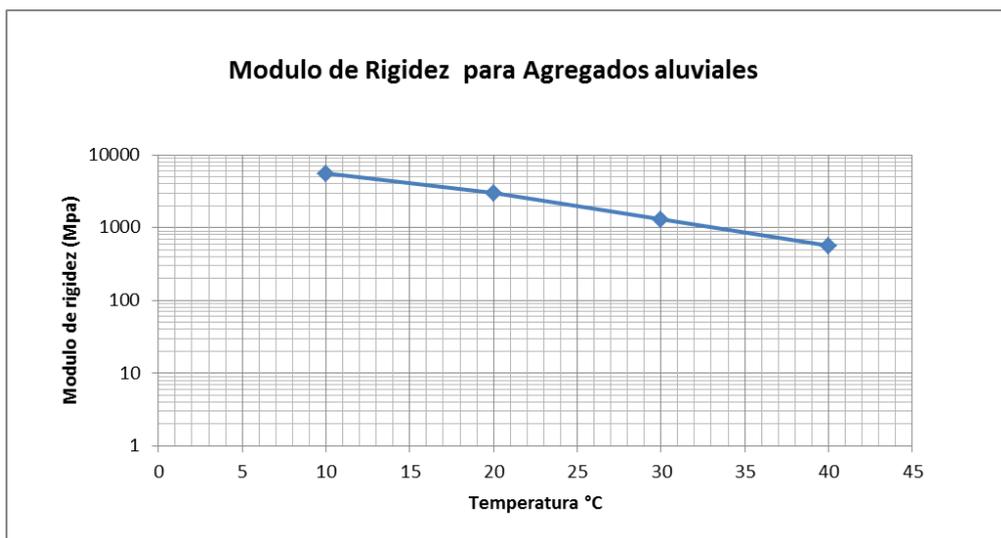


Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

**Ecuación 10: Ecuación de módulo de rigidez para mezclas con agregados de cantera triturados**

$$y = 13090 * e^{-0.073x}$$

**Figura 12: Relación Eac – Temperatura para mezclas con agregados aluviales**



Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

**Ecuación 11: Ecuación de módulo de rigidez para mezclas con agregados aluviales triturados**

$$y = 12836 * e^{-0.077x}$$

## **CAPÍTULO V**

### **CÁLCULO Y ANÁLISIS DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS (AHUELLAMIENTOS)**

#### **5.1 Generalidades**

Es conocido el hecho de que la temperatura ambiental elevada, reblandece el asfalto de las mezclas en los pavimentos, ocasionando una enorme susceptibilidad a sufrir deformaciones plásticas, debido a que la mezcla presenta un comportamiento muy viscoso, que la hace fluir y desplazarse con mucha facilidad.

La temperatura ambiental por lo tanto, es un factor que influye de una manera muy importante en las deformaciones plásticas de los pavimentos, porque permite que una mezcla asfáltica se comporte de manera viscosa o elástica.

Monismith et al. (1994) observaron que un incremento en la temperatura de prueba de las mezclas asfálticas, genera un decremento en la resistencia a la generación de ahuellamientos.

#### **5.2 Determinación de temperaturas y tránsito a utilizar**

Como ya se ha mencionado, este estudio se enfoca en la región Costa tomando como datos la variación de temperatura por hora a lo largo de un año representativo (2013) en la ciudad de Guayaquil, así como los datos reales de tráfico de una vía principal de esta región, en este caso la Carretera E 25, en el tramo “Durán – Jujan” a lo largo de ese mismo año. Dichos datos corresponden a una clasificación horaria y por tipo de vehículos pesados, circulando en las dos direcciones.

## 5.2.1 Tránsito

En el análisis que se pretende realizar se necesita conocer el porcentaje de vehículos pesados por hora actuantes. A continuación y como ejemplo, se presenta los cálculos realizados para el mes de Enero del 2013 en la vía analizada.

### ENERO 2013

Total de ejes pesados registrados: 150899

**Tabla 19: Porcentaje de vehículos pesados por hora actuantes correspondientes al mes de Enero 2013**

HORAS/ EJES	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
2 EJES	2,032.00	1,321.00	1,131.00	1,328.00	2,220.00	3,363.00	4,376.00	4,753.00	4,693.00	4,596.00	4,869.00	4,929.00
3 EJES	68.00	65.00	75.00	108.00	211.00	227.00	310.00	319.00	415.00	363.00	417.00	426.00
4 EJES	313.00	272.00	252.00	257.00	235.00	310.00	268.00	205.00	189.00	135.00	178.00	177.00
5 EJES	423.00	394.00	382.00	411.00	465.00	472.00	400.00	344.00	334.00	318.00	376.00	395.00
6 EJES	126.00	120.00	92.00	114.00	221.00	240.00	312.00	401.00	399.00	348.00	404.00	404.00
BUSES	18.00	3.00	6.00	30.00	299.00	780.00	1,468.00	1,745.00	1,679.00	1,572.00	1,512.00	1,514.00
TOTAL	2,980.00	2,175.00	1,938.00	2,248.00	3,651.00	5,392.00	7,134.00	7,767.00	7,709.00	7,332.00	7,756.00	7,845.00
% V. 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

HORAS/ EJES	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00
	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
2 EJES	4,709.00	4,994.00	5,009.00	5,105.00	5,201.00	5,703.00	5,220.00	4,765.00	3,931.00	3,437.00	3,286.00	2,865.00
3 EJES	472.00	372.00	456.00	420.00	410.00	341.00	318.00	209.00	186.00	137.00	102.00	95.00
4 EJES	193.00	197.00	260.00	298.00	341.00	337.00	381.00	426.00	423.00	396.00	396.00	319.00
5 EJES	380.00	420.00	446.00	453.00	487.00	551.00	542.00	608.00	579.00	570.00	508.00	473.00
6 EJES	464.00	435.00	412.00	467.00	422.00	506.00	419.00	318.00	272.00	264.00	230.00	194.00
BUSES	1,517.00	1,520.00	1,518.00	1,519.00	1,519.00	1,608.00	1,587.00	1,479.00	1,180.00	837.00	447.00	111.00
TOTAL	7,735.00	7,938.00	8,101.00	8,262.00	8,380.00	9,046.00	8,467.00	7,805.00	6,571.00	5,641.00	4,969.00	4,057.00
% V. 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

Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

Con cálculos similares realizados para los restantes meses se logra confeccionar una Tabla como la siguiente:

**Tabla 20: Porcentaje de vehículos pesados por hora actuantes correspondientes al año 2013**

HORAS/ MESES	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
ENE	1.97	1.44	1.28	1.49	2.42	3.57	4.73	5.15	5.11	4.86	5.14	5.20
FEB	2.33	1.67	1.50	1.69	2.57	3.64	4.79	5.15	5.03	4.65	4.93	5.04
MAR	2.32	1.82	1.61	1.81	2.60	3.82	4.75	5.22	4.97	4.70	4.77	5.01
ABR	2.19	1.74	1.50	1.74	2.51	3.76	4.90	5.12	4.88	4.70	4.95	4.96
MAY	2.25	1.72	1.47	1.59	2.57	3.78	4.81	5.05	4.84	4.72	4.95	5.10
JUN	2.03	1.50	1.34	1.59	2.60	3.89	4.76	5.00	5.08	4.82	5.11	5.18
JUL	2.02	1.52	1.38	1.55	2.64	3.87	4.82	4.95	5.02	4.96	5.17	5.15
AGO	2.21	1.66	1.48	1.61	2.69	3.93	4.74	4.82	4.99	4.74	5.12	4.99
SEPT	2.04	1.56	1.39	1.71	2.68	4.00	4.68	4.90	4.89	4.89	5.18	5.01
OCT	2.12	1.65	1.43	1.82	2.71	3.96	4.63	4.81	4.75	4.73	5.04	5.31
NOV	2.09	1.59	1.42	1.68	2.67	4.02	4.67	4.80	4.85	4.84	5.28	5.25
DIC	2.19	1.70	1.57	1.75	2.78	4.00	4.77	4.78	4.79	4.78	5.12	5.11
<b>PROMEDIO</b>	<b>2.14</b>	<b>1.62</b>	<b>1.44</b>	<b>1.66</b>	<b>2.61</b>	<b>3.84</b>	<b>4.75</b>	<b>5.00</b>	<b>4.95</b>	<b>4.78</b>	<b>5.06</b>	<b>5.11</b>
HORAS/ MESES	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
ENE	5.13	5.26	5.37	5.48	5.55	5.99	5.61	5.17	4.35	3.74	3.29	2.69
FEB	4.94	5.06	5.19	5.27	5.43	5.70	5.66	5.19	4.47	3.80	3.42	2.89
MAR	4.95	5.00	5.06	5.31	5.45	5.72	5.48	5.05	4.51	3.86	3.34	2.87
ABR	5.00	5.01	5.20	5.36	5.53	5.69	5.41	5.00	4.59	3.91	3.44	2.91
MAY	4.97	5.05	5.23	5.46	5.61	5.68	5.37	4.99	4.68	3.89	3.41	2.81
JUN	5.30	5.18	5.36	5.57	5.59	5.77	5.32	4.88	4.43	3.74	3.32	2.63
JUL	5.06	5.14	5.16	5.59	5.58	5.68	5.25	4.93	4.46	3.83	3.53	2.74
AGO	4.87	5.04	5.19	5.38	5.50	5.63	5.36	5.01	4.54	4.00	3.62	2.88
SEPT	5.05	5.01	5.37	5.42	5.40	5.64	5.33	4.94	4.56	4.03	3.49	2.80
OCT	4.91	5.11	5.22	5.45	5.57	5.71	5.23	4.96	4.69	3.91	3.44	2.86
NOV	5.13	5.23	5.34	5.48	5.69	5.59	5.32	4.86	4.40	3.86	3.33	2.63
DIC	5.05	5.10	5.12	5.37	5.44	5.65	5.25	4.90	4.45	3.94	3.50	2.89
<b>PROMEDIO</b>	<b>5.03</b>	<b>5.10</b>	<b>5.24</b>	<b>5.43</b>	<b>5.54</b>	<b>5.71</b>	<b>5.39</b>	<b>5.00</b>	<b>4.52</b>	<b>3.87</b>	<b>3.42</b>	<b>2.79</b>

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

## 5.2.2 Temperatura

Con ayuda de la información de la base de datos meteorológicos [www.weatherbase.com](http://www.weatherbase.com), con sede en Virginia, se obtuvo lo siguiente:

Registro de los últimos 16 años de temperaturas ambientales mensuales promedios, máximas y mínimas para la ciudad de Santiago de Guayaquil.

**Tabla 21: Temperaturas promedio, máximas y mínimas del año 2013**

Meses / Temp.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	°C											
Promedio	27	27	27	27	27	25	25	25	25	25	26	27
Máxima	31	30	31	31	30	29	28	28	30	29	30	31
Mínima	23	23	24	23	23	22	21	20	21	21	22	22

Fuente: [www.weatherbase.com](http://www.weatherbase.com) , temperaturas de Santiago de Guayaquil  
Elaborado por: El Autor

De la misma manera la base de datos permite ubicar un día de cada mes del año 2013 que coincida con dicho promedio, así como con los máximos y mínimos. Para dicho día (de cada mes) se tomaron las variaciones horarias. Tabulando adecuadamente se ordenaron dichas temperaturas por hora para proceder a calcular la temperatura correspondiente en la carpeta asfáltica. Ver Tabla 22.

### 5.2.2.1 Temperatura en Carpeta Asfáltica

Para determinar el cambio de temperatura de la carpeta asfáltica respecto de la temperatura ambiental se utilizó la fórmula del Instituto del Asfalto (Asphalt Institute, 1982. Design Normal MS-1 Ninth edition "Research Report n° 82-2 ". Lexington, KY).

#### Ecuación 12

$$M_p = M_a * \left[ \left( 1 + \frac{1}{Z + 4} \right) - \left( \frac{34}{Z + 4} \right) + 6 \right]$$

**Donde:**

M<sub>p</sub>= Temperatura de carpeta asfáltica, °F

M<sub>a</sub>= Temperatura del Aire, °F

H= Espesor de carpeta, pulgadas

Z= 1/3 del espesor de carpeta, pulgadas

✓ **Temperatura del Aire**

**Tabla 22: Temperaturas del aire por hora representativas de cada mes**

TEMPERATURA DEL AIRE																								
HORA/	01:00		02:00		03:00		04:00		05:00		06:00		07:00		08:00		09:00		10:00		11:00		12:00	
TEMP.	°C	°F																						
ENE	25	77	25	77	25	77	24	75	23	73	23	73	24	75	23	73	24	75	26	79	28	82	29	84
FEB	25	77	25	77	24	75	24	75	23	73	24	75	24	75	24	75	25	77	27	81	27	81	27	81
MAR	26	79	25	77	25	77	24	75	24	75	24	75	24	75	25	77	26	79	26	79	26	79	27	81
ABR	26	79	25	77	25	77	25	77	25	77	24	75	24	75	24	75	25	77	25	77	26	79	28	82
MAY	24	75	24	75	24	75	24	75	23	73	23	73	24	75	25	77	26	79	28	82	28	82	29	84
JUN	22	72	22	72	22	72	22	72	22	72	22	72	22	72	22	72	22	72	24	75	26	79	27	81
JUL	21	70	22	72	22	72	22	72	21	70	21	70	22	72	22	72	23	73	23	73	24	75	25	77
AGO	21	70	21	70	21	70	21	70	21	70	21	70	20	68	21	70	23	73	23	73	25	77	26	79
SEPT	22	72	22	72	21	70	21	70	21	70	22	72	22	72	22	72	25	77	25	77	26	79	27	81
OCT	22	72	21	70	21	70	22	72	22	72	22	72	22	72	23	73	24	75	25	77	27	81	28	82
NOV	22	72	22	72	22	72	22	72	23	73	23	73	23	73	24	75	25	77	26	79	28	82	28	82
DIC	23	73	23	73	23	73	24	75	22	72	22	72	23	73	24	75	26	79	28	82	29	84	30	86
HORA/	13:00		14:00		15:00		16:00		17:00		18:00		19:00		20:00		21:00		22:00		23:00		00:00	
TEMP.	°C	°F																						
ENE	30	86	30	86	31	88	31	88	31	88	30	86	30	86	28	82	27	81	27	81	26	79	25	77
FEB	29	84	29	84	29	84	30	86	29	84	26	79	27	81	27	81	26	79	26	79	26	79	25	77
MAR	29	84	29	84	31	88	31	88	30	86	30	86	29	84	28	82	27	81	27	81	27	81	26	79
ABR	29	85	30	86	31	88	31	88	30	86	29	84	29	84	29	84	28	82	28	82	28	82	26	79
MAY	29	84	30	86	29	84	29	84	28	82	28	82	27	81	27	81	27	81	26	79	26	79	25	77
JUN	27	81	28	82	28	82	28	82	28	82	28	82	26	79	25	77	24	75	23	73	23	73	22	72
JUL	27	81	27	81	27	81	28	82	27	81	26	79	26	79	25	77	24	75	23	73	22	72	21	70
AGO	27	81	27	81	27	81	28	82	27	81	26	79	24	75	24	75	22	72	21	70	21	70	21	70
SEPT	28	82	29	84	30	86	29	84	29	84	28	82	26	79	26	79	24	75	24	75	23	73	22	72
OCT	28	82	29	84	29	84	29	84	28	82	27	81	25	77	25	77	23	73	23	73	23	73	22	72
NOV	29	84	29	84	29	84	30	86	30	86	29	84	26	79	26	79	25	77	24	75	23	73	22	72
DIC	31	88	31	88	31	88	30	86	30	86	29	84	28	82	26	79	26	79	25	77	25	77	24	75

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

Debido a que la ecuación anterior depende del espesor de la capa asfáltica, se estimaron algunos espesores de carpeta asfáltica posibles de emplear ante tráficos variables, siendo estos: 7.5, 10, 14 y 20 cm. Posteriormente, en los diseños de pavimentos realizados se mostrarán más detalles de estas determinaciones.

A manera de ejemplo se muestra el cálculo de la temperatura media en la capa asfáltica correspondiente a un espesor de capa (H) igual a 7.5 cm. Ver Tabla 23.

✓ **Temperatura media de carpeta asfáltica.**

**Tabla 23: Temperaturas del aire por hora representativas de cada mes**

TEMPERATURA DE LA CARPETA ASFALTICA , H= 7.5 CM																								
HORAS	01:00		02:00		03:00		04:00		05:00		06:00		07:00		08:00		09:00		10:00		11:00		12:00	
TEMP.	°F	°C																						
ENE	92	33	92	33	92	33	89	32	87	31	87	31	89	32	87	31	89	32	94	34	98	37	100	38
FEB	92	33	92	33	89	32	89	32	87	31	89	32	89	32	89	32	92	33	96	36	96	36	96	36
MAR	94	34	92	33	92	33	89	32	89	32	89	32	89	32	92	33	94	34	94	34	94	34	96	36
ABR	94	34	92	33	92	33	92	33	92	33	89	32	89	32	89	32	92	33	92	33	94	34	98	37
MAY	89	32	89	32	89	32	89	32	87	31	87	31	89	32	92	33	94	34	98	36	98	37	100	38
JUN	85	30	85	30	85	30	85	30	85	30	85	30	85	30	85	30	85	30	89	32	94	34	96	36
JUL	83	28	85	30	85	30	85	30	83	28	83	28	85	30	85	30	87	31	87	31	89	32	92	33
AGO	83	28	83	28	83	28	83	28	83	28	83	28	81	27	83	28	87	31	87	31	92	33	94	34
SEPT	85	30	85	30	83	28	83	28	83	28	83	28	85	30	85	30	92	33	92	33	94	34	96	36
OCT	85	30	83	28	83	28	85	30	85	30	85	30	85	30	87	31	89	32	92	33	96	36	98	37
NOV	85	30	85	30	85	30	85	30	87	31	87	31	87	31	89	32	92	33	94	34	98	37	98	37
DIC	87	31	87	31	87	31	89	32	85	30	85	30	87	31	89	32	94	34	98	37	100	38	102	39
HORAS	13:00		14:00		15:00		16:00		17:00		18:00		19:00		20:00		21:00		22:00		23:00		00:00	
TEMP.	°F	°C																						
ENE	102	39	102	39	105	40	105	40	105	40	102	39	102	39	98	37	96	36	96	36	94	34	92	33
FEB	100	38	100	38	100	38	102	39	100	38	94	34	96	36	96	36	94	34	94	34	94	34	92	33
MAR	100	38	100	38	105	40	105	40	102	39	102	39	100	38	98	37	96	36	96	36	96	36	94	34
ABR	101	38	102	39	105	40	105	40	102	39	100	38	100	38	100	38	98	37	98	37	98	37	94	34
MAY	100	38	102	39	100	38	100	38	98	37	98	37	96	36	96	36	96	36	94	34	94	34	92	33
JUN	96	36	98	37	98	37	98	37	100	38	98	37	94	34	92	33	89	32	87	31	85	30	85	30
JUL	96	36	96	36	96	36	98	37	96	36	94	34	94	34	92	33	89	32	87	31	85	30	83	28
AGO	96	36	96	36	96	36	98	37	96	36	94	34	89	32	89	32	85	30	83	28	83	28	83	28
SEPT	98	37	100	38	102	39	100	38	100	38	98	37	94	34	94	34	89	32	89	32	87	31	85	30
OCT	98	37	100	38	100	38	100	38	98	37	96	36	92	33	92	33	87	31	87	31	85	30	85	30
NOV	100	38	100	38	100	38	102	39	102	39	100	38	94	34	94	34	92	33	89	32	87	31	85	30
DIC	105	40	105	40	105	40	102	39	102	39	100	38	98	37	94	34	94	34	92	33	92	33	89	32

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

En el marco de este trabajo se promediaron las temperaturas horarias entre todos los meses, a fin de encontrar una única variación de temperatura por hora que sea representativa de todo año, considerando los diferentes espesores analizados. Ver Tabla 24.

**Tabla 24: Temperaturas media de capa asfáltica para espesores de diseño**

TEMPERATURA MEDIA DEL PAVIMENTO PARA DIFERENTES ESPESORES												
HORAS	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
ESPEORES	°C											
7.5 cm	31	31	31	31	30	30	31	31	33	34	35	36
10 cm	31	31	30	30	30	30	30	31	32	33	35	36
14 cm	30	30	30	30	29	30	30	30	32	33	34	35
20 cm	30	30	30	30	29	29	29	30	31	32	34	35
HORAS	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00
ESPEORES	°C											
7.5 cm	37	38	38	39	38	37	35	35	33	33	32	31
10 cm	37	38	38	38	38	36	35	34	33	33	32	31
14 cm	37	37	37	38	37	36	35	34	33	32	32	31
20 cm	36	37	37	37	37	35	34	33	32	32	31	30

Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

Para la zona geográfica en cuestión analizada, puede observarse que las temperaturas en el pavimento involucradas en todos los casos están en el rango entre 29 y 39°C, incluidos dichos valores. Estas pueden considerarse las temperaturas de trabajo para dicha zona.

### 5.3 Viscosidad dinámica de la mezcla asfáltica

Para el cálculo de la viscosidad dinámica de la mezcla asfáltica se utilizó la temperatura media del pavimento (temperaturas de trabajo) para los dos tipos de mezcla utilizada.

Con los siguientes resultados de las pruebas a los dos asfaltos empleados, correspondientes al residuo de la prueba de película delgada (TFOT):

- ✓ Índice de penetración (IP), que es una medida de la susceptibilidad térmica del asfalto
- ✓ Punto de ablandamiento ( $T_{800\text{pen}}$ )= Temperatura a la cual la penetración es de 800 décimas de milímetro.

Se accede a un nomograma desarrollado por Shell y mostrado en la Figura 6 para determinar la viscosidad dinámica de las mezclas.

### 5.3.1 Valores de la viscosidad dinámica de la mezcla con agregados de cantera

**Tabla 25: Valores de viscosidad dinámica para mezclas con agregados de cantera**

Agregados de Cantera	IP:	-0.3
	$T_{800\text{pen}}$ :	55
T. Media Pav. (°C)	$T - T_{800\text{pen}}$	Visc (Ns/m <sup>2</sup> )
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	46,000

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

### 5.3.2 Valores de la viscosidad dinámica de la mezcla con agregados aluviales

Tabla 26: Valores de viscosidad dinámica para mezclas con agregados aluviales

Agregados Aluviales	IP: -0.6	
	T <sub>800 pen</sub> :	53.5
T. Media Pav. (°C)	T-T <sub>800 pen</sub>	Visc (Ns/m <sup>2</sup> )
29	-25	480,000
30	-24	360,000
31	-23	320,000
32	-22	230,000
33	-21	150,000
34	-20	130,000
35	-19	105,000
36	-18	81,000
37	-17	61,000
38	-16	52,000
39	-15	41,000

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

### 5.4 Módulos de rigidez (Eac) de las mezclas asfálticas para las temperaturas de trabajo determinadas

Se calcularon los módulos de las mezclas considerando las temperaturas de trabajo determinadas. Para ello se emplearon las ecuaciones 11 y 12.

Los resultados aparecen en la Tabla 27.

**Tabla 27: Módulos de rigidez Eac para temperaturas de trabajo**

T. Media Pav. (°C)	T. Media Pav. (°F)	Eac (psi) I.A.	Eac (MPa) I.A.	Eac (MPa) CANTERA	Eac (MPa) ALUVIALES
29	84.2	434,510	3,042	1576	1376
30	86.0	416,869	2,918	1465	1274
31	87.8	399,945	2,800	1362	1180
32	89.6	383,707	2,686	1266	1093
33	91.4	368,129	2,577	1177	1012
34	93.2	353,183	2,472	1094	937
35	95.0	338,844	2,372	1017	867
36	96.8	325,087	2,276	946	803
37	98.6	311,889	2,183	879	743
38	100.4	299,226	2,095	817	688
39	102.2	287,078	2,010	760	637

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

Se incluyó en dicha tabla como comparación los valores que el Instituto del Asfalto tomaría como módulo de rigidez (Eac) de acuerdo a nuestras temperaturas de trabajo. Vale aclarar que estos módulos no son determinados con equipos tipo NAT.

Se puede visualizar la gran diferencia entre las mezclas de nuestro país y las del Instituto del Asfalto.

### **5.5 Diseño de estructuras de pavimentos según Método ASSHTO 93 (vigente)**

De acuerdo a la normativa AASHTO 93 (“Guide for design of Pavement Structures”, Washington D.C.) se calcularon 16 estructuras correspondientes a variaciones del número de ejes simples equivalentes de 8.2 ton de: 5 x 104, 5 x 105, 5 x 106 y 5 x 107. Además se varió para cada caso el módulo resiliente de la subrasante, considerando: 250, 500, 750 y 900 kg/cm<sup>2</sup>.

Una imagen de la hoja de cálculo de EXCEL se muestra en la Figura 28.

**Tabla 28: Diseño ASSHTO 93 para ESAL 500,000 ejes y MR= 500 kg/cm<sup>2</sup>**

<b>MÉTODO AASHTO 93</b>					
<b>EJEMPLO DE DISEÑO PARA 5 X 10<sup>6</sup> EJES Y MR DE 50 MPa.</b>					
<b>DATOS :</b>					
EJES ACUMULADOS 8,2 ton :	5,000,000				
CONFIABILIDAD (%) :	85				
DESVIACION ESTANDAR :	-1.037				
ERROR ESTANDAR COMBINADO :	0.49				
MODULO SUBRASANTE (kg/cm <sup>2</sup> ) :	500	(50 MPa)			
MODULO SUBBASE AGREG. (kg/cm <sup>2</sup> ) :	1,200	<b>a 3 :</b>	0.120	<b>m 3 :</b>	0.90
MOD. BASE AGREGADOS (kg/cm <sup>2</sup> ) :	2,100	<b>a 2 :</b>	0.135	<b>m 2 :</b>	1.00
MOD. CARPETA ASFALTICA (kg/cm <sup>2</sup> ) :	32,000	<b>a 1 :</b>	0.440	<b>m 1 :</b>	x
PERDIDA TOTAL DE P S I :	2.2				
<b>AJUSTE DEL:</b>		<b>SN3 (SR):</b>	<b>SN2 (SB):</b>		
NUMERO ESTRUCT REQUERIDO :		<b>4.2</b>	<b>3.1</b>		
LOG (EJES ACUMULADOS) :		6.7	6.7		
ECUACION DE COMPROBACION :		6.7	6.7		
<b>AJUSTE DEL:</b>		<b>SN1 (BA):</b>			
NUMERO ESTRUCT REQUERIDO :		<b>2.5</b>			
LOG (EJES ACUMULADOS) :		6.7			
ECUACION DE COMPROBACION :		6.7			
<b>DETERMINACION DE ESPESORES:</b>					
<b>CARPETA ASFALTICA :</b>	<b>D1* :</b>	REAL,cm :	14.2	AJUST,cm :	<b>14</b>
	<b>SN1* :</b>	2.4			
<b>BASE DE AGREGADOS :</b>	<b>D2* :</b>	REAL,cm :	12.5	AJUST,cm :	<b>15</b>
	<b>SN2* :</b>	3.2			
<b>SUBBASE DE AGREGADOS :</b>	<b>D3* :</b>	REAL,cm :	22.6	AJUST,cm :	<b>25</b>
	<b>SN3* :</b>	4.3			

Fuente: Diseño ASSHTO 93  
Elaborado por: El Autor

Las estructuras de diseño de pavimento realizadas fueron:

- ✓ Cuatro diseños estructurales con módulo resiliente  $MR=250\text{kg/cm}^2$

**Figura 13: Estructuras de pavimento para  $MR= 250 \text{ kg/cm}^2$**

ESAL	5E+04			ESAL	5E+05			
4	e=7.5 cm	CA		3	e=10 cm	CA		
3.5				e=15 cm				Base
	Ebg= 909 $\text{kg/cm}^2$	4						
	e=15cm	Sub-base		e=15 cm	Base			
				Esbg= 477 $\text{kg/cm}^2$		Ebg= 1241 $\text{kg/cm}^2$		
	MR= 250 $\text{kg/cm}^2$			Sub-rasante	e=30cm	Sub-base		
				Esbg= 651 $\text{kg/cm}^2$	MR= 250 $\text{kg/cm}^2$			Sub-rasante
ESAL	5E+06			ESAL	5E+07			
5	e=14 cm	CA		6	e=20 cm	CA		
5				e=28 cm				
4			Ebg= 1644 $\text{kg/cm}^2$				8	
	e=30cm	Sub-base	e=30 cm	Base				
			Esbg= 651 $\text{kg/cm}^2$		Ebg= 2035 $\text{kg/cm}^2$			
	MR= 250 $\text{kg/cm}^2$		Sub-rasante	e=45cm	Sub-base			
			Esbg= 781 $\text{kg/cm}^2$	MR= 250 $\text{kg/cm}^2$		Sub-rasante		

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

✓ Cuatro diseños estructurales con módulo resiliente MR=500 kg/cm<sup>2</sup>

**Figura 14: Estructuras de pavimento para MR= 500 kg/cm<sup>2</sup>**

ESAL	5E+04			ESAL	5E+05				
4	e=7.5 cm	CA		3	e=10 cm	CA			
3.5				e=15 cm				Base	3
	Ebg= 953 kg/cm <sup>2</sup>	4							
	MR= 500 kg/cm <sup>2</sup>	Sub-rasante			e=15 cm	Base			
					Ebg= 1818 kg/cm <sup>2</sup>				
					e=15cm	Sub-base			
					Esbg= 953 kg/cm <sup>2</sup>				
					MR= 500 kg/cm <sup>2</sup>	Sub-rasante			
ESAL	5E+06				ESAL	5E+07			
5	e=14 cm	CA		6	e=20 cm	CA			
5				e=15 cm				Base	6
4									Ebg= 2287kg/cm <sup>2</sup>
	e=15cm	Sub-base			e=20 cm	Base			
	Esbg= 1200 kg/cm <sup>2</sup>				Ebg= 2826kg/cm <sup>2</sup>				
	MR= 500 kg/cm <sup>2</sup>	Sub-rasante			e=30cm	Sub-base			
					Esbg= 1302 kg/cm <sup>2</sup>				
					MR= 500 kg/cm <sup>2</sup>	Sub-rasante			

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

- ✓ Cuatro diseños estructurales con módulo resiliente  $MR=750 \text{ kg/cm}^2$

**Figura 15: Estructuras de pavimento para  $MR=750 \text{ kg/cm}^2$**

ESAL	5E+04			ESAL	5E+05			
4	e=7.5 cm	CA		3	e=10 cm	CA		
3.5				3				
e=12 cm		Base		4				
Ebg= 1293 kg/cm <sup>2</sup>				e=18 cm		Base		
MR= 750 kg/cm <sup>2</sup>		Sub-rasante		Ebg= 1552 kg/cm <sup>2</sup>				Sub-rasante
				MR= 750 kg/cm <sup>2</sup>				
ESAL	5E+06			ESAL	5E+07			
5	e=14 cm	CA		6	e=20 cm	CA		
5				6				
4				8				
e=23 cm		Base	e=30 cm		Base			
Ebg= 1733kg/cm <sup>2</sup>			Ebg= 1953kg/cm <sup>2</sup>					
MR= 750 kg/cm <sup>2</sup>		Sub-rasante	MR= 750 kg/cm <sup>2</sup>		Sub-rasante			

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

- ✓ Cuatro diseños estructurales con módulo resiliente  $MR=900 \text{ kg/cm}^2$

**Figura 16: Estructuras de pavimento para  $MR=900 \text{ kg/cm}^2$**

ESAL	5E+04			ESAL	5E+05				
4	e=7.5 cm	CA		3	e=10 cm	CA			
3.5				3				Base	
e=10 cm		4		Base					
Ebg= 1430 kg/cm <sup>2</sup>		e=15 cm			Base				
MR= 900 kg/cm <sup>2</sup>		Ebg= 1716 kg/cm <sup>2</sup>		Sub-rasante					
		MR= 900 kg/cm <sup>2</sup>			Sub-rasante				
ESAL	5E+06			ESAL		5E+07			
5	e=14 cm	CA		6	e=20 cm	CA			
5				6					Base
4				8					
e=18 cm		e=25 cm		Base					
Ebg= 1863kg/cm <sup>2</sup>		Ebg= 2159kg/cm <sup>2</sup>			Sub-rasante				
MR= 900 kg/cm <sup>2</sup>		MR= 900 kg/cm <sup>2</sup>		Sub-rasante					

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

### 5.5.1 Determinación del esfuerzo promedio en capa asfáltica

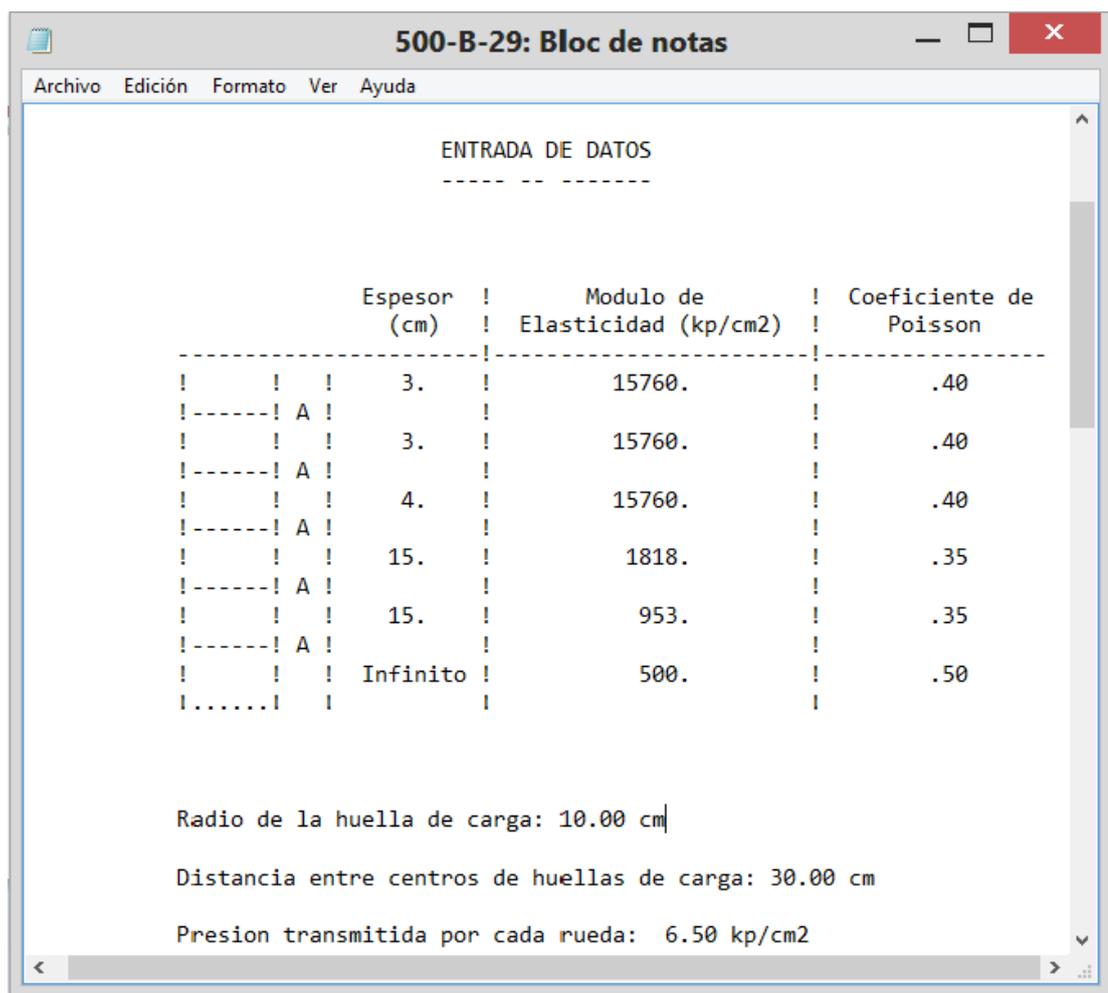
Tanto los módulos de mezclas con agregados de cantera triturados como los módulos de mezclas con agregados aluviales triturados responden a las mismas temperaturas de trabajo (Tabla 27), de tal manera que se analizó el esfuerzo promedio ( $\sigma \text{ prom}$ ) de toda la estructura mediante el programa ALIZE para cada uno de los módulos a cada una de las temperaturas de diseño y para cada estructura de pavimento.

### 5.5.1.1 Cálculo del esfuerzo promedio en estructura de pavimento

Cálculo para la estructura de pavimento con ESAL de  $5 \times 10^5$  y un módulo resiliente  $MR=500 \text{ kg/cm}^2$ , considerando los módulos de la mezcla con agregados de cantera triturados para una temperatura de  $29^\circ\text{C}$ .

#### Datos de entrada en ALIZE:

Figura 17: Entrada de datos de ALIZE



Fuente: Software ALIZE  
Elaborado por: El Autor

## Resultados:

Figura 18: Salida de datos de ALIZE

Z (cm)	Deformacion Tangencial (1/1000)	Tension Tangencial (kp/cm2)	Deformacion Vertical (1/1000)	Tension Vertical (kp/cm2)
0.	.4575 B	15.209 B	-.3463 C	6.500 A
3.	.1550 C	7.014 B	-.1973 C	5.785 B
6.	-.1050 B	-.233 C	.2519 A	4.024 B
10.	-.4472 B	-9.297 B	.5638 B	2.084 B

Fuente: Software ALIZE  
Elaborado por: El Autor

Una vez ejecutado el programa se promedió solamente los esfuerzos ocurridos en las sub-capas que corresponden a la carpeta asfáltica.

$$\sigma (Z=0) \quad 6.50 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma (Z=3) \quad 5.79 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma (Z=6) \quad 4.02 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma (Z=10) \quad 2.08 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{prom}(MR \ 500, 29^\circ\text{C}, \text{Ag.cantera}) = 4.60 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Considerando todas las temperaturas de diseño, se obtuvo:

**Tabla 29: Esfuerzo promedio ponderado por hora**

AGREGADOS DE CANTERA	TEMPERATURA °C										
	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
CANTERA	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	-
	5.79	5.80	5.82	5.84	5.86	5.88	5.90	5.92	5.94	5.95	-
	4.02	4.07	4.13	4.18	4.23	4.29	4.34	4.39	4.45	4.50	-
	2.08	2.15	2.22	2.29	2.35	2.42	2.49	2.56	2.63	2.70	-
MR=500 kg/cm <sup>2</sup>	4.60	4.63	4.67	4.70	4.74	4.77	4.81	4.84	4.88	4.91	-
ESAL 5E+05	<b><math>\sigma_{prom} = 4.75 \text{ Kg/cm}^2</math></b>										

Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

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

### 5.5.1.2 Esfuerzos promedio de estructuras de diseño

**Tabla 30: Esfuerzo promedio ponderado para todas las estructuras diseñadas**

	Agregados de Cantera Triturados				Agregados Aluviales Triturados			
	MR (Kg/cm <sup>2</sup> )				MR (Kg/cm <sup>2</sup> )			
ESAL	250	500	750	900	250	500	750	900
5E+04	4.54	4.57	4.72	4.79	4.60	4.67	4.82	4.88
5E+05	4.58	4.75	4.69	4.74	4.66	4.83	4.78	4.82
5E+06	4.08	4.18	4.10	4.12	4.14	4.28	4.16	4.18
5E+07	3.96	4.02	3.95	3.97	4.00	4.06	3.99	4.01

Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

## **5.6 Determinación del $S_{mix}$ y $S_{bit}$ (visc) para las estructuras de pavimentos diseñadas**

De acuerdo al método de Van de Loo, conociendo las temperaturas de diseño, la viscosidad dinámica del cemento asfáltico el número de ejes equivalentes es posible obtener el  $S_{bit}(visc)$  (Ec 6.) para cada estructura de pavimento diseñada en este trabajo.

Con  $S_{bit}(visc)$  calculado , recurrimos al gráfico  $S_{mix}$ -  $S_{bit}$  (Fig. 9) y se determinó el respectivo valor de  $S_{mix}$  para cada estructura de pavimento diseñada.

### **5.6.1 Cálculo de $S_{bit}$ (visc) para las estructuras de pavimentos diseñadas**

Datos utilizados:

- ✓  $t_w = 0.02$  seg , tiempo de pase de una rueda estándar
- ✓  $N_i =$  número de pases de la carga ,
- ✓  $\eta_i =$  viscosidad dinámica del cemento asfáltico

Para la estructura de pavimento diseñada con mezclas de agregados de cantera triturados y con características  $MR_{500}$   $kg/cm^2$ ,  $ESAL = 500000$  se realizó el análisis para las diferentes temperaturas de diseño a lo largo de 24 horas.

**Tabla 31: Sbit(visc) para estructura de pavimento con MR=500 kg/cm<sup>2</sup> y ESAL 5x10<sup>5</sup>**

TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA: CANTERA					ESAL: 500,000	tw:	0,02 s	Hca (mm): 100				
<b>HORAS</b>	<b>0-1</b>	<b>1-2</b>	<b>2-3</b>	<b>3-4</b>	<b>4-5</b>	<b>5-6</b>	<b>6-7</b>	<b>7-8</b>	<b>8-9</b>	<b>9-10</b>	<b>10-11</b>	<b>11-12</b>
% Vehículos pesados	2.15	1.63	1.45	1.67	2.62	3.85	4.75	4.98	4.93	4.78	5.06	5.11
Ni	10738	8153	7239	8352	13103	19265	23763	24891	24673	23907	25318	25546
T. M.Pav.(°C)	31	31	30	30	30	30	30	31	32	33	35	36
ηi (Ns/m <sup>2</sup> )	300,000	300,000	400,000	400,000	400,000	400,000	400,000	300,000	270,000	170,000	120,000	100,000
Ni/ηi	0.0358	0.0272	0.0181	0.0209	0.0328	0.0482	0.0594	0.0830	0.0914	0.1406	0.2110	0.2555
<b>HORAS</b>	<b>12-13</b>	<b>13-14</b>	<b>14-15</b>	<b>15-16</b>	<b>16-17</b>	<b>17-18</b>	<b>18-19</b>	<b>19-20</b>	<b>20-21</b>	<b>21-22</b>	<b>22-23</b>	<b>23-24</b>
% Vehículos pesados	5.03	5.10	5.23	5.43	5.53	5.70	5.38	4.99	4.51	3.87	3.43	2.80
Ni	25147	25497	26163	27142	27643	28524	26905	24957	22566	19371	17137	14001
T. M.Pav.(°C)	37	38	38	38	38	36	35	34	33	33	32	31
ηi (Ns/m <sup>2</sup> )	80,000	55,000	55,000	55,000	55,000	100,000	120,000	130,000	170,000	170,000	270,000	300,000
Ni/ηi	0.314	0.464	0.476	0.493	0.503	0.285	0.224	0.192	0.133	0.114	0.063	0.047
<b>Sbit visc (Pa) =</b>				<b>34,6</b>								

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

### 5.6.2 Resultados de Sbit (visc) para las estructuras de pavimentos diseñadas

**Tabla 32: Sbit(visc) para las estructuras de pavimento diseñadas**

	AGREGADOS DE CANTERA				AGREGADOS ALUVIALES			
MR (MPa):	25	50	75	90	25	50	75	90
ESAL:	50,000				50,000			
Hca (mm):	75				75			
<b>S bit visc (Pa)</b>	<b>324.6</b>				<b>287.7</b>			
ESAL:	500,000				500,000			
Hca (mm):	100				100			
<b>S bit visc (Pa)</b>	<b>34.6</b>				<b>31.1</b>			
ESAL:	5,000,000				5,000,000			
Hca (mm):	140				140			
<b>S bit visc (Pa)</b>	<b>4.0</b>				<b>3.4</b>			
ESAL:	50,000,000				50,000,000			
Hca (mm):	200				200			
<b>S bit visc (Pa)</b>	<b>0.5</b>				<b>0.4</b>			

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

### 5.6.3 Cálculo de Smix para las estructuras de pavimentos diseñadas

Con la ecuación de la línea de ajuste de la gráfica Smix – Sbit de cada tipo de mezcla (Ec. 8 - 7) y los valores de Sbit (visc), se obtiene los valores de Smix para cada estructura de diseño.

#### Resultados

**Tabla 33: Módulo de rigidez Smix para las estructuras de pavimento diseñadas**

MR (MPa):	AGREGADOS DE CANTERA				AGREGADOS ALUVIALES			
	25	50	75	90	25	50	75	90
ESAL:	50,000				50,000			
Hca (mm):	75				75			
S bit visc (Pa)	324.6				287.7			
<b>Smix (MPa)</b>	<b>19.2</b>				<b>18.6</b>			
ESAL:	500,000				500,000			
Hca (mm):	100				100			
S bit visc (Pa)	34.6				31.1			
<b>Smix (MPa)</b>	<b>15.0</b>				<b>15.0</b>			
ESAL:	5,000,000				5,000,000			
Hca (mm):	140				140			
S bit visc (Pa)	4.0				3.4			
<b>Smix (MPa)</b>	<b>11.8</b>				<b>12.1</b>			
ESAL:	50,000,000				50,000,000			
Hca (mm):	200				200			
S bit visc (Pa)	0.5				0.4			
<b>Smix (MPa)</b>	<b>9.3</b>				<b>9.9</b>			

Fuente: Investigación directa  
Elaborado por: El Autor

### 5.7 Cálculo de las deformaciones plásticas (ahuellamiento)

Con la información ya calculada de esfuerzos promedio  $\sigma_{prom}$ , módulo del betún viscoso (Sbit visc) y módulo de rigidez (Smix) correspondientes para cada estructura de pavimento diseñada se determinaron los

ahuellamientos esperados en todas las estructuras, así mismo considerando las variaciones horarias de temperatura.

Vale aclarar que en estos cálculos se consideró un valor de  $C_m$  igual a 2.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente Tabla.

**Tabla 34: Ahuellamientos producidos en las estructuras de pavimento diseñadas**

<b>MATERIAL:</b>	<b>AGREGADOS DE CANTERA</b>				<b>AGREGADOS ALUVIALES</b>			
<b>MR(MPa):</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>90</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>90</b>
ESAL:	50,000				50,000			
H (mm):	75				75			
$\sigma$ prom (MPa)	0.45	0.46	0.47	0.48	0.46	0.47	0.48	0.49
S bit visc (Pa)	324.6	324.6	324.6	324.6	287.7	287.7	287.7	287.7
S mix (MPa)	19.2	19.2	19.2	19.2	18.6	18.6	18.6	18.6
<b>Deformación (mm):</b>	<b>3.5</b>	<b>3.6</b>	<b>3.7</b>	<b>3.8</b>	<b>3.7</b>	<b>3.8</b>	<b>3.9</b>	<b>4.0</b>
ESAL:	500,000				500,000			
Hca (mm):	100				100			
$\sigma$ prom (MPa)	0.46	0.48	0.47	0.47	0.46	0.48	0.48	0.48
S bit visc (Pa)	34.6	34.6	34.6	34.6	31.1	31.1	31.1	31.1
S mix (MPa)	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
<b>Deformación (mm):</b>	<b>6.1</b>	<b>6.4</b>	<b>6.3</b>	<b>6.3</b>	<b>6.1</b>	<b>6.4</b>	<b>6.4</b>	<b>6.4</b>
ESAL:	5,000,000				5,000,000			
Hca (mm):	140				140			
$\sigma$ prom (MPa)	0.41	0.42	0.41	0.41	0.41	0.43	0.42	0.42
S bit visc (Pa)	4.0	4.0	4.0	4.0	3.4	3.4	3.4	3.4
S mix (MPa)	11.8	11.8	11.8	11.8	12.1	12.1	12.1	12.1
<b>Deformación (mm):</b>	<b>9.7</b>	<b>9.9</b>	<b>9.7</b>	<b>9.7</b>	<b>9.5</b>	<b>9.9</b>	<b>9.7</b>	<b>9.7</b>
ESAL:	50,000,000				50,000,000			
Hca (mm):	200				200			
$\sigma$ prom (MPa)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.41	0.4	0.4
S bit visc (Pa)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
S mix (MPa)	9.3	9.3	9.3	9.3	9.9	9.9	9.9	9.9
<b>Deformación (mm):</b>	<b>17.2</b>	<b>17.2</b>	<b>17.2</b>	<b>17.2</b>	<b>16.2</b>	<b>16.6</b>	<b>16.2</b>	<b>16.2</b>

Fuente: Investigación directa

Elaborado por: El Autor

## **5.8 Criterios sobre los niveles de ahuellamiento permisibles en carreteras**

Los valores obtenidos de deformaciones deben ser comparados con ciertos criterios de admisibilidad. De acuerdo a un trabajo publicado recientemente en nuestra universidad (Vila, 2013. Revista Alternativas no. 18, "Deformaciones plásticas en la capa asfáltica de una vía primaria en la región costa del Ecuador"), según la metodología PAVER ampliamente utilizada en el país, un ahuellamiento es considerado de la siguiente manera:

- ✓ Bajo entre 6 y 13 mm
- ✓ Medio entre 13 y 25 mm
- ✓ Alto mayores a 25 mm
- ✓ Por debajo de 6 mm no se reporta este daño.

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas en el Ecuador (MTOPE) admite ahuellamientos máximos hasta 12mm.

## CONCLUSIONES

- ✓ Para los dos tipos mezclas asfálticas utilizadas en la medida que aumentan los ESAL y por ende los espesores de capa asfáltica se incrementan los valores de ahuellamiento esperados.
- ✓ No existen diferencias significativas entre los valores de las deformaciones calculadas entre las dos mezclas estudiadas. Esto puede estar originado por dos motivos, primero que los agregados aluviales (cantos rodados) estaban bien triturados y segundo que en ambas mezclas existieron contenidos altos de arena de río (aproximadamente 20%) en las dosificaciones respectivas.
- ✓ En general los niveles de ahuellamiento esperados son adecuados salvo el último diseño valorado, correspondiente a un tráfico de 50 millones de ejes equivalentes.
- ✓ Las magnitudes calculadas de ahuellamiento con el creep estático corroboran en general el comportamiento evaluado en mezclas similares producidas en esas plantas, mediante la prueba de compresión cíclica uniaxial (creep dinámico). Sin embargo, para tráfico muy pesado las decisiones a tomar van más allá de un simple control de calidad, involucrando seriamente al tráfico actuante y las temperaturas.
- ✓ Se detecta una gran diferencia entre los módulos de las mezclas asfálticas a diferentes temperaturas, correspondientes a las mezclas estudiadas y a las empleadas por el Instituto del Asfalto.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Debe determinarse, empleando los mismos criterios manejados, cuál sería el nivel de tráfico máximo permitido para cumplir las exigencias de ahuellamiento del MTOP, el cual aparentemente estaría entre 10 y 12 millones de ejes. A partir de los mismos, en los diseños recomiendo emplear mezclas asfálticas mejoradas con polímeros.
- ✓ 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.
- ✓ 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.

## BIBLIOGRAFÍA

- ✓ AASHTO 93. "Guide for design of Pavement Structures", Washington D.C.
- ✓ 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).
- ✓ Luis Naveda, 2014. Tesis de grado : "Incidencia del contenido de arena de río en la deformación permanente de las mezclas asfálticas". UCSG. Facultad de Ingeniería.
- ✓ Monismith C.L. and A. A. Tayebali (1988). Permanent Deformation (Rutting) Considerations in Asphalt Concrete Pavements Sections. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists, Williamsburg, Virginia, Vol 57.
- ✓ Rodríguez, A & Castillo, H. "La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas". Volumen 2. Editorial Limusa.
- ✓ Said, S.F et al, Sweden( 2011). "Prediction of flow rutting in asphalt concrete layers". International Journal of Pavement Engineering, 12:6, pag 519-532).
- ✓ Temperaturas mensuales de la ciudad de Santiago de Guayaquil. Recuperado de: <http://www.weatherbase.com> (2014, Junio 6)
- ✓ Temperaturas por hora (mensual) de la ciudad de Santiago de Guayaquil. Recuperado de: <http://www.weatherbase.com> (2014, Junio 10)
- ✓ Transportation Research Record No. 616, Soil Mechanics: Rutting in Asphalt Pavement, Embankments on Varved Clays, and Foundations, 1976.
- ✓ 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.

- ✓ 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