



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

**TÍTULO:**

**ESTUDIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOCADAS EN VÍAS  
DE LA REGIÓN SIERRA DEL ECUADOR MEDIANTE PRUEBAS  
DE DESEMPEÑO**

**AUTOR:**

**KATHERINE GALUTH NUÑEZ GAVILANEZ**

**Trabajo de Titulación  
previo a la Obtención del Título de:**

**INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

**Ing. Rolando Vila Romani, PhD**

**Guayaquil, Ecuador  
2014**



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

### **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **NUÑEZ GAVILANEZ KATHERINE GALUTH**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **INGENIERO CIVIL**.

### **TUTOR**

---

Ing. Rolando Vila Romaní, PhD

### **REVISORES**

---

Ing. Claudio Luque Rivas

---

Lcda. Ruth Zambrano

### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

---

Ing. Mario Dueñas Rossi

**Guayaquil, a los 13 días del mes de marzo del año 2014**



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

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **KATHERINE GALUTH NUÑEZ GAVILANEZ**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación **“ESTUDIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOCADAS EN VÍAS DE LA REGIÓN SIERRA DEL ECUADOR MEDIANTE PRUEBAS DE DESEMPEÑO”** previa a la obtención del Título de **INGENIERO CIVIL**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, 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 total autoría.

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

**Guayaquil, a los 13 días del mes de marzo del año 2014**

**EL AUTOR**

---

**KATHERINE GALUTH NUÑEZ GAVILANEZ**



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

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **KATHERINE GALUTH NUÑEZ GAVILANEZ**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación “**ESTUDIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOCADAS EN VÍAS DE LA REGIÓN SIERRA DEL ECUADOR MEDIANTE PRUEBAS DE DESEMPEÑO**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 13 días del mes de marzo del año 2014**

**EL AUTOR:**

---

**KATHERINE GALUTH NUÑEZ GAVILANEZ**

## AGRADECIMIENTO

A **DIOS** por su amor incondicional, por todas sus bendiciones derramadas en mí, porque siempre sentí su compañía y su protección. Gracias por ayudarme a superar mis propios límites y demostrarme que con constancia y esfuerzo las metas se pueden alcanzar.

A mis Padres: **Jaime Núñez Baños** por ser un ejemplo de tenacidad y trabajo, por tener fe en mí.

**Galuth Gaviláñez Camacho**, por su amor, por sus sabios consejos, por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas.

Gracias por ser mi inspiración, por darme la fuerza para seguir superándome. A los dos, inmensas gracias porque son mi gran tesoro.

A mis Hermanos: **Eleana, Jaime y George** por su apoyo y comprensión, sé que esta meta la disfrutaban conmigo.

Al grupo de amigos que formamos en la laboratorio de carreteras por su colaboración desinteresada.

Especialmente quiero agradecer al Director de mi trabajo de grado el **Ing. Rolando Vila Romaní, PhD** por su orientación y dedicación en el desarrollo de esta investigación, por la confianza y el apoyo constante depositado en mi persona.

**KATHERINE GALUTH NUÑEZ GAVILANEZ**

## **DEDICATORIA**

Con infinito amor, cariño y respeto dedico de una manera muy especial este trabajo de grado a mis padres y hermanos, personas importantes y trascendentales en mi proyecto de vida y con las que sigo compartiendo los grandes retos que existen en ella.

**KATHERINE GALUTH NUÑEZ GAVILANEZ**

## **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

Ing. Rolando Vila Romani, PhD  
TUTOR

---

Ing. Claudio Luque Rivas  
PROFESOR DELEGADO



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

**CALIFICACIÓN**

---

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



# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	xiii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Presentación del Tema .....	1
1.2. Razones que motivaron el Estudio .....	1
1.3. Justificación del Tema.....	1
1.4. Descripción del Problema de Investigación.....	3
1.5. Antecedentes.....	4
1.6. Contextualización en Tiempo y Espacio.....	6
1.7. Objetivos Planteados .....	7
1.7.1. Objetivo General.....	7
1.7.2. Objetivos Específicos .....	7
1.8. Hipótesis.....	7
1.9. Metodología .....	7
CAPÍTULO 2: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLE .....	9
2.1. Generalidades .....	9
2.2 Ligante Asfáltico .....	9
2.2.1. Efectos de temperatura en la reología del asfalto .....	12
2.2.2. Efectos del tiempo de carga en la reología del asfalto.....	13
2.3 Agregados Minerales.....	13
2.4. Propiedades a Evaluar en las Mezclas Asfálticas.....	15
2.4.1. Pruebas de caracterización.....	15
2.4.1.1. Densidad bruta.....	15
2.4.1.2. Densidad máxima (RICE).....	16
2.4.1.3. Vacíos de Aire (VA) .....	19
2.4.1.4. Contenido Asfalto Pb .....	20
Tabla 1. Tamaños de la muestra .....	21
2.4.1.5. Granulometría del agregado extraído .....	23
2.5 Observaciones sobre los Mecanismos Principales de Falla en Pavimentos Flexibles.....	27
2.5.1 Ahuellamiento en mezclas asfálticas .....	27
2.5.2 Fatiga en mezclas asfálticas .....	28
CAPITULO 3: SELECCIÓN DE VIAS A ESTUDIAR.....	31
3.1. Criterios de Selección .....	31
3.2. Evaluación de los tramos de las vías estudiadas.....	32

3.3. Calidad de las mezclas asfálticas en las vías .....	34
3.3.1. Vía: Guaranda – Balzapamba .....	34
3.3.2. Vía: Alausí – Huigra.....	36
3.3.3. Vía: Guasuntos – Chunchi .....	34
CAPÍTULO 4: TRABAJO EXPERIMENTAL .....	40
4.1. Información General.....	40
4.2. Pruebas de caracterización.....	40
4.2.1. Determinación de las densidades (gravedad específica bruta) .....	40
4.2.2. Determinación de los porcentajes de vacíos .....	45
4.2.3 Análisis de resultados de las pruebas de caracterización .....	49
4.3. Pruebas de Desempeño .....	49
4.3.1. Información General. ....	49
4.3.2. Módulo de Rigidez.....	50
4.3.2.1. Resultados .....	50
4.3.3. Fatiga .....	54
4.3.3.1. Resultados .....	54
4.3.4. Prueba de Deformación Permanente (Creep Dinámico).....	56
4.3.4.1. Resultados .....	58
4.3.5 Análisis de resultados de las pruebas de desempeño .....	59
CONCLUSIONES .....	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Módulo de rigidez.....	4
Figura 2. Ensayo de Fatiga.....	5
Figura 3. Ensayo creep dinámico .....	5
Figura 4. Dependencia tiempo-temperatura del cemento asfáltico .....	10
Figura 5. Esqueleto pétreo del agregado.....	14
Figura 6. Diagramas esfuerzo, deformación horizontal versus número de repeticiones (escala logarítmica) .....	26
Figura 7. Vista general de la Vía Guaranda - Balzapamba.....	32
Figura 8. Vista general de la Vía Alausí - Huigra .....	33
Figura 9. Vista general de la Vía Guasuntos – Chunchi .....	34
Figura 10. Curva granulométrica del agregado vía Guaranda – Balzapamba .....	35
Figura 11. Curva granulométrica del agregado vía Alausí – Huigra .....	37
Figura 12. Curva granulométrica del agregado vía Guasuntos – Chunchi.....	39
Figura 13. Densidades vía Guaranda - Balzapamba, diagrama de barras .....	42
Figura 14. Densidades vía Alausí - Huigra, diagrama de barras .....	43
Figura 15. Densidades vía Guasuntos - Chunchi, diagrama de barras .....	44
Figura 16. Densidades promedio de cada vía.....	44
Figura 17. Porcentaje de vacíos Guaranda - Balzapamba, diagrama de barras .	46
Figura 18. Porcentaje de vacíos Alausí - Huigra, diagrama de barras .....	47
Figura 19. Porcentaje de vacíos Guasuntos - Chunchi, diagrama de barras .....	48
Figura 20. Porcentaje promedio de vacíos de cada vía .....	48
Figura 21. Módulo de rigidez Guaranda – Balzapamba, diagrama de barras .....	51
Figura 22. Módulo de rigidez Alausí – Huigra, diagrama de barras.....	52
Figura 23. Módulo de rigidez Guasuntos - Chunchi, diagrama de barras .....	53
Figura 24. Módulos promedio de rigidez de cada vía .....	53
Figura 25. Núcleos de las vías de la región Sierra ensayados a Fatiga.....	54
Figura 26. Gráfico de esfuerzo versus número de repeticiones (ambas en escala logarítmica) de 3 vías de la región Sierra. ....	56
Figura 27. Gráfico de deformación versus número de repeticiones (ambas en escala logarítmica) de 3 vías de la región Sierra. ....	57
Figura 28. Porcentajes de deformación permanente de las 3 muestras de cada vía correspondiente .....	58
Figura 29. Porcentajes promedios de deformación de cada vía.....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tamaños de la muestra .....	21
Tabla 2. Especificación granulométrica para tamaño máximo nominal de ½" (12.5 mm) .....	26
Tabla 3. Análisis granulométrico del agregado vía Guaranda – Balzapamba.....	35
Tabla 4. Análisis granulométrico del agregado vía Alausí – Huigra .....	37
Tabla 5. Análisis granulométrico del agregado vía Guasuntos - Chunchi .....	38
Tabla 6. Resultados de las densidades. Vía Guaranda – Balzapamba.....	41
Tabla 7. Resultados de las densidades. Vía Alausí - Huigra .....	42
Tabla 8. Resultados de las densidades. Vía Guasuntos – Chunchi.....	43
Tabla 9. Porcentaje de vacíos de las muestras vía Guaranda – Balzapamba.....	45
Tabla 10. Porcentaje de vacíos de las muestras vía Alausí – Huigra.....	46
Tabla 11. Porcentaje de vacíos de las muestras vía Guasuntos – Chunchi .....	45
Tabla 12. Resultados de módulos de rigidez Guaranda – Balzapamba.....	45
Tabla 13. Resultados de módulos de rigidez Alausí – Huigra .....	50
Tabla 14. Resultados de módulos de rigidez Guasuntos – Chunchi .....	51
Tabla 15. Valores de repeticiones, módulos de rigidez y la deformación para cada carga que se sometían a las muestras de cada vía. ....	55
Tabla 16. Resultados del ensayo del creep dinámico .....	58

## RESUMEN

El estudio y control de mezclas asfálticas mediante pruebas de desempeño ha tomado auge en los últimos años, estas pruebas están basadas en un análisis dinámico del comportamiento tensión-deformación en especímenes de mezclas asfálticas.

El presente trabajo se basa en relacionar el comportamiento de las mezclas asfálticas en diferentes obras, con tiempo de colocación entre 3 y 4 años, y con diferentes niveles de deterioros, mediante pruebas de desempeño: módulo de rigidez, fatiga y deformación plástica, que se realizaron a los núcleos que fueron extraídos de los pavimentos de las vías de la región sierra del Ecuador. Para este Estudio se utilizó el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) modelo NU-10, en el Laboratorio de carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Las vías seleccionadas para este trabajo fueron: Guaranda – Balzapamba, Alausí – Huigra y Guasuntos – Chunchi, de las cuales se extrajeron 12 núcleos en cada vía.

**Palabras Claves:** Mezclas asfálticas, rice, vacíos, módulo de rigidez, fatiga, deformación permanente.

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Presentación del Tema**

En este estudio se van analizar algunas razones que motivan diferentes niveles de deterioros en las carreteras de la Región Sierra, a pesar de tener mezclas asfálticas con similares granulometrías, el mismo tipo de asfalto y cumplir con similares criterios de diseño. Para ello se seleccionaron tres carreteras de esta región con niveles de daño catalogados como bueno, regular y malo, para realizarles diferentes pruebas de desempeño y así comprender su comportamiento con el tema “ESTUDIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COLOCADAS EN VÍAS DE LA REGIÓN SIERRA DEL ECUADOR MEDIANTE PRUEBAS DE DESEMPEÑO”.

### **1.2. Razones que motivaron el Estudio**

La necesidad de conocer detalladamente las características que poseen las mezclas asfálticas en vías con diferentes niveles de deterioros, empleando pruebas de desempeño (dinámicas) que pueden realizarse en el Laboratorio de Carreteras de la UCSG. El tema es parte de una investigación que se realiza considerando las diferentes regiones del país y en particular este estudio está direccionado hacia la Región Sierra.

### **1.3. Justificación del Tema**

La mezcla asfáltica en caliente para pavimentos de carreteras está compuesta por una combinación de agregados y un cemento asfáltico, ambos con calidades muy particulares. Si bien el agregado es un material elástoplástico, el cemento asfáltico es un material visco-elástico que puede exhibir características más o menos viscosas o elásticas, en función de la temperatura existente y de la velocidad de aplicación de la carga. Esto

implica que una misma mezcla asfáltica tendrá una rigidez y por ende un comportamiento muy distinto si las temperaturas son bajas o altas, lo cual depende del clima de la región. Existen además otras variables climáticas como la pluviosidad y las radiaciones que son también importantes.

El diseño y control de calidad rutinario a las mezclas fabricadas en planta se basa en los criterios del método de diseño Marshall (Asphalt Institute, 1997), cuyo empleo está establecido en el Ecuador (MTOPE, 2002). Sin embargo, desde un punto de vista tenso-deformacional los parámetros resistentes involucrados, la estabilidad Marshall y el flujo, están relacionados solo con la deformación plástica y son empíricos y de difícil interpretación, otras pruebas para el control de las fisuras y el daño ante el agua son escasas. Pese a que usualmente se cumple con los criterios de diseño Marshall y los controles asociados con este es muy frecuente ver en el país pavimentos fisurados, deformados o dañados por el efecto del agua a los pocos años de su construcción o rehabilitación, lo que demuestra la insuficiencia de los mismos.

En la actualidad, se ha incrementado en el mundo el estudio y control de mezclas asfálticas mediante las citadas pruebas reológicas, fundadas en un análisis dinámico del comportamiento tensión-deformación en especímenes de mezclas asfálticas. La forma de realizar estos estudios es variable, pudiéndose emplear pruebas a compresión, flexión, tracción y de corte.

En el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) modelo NU-10, se pueden efectuar diversas de este tipo de pruebas reológicas. El NAT aplica las cargas mediante un sistema neumático con servo-control, midiéndose la fuerza aplicada por el transductor de la celda de carga. El equipo emplea una computadora junto con un sistema digital de adquisición de datos y control de sistema con el cual se logra desarrollar las diferentes pruebas y procesar los datos de los mismos a través de programas determinados, el software utilizado guía al usuario paso a paso en cada procedimiento.

El NAT permite realizar diferentes tipos de pruebas reológicas como módulos de rigidez bajo deformación o carga controlada, compresión cíclica

uniaxial sin confinamiento (creep dinámico) y pruebas de fatiga bajo carga controlada. El laboratorio de carreteras de la UCSG posee este equipo.

Desde el punto de vista científico el trabajo establecerá relaciones entre el comportamiento real de las vías estudiadas con la calidad de la mezcla que poseen las capas asfálticas, evaluadas con pruebas dinámicas. Desde el punto de vista social, el trabajo es importante para mejorar la durabilidad y buen funcionamiento de la infraestructura vial del país.

#### **1.4. Descripción del Problema de Investigación**

En el país es muy frecuente encontrar pavimentos asfálticos, a los pocos años de su construcción o rehabilitación, fisurados, deformados o dañados por el efecto del agua; La cuestión va en detrimento de la inversión de recursos económicos realizada, además de las afectaciones a la seguridad y el confort de los usuarios. Esta situación puede presentarse pese a cumplirse con el método Marshall para el diseño y control de calidad de la mezcla asfáltica, por lo que este resulta insuficiente.

El desempeño de la mezcla asfáltica depende de sus propiedades dinámicas de respuesta frente a las fuerzas dinámicas aplicadas por el tráfico vehicular. Las técnicas tradicionales para el aseguramiento y control de la calidad de las capas estructurales del pavimento generalmente no miden la respuesta dinámica de los materiales del sitio y no constituyen parámetros directos de diseño. El potencial de las llamadas pruebas reológicas o de comportamiento (NCHRP, 2005), como los módulos de rigidez bajo carga o deformación controlada, los módulos complejos, el número de flujo, el tiempo de flujo, la deformación creep o pruebas de fatiga, es muy grande y pueden relacionarse con métodos de diseño o bien con el comportamiento real de las estructuras ante las deformaciones plásticas o la fatiga.

El problema de investigación es la relación entre los diferentes tipos de pruebas dinámicas aplicadas a mezclas que forman parte de pavimentos en



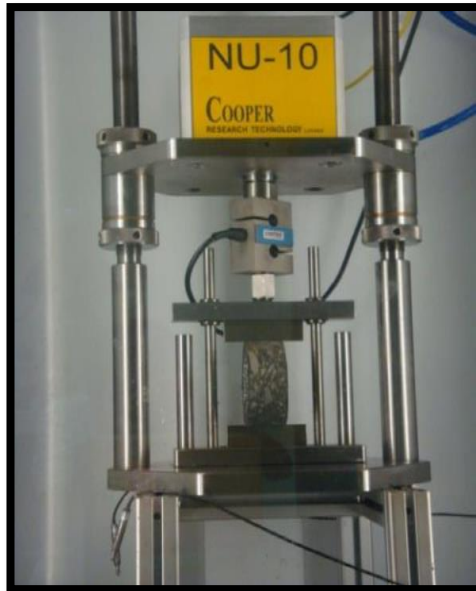
la Región Sierra y el comportamiento de los mismos. Por esta razón se analizarán tres vías en condiciones: buena, regular y mala.

### 1.5. Antecedentes

El tema es parte de una investigación que se efectúa considerando las diferentes regiones del país, este estudio ya se lo realizó en la Región Costa (Andaluz, 2013), su propósito es establecer una relación entre el comportamiento de las mezclas asfálticas en tres obras, con un tiempo de colocación entre 3 y 4 años y con diferentes niveles de deterioro, a través de los resultados de las pruebas de desempeño: módulo de rigidez, fatiga y deformación plástica, aplicadas a los núcleos extraídos de los pavimentos de la Región Costa, mediante el equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT) modelo NU-10 en la UCSG, que permite realizar varias de este tipo de pruebas reológicas.



**Figura 1. Módulo de rigidez.**



**Figura 2. Ensayo de Fatiga.**



**Figura 3. Ensayo creep dinámico.**

Las vías seleccionadas entonces fueron: Progreso – Playas, Progreso – Salinas y Manta – Crucita, de las cuales se extrajeron 12 núcleos en cada vía.

En el trabajo de referencia en la Región Costa se obtuvieron los resultados que se resumen a continuación:

1) El porcentaje de vacíos que se asocia a la efectividad de la compactación es muy variable. En la vía Progreso – Playas (4,30%) y Progreso – Salinas (5,38%), los valores están acordes con las densidades relativas permitidas. En la vía Manta – Crucita el porcentaje de vacíos de 6,91% es un valor más elevado, que sin dudas tiene que haber incidido en el mayor deterioro que existe en esta vía.

2) Los altos módulos de rigidez obtenidos en la vía Manta – Crucita junto a su nivel de daños elevados, alertan que en la vía se presentaron posiblemente problemas con la calidad del asfalto original empleado o durante la manipulación del mismo para la fabricación de mezclas (sobrecalentamiento).

3) Las leyes de fatiga obtenidas en las diferentes vías muestran que para un mismo nivel de deformación, las mayores repeticiones (a nivel de laboratorio) las originan la vía Progreso – Salinas, aunque el comportamiento de estas a nivel de obra (realidad) puede calificarse como regular. Las menores repeticiones para un mismo nivel de deformación lo daría la vía Manta – Crucita.

4) En las pruebas creep dinámicas dos de las vías estudiadas (Progreso – Playas y Manta – Crucita) cumplen con las exigencias británicas, es decir, deformaciones permanentes menores a 1%. Sin embargo, en la vía Progreso – Salinas se presentaron valores mayores a los permitidos, teniendo la vía más potencial para deformarse.

## **1.6. Contextualización en Tiempo y Espacio**

Este estudio considera tres vías de la Región Sierra, con niveles de deterioro bajo, medio y alto respectivamente, donde se extraerán 12 núcleos en cada caso para la realización de pruebas de desempeño con equipo NAT en el Laboratorio de Carreteras de la UCSG. Las mezclas corresponderán a granulometrías densas usuales para capas de rodaduras con el mismo tipo de cemento asfáltico AC-20 procedente de la Refinería de Esmeraldas. Las

vías en estudio son: Guaranda – Balzapamba, Alausí – Huigra y Guasuntos – Chunchi.

## **1.7. Objetivos Planteados**

### **1.7.1. Objetivo General**

Relacionar el comportamiento de mezclas asfálticas en diferentes obras construidas en la Región Sierra con tiempo de colocación entre 3 y 4 años, y diferentes niveles de deterioros, con los resultados de pruebas de desempeño módulo de rigidez, fatiga y deformación plástica realizadas sobre núcleos extraídos de los pavimentos correspondientes.

### **1.7.2. Objetivos Específicos**

- ✚ Identificar de qué depende el desempeño de las mezclas asfálticas.
- ✚ Evaluar cómo se relacionan las pruebas reológicas con el comportamiento real de la estructura.

## **1.8. Hipótesis**

Existe una relación físico-mecánica entre las propiedades dinámicas de las mezclas asfálticas, es decir su módulo de rigidez, su ley de fatiga y su deformación en prueba creep con el comportamiento que las mismas puedan presentar en obra, es decir, nivel de ahuellamiento y porcentaje de fisuración; por lo que a partir de la medición de dichas propiedades en el laboratorio podrá ser estimado su comportamiento en obra.

## **1.9. Metodología**

La investigación tiene un enfoque cuantitativo y pertenece al tipo correlacional, ya que se busca relacionar las propiedades de las mezclas asfálticas con el comportamiento del pavimento ante las condiciones climáticas de la Región Sierra.

El trabajo responderá al método teórico-práctico con análisis y síntesis, y un enfoque sistémico estructural. Se desarrollará en 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

-Descripción de cada prueba procedimiento de trabajo, parámetros involucrados y fórmulas de cálculo

2) Desarrollo experimental

-Selección de las vías a estudiar

-Evaluación de daños en las vías seleccionadas

-Caracterización de las mezclas a ensayar (tres mezclas)

-Extracción de 12 núcleos de 10 cm de diámetro para cada vía

-Realización de ensayos de módulos de rigidez bajo deformación controlada, compresión cíclica uniaxial sin confinamiento (creep dinámico) y pruebas de fatiga bajo dispositivo de tracción indirecta

3) Análisis de resultados

-Evaluación del comportamiento de las mezclas

-Planteamiento de relaciones entre el estado de las vías y los resultados de las pruebas de desempeño correspondientes

-Conclusiones

-Recomendaciones

## **CAPÍTULO 2: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLE**

### **2.1. Generalidades**

La mezcla de materiales pétreos y de un ligante hidrocarbonado da lugar a un nuevo material conocido como mezcla asfáltica, ampliamente empleado en carreteras por sus características y propiedades.

La normativa de diseño vigente en el Ecuador y en la mayor parte de los países suramericanos, AASHTO (1993) indica que los materiales están caracterizados por el módulo de elasticidad, llamado también como módulo de rigidez en mezclas asfálticas y módulo resiliente para los materiales granulares o suelos sin tratar. El módulo de rigidez en mezclas asfálticas es dependiente de la temperatura y sus cambios a través del año.

Según algunos investigadores Caro, S., García, C. & Caicedo, B. (2001) en el estudio de mezclas asfálticas, se ha confirmado que los factores primordiales, que determinan la formación de daños son la magnitud y frecuencia de la aplicación de carga y las condiciones climatológicas. Las mezclas deben ser resistentes a las deformaciones plásticas, al fenómeno de fatiga y al daño por humedad.

### **2.2 Ligante Asfáltico**

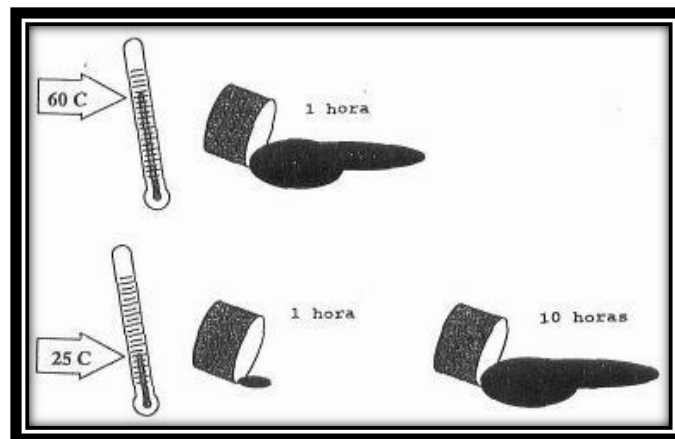
Los ligantes asfálticos son productos hidrocarbonados provenientes de la destilación natural o artificial del petróleo. Es el residuo sólido que queda después de que se hayan ido extrayendo los componentes más ligeros y volátiles del petróleo.

Es un material de gran calidad, sobre el que se cimienta en gran parte la construcción de los pavimentos flexibles de carreteras, a los que se llaman también pavimentos asfálticos, en causa de este dúctil, flexible y tenaz

material que los compone y caracteriza. En carreteras el principal tipo de ligante son los betunes asfálticos.

La temperatura, la carga y el tiempo de aplicación de la misma hacen que los cementos asfálticos tengan un comportamiento reológico muy complejo. Una de las propiedades más importantes de los productos asfálticos es la reología. Se refiere a la variación de las propiedades de flujo a través del tiempo de aplicación de una carga e incluye una propiedad muy importante, la viscosidad.

A bajas temperaturas y durante intervalos cortos de tiempo el asfalto tiene un carácter elástico, y durante temperaturas moderadamente elevadas o tiempos de aplicación muy extensos, la elasticidad prácticamente deja de existir y el asfalto se deforma permanentemente y fluye, Rubio (2006).



**Figura 4. Dependencia tiempo-temperatura del cemento asfáltico**

Usualmente al ligante asfáltico se lo puede designar como un material viscoelástico, ya que posee propiedades tanto elásticas como viscosas.

El cemento asfáltico incide en la mayoría de las propiedades mecánicas y reológicas de las mezclas y es responsable del comportamiento de las mezclas asfálticas, a pesar de que representa un porcentaje pequeño en las mismas.

Según, Rubio (2006), las propiedades primordiales que tienen que poseer los cementos asfálticos, para su empleo en carreteras son:

✚ **Carácter Termoplástico:**

La viscosidad de los ligantes por el efecto de la temperatura se reduce cuantiosamente de tal forma que tiene la capacidad de “humedecer” y envolver los áridos. Al enfriarse deben obtener la consistencia primitiva y en compañía del polvo mineral aportar cohesión a la mezcla.

Es necesario conocer el carácter termoplástico del asfalto, ya que esta propiedad indica la temperatura correcta a la que debe ser realizada la mezcla del asfalto con los agregados. Aparte también nos indica la temperatura a la cual compactar la mezcla sobre la base de la calzada.

✚ **Adhesión y cohesión:**

La adhesión permite al asfalto adherirse a los áridos en la mezcla para la pavimentación. La cohesión ayuda al ligante asfáltico a poder cumplir con su facultad aglomerante, al mantener firmemente en su puesto al agregado en el pavimento terminado.

✚ **Un adecuado comportamiento mecánico y reológico para resistir las tensiones aplicadas por la circulación de vehículos y poder mantener a las temperaturas de servicio, la estructura de la mezcla asfáltica.**

✚ **Resistencia al envejecimiento frente a los agentes atmosféricos y escenarios ambientales, para conservar sus propiedades con el tiempo.**

Esto es causado principalmente por el proceso de oxidación, el cemento asfáltico reacciona con el oxígeno del medio ambiente, esto se debe a que está compuesto de moléculas orgánicas. Esta reacción se la designa como "oxidación" y cambia la estructura y composición



de las moléculas de asfalto. La estructura del asfalto se hace más rigurosa y frágil al reaccionar con el oxígeno y esta característica se la conoce como "endurecimiento por oxidación" o "endurecimiento por envejecimiento".

Cuando es preciso calentar el cemento asfáltico para permitir el mezclado y compactación durante el proceso de producción, es aquí donde sucede parte del endurecimiento ya que la oxidación se produce de modo fugaz a altas temperaturas.

Estas propiedades del asfalto se pueden determinar por medio de varias pruebas y estas son: viscosidad, penetración, punto de inflamación, endurecimiento, durabilidad, solubilidad y peso específico.

### **2.2.1. Efectos de temperatura en la reología del asfalto**

Según algunos autores, Bahia, H.U., & Kamel, M.A. (2002), las propiedades reológicas a altas temperaturas (40°C a 60°C) están relacionadas con el desempeño al ahuellamiento de pavimentos. La reología a temperaturas medias impacta en las grietas por fatiga de pavimentos. Las propiedades a bajas temperaturas del ligante están relacionadas con el agrietamiento térmico a bajas temperaturas del pavimento. Se han medido valores de ahuellamiento reducido, mejora a la resistencia a la fatiga, y menor rigidez a temperaturas bajas en las mezclas asfálticas hechas con ligantes con propiedades reológicas mejoradas. La temperatura es uno de los factores más importantes para determinar el módulo del asfalto, la resistencia a la fatiga y a la deformación permanente de las capas asfálticas, AUSTRROADS (1992).

Debido al efecto de la temperatura en la reología del ligante y el efecto correspondiente en la mezcla asfáltica, se eligen las condiciones de temperatura en una prueba de laboratorio para reflejar las temperaturas esperadas en servicio aproximadas a las condiciones críticas de desempeño para el tipo de prueba que se lleve a cabo.

### **2.2.2. Efectos del tiempo de carga en la reología del asfalto**

Debido a su naturaleza visco-elástica, las propiedades del asfalto son dependientes del tiempo en el cual es cargado. Por ejemplo, una carga más rápida (tiempo pequeño) resultará en un módulo más alto, incrementando la resistencia a la deformación y a la fatiga.

### **2.3 Agregados Minerales**

Agregado es todo material rígido e inerte, usado en forma de partículas fragmentadas. De acuerdo a su origen se clasifican en:

- Agregados naturales
- Agregados procesados
- Agregados sintéticos

Los materiales granulares entran en un porcentaje muy elevado en la composición de las mezclas asfálticas, próximos entre el 90% y 95%, del peso, y entre el 75% y 85% del volumen, inciden de forma muy directa en su compacidad, ángulo de rozamiento interno, textura, manejabilidad, resistencia a la acción del agua y en la calidad del mástico asfáltico.

Esto se debe a que el mismo proporciona gran parte de las características de su capacidad portante, Asphalt Institute (1997).

La granulometría que se usa en una mezcla asfáltica, se debe elegir de acuerdo a la función solicitada para la capa asfáltica en la estructura de un pavimento.

Se confía que el agregado provea un fuerte esqueleto pétreo para resistir las repetidas aplicaciones de carga, independientemente del origen, métodos de procesamiento o mineralogía. Agregados de textura rugosa, de buena cubrición, dan más resistencia que los redondeados y de textura lisa.



**Figura 5. Esqueleto pétreo del agregado.**

Las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una fuerte masa de material. Las partículas redondeadas, en lugar de trabarse, propenden a deslizarse una sobre otras, a pesar de que un fragmento de agregado redondeado podría poseer similar resistencia interna de un fragmento angular, Garnica, P., Delgado, H., & Sandoval, C.D. (2005).

Formando un resumen causa-efecto de la incidencia del material granular sobre la respuesta de la mezcla asfáltica, tiene como resolución que las características a las que se deben prestar especial atención en la sección de los materiales granulares son referentes a:

- Granulometría
- Tamaño y forma de partículas
- Naturaleza de las partículas
- Dureza
- Textura
- Limpieza de las partículas
- Naturaleza y plasticidad del material pétreo fino

Para asegurar el uso de determinado agregado en una mezcla, es preciso conocer sus fuentes de origen, investigar sus características y chequear el cumplimiento de las exigencias vigentes relacionadas con estas características, MTOP (2002).

## 2.4. Propiedades a Evaluar en las Mezclas Asfálticas

En nuestro estudio a los núcleos extraídos se les realizarán dos tipos de pruebas:

- a) pruebas convencionales de caracterización
- b) pruebas de desempeño (dinámicas)

### 2.4.1. Pruebas de caracterización

- Densidad bruta de la mezcla
- Densidad máxima (RICE)
- Vacíos de aire
- Contenido de asfalto
- Granulometría de los agregados combinados

#### 2.4.1.1. Densidad bruta

Según, Asphalt Institute (2002), la densidad es una característica significativa, la mezcla asfáltica compactada, está definida por su peso unitario. Es fundamental obtener una alta densidad en el pavimento finalizado para alcanzar un rendimiento duradero.

Se lo determina usando el procedimiento descrito en la norma AASHTO 166.

#### **Descripción.**

- El primer paso es pesar las núcleos con la ayuda de una balanza perfectamente calibrada, para ser lo más exactos posibles, con esta obtendremos el “*Peso Seco*”
- En seguida se debe sumergir los núcleos en el agua en un reservorio, se deja suspendido el núcleo para luego pesarlo y de esta manera se obtiene el “*Peso Saturado*”
- Posteriormente procedemos a secar de manera parcial con la ayuda de un papel absorbente y luego, mediante la balanza se mide su

peso, y de esa forma obtenemos el “Peso Saturado Superficialmente Seco”, lo cual debe ser un poco mayor al Peso Seco  
Para los cálculos de las densidades, debemos previamente calcular el volumen mediante la ecuación (2.1):

$$Volumen = \text{Peso Superficialmente Seco} - \text{Peso Saturado} \quad (2.1)$$

Para obtener la densidad de cada núcleo se lo obtiene mediante la ecuación (2.2):

$$Densidad = \frac{\text{Peso Seco}}{\text{Volumen}} \quad (2.2)$$

Donde “Volumen” está representado por la ecuación (2.1).

#### 2.4.1.2. Densidad máxima (RICE)

Lo describe la norma AASHTO T 209 para mezclas asfálticas no compactadas.

##### **Equipos:**

- ✚ **Picnómetro de Vacío:** Puede ser de metal o de plástico con un diámetro entre 180 a 260 mm y con una altura no menor a 160 mm. Constará con una tapa transparente con empaquetadura de goma y un enlace para la línea de vacío
- ✚ **Balanza:** Con una exactitud de 0.1 gr y de acuerdo a los exigencias de la especificación ASTM D 4753
- ✚ **Bomba de vacío:** Capaz de evacuar el aire desde el contenedor de vacío a una presión residual de 4 kPa (0.04 kgf/cm<sup>2</sup>) o inferiores a esta presión
- ✚ **Manómetro o Indicador de vacíos:** Adecuado para medir el vacío. Este dispositivo puede ser conectado directamente a la fuente de vacío

- ✚ **Manómetro de presión residual:** Se utiliza para la confirmación de la presión que se aplican al recipiente y que será capaz de medir la presión residual de 4kPa o menos
- ✚ **Termómetro:** Calibrado, de vidrio, de rango adecuado y con subdivisiones de escala máxima de error de 0.5°C. Los termómetros se usarán de acuerdo a la especificación ASTM E 1
- ✚ **Válvula de vacío:** Para facilitar el ajuste de vacío que se aplican al picnómetro con la muestra
- ✚ **Dispositivo de agitación mecánica:** Capaz de aplicar una suave y constante agitación de la muestra. Este dispositivo estará equipado con un medio de anclaje firmemente al picnómetro de vacío para que no se mueva en la superficie del dispositivo
- ✚ **Horno:** Capaz de conservar una temperatura constante de 110°C.
- ✚ Muestras de ensayo de las 3 vías seleccionadas

### **Procedimiento**

- ✚ Calibración de los recipientes: si se utiliza el picnómetro para el pesaje en el aire, hay que determinar apropiadamente el peso del agua solicitado para llenar a una temperatura de 25°C, lo cual debe asegurarse mediante el uso de una placa de vidrio que sirva de cubierta y pesarlo (PESO PICNÓMETRO + AGUA)
- ✚ Separar las partículas de la muestra a mano teniendo cuidado de no fracturar las partículas minerales
- ✚ Enfriar la muestra a temperatura ambiente
- ✚ Pesar el recipiente con la muestra y designar un peso neto (PESO MEZCLA SUELTA)
- ✚ Agregar suficiente agua a una temperatura de 25°C, para cubrir la muestra completamente
- ✚ Colocar la tapa en el picnómetro de vacío

- ✚ Colocar el picnómetro de vacío con la muestra y el agua, en el dispositivo de agitación mecánica
  
- ✚ Remueva el aire atrapado en la muestra, aumentando gradualmente la presión de vacío hasta que el manómetro de presión marque 4 kPa durante un período de 15 minutos
  
- ✚ Sacudir el picnómetro de vacío con el contenido ya sea continuamente mediante el dispositivo mecánico a intervalos de próximos de 2 minutos
  
- ✚ El vacío puede aplicarse y reducirse gradualmente utilizando la válvula de vacío
  
- ✚ Rápidamente, luego de remover el aire atrapado, se va a proceder lo siguiente:
  - Peso en el aire. Para esto, llenar lentamente el picnómetro de vacío tratando de no meter aire en la muestra
  - Medir y registrar la temperatura del agua en el picnómetro de vacío
  - Apartar el termómetro, llenar completamente el picnómetro utilizado y tapar con la placa de vidrio, con mucha precaución de no atrapar el aire por debajo de la placa
  - Eliminar cualquier humedad del exterior del picnómetro de vacío y de la placa
  - Determine la masa del picnómetro de vacío más la placa y sus contenidos completamente lleno de agua, y designar un peso llamado PESO PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL

## Datos del ensayo del Rice

Para la obtención del RICE, se debe de usar la siguiente ecuación (2.3):

$$RICE = \frac{C}{A - (B - C)} \quad (2.3)$$

Donde:

A = PESO PICNÓMETRO + AGUA (gr)

B = PESO PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL (gr)

C = PESO DE LA MEZCLA SUELTA (gr)

### 2.4.1.3. Vacíos de Aire (VA)

Asphalt Institute (1997) sostiene que los vacíos son pequeñas espacios de aire que se hallan entre las partículas del agregado recubiertas en la mezcla final compactada. Inevitablemente todas las mezclas densamente graduadas deben contener algún porcentaje de vacíos para poder permitir una compactación adicional y proveer espacios de tal manera que pueda fluir el asfalto durante la compactación adicional.

La durabilidad del pavimento está en función del contenido de vacíos, si tiene una baja cantidad de vacíos, la permeabilidad de la mezcla asfáltica disminuirá, por otra parte si tiene un elevado contenido de vacíos también puede ser dañino, ya que puede ingresar agua y aire logrando deteriorarse. Se ha observado que cuando el porcentaje de vacíos de aire de la carpeta asfáltica cae por debajo del 3%, la probabilidad de aparición de roderas en la superficie de rodamiento se incrementa significativamente.

Para calcular el porcentaje de vacíos de una mezcla asfáltica compactada se debe de usar mediante la siguiente ecuación (2.4):

$$\%Vacíos = 100 * \left( \frac{RICE - DENSIDAD\ BULK}{RICE} \right) \quad (2.4)$$



#### 2.4.1.4. Contenido Asfalto Pb

El contenido de asfalto se calcula mediante el procedimiento descrito en la norma AASHTO T 164.

#### Equipo

- ☒ **Horno:** Que logre conservar la temperatura a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$
- ☒ **Recipiente plano:** Con las dimensiones adecuadas, para calentar las muestras
- ☒ **Balanza:** Debe ser de capacidad suficiente y con aproximación mínima de 0.1% de la masa de la muestra
  
- ☒ **Placa de calentamiento:** Eléctrica, con velocidad de calentamiento ajustable
- ☒ **Cilindros graduados:** De 1000 o de 2000 ml de capacidad. Opcionalmente, un cilindro de 100 ml de capacidad
- ☒ **Cápsula de porcelana:** De 125 ml de capacidad
- ☒ **Desecador**
- ☒ **Aparato de extracción:** Consistente en una taza y un aparato en el cual se pueda rotar la taza a una velocidad variable y controlada hasta de 3600 rpm. El aparato debe estar dotado de un recipiente para recoger el solvente que escapa de la taza y un desagüe para remover dicho solvente
  
- ☒ **Anillos filtrantes:** De fieltro o de papel, para colocar sobre el borde de la taza

#### Reactivos

- ☒ Solución saturada de carbonato de amonio  $[(\text{NH}_4)_2 \text{CO}_3]$ , químicamente puro
- ☒ Cloruro de Metileno, químicamente puro
- ☒ Tricloroetano 1.1.1
- ☒ Tricloroetileno de tipo 1

## Precauciones

Los solventes indicados se deberán emplear tan sólo bajo una campana con un sistema de desfogue superficial efectivo en un área bien ventilada, ya que todos son tóxicos en algún nivel.

## Preparación de la muestra

- ✚ Se debe conseguir las muestras según el ensayo AASHTO T 160. Si la muestra no es lo suficientemente blanda para separarla con una espátula, se coloca en una bandeja y se calienta a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  hasta que pueda mezclarse. Divídase el material hasta que se obtenga el peso del material requerido para el ensayo ( $w_1$ )
- ✚ La cantidad de la muestra para el ensayo se determinará según el tamaño máximo nominal del agregado en la mezcla, de acuerdo con la Tabla 1

Tamaño nominal máximo del agregado		Masa mínima de la Muestra
mm	pul	kg
4.75	No.4	0.5
9.5	3/8"	1.0
12.5	1/2"	1.5
19.0	3/4"	2.0
25.0	1"	3.0
37.5	1-1/2"	4.0

Tabla 1. Tamaños de la muestra

- ✚ Salvo que la muestra se encuentre libre de agua, es necesario otra muestra para la determinación de la humedad, en las mezclas. Esta muestra se toma de la mezcla remanente rápidamente después de conseguir el espécimen para el ensayo de extracción

## Humedad

- ✚ Se determina el contenido de humedad de la mezcla de acuerdo al procedimiento del Método AASHTO T 110

- ✚ La masa de agua (W2) en la porción del ensayo de extracción, se calcula multiplicando el porcentaje de la masa del agua por la masa de la porción del ensayo de extracción

### **Procedimiento**

- ✚ Determine el contenido de humedad de acuerdo al el método indicado
- ✚ Se coloca la porción de ensayo en la taza y se cubre con los solventes mencionados anteriormente y se debe dejar el tiempo suficiente para que el disolvente desintegre la porción de ensayo. Se coloca la taza que contiene la porción de ensayo y el solvente en el aparato de extracción. Se seca a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$  y se determina la masa del anillo filtrante y se a justa alrededor del borde de la taza
- ✚ Se inicia la centrifugación girando lentamente y aumentando gradualmente la velocidad hasta un máximo de 3600 rpm, hasta que deje de fluir el solvente por el desagüe. Se detiene la máquina y se agregan 200 ml del solvente empleado, y se repite el procedimiento
- ✚ Se recogen el extracto y las lavaduras en un recipiente adecuado, para determinar la materia mineral
- ✚ Se seca al aire bajo una campana hasta que se disipen los vapores y luego en un horno a  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , hasta masa constante. La masa del agregado extraído (W3) es igual a la masa del contenido en el recipiente menos el peso seco inicial del anillo filtrante
- ✚ Se deja enfriar el recipiente y se vuelve a determinar inmediatamente la masa. El aumento en masa representa la masa de material mineral (W4) en el extracto

### **Cálculo del Contenido del asfalto**

$$\text{Contenido de asfalto \%} = \frac{(W1 - W2) - (W3 - W4)}{W1 - W2} \times 100 \quad (2.5)$$

Donde:

W1 = masa de la porción de ensayo,

W2 = masa del agua en la porción de ensayo,

W3 = masa del agregado mineral extraído, y

W4 = masa de la materia mineral en el extracto.

#### 2.4.1.5. Granulometría del agregado extraído

Se tiene como finalidad obtener la distribución por tamaño de una muestra, mediante su división y separación con una serie de tamices en fracciones granulométricas de tamaño decreciente.

La granulometría normal pertenece a la especificación: 1/2". MOP- 001 F-2002. TABLA 405-5.1., que es la usualmente más empleada para capas de rodadura en nuestro país.

Los porcentajes pasados acumulados en la especificación mencionada se muestran en la Tabla 2.

ABERTURA DE TAMICES		% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm		Mínimo	Máximo
3/4"	19.00		100	100
1/2"	12.70		90	100
# 4	4.75		44	74
# 8	2.36		28	58
# 50	0.30		5	21
# 200	0.10		2	10
FONDO	FONDO			

Tabla 2. Especificación granulométrica para tamaño máximo nominal de 1/2" (12.5mm).

#### 2.4.2. Pruebas de desempeño (dinámicas).

Estas pruebas están basadas en un análisis dinámico del comportamiento tensión-deformación en especímenes de mezclas asfálticas.

### **2.4.2.1. Módulo de Rigidez**

Para las mezclas asfálticas fabricadas en caliente, la determinación del módulo resiliente o del módulo de rigidez presenta una serie de complicaciones, ya que éste valor depende de una serie de parámetros, entre los cuales se encuentran la temperatura, la velocidad y la magnitud de la carga aplicada, Committee European of Normalization (2000).

Para este ensayo se va a emplear con el equipo Nottingham Asphalt Test (NAT), modelo NU-10 que contiene los siguientes componentes:

- Un marco de agua
- Un sistema servo-neumático de carga
- Un sistema de adquisición de datos
- Un compresor de aire
- Transductores de tipo “Linear Variable Differential Transducer” (LVDT)
- Una cámara termostatazada que regula y mantiene la temperatura a la que se quiere realizar el ensayo
- Aire acondicionado, el cual regula la temperatura ambiente del laboratorio en el que se encuentra el equipo NAT

Este ensayo se basa en la normativa europea CEN 12697-26: 2000 anexo C, pruebas de tensión indirecta en probetas cilíndricas.

Esta prueba se la denomina como tensión indirecta, que consiste en un método no destructivo en el cual permite conocer el módulo de rigidez de las mezclas asfálticas ante la deformación controlada.

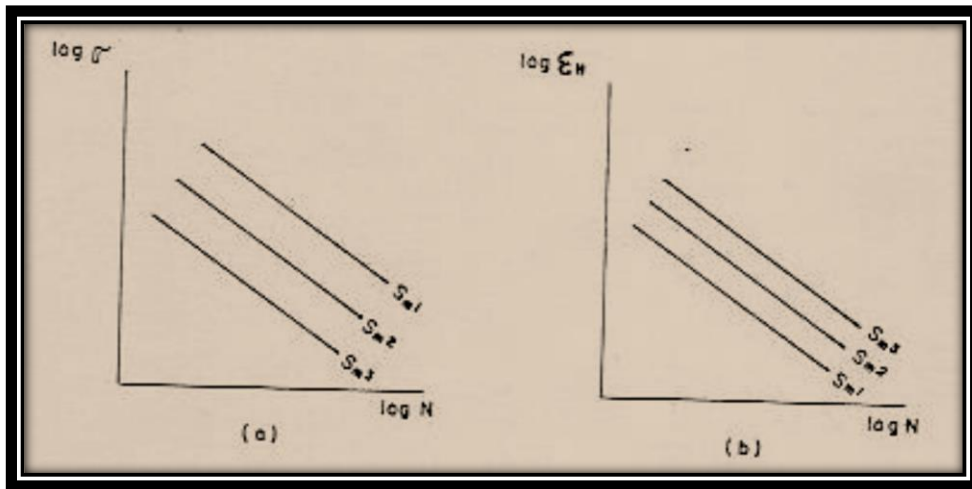
El módulo de rigidez se evalúa a una temperatura de 20°C, empleando un nivel de deformación controlada de 5 micrones y ondas sinusoidales con intervalo de tiempo entre el inicio del pulso de carga y el punto en el que la carga es máxima de 0,12 segundos.

#### **2.4.2.2. Ensayo de Fatiga**

Previo a obtener el número de repeticiones mediante el ensayo de fatiga, se realizó la prueba del módulo de rigidez a través del programa Stiffness Stress, el cual se hará bajo un esfuerzo controlado con el cual se obtiene el módulo, en el ensayo de fatiga se aplica el mismo esfuerzo.

Se realizó con esfuerzos que varían entre 250 y 500 kPa, obteniendo así el número de aplicaciones de carga necesarios para alcanzar a una deformación vertical máxima de 5 mm, dicha condición la muestra se puede considerar como fallida. Las aplicaciones de carga adicionalmente poseen un tiempo de aplicación de carga de 120 milisegundos, para este ensayo la temperatura fue de 20°C.

Según, EMOP-Q (1997) los resultados se pueden interpretar de acuerdo a las designadas “Leyes de Fatiga”, que constan de gráficas a escala logarítmica, tanto para el número de repeticiones en el eje de las abscisas como la deformación o los esfuerzos en eje de las ordenadas, ambos ejes quedarán bajo la escala logarítmica, estas serán rectas de pendiente negativa (ver Figura 6). En la gráfica esfuerzo vs número de repeticiones la recta que se encuentre en la parte superior poseerá la mezcla más rígida respecto a las demás ( $S_{m1} > S_{m2} > S_{m3}$ ) y en la gráfica deformación vs número de repeticiones la recta que se encuentre en la parte inferior tendrá la mezcla más rígida ( $S_{m1} > S_{m2} > S_{m3}$ ).



**Figura 6. Diagramas esfuerzo, deformación horizontal versus número de repeticiones (escala logarítmica)**

El desarrollo del ensayo de fatiga inicia obteniendo el módulo de rigidez denominado “Sm” bajo un esfuerzo “σ” que es aplicado a las muestras, de esta forma se obtiene la deformación por tracción inicial “ε”, mediante la ecuación (2.6):

$$\varepsilon = \frac{\sigma \cdot (1 + 3\mu)}{Sm} \quad (2.6)$$

El coeficiente de Poisson “μ” empleado es de 0,35. Los valores de ε se presentan en:  $\frac{mm}{mm} \times 10^{-6}$

### **2.4.2.3. Compresión Cíclica Uniaxial (Creep Dinámico)**

#### **Descripción del ensayo**

Este ensayo permite evaluar el comportamiento ante la deformación permanente o plástica de una mezcla asfáltica mediante la prueba de compresión cíclica uniaxial (creep dinámico) realizada a 3 núcleos extraídos de las vías de la región Sierra.

Un ciclo de carga radica en la aplicar un esfuerzo durante 1 segundo seguido por 1 segundo de detención, es decir, con ondas cuadradas.

El ensayo se efectuará a una temperatura de 40°C, midiendo de esta forma las deformaciones inducidas por 3600 repeticiones de cargas de 100 kPa.

Según criterios británicos, Cooper (2002), bajo estas condiciones de ensayo una mezcla con un buen comportamiento a la deformación tendrá valores por debajo de 1%. Para deformaciones superiores a 2% la mezcla tendrá asegurado un mal comportamiento y entre 1 y 2% existe incertidumbre en el desempeño respecto a las deformaciones.

## **2.5 Observaciones sobre los Mecanismos Principales de Falla en Pavimentos Flexibles**

Varios investigadores Rondón, H.A.; Reyes, F.A.; González; L.A.; & Vázquez S. E. (2012) indican que los dos principales mecanismos de falla de estructuras de pavimento flexible son la fatiga y el ahuellamiento. La fatiga se asocia con a la respuesta resiliente de la estructura y el ahuellamiento a la acumulación de las deformaciones permanentes en la dirección vertical. Estos dos mecanismos generan fallas estructurales y funcionales en el pavimento, que se producen principalmente en la capa asfáltica y se generan por las cargas cíclicas impuestas por el motor vehicular.

### **2.5.1 Ahuellamiento en mezclas asfálticas**

De acuerdo con Archilla & Madanat. (2006), el fenómeno de ahuellamiento en mezclas asfálticas sucede por densificación primordialmente durante la construcción y por la formación de deformaciones de corte durante la vida útil del pavimento.

Según, Tarefder, R.A., Zaman, A. & Hobson, K. (2003), el ahuellamiento se afecta principalmente por tres factores: mezcla (gradación del agregado, grado de funcionamiento PG del ligante, contenido de asfalto), carga (presión de llanta, tipo de eje) y ambiente (temperatura, humedad, precipitación). La predicción de este fenómeno en mezclas asfálticas ha sido complicada debido a la falta de métodos de ensayos prácticos de laboratorio



y equipos, NAPA (1995), y por lo general se intenta controlar la resistencia a las deformaciones permanentes a través de la rigidez de las mezclas.

Roberts, B.L.; Kandhal, P.S.; Brown E.R.; Lee, D-Y; Kenndy T.W. (1996), mencionan que el ahuellamiento en pavimentos incrementa en los primeros años de operación y luego se estabiliza en el tiempo.

Al ahuellamiento se lo define como la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes, es por esto, que una manera de hacer que el cemento asfáltico de una correcta resistencia al corte, es usar un cemento asfáltico no solo rígido, sino de un comportamiento lo más parecido a un sólido elástico a elevadas temperaturas del pavimento. De esta forma, el cemento asfáltico en la mezcla, cuando se le aplica una carga, va a realizar el papel de una banda de goma, y a recobrar su posición original en vez de permanecer deformado.

### **2.5.2 Fatiga en mezclas asfálticas**

El fenómeno de fatiga es uno de los principales mecanismos de daño de las mezclas asfálticas en servicio Tarefder, R.A., Kias, E. & Zaman, A. (2008), ocurre en las capas ligadas del pavimento y, para el caso de estructuras flexibles, se presenta cuando se generan valores elevados de deformación a tracción en la zona inferior de la capa asfáltica producto de las cargas impuestas por el parque automotor (cargas repetidas) lo que lleva a la formación de fisuras, también existe el caso de agrietamiento por bajas temperaturas y fatiga térmica.

Según, Di Benedetto, H., De la Roche, C., Baaj, H., Pronk, A. & Lundstrom, R. (2004), usualmente se reconocen dos fases de daño durante el fenómeno de agrietamiento por fatiga. La primera fase de iniciación corresponde a la aparición y propagación de una red de microfisuras, las cuales se extienden de manera uniforme en la mezcla asfáltica generando disminución de la rigidez de la misma. Durante la segunda fase, de propagación, se presenta

la unión de las microfisuras y por lo tanto aparición de fisuras de mayor tamaño (macro-crack).

La aparición y velocidad de avance de cada una de las fases de daño dependen principalmente de la rigidez de la mezcla asfáltica.

Por lo general, la rotura por fatiga es básicamente una señal de que el pavimento ha excedido el número de aplicaciones de carga para el cual fue diseñado. Para poder prevenir la rotura por fatiga se pueden realizar varias cosas como: un diseño adecuado del número de cargas pesadas, mantener la subrasante seca, utilizar mayores espesores de pavimento, usar material no susceptibles a la humedad, y preferiblemente utilizar mezclas asfálticas que resistan las deflexiones normales.

La textura de la superficie del agregado tiene una gran importancia para una buena resistencia a la fatiga. Las partículas planas y alongadas manifiestan agregados tendentes a fallar ante esfuerzo cortante en la mezcla, lo cual aumenta las posibilidades de que se presenten fisuras, después de ocurrida la falla por fatiga.

Según, Kim, Y.R., Kim, N., & Khosla, N.P. (1991) en un estudio que realizaron, muestran que mezclas que contienen asfaltos más rígidos demuestran más resistencia a la fatiga que las mezclas fabricadas con asfaltos más flexibles, además la diferencia en la resistencia a la fatiga de las 2 mezclas es más pronunciada para altas temperaturas que para bajas temperaturas.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla es un proceso de adaptación de dos objetivos: tener la mayor cantidad de asfalto como sea posible para mejorar la resistencia a la fatiga y la durabilidad, como el mínimo necesario para no encontrar problemas de deformación permanente.

En general, las mezclas con graduación continua tienen dos factores que afectan la respuesta de la fatiga son el contenido del asfalto y el contenido de vacíos de aire.

Desde el punto de vista de diseño de la mezcla, en ella debe ser incorporado tanto asfalto como sea posible. Hay un límite superior para el contenido de asfalto, debido a la estabilidad; sin embargo debe estar cercano al máximo para que aumente la resistencia la fatiga.

El contenido de vacíos de aire es un factor importante que afecta la vida de fatiga de una mezcla de asfalto, de manera que debe ser tan pequeño como sea posible.

## **CAPITULO 3: SELECCIÓN DE VIAS A ESTUDIAR**

### **3.1. Criterios de Selección**

Para el estudio se decidió trabajar con núcleos de carpeta asfáltica extraídos en 3 vías de la región sierra, con tiempo de colocación entre 3 y 4 años, y con diferentes niveles de deterioros: bajo, regular y alto.

Si bien dichas mezclas se construyeron con diferentes agregados y similar tipo de asfalto (AC-20 de la Refinería de Esmeraldas), en todos los casos se debieron cumplir las exigencias de calidad del MTOP 2002 para los diferentes materiales.

Con el tiempo de colocación establecido, en el cual las características de endurecimiento o envejecimiento del cemento asfáltico tienden a estabilizarse, se pretende buscar un factor común que permita considerar que en el daño acumulado del pavimento solo sea representativo el efecto del paso de las cargas, no la variación de la rigidez de la mezcla provocado por el mayor o menor número de años transcurrido desde su colocación.

Se extrajeron 12 núcleos de cada vía, tomados en una misma banda de pavimentación, lo que normalmente coincide con el ancho de un carril, espaciado cada 5 metros de manera aproximada.

Esta concentración nos permite extraer los núcleos en una longitud de 60 metros, lo que garantiza que la mezcla analizada sea uniforme ya que procede de la misma volqueta de transportación o, en el peor de los casos, de dos volquetas contiguas.

### 3.2. Evaluación de los tramos de las vías estudiadas

En general, se seleccionaron las siguientes vías:

- ✚ **Guaranda - Balzapamba**, con 2 carriles, se barrenó el carril derecho, en el tramo 51+945 a 52+000. El estado de la sección es bueno, con menos del 3% de fisuras de piel de cocodrilo de severidad baja o media. No hay evidencias de deformaciones permanentes (ver figura 7).

Las muestras ensayadas corresponden a los 5 cm de la capa de rodadura. En general, el espesor total de capa asfáltica en los núcleos se encontraba entre 11.5 y 13.0 cm.



**Figura 7. Vista general de la Vía Guaranda - Balzapamba**

- ✚ **Alausí – Huigra**, con 2 carriles, se barrenó el carril derecho, en el tramo 6+300 a 6+400. El estado de la sección es malo, con un 10 a 15% de la superficie bacheada, muchos baches ya fisurados, más un 20% aproximadamente del área con un sello bituminoso. Existe algunas fisuras de piel de cocodrilo y transversales de severidad baja o media y en general presencia de peladuras de severidad baja a media. Ver Figura 8.

En los núcleos extraídos, los que tuvieron espesores totales entre 8.5 y 11.5 cm se desecharon aproximadamente los 2 cm más superficiales para evitar la capa de sello, cortándose entonces la capa subsiguiente con 5 cm de espesor.



**Figura 8. Vista general de la Vía Alausí - Huigra**

- ✚ **Guasuntos – Chunchi**, con 2 carriles, se barrenó el carril derecho en el tramo 12+200 a 12+300. El estado de la sección es regular, con aproximadamente un 15% de la superficie bacheada, un 10% de fisuras de cocodrilo de intensidad baja y algunas fisuras longitudinales especialmente por el carril izquierdo. No hay evidencias de deformaciones permanentes (Figura 9). Las muestras ensayadas corresponden a los 5 cm superiores de la capa de rodadura existente. El espesor total de los núcleos extraídos varió entre 11.5 y 14.5 cm.



**Figura 9. Vista general de la Vía Guasuntos – Chunchi**

### **3.3. Calidad de las mezclas asfálticas en las vías**

A la mezcla de cada una de las vías se les realizó varias pruebas de laboratorio para determinar su calidad, para lo cual se usó 3 núcleos por vía, los cuales fueron calentados hasta que se pudieran disgregar y obtener la masa del material requerida para cada ensayo en particular. Las pruebas que se efectuaron fueron: extracción de asfalto, granulometría y Rice. Los núcleos empleados provinieron de los ensayos de fatiga.

#### **3.3.1. VÍA: GUARANDA – BALZAPAMBA**

##### Prueba de extracción del asfalto

$W_1$ : Peso de la muestra de mezcla asfáltica (gr):	1057,00
$F_1$ : Peso del filtro antes de la extracción (gr):	11,00
$W_2$ : Contenido de humedad (gr):	0,00
$W_{3A}$ : Peso de agregado lavados en centrífuga (gr):	981,00
$F_2$ : Peso del filtro después de la extracción (gr):	13,00
$W_{3B}$ : $F_2 - F_1$ (gr):	2,00
$W_3$ : Peso agregado incluyendo filtro (gr) ( $W_{3A} + W_{3B}$ ):	983,00

W<sub>4</sub> : Peso de material mineral en extracto (gr): 3,00  
 % de Asfalto (ver ecuación 3.1) 6,72

$$\% \text{ de Asfalto} = \frac{(W_1 - W_2) - (W_3 + W_4)}{W_1 - W_2} \quad (3.1)$$

Tabla 3. Análisis granulométrico del agregado vía Guaranda – Balzapamba

ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	0,0	0,0	100,0	100	100
1/2"	12,70	144,7	14,7	85,3	90	100
# 4	4,75	431,7	43,9	56,1	44	74
# 8	2,36	555,3	56,5	43,5	28	58
# 50	0,30	833,2	84,8	15,2	5	21
# 200	0,10	963,6	98,0	2,0	2	10
FONDO	FONDO	983,0				

Chequeo granulométrico en agregados extraídos

Para la vía Guaranda - Balzapamba, en la Tabla 3. se detalla el cálculo de la granulometría de los agregados por medio de tamizado, y en la Figura 10 se muestra la curva granulométrica.

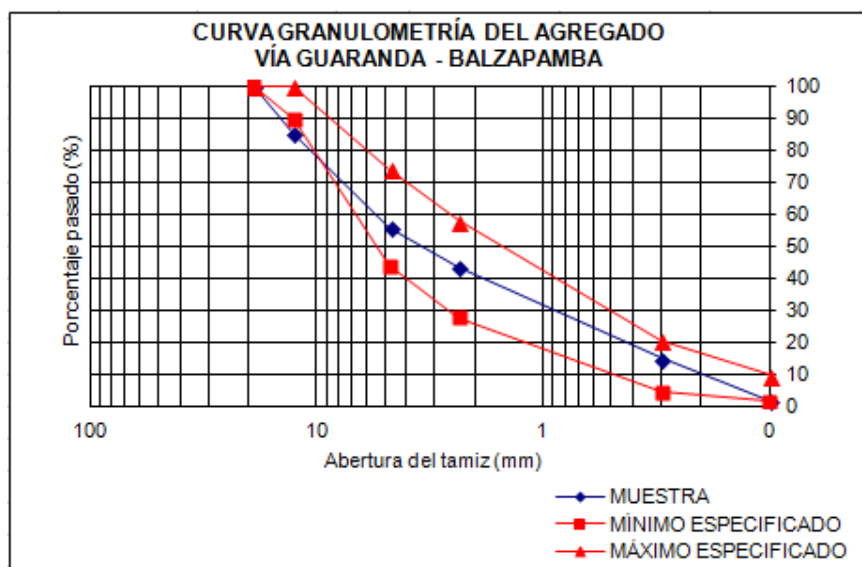


Figura 10. Curva granulométrica del agregado vía Guaranda – Balzapamba



### Ensayo RICE

A: Peso del frasco + Agua (gr):	7191,0
B: Peso del frasco + Agua + Material (gr):	8203,0
C: Peso de la mezcla suelta (gr):	1687,0

RICE, su fórmula se lo puede observar en la ecuación (2.3):

$$RICE = \frac{C}{A-(B-C)} \quad (2.3)$$

**RICE: 2,499**

### **3.3.2. VÍA: ALAUSÍ – HUIGRA**

#### Prueba de extracción del asfalto

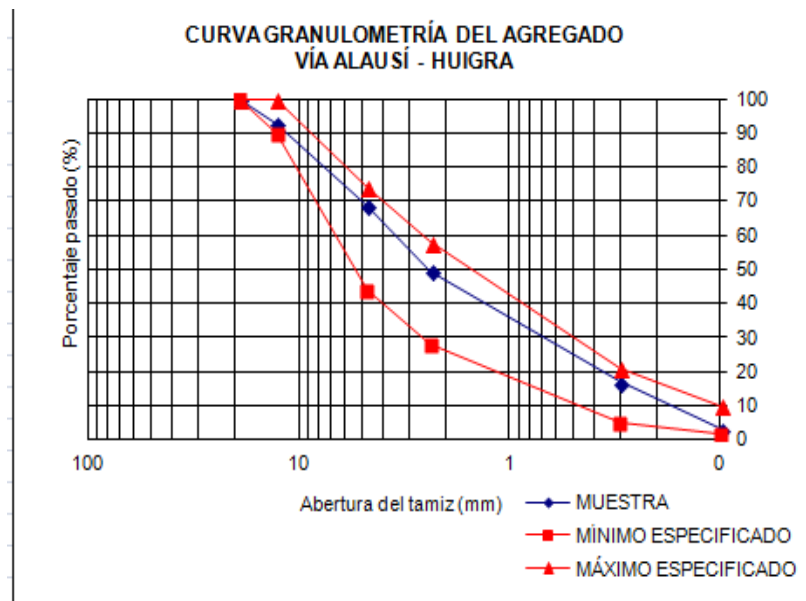
W <sub>1</sub> : Peso de la muestra de mezcla asfáltica (gr):	1179,00
F <sub>1</sub> : Peso del filtro antes de la extracción (gr):	11,00
W <sub>2</sub> : Contenido de humedad (gr):	0,00
W <sub>3A</sub> : Peso de agregado lavados en centrífuga (gr):	1096,00
F <sub>2</sub> : Peso del filtro después de la extracción (gr):	12,00
W <sub>3B</sub> : F2 - F1 (gr):	1,00
W <sub>3</sub> : Peso agregado incluyendo filtro (gr) (W <sub>3A</sub> +W <sub>3B</sub> ):	1097,00
W <sub>4</sub> : Peso de material mineral en extracto (gr):	4,00
% de Asfalto (ver ecuación 3.1)	<b>6,62</b>

#### Chequeo granulométrico en agregados extraídos

Para la vía Alausí – Huigra, en la Tabla 4 se detalla el cálculo de la granulometría de los agregados por medio de tamizado, y en la Figura 11 se muestra la curva granulométrica, cumpliéndose con las especificaciones del MTOP 2002, en relación al porcentaje de pasado acumulado de los agregados.

**Tabla 4. Análisis granulométrico del agregado vía Alausí – Huigra**

ABERTURA DE TAMICES		PESO RET.	% RETENIDO	% PASADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm	ACUM. (gr)	ACUMULADO	ACUMULADO	Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	0,0	0,0	<b>100,0</b>	100	100
1/2"	12,70	80,6	7,3	<b>92,7</b>	90	100
# 4	4,75	344,5	31,4	<b>68,6</b>	44	74
# 8	2,36	553,9	50,5	<b>49,5</b>	28	58
# 50	0,30	912,4	83,2	<b>16,8</b>	5	21
# 200	0,10	1061,1	96,7	<b>3,3</b>	2	10
FONDO	FONDO	1097,0				



**Figura 11. Curva granulométrica del agregado vía Alausí – Huigra**

Ensayo RICE

A: Peso del frasco + Agua (gr):	7191,0
B: Peso del frasco + Agua + Material (gr):	7891,0
C: Peso de la mezcla suelta (gr):	1179,0
<b>RICE:</b>	<b>2,461</b>

### 3.3.3 VÍA: GUASUNTOS – CHUNCHI

#### Prueba de extracción del asfalto

W <sub>1</sub> : Peso de la muestra de mezcla asfáltica (gr):	936,00
F <sub>1</sub> : Peso del filtro antes de la extracción (gr):	12,00
W <sub>2</sub> : Contenido de humedad (gr):	0,00
W <sub>3A</sub> : Peso de agregado lavados en centrífuga (gr):	885,00
F <sub>2</sub> : Peso del filtro después de la extracción (gr):	14,00
W <sub>3B</sub> : F2 - F1 (gr):	2,00
W <sub>3</sub> : Peso agregado incluyendo filtro (gr) (W <sub>3A</sub> +W <sub>3B</sub> ):	887,00
W <sub>4</sub> : Peso de material mineral en extracto (gr):	3,00
% de Asfalto (ver ecuación 3.1)	<b>4,91</b>

#### Chequeo granulométrico en agregados extraídos.

Para la vía Guasuntos - Chunchi, en la Tabla 5 se detalla el cálculo de la granulometría de los agregados por medio de tamizado, y en la Figura 12 se muestra la curva granulométrica, cumpliéndose con las especificaciones del MTOP 2002, en relación al porcentaje de pasado acumulado de los agregados

**Tabla 5. Análisis granulométrico del agregado vía Guasuntos - Chunchi**

ABERTURA DE TAMICES		PESO RET. ACUM. (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASADO ACUMULADO	ESPEC. 1/2" MOP 2002	
No.	mm				Mínimo	Máximo
3/4"	19,00	0,0	0,0	<b>100,0</b>	100	100
1/2"	12,70	85,4	9,6	<b>90,4</b>	90	100
# 4	4,75	325,4	36,7	<b>63,3</b>	44	74
# 8	2,36	478,6	54,0	<b>46,0</b>	28	58
# 50	0,30	760,4	85,7	<b>14,3</b>	5	21
# 200	0,10	845,6	95,3	<b>4,7</b>	2	10
FONDO	FONDO	887,0				

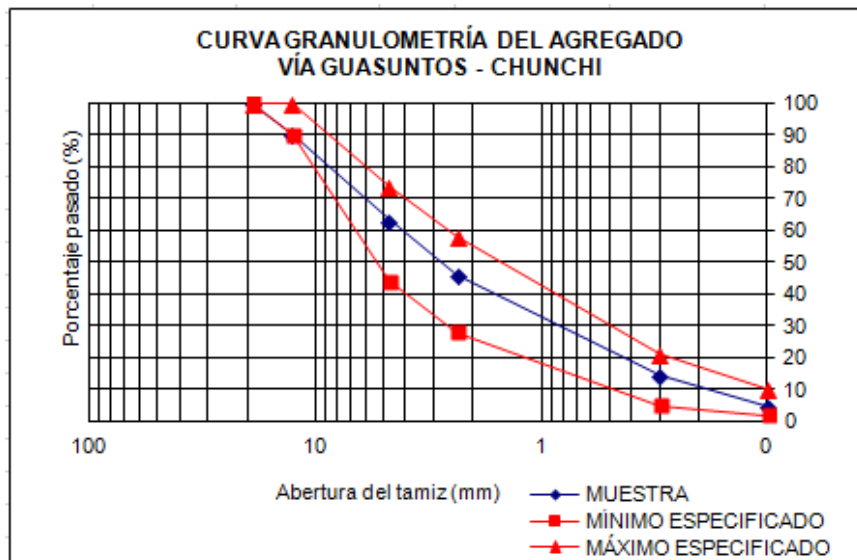


Figura 12. Curva granulométrica del agregado vía Guasuntos – Chunchi

Ensayo RICE

A: Peso del frasco + Agua (gr)	7191,0
B: Peso del frasco + Agua + Material (gr)	8118,0
C: Peso de la mezcla suelta (gr)	1560,0
<b>RICE:</b>	<b>2,464</b>

## CAPÍTULO 4: TRABAJO EXPERIMENTAL

### 4.1. Información General

Este estudio va a dirigir su interés hacia dos tipos de pruebas, las cuales son:

- Pruebas convencionales de caracterización
- Pruebas de desempeño (dinámicas)

### 4.2. Pruebas de caracterización

Las pruebas convencionales de caracterización consisten en determinar la densidad y el porcentaje de vacíos de las mezclas asfálticas.

#### 4.2.1. Determinación de las densidades (gravedad específica bruta)

Las densidades de los núcleos de cada vía son presentadas en las Tablas 6, 7 y 8. Posteriormente se realizó ciertos cálculos descritos en los siguientes párrafos.

- Se realizó un promedio con las 12 densidades por vía mediante la suma de todos sus valores, divididos para el número de muestras en total.
- La desviación estándar mide cuánto se separan los datos y se la calcula a través de la siguiente fórmula  $\sqrt{\frac{\sum(x-X)^2}{(n-1)}}$  donde:

- x es el valor de cada densidad,
- X es la promedio de las densidades y
- n es número de densidades

- El coeficiente de variación se lo obtiene al dividir la desviación estándar para el promedio de las densidades de cada vía.

**Tabla 6. Resultados de las densidades. Vía Guaranda – Balzapamba**

NÚMERO	MUESTRA	PESO AIRE Pa (gr)	P. AGUA Pag (gr)	SUP. SECA Psss (gr)	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )
1	52+000	982	570	982	2,383
2	51+995	912	526	912	2,363
3	51+990	956	547	956	2,337
4	51+985	920	527	920	2,341
5	51+980	956	547	959	2,320
6	51+975	994	569	994	2,339
7	51+970	949	548	950	2,361
8	51+965	928	534	930	2,343
9	51+960	908	516	911	2,299
10	51+955	974	559	974	2,347
11	51+950	967	558	969	2,353
12	51+945	953	543	954	2,319

PROMEDIO	<b>2,342</b>
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	<b>0,022</b>
COEF. VARIACIÓN (%)	<b>0,960</b>

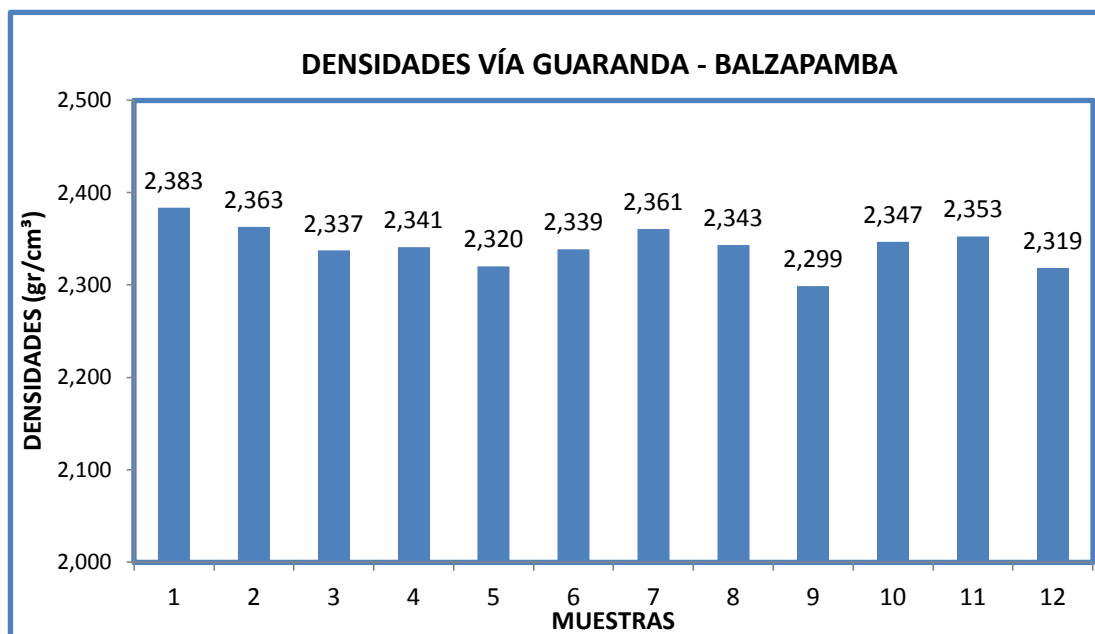
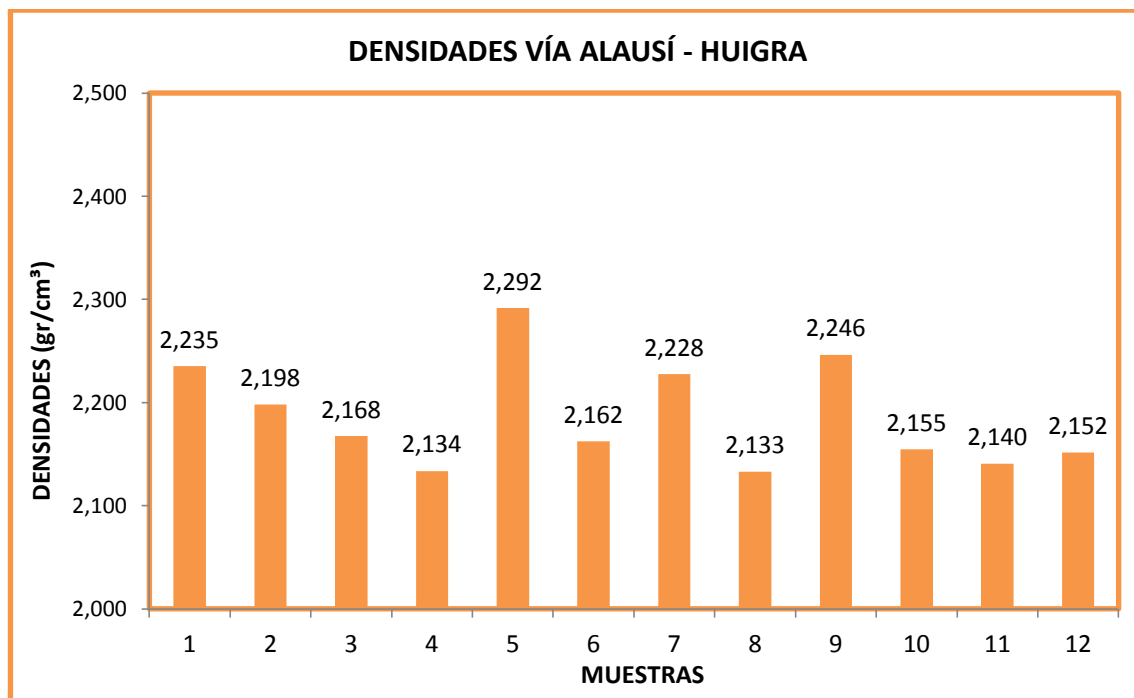


Figura 13. Densidades vía Guaranda - Balzapamba, diagrama de barras

Tabla 7. Resultados de las densidades. Vía Alausí - Huigra

NÚMERO	MUESTRA	PESO AIRE Pa (gr)	P. AGUA Pag (gr)	SUP. SECA Psss (gr)	DENSIDAD (gr/cm³)
1	1-AH	941	520	941	2,235
2	2-AH	833	455	834	2,198
3	3-AH	854	461	855	2,168
4	4-AH	830	442	831	2,134
5	5-AH	841	474	841	2,292
6	6-AH	852	459	853	2,162
7	7-AH	891	491	891	2,228
8	8-AH	834	444	835	2,133
9	9-AH	903	502	904	2,246
10	10-AH	849	456	850	2,155
11	11-AH	777	415	778	2,140
12	12-AH	822	440	822	2,152

PROMEDIO	<b>2,187</b>
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	<b>0,052</b>
COEF. VARIACIÓN (%)	<b>2,376</b>



**Figura 14. Densidades vía Alausí - Huigra, diagrama de barras**

**Tabla 8. Resultados de las densidades. Vía Guasuntos – Chunchi**

NÚMERO	MUESTRA	PESO AIRE Pa (gr)	P. AGUA Pag (gr)	SUP. SECA Psss (gr)	DENSIDAD (gr/cm³)
1	1-GC	926	526	927	2,309
2	2-GC	908	512	908	2,293
3	3-GC	856	483	857	2,289
4	4-GC	900	506	901	2,278
5	5-GC	893	504	893	2,296
6	6-GC	907	504	908	2,245
7	7-GC	857	471	858	2,214
8	8-GC	903	490	904	2,181
9	9-GC	960	545	960	2,313
10	10-GC	909	509	910	2,267
11	11-GC	838	455	838	2,188
12	12-GC	872	480	872	2,224

PROMEDIO	<b>2,258</b>
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	<b>0,046</b>
COEF. VARIACIÓN (%)	<b>2,058</b>



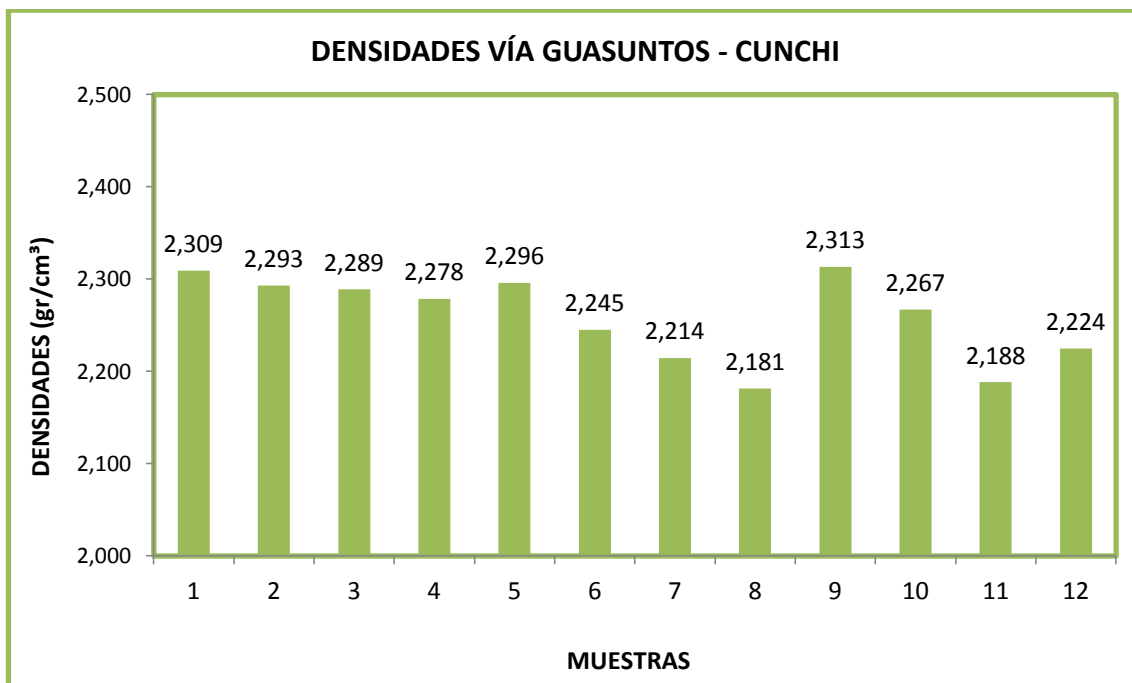


Figura 15. Densidades vía Guasuntos - Chunchi, diagrama de barras

En la Figura 16 se muestran las variaciones de las densidades promedio correspondientes a cada vía.

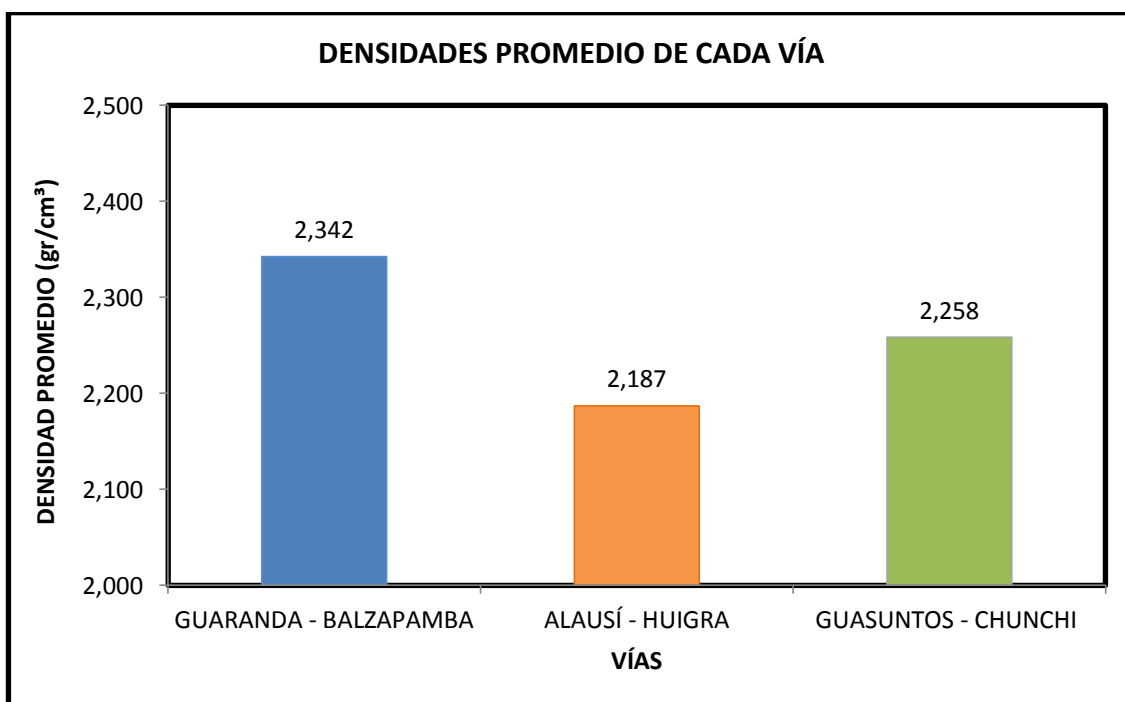


Figura 16. Densidades promedio de cada vía.

#### 4.2.2. Determinación de los porcentajes de vacíos

En esta sección se realizó los cálculos descritos en la sección precedente.

En las Tabla 9, 10 y 11, detallan los porcentajes de vacíos para cada muestra.

Las figuras 17, 18 y 19, presentan las variaciones de los porcentajes de vacíos de los 12 núcleos de cada vía.

**Tabla 9. Porcentaje de vacíos de las muestras vía Guaranda – Balzapamba**

<b>BRIQUETAS</b>	<b>Peso muestra en aire (gr)</b>	<b>Peso muestra en agua (gr)</b>	<b>Peso muestra s.s.s. aire (gr)</b>	<b>Volumen (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Gravedad Esp. Bulk</b>	<b>Vacíos en mezcla (%)</b>
1	982	570	982	412	2,383	<b>4,63</b>
2	912	526	912	386	2,363	<b>5,46</b>
3	956	547	956	409	2,337	<b>6,48</b>
4	920	527	920	393	2,341	<b>6,33</b>
5	956	547	959	412	2,320	<b>7,16</b>
6	994	569	994	425	2,339	<b>6,42</b>
7	949	548	950	402	2,361	<b>5,54</b>
8	928	534	930	396	2,343	<b>6,23</b>
9	908	516	911	395	2,299	<b>8,02</b>
10	974	559	974	415	2,347	<b>6,09</b>
11	967	558	969	411	2,353	<b>5,86</b>
12	953	543	954	411	2,319	<b>7,22</b>

<b>PROMEDIO</b>	<b>6,29</b>
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR</b>	<b>0,90</b>
<b>COEF. VARIACIÓN (%)</b>	<b>14,30</b>

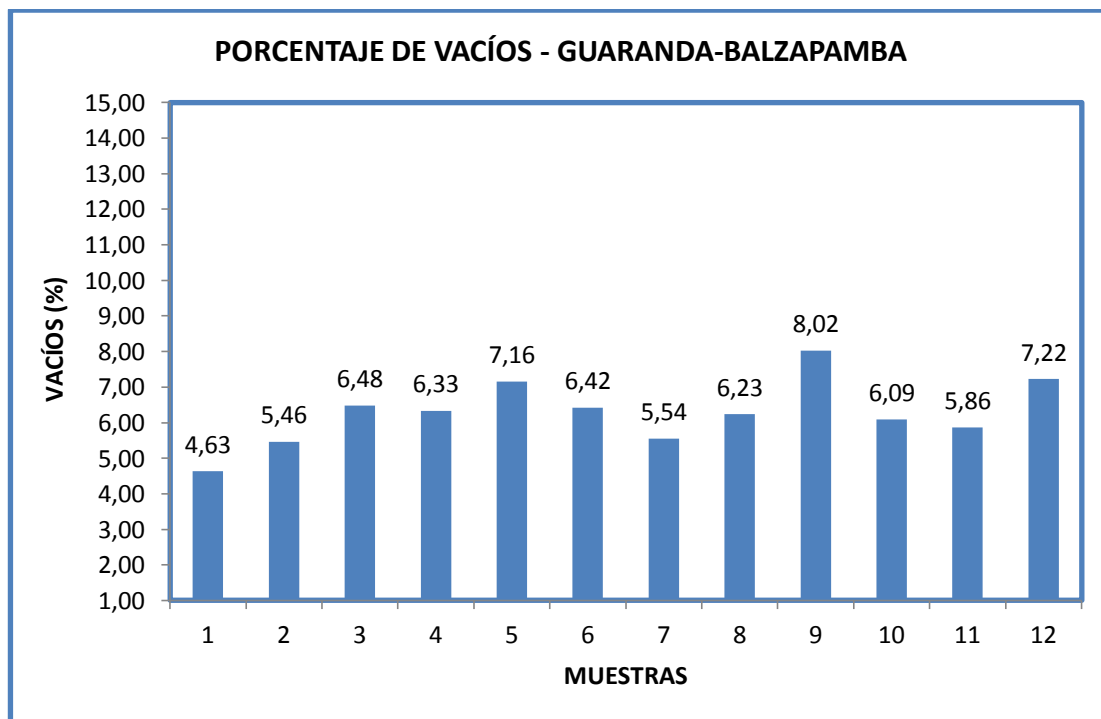


Figura 17. Porcentaje de vacíos Guaranda - Balzapamba, diagrama de barras

Tabla 10. Porcentaje de vacíos de las muestras vía Alausí – Huigra

BRIQUETAS	Peso muestra en aire (gr)	Peso muestra en agua (gr)	Peso muestra s.s.s. aire (gr)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Gravedad Esp. Bulk	Vacíos en mezcla (%)
1	941	520	941	421	2,235	<b>9,19</b>
2	833	455	834	379	2,198	<b>10,70</b>
3	854	461	855	394	2,168	<b>11,94</b>
4	830	442	831	389	2,134	<b>13,31</b>
5	841	474	841	367	2,292	<b>6,90</b>
6	852	459	853	394	2,162	<b>12,15</b>
7	891	491	891	400	2,228	<b>9,50</b>
8	834	444	835	391	2,133	<b>13,34</b>
9	903	502	904	402	2,246	<b>8,74</b>
10	849	456	850	394	2,155	<b>12,45</b>
11	777	415	778	363	2,140	<b>13,04</b>
12	822	440	822	382	2,152	<b>12,58</b>

PROMEDIO	<b>11,15</b>
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	<b>2,11</b>
COEF. VARIACIÓN (%)	<b>18,93</b>

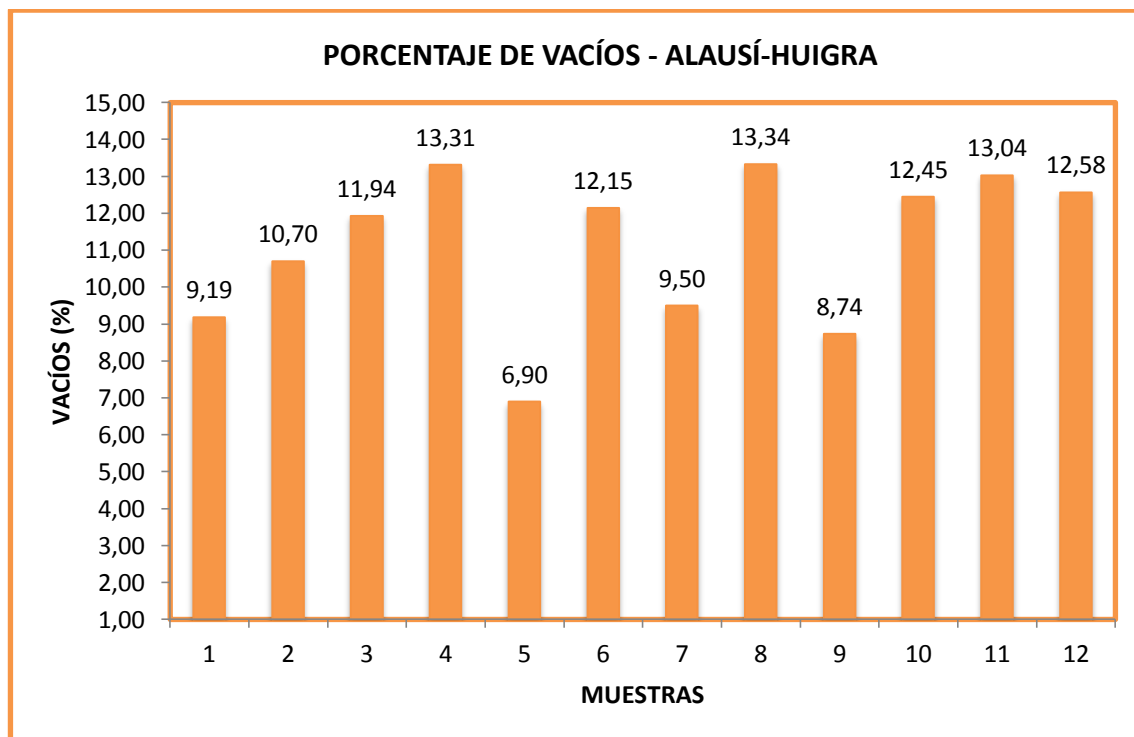


Figura 18. Porcentaje de vacíos Alausí - Huigra, diagrama de barras

Tabla 11. Porcentaje de vacíos de las muestras vía Guasuntos – Chunchi

BRIQUETAS	Peso muestra en aire (gr)	Peso muestra en agua (gr)	Peso muestra s.s.s. aire (gr)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Gravedad Esp. Bulk	Vacíos en mezcla (%)
1	926	526	927	401	2,309	<b>6,30</b>
2	908	512	908	396	2,293	<b>6,96</b>
3	856	483	857	374	2,289	<b>7,13</b>
4	900	506	901	395	2,278	<b>7,55</b>
5	893	504	893	389	2,296	<b>6,85</b>
6	907	504	908	404	2,245	<b>8,90</b>
7	857	471	858	387	2,214	<b>10,14</b>
8	903	490	904	414	2,181	<b>11,50</b>
9	960	545	960	415	2,313	<b>6,14</b>
10	909	509	910	401	2,267	<b>8,02</b>
11	838	455	838	383	2,188	<b>11,22</b>
12	872	480	872	392	2,224	<b>9,74</b>

PROMEDIO	<b>8,37</b>
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	<b>1,89</b>
COEF. VARIACIÓN (%)	<b>22,53</b>

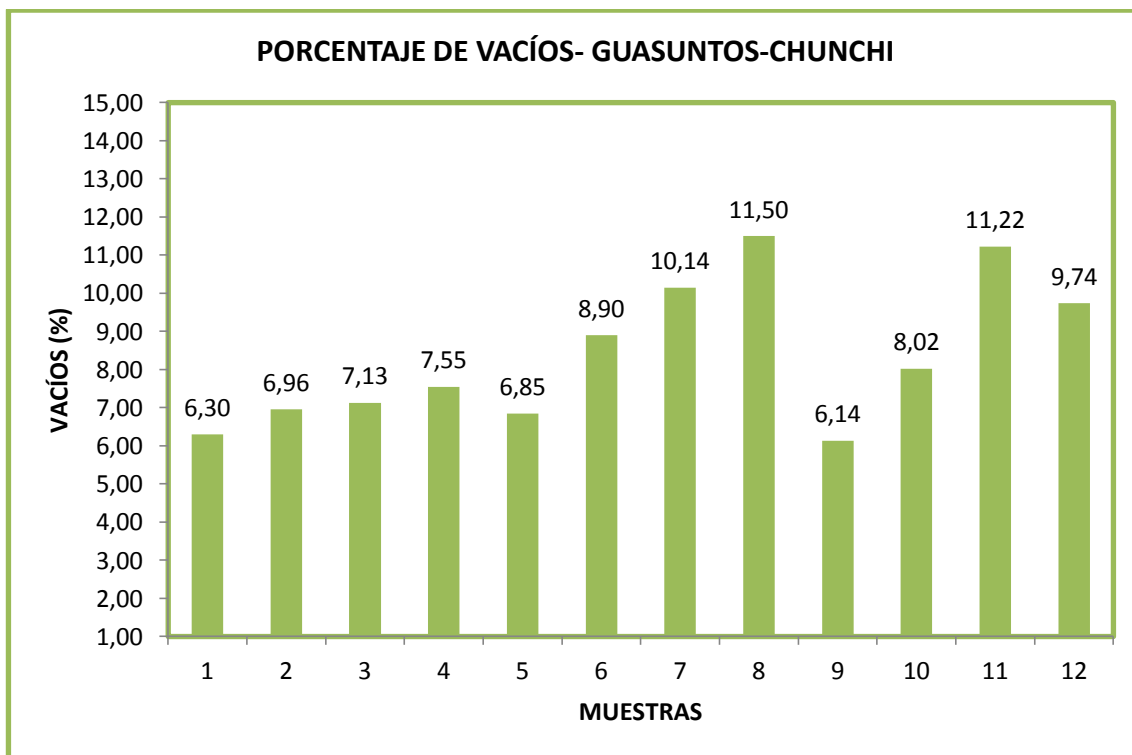


Figura 19. Porcentaje de vacíos Guasuntos - Chunchi, diagrama de barras

Los porcentajes de vacíos promedio de cada vía son mostrados en la figura 20.

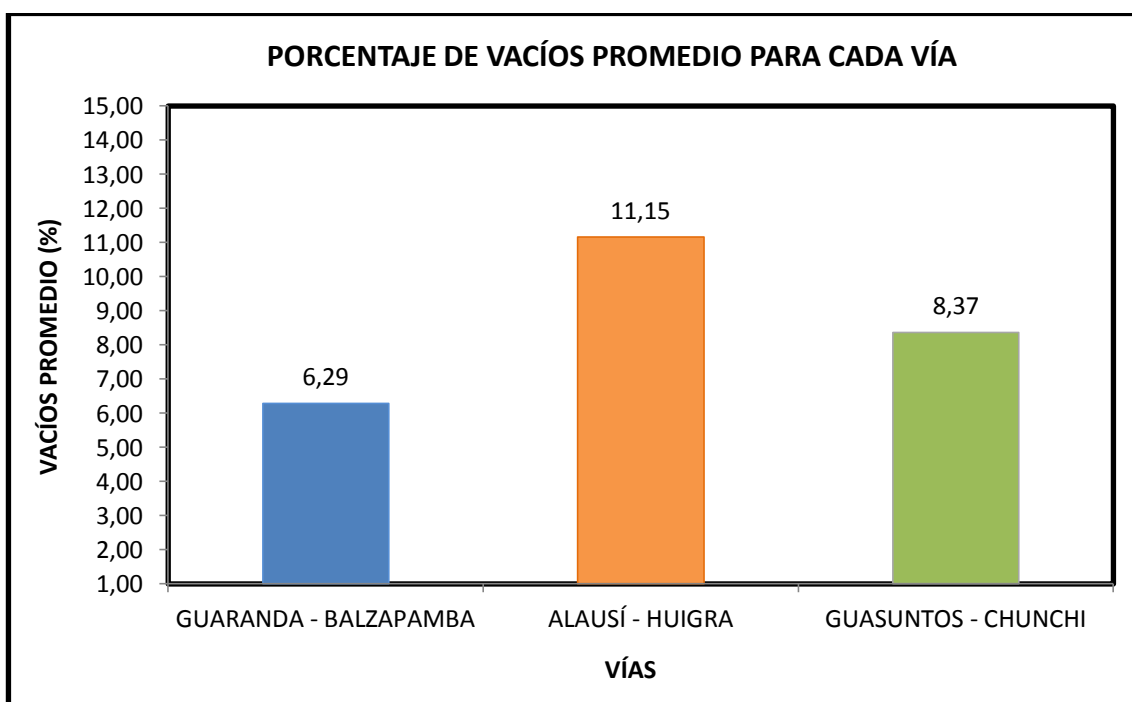


Figura 20. Porcentaje promedio de vacíos de cada vía

### **4.2.3 Análisis de resultados de las pruebas de caracterización**

#### **Densidad (Gravedad específica bruta)**

Existe una gran variación de densidades en las vías seleccionadas, según nuestros resultados las vías: Alausí – Huigra y Guasuntos - Chunchi tienen un elevado coeficiente de variación de 2,376 % y 2,058 % respectivamente, en comparación a la vía Guaranda – Balzapamba (0,96 %).

#### **Porcentaje de vacíos**

En la vía Alausí – Huigra el porcentaje de vacíos es de 11,15%, muy alto, que sobrepasa significativamente los límites permitidos en obra considerando las densidades relativas exigidas (6 a 8%). En el caso de la vía Guasuntos – Chunchi el valor promedio de 8,37% tampoco cumpliría la exigencia de obra y solo Guaranda – Balzapamba con 6,29% daría un resultado satisfactorio.

Al existir en las vías densidades muy variables, es inevitable que no ocurra lo mismo en sus porcentajes de vacíos. El coeficiente de variación en todas las vías son muy elevados: Guaranda – Balzapamba con un 14,30 %, Alausí – Huigra con un 18,93 % y finalmente Guasuntos – Chunchi con un 22,53%.

### **4.3. Pruebas de Desempeño**

#### **4.3.1. Información General**

En este trabajo se realizaron tres importantes pruebas de desempeño, que tienen como objetivo conocer el comportamiento de estos núcleos, los resultados se obtuvieron mediante programas de software, uno para cada ensayo.

Las pruebas de desempeño para este proyecto fueron: módulo de rigidez, ensayo de fatiga y deformación plástica (Creep dinámico).

En este estudio se cuenta con 12 núcleos por vía, los cuales se van a distribuirse de la siguiente manera:

- a) 3 núcleos se emplearán para “Pruebas de rigidez bajo deformación controlada” y ensayos de “Deformación Permanente (Creep dinámico)”.
- b) 7 núcleos serán usados para “Pruebas de fatiga”
- c) 2 núcleos, se destinarán como reserva.

#### 4.3.2. Módulo de Rigidez

##### 4.3.2.1. Resultados

Los resultados de los módulos de rigidez de cada muestra se registraron por el programa Stiffness Micron y serán expuestas en las Tablas 12, 13 y 14.

A cada vía se le calculo el promedio del módulo de rigidez, con su desviación estándar y el coeficiente de variación.

Los módulos de rigidez de cada vía se presentan mediante un diagrama de barras mostradas en las Figuras 21, 22 y 23.

**Tabla 12. Resultados de módulos de rigidez Guaranda - Balzapamba**

NÚMERO	MUESTRA	ESPESOR (mm)	DIÁMETRO (mm)	M. RIGIDEZ (MPa)
1	3-GB	50	100	3937
2	8-GB	50	100	4207
3	10-GB	53	100	3176

PROMEDIO	<b>3773</b>
DESV. EST.	<b>534,63</b>
COEF. VARIACIÓN (%)	<b>14,17</b>

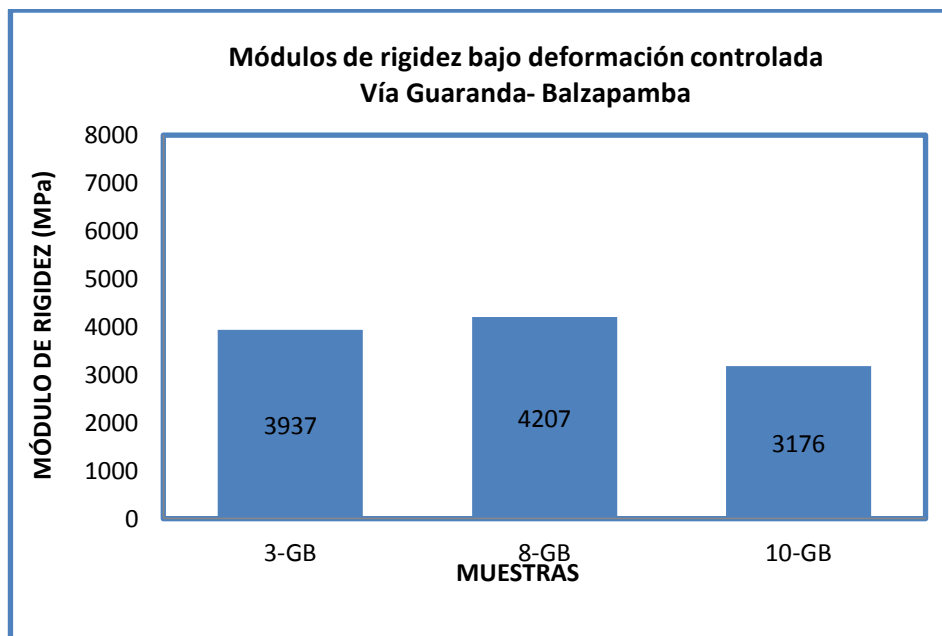


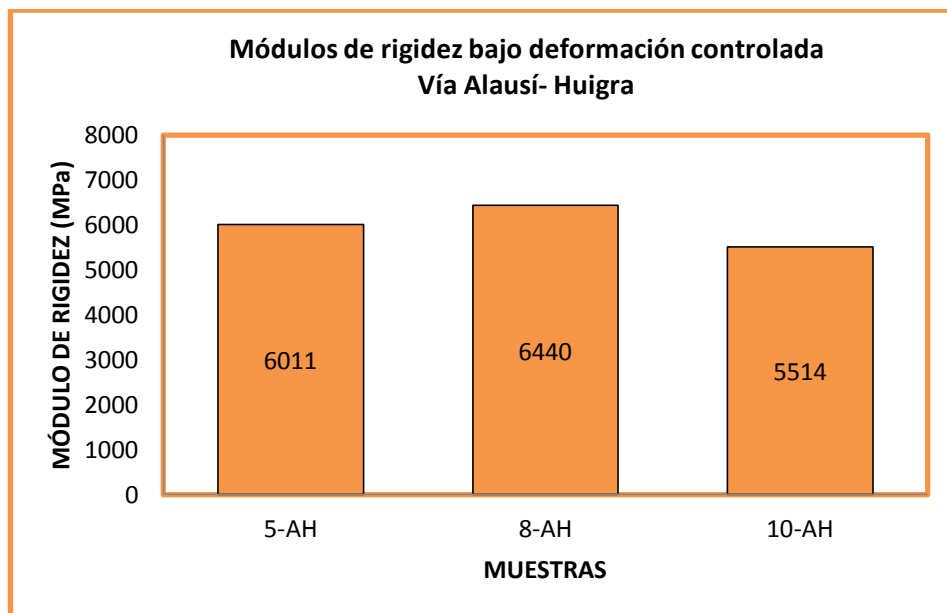
Figura 21. Módulo de rigidez Guaranda – Balzapamba, diagrama de barras

Tabla 13. Resultados de módulos de rigidez Alausí - Huigra

NÚMERO	MUESTRA	ESPESOR (mm)	DIÁMETRO (mm)	M. RIGIDEZ (MPa)
1	1-AH	54	100	6011
3	3-AH	51	100	6440
10	10-AH	50	100	5514

PROMEDIO	<b>5988</b>
DESV. EST.	<b>463,42</b>
COEF. VARIACIÓN (%)	<b>7,74</b>





**Figura 22. Módulo de rigidez Alausí – Huigra, diagrama de barras**

**Tabla 14. Resultados de módulos de rigidez Guasuntos – Chunchi**

NÚMERO	MUESTRA	ESPESOR (mm)	DIÁMETRO (mm)	M. RIGIDEZ (MPa)
1	4-GC	52	100	3892
2	3-GC	48	100	2721
3	6-GC	52	100	3024

PROMEDIO	<b>3212</b>
DESV. EST.	<b>607,79</b>
COEF. VARIACIÓN (%)	<b>18,92</b>

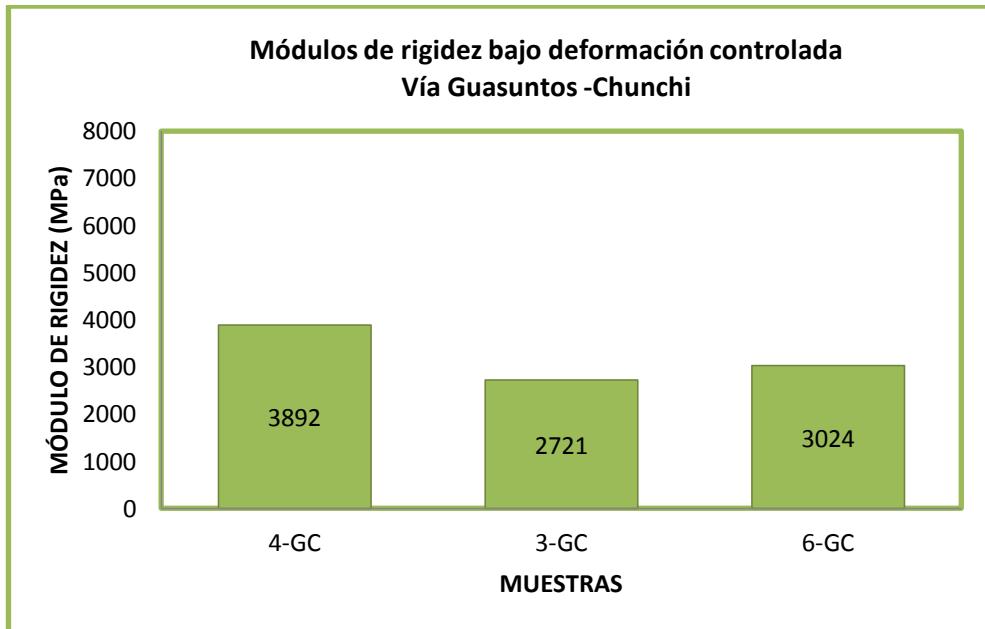


Figura 23. Módulo de rigidez Guasuntos - Chunchi, diagrama de barras

En la figura 24 se muestran las variaciones de los promedios de los módulos de rigidez para cada vía.

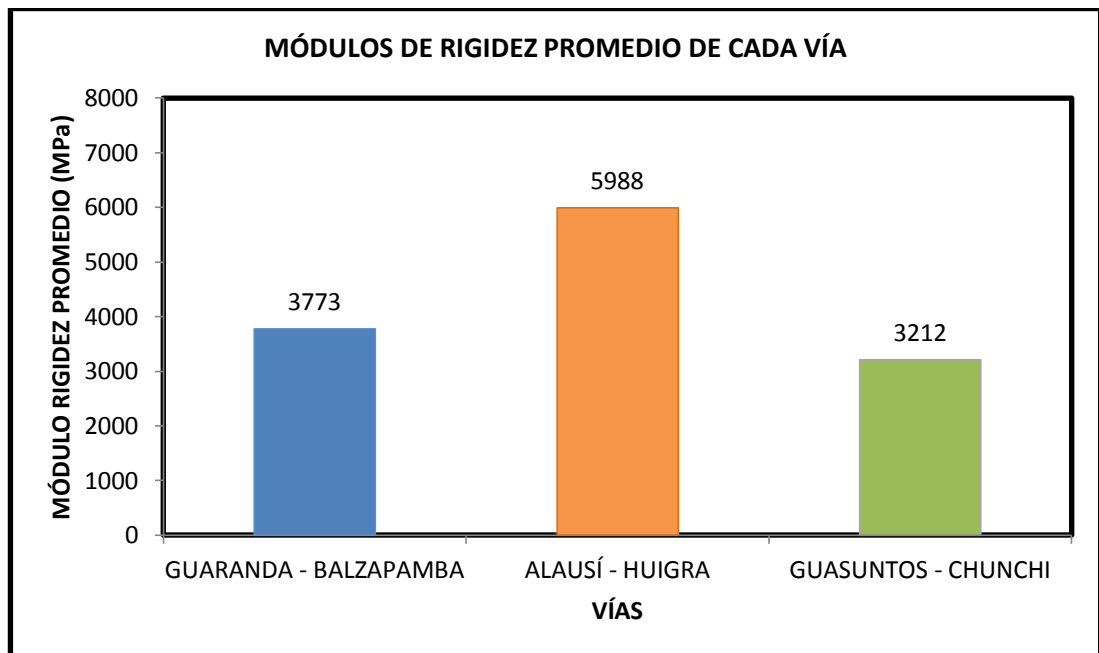


Figura 24. Módulos promedio de rigidez de cada vía

### 4.3.3. Fatiga

#### 4.3.3.1. Resultados

Este ensayo permite determinar la vida de fatiga de una muestra usando el método de tensión indirecta. La carga es aplicada verticalmente en un plano diametral al núcleo de concreto asfáltico. Se mide la deformación horizontal y el número de aplicaciones de carga para llevar a una falla por fractura.



**Figura 25. Núcleos de las vías de la región Sierra ensayados a Fatiga**

Los resultados de la deformación de cada núcleo de las 3 vías de la Sierra se pueden observar en la Tabla 15 y las Figuras 26 y 27 se detallan los diagramas de Esfuerzo y Deformación, respecto al número de repeticiones por fatiga.

VÍAS ESFUERZO KPa	GUARANDA - BALZAPAMBA			ALAUZI - HUIGRA			GUASUNTOS - CHUNCHI		
	REPETI- CIONES	DEFOR- MACIÓN (x 10 <sup>-6</sup> )	MÓDULO RIGIDEZ MPa	REPETI- CIONES	DEFOR- MACIÓN (x 10 <sup>-6</sup> )	MÓDULO RIGIDEZ MPa	REPETI- CIONES	DEFOR- MACIÓN (x 10 <sup>-6</sup> )	MÓDULO RIGIDEZ MPa
50									
100									
150									
200									
200									
250	32435	135	3795	34254	86	5966	55342	112	4558
300	11765	210	2928	6320	105	5838	8787	176	3490
350	6464	217	3311	5285	123	5838	2141	326	2204
400	2631	236	3477	389	211	3879	982	386	2127
450	1892	292	3155	765	187	4944	1236	370	2492
500	1768	353	2901	1028	228	4487	151	457	2245
550	295	497	2269	375	255	4424			
600									
650									
700									
750									

**Tabla 15. Valores de repeticiones, módulos de rigidez y la deformación para cada carga que se sometan a las muestras de cada vía.**

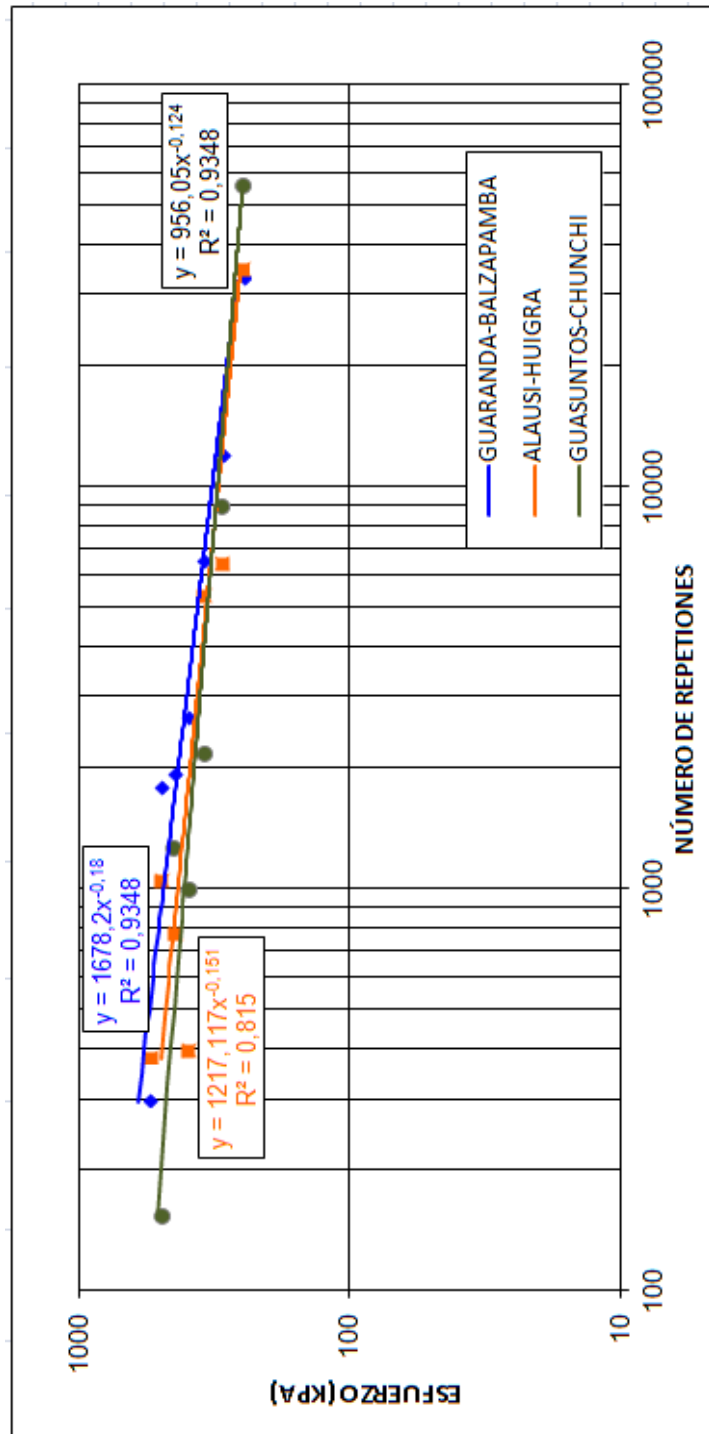


Figura 26. Gráfico de esfuerzo versus número de repeticiones (ambas en escala logarítmica de

3 vías de la región Sierra.

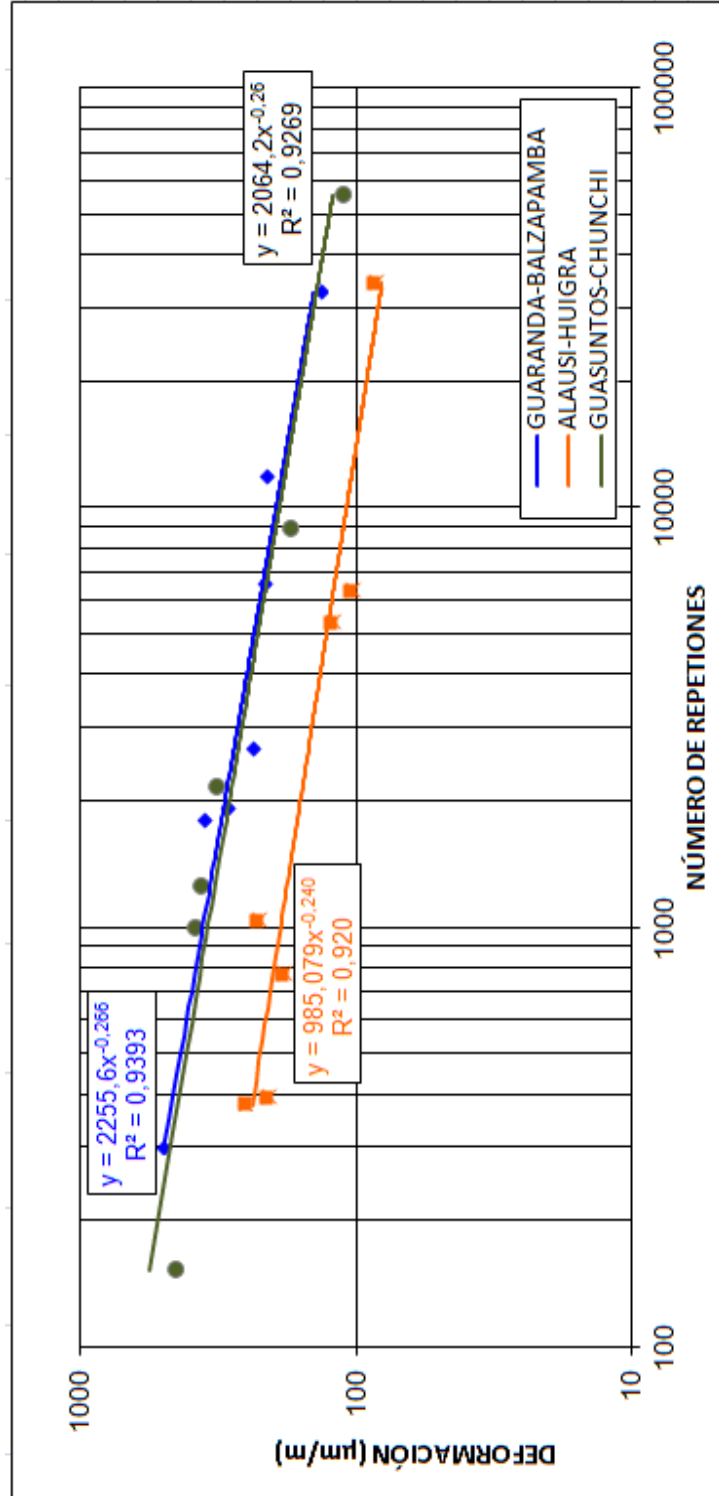


Figura 27. Gráfico de deformación versus número de repeticiones (ambas en escala logarítmica) de 3 vías de la región Sierra.

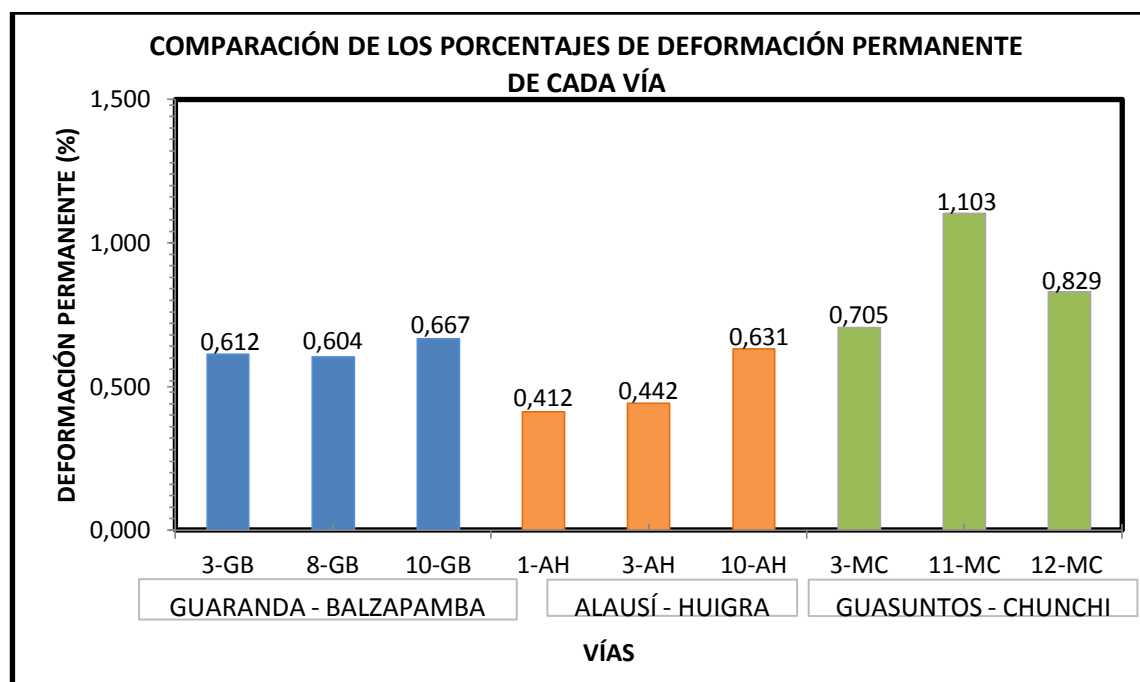
#### 4.3.4. Prueba de Deformación Permanente (Creep Dinámico)

##### 4.3.4.1. Resultados

Se puede observar en la Tabla 16 y en la Figura 28 los porcentajes de deformación de las 3 muestras correspondientes a las tres vías de la región Sierra, a las que se les efectuó algunas operaciones como: promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.

**Tabla 16. Resultados del ensayo del creep dinámico**

VÍA	NÚMERO	MUESTRA	% DEFORMACIÓN	PROMEDIO	DESV. EST.	COEF. VAR.
GUARANDA - BALZAPAMBA	1	3-GB	0,612	0,628	0,034	5,458
	2	8-GB	0,604			
	3	10-GB	0,667			
ALAUÍS - HUIGRA	1	1-AH	0,412	0,495	0,119	24,017
	2	3-AH	0,442			
	3	10-AH	0,631			
GUASUNTOS - CHUNCHI	1	4-GC	0,705	0,879	0,204	23,198
	2	3-GC	1,104			
	3	6-GC	0,829			



**Figura 28. Porcentajes de deformación permanente de las 3 muestras de cada vía correspondiente**

En la figura 29 se indican las variaciones de los porcentajes de deformación permanente promedios para cada vía.

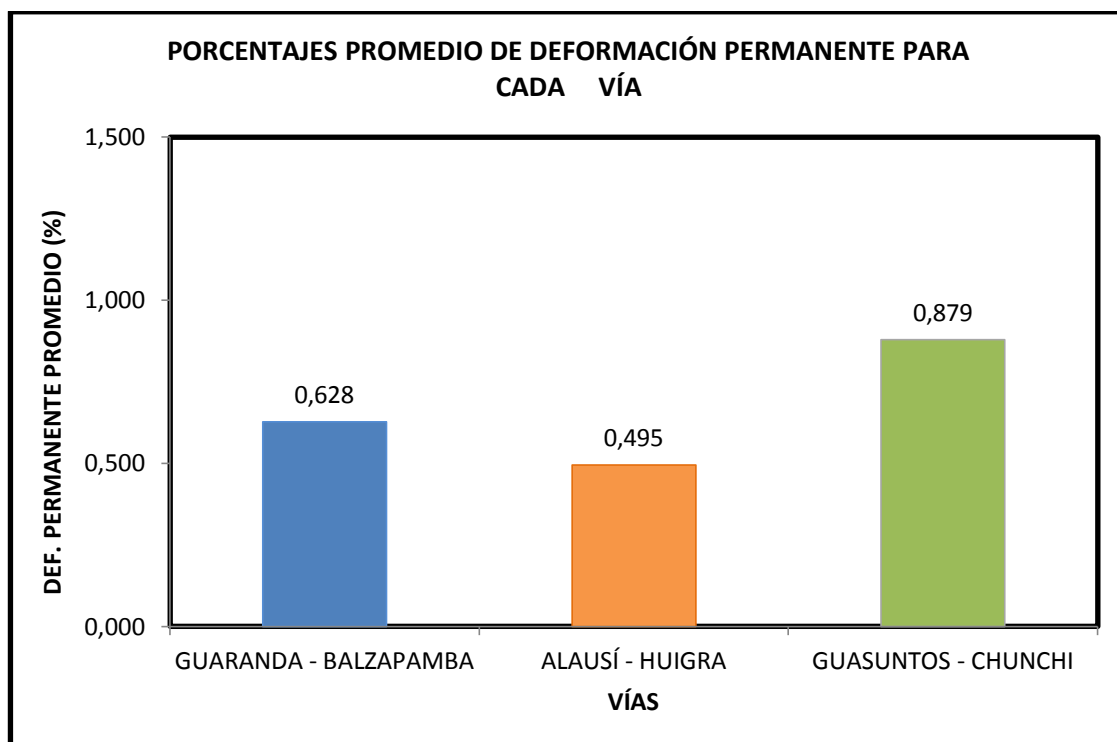


Figura 29. Porcentajes promedios de deformación de cada vía

#### 4.3.5 Análisis de resultados de las pruebas de desempeño

##### Módulo de rigidez

Los resultados obtenidos en la vía Alausí – Huigra son elevados, con un rango aproximado entre 5000 y 7000 MPa, en comparación a los dos vías restantes cuyos valores oscilan entre 2000 y 5000 MPa. Este parámetro indica que la mezcla asfáltica existente probablemente se encuentra envejecida debido a factores que necesitan ser investigados, ya que el asfalto original, el tiempo de colocación y la temperatura ambiente es aproximadamente similar en todas las vías estudiadas. En general, una buena mezcla con 3 a 4 años de colocada deberá ofrecer módulos entre 3000 y 5000 MPa. El coeficiente de variación de la vía Guasuntos – Chunchi fue alto (18.92%) en comparación con las otras dos vías: Guaranda – Balzapamba con 14.17% y Alausí – Huigra con 7.74%.



## **Fatiga**

Se puede observar en la Figura 26 una relación entre el esfuerzo aplicado versus número de repeticiones. En general las rectas se encuentran bastante agrupadas, más aún las correspondientes a la vía Alausí – Huigra (color naranja) y Guasuntos – Chunchi (color verde).

En la Figura 27 se observa el diagrama de deformación versus número de repeticiones. Existe un ordenamiento más diferenciado en este caso, ubicándose la recta de ajuste correspondiente a las mezclas de mayor rigidez en la parte inferior del gráfico, es el caso de la vía Alausí – Huigra (color naranja). Las otras dos rectas de las restantes vías son casi coincidentes.

Solo un coeficiente de correlación “R<sup>2</sup>”, en las dos figuras mencionadas en esta sección es menor a 0.92 y corresponde a Alausí – Huigra (0,815) en la Figura 26.

## **Creep dinámico**

A partir de los resultados de la Tabla 16, puede observarse que:

- ✚ Los valores más bajos respecto a la deformación permanente pertenecen a la vía Alausí – Huigra (0,495 %), algo lógico ya que esta vía presenta los módulos de rigidez más elevados.
- ✚ La vía Guasuntos – Chunchi presenta valores de deformación permanente cercanos a la unidad (0.879 %).
- ✚ En general todas las vías estudiadas en este informe cumplen con las exigencias británicas (menores a 1%).

## CONCLUSIONES

- ✚ En las vías estudiadas, el porcentaje de vacíos que se asocia a la efectividad de la compactación es muy variable de acuerdo a nuestras mediciones y cálculos. En general todos los coeficientes de variación calculados para los vacíos son muy elevados, por encima de 14%. Puede observarse que los daños observados en las vías son mayores en la medida que aumenta el porcentaje de vacíos.
- ✚ Los altos módulos de rigidez obtenidos en la vía Alausí – Huigra junto a su nivel de daños elevados, alertan que en la vía se presentaron posiblemente problemas con la calidad del asfalto original empleado o durante la manipulación del mismo para la fabricación de mezclas (sobrecalentamiento). Este escenario claramente podía haberse determinado en las fases iniciales del proceso constructivo, de haberse realizado entonces pruebas de desempeño.
- ✚ Las leyes de fatiga obtenidas en las diferentes vías muestran que para un mismo nivel de deformación, las mayores repeticiones (a nivel de laboratorio) las originan la vía Guaranda – Balzapamba, el comportamiento de esta a nivel de obra (realidad) puede calificarse como buena. Sin dudas, también incide en este comportamiento: la calidad de los materiales, el proceso constructivo y de manera decisiva, la estructura de pavimentos que origina dicha deformación bajo el esfuerzo. Las menores repeticiones para un mismo nivel de deformación se obtendría en la vía Alausí – Huigra, con el peor estado. El comportamiento a la fatiga de la Guasuntos – Chunchi es muy cercano a la Guaranda – Balzapamba.
- ✚ En el estudio con creep dinámico, es decir, pruebas de compresión cíclica axial, los resultados que se obtuvieron son satisfactorios. Todas las vías estudiadas (Guaranda – Balzapamba, Alausí – Huigra y Guasuntos – Chunchi) cumplen con las exigencias británicas, es decir, deformaciones permanentes menores a 1%.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State of Highway and Transportation Officials. (1993).

*AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures*. U.S.A.

Andaluz, A. X. (2013). *Estudio de Mezclas Asfálticas colocadas en vías de la Región Costa del Ecuador mediante Pruebas de Desempeño*. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Ecuador.

Asphalt Institute. (1997). *Mix design methods for asphalt concrete. MS-2*. (Sixth Edition.). U.S.A.

Archilla, A.R. & Madanat, S. (2000). *Development of a Pavement Rutting Model from Experimental Data*. Journal of Transportation Engineering. 126 (4), pp 291-299.

AUSTROADS, 1992b, Part 4: Guidelines for the Selection of Polymer Modified Binders & Specification for Polymer Modified Binders and Methods for Sampling and Testing, "Proceedings of the Surfacing Workshop, 16th ARRB Conference, Perth, Western Australia, APRG Report No. 7", ARRB Transport Research Ltd, Vermont South, Victoria.

Bahia, H.U., & Kamel, M.A. (2002). Performance Evaluation of Modified Asphalt Binders. Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Winnipeg, Manitoba.

- Barrera, C.E. (2008). *Diseño y Construcción de Pavimentos Tipo Stone Mastic Asphalt en México*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Caro, S., García, C., Caicedo, B. (2001). *Modelo numérico para el estudio del clima en pavimentos flexibles*. XIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Universidad de los Andes, Colombia.
- Committee European of Normalization- CEN 12697 (2000). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalts – Part 25: Cyclic compression test. Part A*.
- Committee European of Normalization- CEN 12697 (2000). *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalts – Part 26: Stiffness. Annex C*.
- Cooper Research Technology Limited. (2002). NU-10 & NU-5. *Operation & Maintenance Manual*. United Kingdom.
- Di Benedetto, H., De la Roche, C., Baaj, H., Pronk, A. & Lundstrom, R. (2004). *Fatigue of Bituminous Mixtures*. *Materials and Structures*, 37 (4), pp 202-216.
- EMOP-Q, (1997). *Taller sobre mezclas asfálticas rígidas, recicladas y micropavimentadas*. Ecuador.

- Garnica, P., Delgado, H., & Sandoval, C.D. (2005). Análisis de varianza del efecto de algunos factores que influyen en la deformación permanente de mezclas asfálticas. *Publicación Técnica IMT* (Nº 272).
- González, S.V, & Velandia, S.E. (2006). *Estado del Arte en el Estudio de la Fatiga de Materiales Bituminosos*. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Hernández, S.K., Rodríguez, L.A., & Serrano, M.A. (2005). *Guía Básica para el Control de Calidad con Mezclas Asfálticas en Caliente*. Tesis de Grado. Universidad de El Salvador.
- Kim, Y.R., Kim, N., & Khosla, N.P. (1991). Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete. ASTM STP 1147 -Effects of aggregates and mineral fillers an asphalt mixture performance. Ed. Richard C. Meininger, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (2002). *Especificaciones Técnicas para la Construcción de Carreteras y Puentes*. MOPT-001-F, Quito – Ecuador.
- Monismith, C.L., Finn, F.N., & Vallejo, B.A. (1989). *A Comprehensive Asphalt Concrete Mixture Design System*. Asphalt Concrete Mix design. STP 1041. ASTM., pp 39-71.

NCHRP (2005). Report 547. *Simple Performance Tests: Summary of Recommended Method and Database*. Transportation Research Board. Washington.

National Asphalt Paving Association. (1995). An Industry Discussion on Superpave Implementacion. NAPA Special Report 174.

Norma AASTHO T 209. *ENSAYO RICE (Densidad Teórica Máxima)*.

Recuperado el 25 de noviembre del 2013, de

<http://www.slideshare.net/UCGcertificacionvial/rice-3411550>

Norma I.N.V.E. 5 - 732 – 07. *Extracción Cuantitativa del Asfalto en Mezclas en Caliente para Pavimentos*.

Recuperado el 27 de noviembre del 2013, de

[ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones\\_Normas\\_I NV-07/Normas/Norma%20INV%20E-732-07.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_I NV-07/Normas/Norma%20INV%20E-732-07.pdf)

Reyes, O.J, Reyes, F.A., & Troncoso, J.R. (2005). *Efecto de la Presión de Contacto y la Temperatura en el Ahuellamiento de una Mezcla*. CILA. Costa Rica.

Rondón, H.A, & Reyes, F.A. (2012). *Influencia de las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá sobre el comportamiento mecánicos de una mezcla*.

Revista Ingeniería de Construcción. Vol. 27 N°1, Abril de 2012, pp 57 – 74.

Colombia.

Rondón, H.A.; Reyes, F.A.; González; L.A.; & Vázquez S. E. (2012).

*Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas*. Bogotá – Colombia: Editorial UD. ( Primera Edición).

Roberts, B.L.; Kandhal, P.S.; Brown E.R.; Lee, D-Y; Kenndy T.W. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construccion*, 2nd. Lanham, M.D., N.A.P.A. Research and Education Foundation.

Rubio, B. (2006). *Patología de Mezclas Asfálticas. Calidad de los Betunes*. Publicación del Centro de Estudios de Trasporte-CEDEX. España.

Tarefder, R.A., Kias, E. & Zaman, A. (2008). *Cracking in Asphalt Concrete under Wet and Dry Conditions*. Pavements & Materials, pp 37-47.

Tarefder, R.A., Zaman, A. & Hobson, K. (2003). *A Laboratory and Statistical Evaluation of Factors Affecting Rutting*. *International Journal of Pavement Engineering*, 4 (1), pp 59-68.

Vila, R. (2012). *Deformaciones Plásticas en la Capa Asfáltica de una vía primaria en la Región Costa del Ecuador*. Alternativas. No. 18. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Ecuador. pp 3-9.