



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

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

**EMPLEO DEL COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE  
PARA EL ESTUDIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS FABRICADAS  
EN PLANTAS DE LA REGIÓN COSTA.**

**AUTOR:**

Guzmán Núñez, Víctor Mauricio

Trabajo de Seminario de Graduación  
Previo a la Obtención del Título de:  
**INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

Ing. Vila Romaní Rolando, 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 el Sr. Víctor Mauricio Guzmán Núñez, como requerimiento parcial para la obtención del Título de INGENIERO CIVIL.

### **TUTOR:**

\_\_\_\_\_  
Ing. Rolando Vila Romaní, PhD

### **REVISORES**

\_\_\_\_\_  
Ing. Claudio Luque Rivas

\_\_\_\_\_  
Dra. Estela Ampuero Velasco, MSc.

### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

\_\_\_\_\_  
Ing. Mario Dueñas Rossi

**Guayaquil, a los 24 del mes de marzo del año 2014**



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

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, Víctor Mauricio Guzmán Núñez**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación: “EMPLEO DEL COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE PARA EL ESTUDIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS FABRICADAS EN PLANTAS DE LA REGIÓN COSTA”, 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 24 del mes de marzo del año 2014**

**EL AUTOR**

---

Víctor Mauricio Guzmán Núñez



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

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **AUTORIZACIÓN**

**Yo, Víctor Mauricio Guzmán Núñez**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “EMPLEO DEL COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE PARA EL ESTUDIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS FABRICADAS EN PLANTAS DE LA REGIÓN COSTA”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 24 del mes de marzo del año 2014**

**EL AUTOR**

---

Víctor Mauricio Guzmán Núñez

## **AGRADECIMIENTO**

Este trabajo de investigación se lo ha realizado en primer lugar gracias a la bendición de Dios, quien día a día nos proporciona ese regalo tan maravilloso que es la vida; a mis padres, quienes con su apoyo moral y económico hicieron posible la culminación del mismo; a mi tutor Ing. Rolando Vila, quien con su inmenso conocimiento investigativo supo guiar adecuadamente el desarrollo del mismo; a los profesores de la Facultad, aquellos que impartieron los conocimientos previos que facilitaron el proceso de este trabajo.

Por último y no menos importante, un eterno agradecimiento a esta prestigiosa Universidad, la misma que cada año recibe a jóvenes y los prepara para un futuro profesional competitivo.

*Víctor Mauricio Guzmán Núñez*

## DEDICATORIA

A mi madre, Livia, quien con su esfuerzo y cariño ha sido la responsable de la persona que soy hoy en día; a mi padre, quien siempre me enseñó el valor del trabajo, el respeto y responsabilidad; a mi familia, en especial a mis hermanos Maritza y Valentin, a mi tíos Clara y César, a mis tíos Omar y Janet, a mi abuelita Melida, a mi primo Freddy, a la Sra. Mercedes, quienes siempre me brindaron su apoyo en esos momentos difíciles y con los cuales compartí muchas alegrías. A mis amigos, que con su apoyo moral supieron fomentar en mí el entusiasmo por seguir adelante; a mi novia que fue mi inspiración desde que la conocí y que siempre estuvo pendiente de mí.

*Víctor Mauricio Guzmán Núñez*

## **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

Ing. Rolando Vila Romaní, 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

AGRADECIMIENTO .....	v
DEDICATORIA .....	vi
RESUMEN (ABSTRACT) .....	xvii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes: .....	1
1.2. Descripción del problema: .....	2
1.3. Justificación del tema:.....	2
1.3.1. Punto de vista científico: .....	2
1.3.2. Punto de vista social: .....	3
1.4. Objeto de estudio, características, entorno:.....	3
1.5. Contextualización en tiempo y espacio, establecimiento de los marcos en los que el trabajo se desarrollará: .....	3
1.6. Objetivos:.....	4
1.6.1. Objetivo general: .....	4
1.6.2. Objetivos específicos: .....	4
1.7. Preguntas de investigación:.....	4
1.8. Enfoque metodológico: .....	4
CAPÍTULO 2: CONSIDERACIONES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	6
2.1. Tipos de mezclas asfálticas: .....	6
2.2. Mezclas asfálticas en caliente: .....	6
2.3. Cemento asfáltico: .....	7
2.4. Agregados minerales:.....	9
CAPÍTULO 3: PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS .....	11
3.1. Definiciones: .....	11
3.2. Diagrama de componentes:.....	13

3.3. Fórmulas para calcular los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica compactada: .....	15
<b>CAPÍTULO 4: MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....</b>	<b>18</b>
4.1. Método Marshall: .....	18
4.1.1. Requisitos del Agregado mineral:.....	19
4.1.2. Requisitos de la granulometría:.....	20
4.1.3. Requisitos volumétricos: .....	20
4.2. Método Superpave: .....	23
4.2.1. Requisitos del agregado pétreo: .....	23
4.2.2. Requisitos de la granulometría:.....	24
4.2.3. Requisitos de compactación: .....	27
4.2.4. Requisitos volumétricos: .....	29
4.2.5. Análisis de datos de la compactación: .....	30
<b>CAPÍTULO 5: PLANTAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE LA REGIÓN COSTA .....</b>	<b>33</b>
5.1. Criterios generales de la Región Costa: .....	33
5.2. Plantas en estudio de la Región Costa: .....	35
<b>CAPÍTULO 6: COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE PINE AFGB1:.....</b>	<b>37</b>
6.1. Historia:.....	37
6.2. Características:.....	37
6.3. Especificaciones técnicas: .....	38
6.4. Operación: .....	40
6.4.1. Controles del Compactador.....	40
6.4.2. Interruptor de encendido principal.....	41
6.4.3. Botón de emergencia .....	42
6.4.4. Panel de control principal .....	43
6.4.5. Teclas de función .....	44
6.5. Mantenimiento: .....	49

6.5.1. Lubricación:.....	49
6.5.2. Ajuste de abrazaderas: .....	56
6.5.3. Sistema hidráulico:.....	58
6.5.4. Enganches de retención del molde:.....	59
6.5.5. Limpieza del equipo de compactación: .....	60
<b>CAPÍTULO 7: PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS .....</b>	<b>61</b>
7.1. Proceso de preparación del espécimen compactado por Metodología Superpave: .....	61
7.2. Proceso de preparación del espécimen compactado por Metodología Marshall:.....	73
7.3. Proceso para la determinación de la Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica (Gmb):.....	78
7.3.1. Para briquetas tipo Marshall:.....	78
7.3.2. Para cilindros tipo Superpave: .....	79
7.4. Proceso para la determinación del valor de estabilidad y flujo de las briquetas tipo Marshall:.....	81
7.5. Proceso para la determinación de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica (Gmm):.....	84
7.6. Resultados obtenidos: .....	87
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>114</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>116</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2-1:</b>	Características del Cemento Asfáltico AC-20.....	7
<b>Tabla 4-1:</b>	Requisitos de calidad del material mineral para carpetas asfálticas de granulometría densa.....	19
<b>Tabla 4-2:</b>	Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa.....	20
<b>Tabla 4-3:</b>	Requisitos volumétricos de mezclas Marshall.....	21
<b>Tabla 4-4:</b>	Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral (VMA)..	21
<b>Tabla 4-5:</b>	Requisitos de propiedades de consenso del agregado.....	23
<b>Tabla 4-6:</b>	Requisitos de propiedades de origen del agregado.....	24
<b>Tabla 4-7:</b>	Puntos de control de Superpave para diferentes tamaños nominales de agregados.....	26
<b>Tabla 4-8:</b>	Designaciones de las mezclas Superpave.....	27
<b>Tabla 4-9:</b>	Especificaciones del Compactador Giratorio Superpave.....	27
<b>Tabla 4-10:</b>	Número de giros de compactación según Superpave.....	28
<b>Tabla 4-11:</b>	Requisitos volumétricos del diseño de mezclas Superpave.....	29
<b>Tabla 5-1:</b>	Promedio de las temperaturas máximas del aire anual registradas en la Región Costa.....	33
<b>Tabla 5-2:</b>	Agregados minerales utilizados en cada planta.....	35
<b>Tabla 5-3:</b>	Parámetros básicos de la mezcla utilizados en cada planta....	36
<b>Tabla 7-1:</b>	Factores de corrección por altura en la Estabilidad Marshall...83	
<b>Tabla 7-2:</b>	Gravedad específica teórica máxima de las mezclas (Rice)...87	
<b>Tabla 7-3:</b>	Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica de la Planta de “Durán”.....	88
<b>Tabla 7-4:</b>	Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica de la Planta de “Km.26” .....	89
<b>Tabla 7-5:</b>	Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica de la Planta de “Vía a la Costa” .....	90
<b>Tabla 7-6:</b>	Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica de la Planta de “Chivería” .....	91
<b>Tabla 7-7:</b>	Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica de la Planta de “Picoazá”.....	92
<b>Tabla 7-8:</b>	Resumen de parámetros volumétricos de las plantas asfálticas.....	93
<b>Tabla 7-9:</b>	Resumen de Estabilidad y Flujo Marshall de las plantas asfálticas.....	95
<b>Tabla 7-10:</b>	Parámetros de densificación en el C.G.S. Planta “Durán”.....	96

<b>Tabla 7-11:</b> Parámetros de densificación en el C.G.S. Planta “Km.26”	98
<b>Tabla 7-12:</b> Parámetros de densificación en el C.G.S. Planta “Vía a la Costa”	100
<b>Tabla 7-13:</b> Parámetros de densificación en el C.G.S. Planta “Chivería”	102
<b>Tabla 7-14:</b> Parámetros de densificación en el C.G.S. Planta “Picoazá”	104
<b>Tabla 7-15:</b> Porcentaje de $G_{mm}$ promedio para las 5 mezclas asfálticas en estudio	106
<b>Tabla 7-16:</b> Resumen de parámetros volumétricos de las plantas asfálticas	109
<b>Tabla 7-17:</b> Comparación de resultados para ambos métodos de diseño de mezclas asfálticas	110

<b>Anexo 1:</b> Gravedad específica bruta de las mezclas asfálticas para briquetas tipo Marshall (Gmb)	116
<b>Anexo 2:</b> Valor de la Estabilidad y Flujo Marshall para las mezclas de cada planta asfáltica	117
<b>Anexo 3:</b> Gravedad específica bruta de las mezclas asfálticas para cilindros tipo Superpave (Gmb)	119
<b>Anexo 4:</b> Datos de las alturas de los cilindros para cada número de giro exportados del CGS para “Durán”	121
<b>Anexo 5:</b> Datos de las alturas de los cilindros para cada número de giro exportados del CGS para “Km.26”	122
<b>Anexo 6:</b> Datos de las alturas de los cilindros para cada número de giro exportados del CGS para “Vía a la Costa”	123
<b>Anexo 7:</b> Datos de las alturas de los cilindros para cada número de giro exportados del CGS para “Chivería”	124
<b>Anexo 8:</b> Datos de las alturas de los cilindros para cada número de giro exportados del CGS para “Picoazá”	125

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 2-1:</b> Comportamiento del flujo del cemento asfáltico.....	9
<b>Gráfico 2-2:</b> Tolvas que contienen los agregados en una planta de mezcla asfáltica.....	10
<b>Gráfico 3-1:</b> Ilustración de volúmenes en el agregado mineral.....	12
<b>Gráfico 3-2:</b> Diagrama esquemático de fases de una mezcla asfáltica compactada.....	13
<b>Gráfico 4-1:</b> Esquema de los parámetros volumétricos con relación al contenido de asfalto de una mezcla en particular.....	22
<b>Gráfico 4-2:</b> Curva de máxima densidad y límites para la granulometría con un tamaño máximo de agregado de 19 mm.....	25
<b>Gráfico 4-3:</b> Datos de la densificación para una mezcla de prueba.....	31
<b>Gráfico 4-4:</b> Curvas de densificación para una mezcla de prueba.....	31
<b>Gráfico 4-5:</b> Datos del %G <sub>mm</sub> para los números de giros inicial, diseño y máximo.....	32
<b>Gráfico 5-1:</b> Selección de los números de giros de compactación según Superpave.....	34
<b>Gráfico 6-1:</b> Modelo Pine AFGB1 ubicado en el Laboratorio de Carreteras de la Facultad de Ingeniería de la U.C.S.G.....	38
<b>Gráfico 6-2:</b> Controles principales del Compactador AFGB1.....	40
<b>Gráfico 6-3:</b> Interruptor de encendido principal (con placa amarilla) en posición vertical.....	41
<b>Gráfico 6-4:</b> Botón “Emergency Stop” (rojo) en la consola principal del AFGB1.....	42
<b>Gráfico 6-5:</b> Panel de control principal E1022.....	43
<b>Gráfico 6-6:</b> Área de visualización del panel de control principal.....	44
<b>Gráfico 6-7:</b> Lubricación del <i>sopORTE esférico</i> .....	50
<b>Gráfico 6-8:</b> Lubricación de la placa metálica en la cabeza giratoria.....	51
<b>Gráfico 6-9:</b> Lubricación del <i>cojinete cónico</i> dentro de la cámara de compactación.....	52
<b>Gráfico 6-10:</b> Lubricación de la <i>placa de presión</i> .....	53
<b>Gráfico 6-11:</b> <i>Plato de molde superior</i> lubricado con grasa de molibdeno...54	54
<b>Gráfico 6-12:</b> Lubricación de una <i>sujeción de la abrazadera</i> .....	55
<b>Gráfico 6-13:</b> Polvo de disulfuro de molibdeno en borde superior de cámara.....	56
<b>Gráfico 6-14:</b> Ajuste de las abrazaderas en la cámara de compactación....	57
<b>Gráfico 6-15:</b> Chequeo del nivel de aceite hidráulico.....	59

**Gráfico 6-16:** Limpieza del fondo de la cámara de compactación.....60

<b>Gráfico 7-1:</b> Obtención de mezcla asfáltica en caliente directamente de la planta.....	61
<b>Gráfico 7-2:</b> Bandeja metálica con mezcla asfáltica siendo pesada.....	62
<b>Gráfico 7-3:</b> Bandeja metálica con mezcla, molde y platos de base dentro de horno eléctrico.....	63
<b>Gráfico 7-4:</b> Función SETUP.....	64
<b>Gráfico 7-5:</b> Plato base inferior introducido con el dispositivo magnético...	64
<b>Gráfico 7-6:</b> Platos base y molde compactación.....	65
<b>Gráfico 7-7:</b> Embudo y cuchara para verter la mezcla en el molde.....	65
<b>Gráfico 7-8:</b> Pinzas con clavijas para desplazar el molde lleno de mezcla..	66
<b>Gráfico 7-9:</b> Molde siendo ingresado en la cámara de compactación.....	67
<b>Gráfico 7-10:</b> Abrazaderas asegurando la cámara de compactación.....	67
<b>Gráfico 7-11:</b> Parámetros de una compactación en proceso.....	68
<b>Gráfico 7-12:</b> Molde listo para ser extraído.....	69
<b>Gráfico 7-13:</b> Embudo, muestra siendo extraída y dispositivo para elevar la briqueta.....	70
<b>Gráfico 7-14:</b> Extracción manual del molde con las pinzas de clavijas.....	71
<b>Gráfico 7-15:</b> Impresora de cinta conectada al C.G.S.....	72
<b>Gráfico 7-16:</b> Molde, platos de base y briqueta después de un ensayo de compactación.....	72
<b>Gráfico 7-17:</b> Moldes de compactación (4" de diámetro x 3" de altura) con sus respectivos collarines y bases.....	73
<b>Gráfico 7-18:</b> Mezcla asfáltica siendo recalentada en una cocineta convencional.....	74
<b>Gráfico 7-19:</b> Compactador electromecánico para el ensayo Marshall.....	75
<b>Gráfico 7-20:</b> Compactación tipo Marshall en proceso.....	76
<b>Gráfico 7-21:</b> Molde sumergido completamente en agua.....	77
<b>Gráfico 7-22:</b> Molde colocado en el extractor de muestras.....	77
<b>Gráfico 7-23:</b> Balanza electrónica de precisión 0,1 g registrando el Peso Seco.....	78
<b>Gráfico 7-24:</b> Foto comparativa de briquetas y cilindros.....	80
<b>Gráfico 7-25:</b> Briquetas tipo Marshall enumeradas con relación a cada planta asfáltica.....	81
<b>Gráfico 7-26:</b> Briquetas tipo Marshall sumergidas en un baño de agua a 60°C.....	82
<b>Gráfico 7-27:</b> Briqueta colocada en la prensa electrónica Marshall.....	82
<b>Gráfico 7-28:</b> Curvas de densificación para la mezcla asfáltica de "Durán".....	97
<b>Gráfico 7-29:</b> Curvas de densificación para la mezcla asfáltica de "Km.26".....	99

<b>Gráfico 7-30:</b> Curvas de densificación para la mezcla asfáltica de “Vía a la Costa”.....	101
<b>Gráfico 7-31:</b> Curvas de densificación para la mezcla asfáltica de “Chivería”.....	103
<b>Gráfico 7-32:</b> Curvas de densificación para la mezcla asfáltica de “Picoazá”.....	105
<b>Gráfico 7-33:</b> Curvas de densificación para las 5 mezclas asfálticas en estudio.....	107
<b>Anexo 9:</b> Granulometría del agregado combinado utilizado en la mezcla asfáltica de “Durán”.....	126
<b>Anexo 10:</b> Granulometría del agregado combinado utilizado en la mezcla asfáltica de “Km.26”.....	127
<b>Anexo 11:</b> Granulometría del agregado combinado utilizado en la mezcla asfáltica de “Vía a la Costa”.....	128
<b>Anexo 12:</b> Granulometría del agregado combinado utilizado en la mezcla asfáltica de “Chivería”.....	129
<b>Anexo 13:</b> Granulometría del agregado combinado utilizado en la mezcla asfáltica de “Picoazá”.....	130

## RESUMEN (ABSTRACT)

El presente trabajo investigativo presenta el análisis de 5 tipos de mezclas asfálticas de granulometría densa provenientes de plantas situadas en la Región Costa, comparándose el método de diseño Marshall rutinario con el método Superpave que actualmente se posiciona a nivel mundial. Para ello se consideraron los parámetros volumétricos de mayor interés en una mezcla, como son: vacíos de aire ( $V_a$ ), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos rellenos con asfalto (VFA), para así efectuar una comparación con lo establecido en dichas metodologías y los resultados que se alcancen.

Estos parámetros fueron calculados en base a dos tipos de especímenes compactados: el primero obtenido por medio de la compactación convencional con martillo Marshall (briqueta) y el segundo producido en el Compactador Giratorio Superpave (cilindro). En el trabajo se hace énfasis en la utilización de este nuevo equipo de compactación giratoria, dedicándosele un capítulo entero al estudio de las características que presenta, especificaciones técnicas, operación, mantenimiento y una breve historia, así como el procedimiento que se debe seguir para obtener una muestra compactada por esta metodología.

A las muestras compactadas se les realizaron los ensayos usuales de: gravedad específica bruta (Gmb), estabilidad y flujo Marshall así como el Rice (Gmm). Se exponen además los requisitos que requieren ambos métodos de diseño, en cuanto a: agregado pétreo, granulometría, compactación y la volumetría en sí.

**Palabras Claves:** vacíos, gravedad, estabilidad, flujo, Rice, compactación, Superpave, Marshall.

# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

## **1.1. Antecedentes:**

A mediados de la década de los noventa el Congreso de los Estados Unidos preocupado por mejorar el desempeño y duración de las carreteras en ese entonces, estableció un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación, bajo el nombre de SHRP (Strategic Highway Research Program). De la cantidad antes citada, un tercio fue destinado al desarrollo de especificaciones técnicas sobre pruebas de desempeño (laboratorio) de mezclas asfálticas, con el objetivo de poder plasmar dichos resultados hacia el campo (vías).

Después de varios estudios, el producto final fue un sistema con tal tecnología que era capaz de diseñar mezclas asfálticas, especificar agregados y ligante asfáltico, su respectivo análisis y principalmente ejecutar pruebas que permitían predecir el desempeño de la mezcla ante los principales problemas que sufren estos tipos de pavimentos flexibles como son: el ahuellamiento, las fisuras por fatiga y por bajas temperaturas. A este nuevo sistema se lo denominó Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement).

Una de las principales características del nuevo método de diseño de mezclas asfálticas fue el desarrollo de un sistema de compactación giratoria a cierta velocidad, ángulo horizontal y presión vertical, denominado Compactador Giratorio Superpave (CGS). Este tipo de compactador forma parte del Diseño Volumétrico de las mezclas, participando así en todos los niveles de diseño dispuestos por este método.

En la actualidad, en el Ecuador todavía no se ha planteado un proyecto de investigación sobre este tema, pero si se ha dado uso del CGS en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (P.U.C.E.), como una inversión de la Fiscalización del Aeropuerto Internacional de Quito en la localidad de Tababela, en donde se requirió realizar muchos ensayos de diseño y control a mezclas asfálticas, más no como una investigación propiamente. Por tal

motivo, la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, tomando en cuenta la necesidad de ejecutar programas de investigación, principalmente el Diseño Volumétrico de mezclas asfálticas, adquirió el Compactador Giratorio Superpave.

## **1.2. Descripción del problema:**

El Método Marshall, que es uno de los métodos más utilizados para el diseño de mezclas asfálticas, presenta varios inconvenientes que han sido investigados últimamente, en donde se ha comprendido que el principal problema radica en la preparación de las briquetas, las mismas que son compactadas mediante golpes del martillo Marshall (impactos), lo cual no tiene ninguna relación con la práctica constructiva a nivel de obra. Además, el volumen de tránsito para el cual la mezcla va a ser diseñada en el Método Marshall se refleja solamente la variación del número de golpes/cara para la compactación de las briquetas tipo Marshall, en este caso de 35, 50 y 75 golpes /cara si los tráficos son liviano, medio y pesado respectivamente, por lo que no estaría simulando la densificación que realmente tendría el pavimento en obra y con esto dar lugar a mezclas asfálticas muy susceptibles a fisuras por ahuellamiento y adicionalmente requerir contenido de ligante asfáltico mayor a los necesarios, encareciendo consecuentemente la vía en estudio.

Por otra parte, los parámetros resistentes que son utilizados por este método son muy empíricos.

## **1.3. Justificación del tema:**

### **1.3.1. Punto de vista científico:**

Con el objetivo de reemplazar los métodos antiguos de diseño de mezclas asfálticas, surge con esto la necesidad del estudio de esta nueva

metodología, que ya se emplea en muchos países a nivel mundial pero con excepción de algunos que se encuentran al margen de ésta tecnología de punta, como es el caso de Ecuador.

Además Superpave en estos últimos años, ha presentado un avance en lo que respecta a la selección de la mezcla combinada de agregados, el ligante asfáltico y principalmente el proceso de compactación de la mezcla asfáltica.

### **1.3.2. Punto de vista social:**

El SHRP fue establecido con el fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras, volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas, consiguiendo así una mejor infraestructura vial (desarrollo del país).

### **1.4. Objeto de estudio, características, entorno:**

El principal objeto de estudio son las mezclas asfálticas, que para este caso en particular son fabricadas en sus respectivas plantas con un mismo tipo de Asfalto AC-20 (producido en la Refinería Estatal de Esmeraldas) pero con las combinaciones de agregados características de cada planta y procedentes de distintas fuentes de aprovisionamiento (canteras o minas) de la región Costa.

### **1.5. Contextualización en tiempo y espacio, establecimiento de los marcos en los que el trabajo se desarrollará:**

Mediante la obtención de mezclas asfálticas en caliente directamente de las plantas involucradas, se procedieron a los ensayos respectivos, principalmente en el Compactador Giratorio Superpave, en el Laboratorio de Carreteras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

## **1.6. Objetivos:**

### **1.6.1. Objetivo general:**

Contrastar los diseños de mezclas asfálticas convencionales por el Método Marshall producidas en 5 plantas de la región costa, con los parámetros de diseño obtenidos empleando el Compactador Giratorio Superpave sobre las mismas mezclas.

### **1.6.2. Objetivos específicos:**

- Obtener la *curva de densificación* para las mezclas asfálticas correspondientes a las plantas seleccionadas.
- Calcular los parámetros volumétricos relacionados con las mezclas, es decir: vacíos en la mezcla (Va), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos rellenos con asfalto (VFA) y Rice (Gmm).
- Analizar los resultados obtenidos por ambos métodos de manera particular y realizar una comparación entre ambas metodologías en base a los parámetros antes mencionados.

## **1.7. Preguntas de investigación:**

Hasta qué punto es confiable y exacto el diseño Marshall respecto a los porcentajes óptimos de asfalto que se necesitan para la fabricación de las mezclas y a los parámetros volumétricos de referencia para la construcción de capas asfálticas.

## **1.8. Enfoque metodológico:**

El trabajo presentado responde al Enfoque Cuantitativo (porque se estudiaron las mezclas asfálticas como un objeto) y Tipo Descriptivo (ya que se busca caracterizar las mezclas por medio de comparaciones). El método

empleado es el *teórico-práctico*, con análisis y síntesis, y un enfoque sistemático estructural.

Se desarrolla en tres etapas:

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

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

1. Marco teórico conceptual:
  - Revisión bibliográfica.
  - Descripción de cada prueba, procedimiento de trabajo, parámetros involucrados y fórmulas de cálculo.
2. Desarrollo experimental:
  - Caracterización de las mezclas a ensayar (cinco mezclas).
  - Preparación de briquetas Tipo Marshall y Tipo Superpave.
  - Realización de distintos ensayos.
3. Análisis de resultados.
  - Comparación de resultados por los procedimientos Marshall y Superpave.
  - Conclusiones.
  - Recomendaciones.

## **CAPÍTULO 2: CONSIDERACIONES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS**

### **2.1. Tipos de mezclas asfálticas:**

Las mezclas asfálticas poseen varias clasificaciones, las cuales dependen de parámetros como las fracciones del agregado pétreo, las cuales dan lugar a subdivisiones como el mástico asfáltico, mortero asfáltico, macadam asfáltico y concreto asfáltico; así mismo como la temperatura, la cual la subdivide en mezclas en caliente y mezclas en frío; si el parámetro a considerar es el porcentaje de vacíos de aire, entonces las mezclas pueden ser densas o cerradas (menos de 6%), semidensas o semicerradas (entre el 6% y 12%), abiertas y porosas (entre el 12% y 18% o más del 20%); y si la curva granulométrica es el parámetro a discutir, en tal caso se trata de mezclas asfálticas continuas o discontinuas. (Garnica et al, 2005).

En cuanto a las *Mezclas asfálticas en Caliente*, se las designa así, debido a que tanto el agregado mineral y el cemento asfáltico se calientan a la misma temperatura previo al mezclado respectivo para así conseguir una buena adherencia entre ambos componentes. Además se debe recalcar que la proporción en peso del agregado (entre 93% a 97%) y el contenido de asfalto (3% a 7%) debe ser diseñada con respecto a la masa total de la mezcla.

### **2.2. Mezclas asfálticas en caliente:**

La H.M.A. (Hot Mix Asphalt) es el material que constituye la carpeta superficial de los pavimentos flexibles, compuesto de un ligante asfáltico y un agregado mineral. El ligante asfáltico actúa como un agente aglutinante de las partículas minerales en una masa cohesiva y además por presentar impermeabilidad frente al agua, le da el mismo efecto a la mezcla en sí. El

agregado mineral, actúa como un esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez al sistema.

Entonces ambos componentes afectan al conjunto de mezcla, proporcionándole a la misma, sus propiedades individuales y la interrelación entre ellos.

### 2.3. Cemento asfáltico:

Es un material bituminoso de color negro constituido por elementos como asfaltenos, resinas y aceites, los mismos que le proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad. Puede ser sólido o semisólido, dependiendo la temperatura, puede presentar consistencia blanda (hasta llegar a ser líquido) a elevadas temperaturas y propiedades cementantes a temperatura ambiente.

El cemento asfáltico indicado por el MTOP para emplear en nuestro país es el tipo AC-20 de acuerdo a la normativa ASTM D-3381 (Tabla 2), que presenta las siguientes características:

Tabla 2-1: Características del Cemento Asfáltico AC-20.

PROPIEDAD	NORMA	UNIDAD	AC 20	
			Mínimo	Máximo
<b>Penetración, 25 °C, 100g.,5s.</b>	ASTM D-5	0.1 mm	60	-
<b>Flash Point, Copa Cleveland</b>	ASTM D-92	°C	232	-
<b>Viscosidad Dinámica 60 °C</b>	ASTM D-4402	cP	160.000	240.000
<b>Viscosidad Cinemática, 135 °C</b>	ASTM D 2170	cSt	300	
<b>Solubilidad en Tricloroetileno</b>	ASTM D-2042	%w	99	-

<b>ENVEJECIMIENTO TFOT, 163 °C, 5h</b>				
<b>Ductilidad, 25°C, 5cm/min</b>	ASTM D 113	cm	50	-
<b>Viscosidad Dinámica 60 °C</b>	ASTM D 4402	cP	-	1.000.000

Fuente: ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, 2001.

Las características más importantes del cemento asfáltico que delimitan el comportamiento de la mezcla asfáltica son: la susceptibilidad a la temperatura, la viscoelasticidad y el envejecimiento.

Sin duda alguna, la característica que afecta especialmente a las propiedades mensurables de la mezcla es la susceptibilidad a la temperatura, acompañada con el tiempo en que aplique una carga en particular (velocidad), ya que para un mismo tipo de asfalto y carga, se pueden variar los resultados al alterar el tiempo de permanencia de la carga aplicada. Es decir en el análisis de mezclas asfálticas se debe especificar la temperatura y velocidad de carga.

Conforme lo que muestra la siguiente ilustración, el efecto combinado que produce el tiempo y la temperatura puede exponer resultados similares considerando la variación de ambos parámetros, por ejemplo, en el caso de la fluencia del asfalto, la cantidad que fluye en 1 hora a 60°C es equivalente para la que lo hace en 10 horas pero a 25°C.

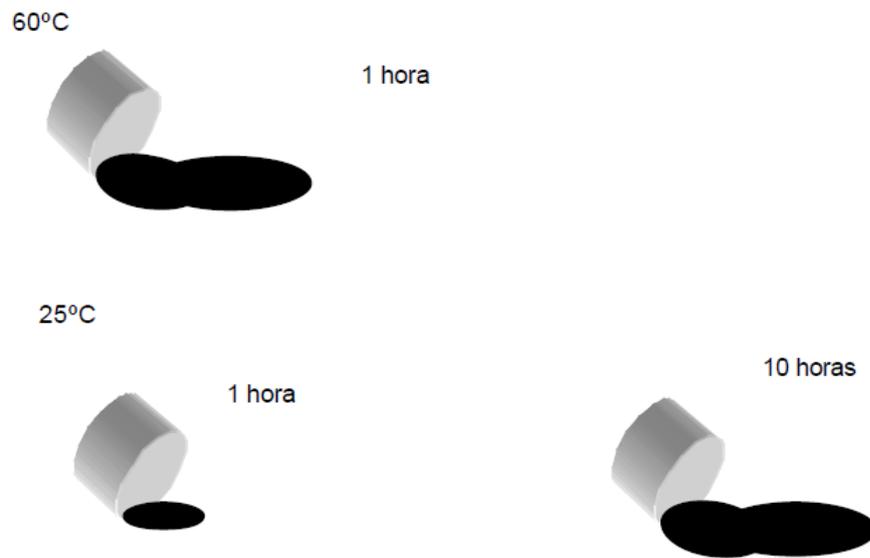


Gráfico 2-1: Comportamiento del flujo del cemento asfáltico.

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1996.

#### 2.4. Agregados minerales:

Los agregados utilizados en la elaboración de mezclas asfálticas pueden ser de origen natural, triturado o sintético. Los que se extraen de ríos y otras fuentes naturales, sin ningún procesamiento para ser utilizado en la mezcla, son los *agregados naturales*; los que son triturados mecánicamente en canteras hasta alcanzar el tamaño deseado, son los *agregados triturados o procesados*; y los que provienen de subproductos industriales, como por ejemplo de la escoria de altos hornos, son los llamados *agregados sintéticos*.



Gráfico 2-2: Tolvas que contienen los agregados en una planta de mezcla asfáltica.

## CAPÍTULO 3: PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 3.1. Definiciones:

- **$G_{sb}$  (Gravedad específica bruta del agregado):** Es la relación entre el peso seco de una unidad de volumen de agregado (incluyendo el volumen de agua contenida en los poros superficiales), que corresponde a la condición del agregado saturado y superficialmente seco, y el peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura. El procedimiento de ensayo para calcular este parámetro consta en la norma AASHTO T84 y AASHTO T85.
- **$G_{se}$  (Gravedad específica efectiva del agregado):** Es la relación entre el peso seco de una unidad de volumen efectivo de agregado (excluyendo el volumen de los poros llenos de asfalto), y el peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura. A diferencia de la  $G_{sb}$ , esta se calcula a partir de la Gravedad Específica Teórica Máxima de la mezcla ( $G_{mm}$ ) y el contenido de asfalto ( $P_b$ ).
- **$G_b$  (Gravedad específica del ligante asfáltico):** Es la relación entre el peso de una unidad de volumen de ligante y el peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura. El procedimiento de ensayo para calcular este parámetro consta en la norma ASTM D 70. Los valores se especifican entre 1,015 y 1,05.

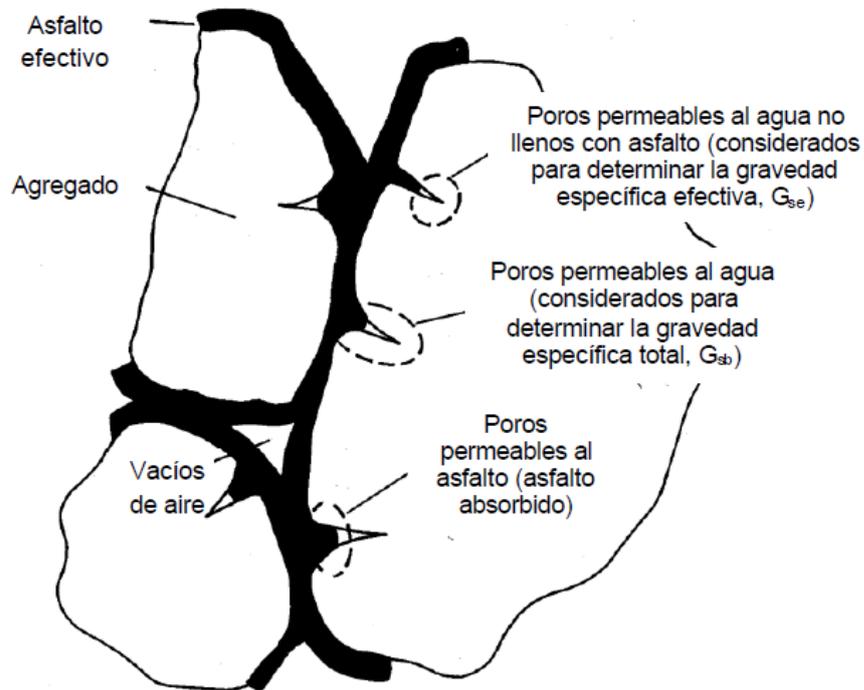


Gráfico 3-1: Ilustración de volúmenes en el agregado mineral.

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1996.

- **$G_{mb}$  (Gravedad específica bruta de la mezcla):** Es la relación entre el peso seco de una unidad de volumen de H.M.A. compactada (incluyendo vacíos de aire), y el peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura. El procedimiento de ensayo para calcular este parámetro consta en la norma AASHTO T166.
- **$G_{mm}$  (Gravedad específica teórica máxima de la mezcla):** Es la relación entre el peso seco de una unidad de volumen de H.M.A. suelta (sin incluir vacíos de aire), y el peso de igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura. El procedimiento de ensayo para calcular este parámetro consta en la norma AASHTO T209. También se llama gravedad específica RICE, en reconocimiento al investigador James Rice, quien desarrolló el método de prueba.

### 3.2. Diagrama de componentes:

En una mezcla asfáltica se encuentran tres componentes o fases, teniendo como la fase sólida al *agregado mineral*, la líquida al *asfalto* y la fase gaseosa que comprende al *aire*.

El agregado mineral siempre presenta porosidades, en donde una parte del asfalto penetra en dichos poros, ocasionando que una porción del agregado y del asfalto compartan espacio, a esta porción se le llama *asfalto absorbido*, y a la restante porción que cubre la superficie del agregado se la denomina *asfalto efectivo*.

A continuación se presenta un esquema, útil para describir las propiedades de masa y volumen de una mezcla asfáltica compactada.

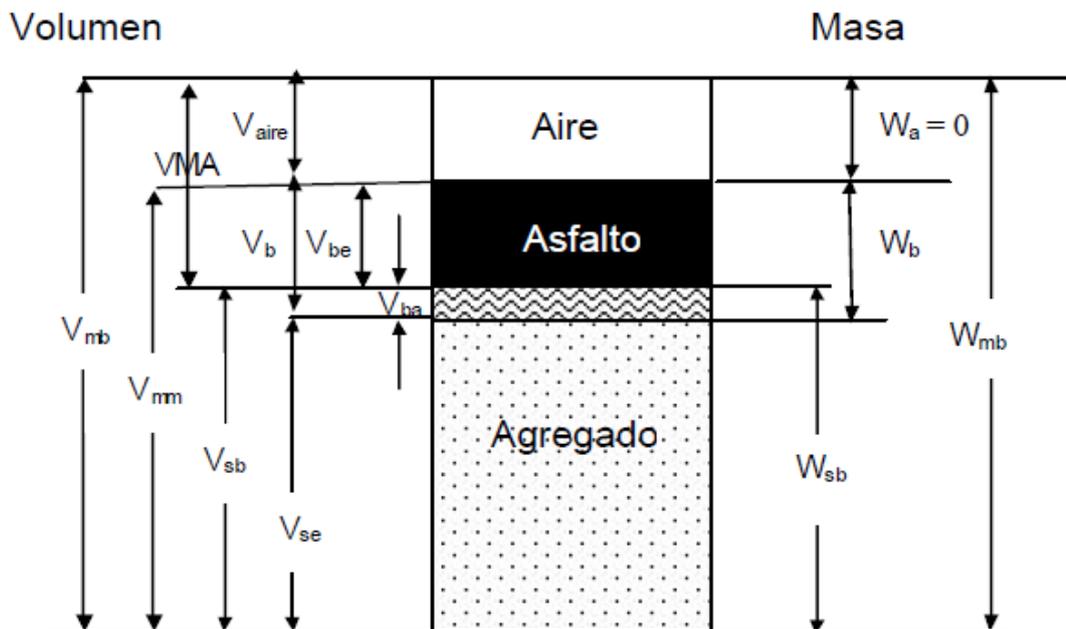


Gráfico 3-2: Diagrama esquemático de fases de una mezcla asfáltica compactada

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1996.

Dónde:

$V_{mb}$  = volumen total de la mezcla compactada

$V_{mm}$  = volumen de la mezcla sin vacíos

VMA=volumen de vacíos en el agregado mineral

$V_{sb}$  = volumen total del agregado

$V_{se}$  = volumen efectivo de agregado

$V_{be}$  = volumen efectivo de asfalto

$V_{ba}$  = volumen de asfalto absorbido

$V_{aire}$  = volumen de aire

$W_{mb}$  = masa total de la mezcla compactada

$W_a$  = masa del aire

$W_b$  = masa del asfalto

$W_{sb}$  = masa total del agregado

Este diagrama permite una clara definición de los siguientes parámetros volumétricos:

- **VMA (Vacíos en el agregado mineral):** Es el espacio intergranular ocupado por la suma del volumen del asfalto efectivo ( $V_{be}$ ) y el volumen del aire ( $V_{aire}$ ), expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla compactada.

$$VMA = \frac{V_{be} + V_{aire}}{V_{mb}} \times 100$$

- **$V_{aire}$  (Vacíos de aire):** Es el volumen de aire ( $V_{aire}$ ) en la muestra compactada, expresado siempre como porcentaje del volumen total de la mezcla.

$$V_a = \frac{V_{aire}}{V_{mb}} \times 100$$

- **VFA (Vacíos llenos con asfalto):** Si bien no se muestra en el diagrama, pero se define como el porcentaje de los VMA que contienen asfalto, es decir el efectivo. Se expresa como porcentaje de los vacíos en el agregado mineral (VAM).

$$VFA = \frac{V_{be}}{V_{be} + V_{aire}} = \frac{V_{be}}{VMA} = \frac{VMA - V_a}{VMA} \times 100$$

- **Contenido de asfalto ( $P_b$  o CA):** Es la concentración de peso de ligante asfáltico. Se expresa como porcentaje del peso total de la mezcla o en algunos casos como un porcentaje del peso total del agregado. Depende en gran medida de las características del agregado como: la graduación y la absorción.

$$CA = \frac{W_b}{W_{mb}} \times 100$$

- **Contenido de asfalto efectivo:** Contenido total de asfalto ( $P_b$ ) de la mezcla menos la fracción de ligante absorbido por las partículas del agregado. Se expresa como porcentaje del peso total de la mezcla.

$$CA_e = \frac{W_{be}}{W_{mb}} \times 100$$

- **Contenido de asfalto absorbido:** Es la concentración de peso de ligante asfáltico absorbido por el agregado. Normalmente se expresa como un porcentaje del peso total del agregado.

$$CA_a = \frac{W_{ba}}{W_{sb}} \times 100$$

### 3.3. Fórmulas para calcular los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica compactada:

A continuación se exponen las fórmulas que han sido estudiadas por el Instituto de Asfalto de USA, a partir de algunos parámetros conocidos de una mezcla HMA compactada:

- ✓ Gravedad Específica Bruta de la Mezcla ( $G_{mb}$ ).
- ✓ Gravedad Específica Teórica Máxima de la Mezcla ( $G_{mm}$ ).
- ✓ Porcentaje de agregado ( $P_s$ ) en %, respecto al peso total de la mezcla.
- ✓ Contenido de Asfalto ( $P_b$ ) en %, con respecto de la masa total de la mezcla.
- ✓ Gravedad Específica del Ligante Asfáltico ( $G_b$ ).

- Gravedad Específica Bruta del Agregado Combinado:

$$G_{sb} = \frac{(P_1 + P_2 + P_3)}{\left(\frac{P_1}{G_{sb1}} + \frac{P_2}{G_{sb2}} + \frac{P_3}{G_{sb3}}\right)}$$

Dónde:

$P_i$ : Porcentaje de peso de cada uno de los componentes del agregado de la mezcla ( $i=1, 2, 3...n$ ).

$G_{sbi}$ : Gravedad Específica Bruta de cada componente de la mezcla ( $i=1, 2, 3...n$ ).

- Gravedad Específica Efectiva del Agregado:

$$G_{se} = \frac{(100 - P_b)}{\left(\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}\right)}$$

Dónde:

$G_{mm}$ : Gravedad Específica Teórica Máxima de la Mezcla.

$P_b$ : Porcentaje de contenido de asfalto respecto al peso total de la mezcla ( $100-P_s$ ).

$G_b$ : Gravedad Específica del Ligante Asfáltico.

- Contenido de asfalto absorbido:

$$P_{ba} = G_b \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{se}} \right) \times 100\%$$

- Contenido de asfalto efectivo:

$$P_{be} = P_b - \left( \frac{P_{ba} \times P_s}{100} \right)$$

Dónde:

$P_s$ : Porcentaje de contenido de agregado respecto al peso total de la mezcla.

- Porcentaje de vacíos de aire:

$$V_{aire} = \left( \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100\%$$

Dónde:

$G_{mb}$ : Gravedad Específica Bruta de la Mezcla

- Vacíos en el agregado mineral:

$$VMA = 100 - \left( \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \right)$$

Dónde:

$G_{sb}$ : Gravedad Específica Bruta del Agregado Combinado.

- Vacíos llenos de asfalto:

$$VFA = \left( \frac{VMA - V_{aire}}{VMA} \right) \times 100\%$$

En caso de no conocer la  $G_{mm}$  y teniendo información de los otros parámetros necesarios para su cálculo, entonces:

- Gravedad Específica Teórica Máxima de la Mezcla:

$$G_{mm} = \frac{100}{\left( \frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b} \right)}$$

## CAPÍTULO 4: MÉTODOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El proceso del diseño de una mezcla asfáltica considera principalmente la selección del agregado (granulometría, gravedad específica, porcentaje en peso); la selección del asfalto (gravedad específica y propiedades); compactación de los especímenes de prueba; el cálculo de los parámetros volumétricos y la determinación del contenido de asfalto óptimo.

### 4.1. Método Marshall:

Este método de diseño de mezclas asfálticas fue desarrollado por el ex-Ingeniero de Asfaltos del Departamento de Carreteras del Estado de Mississippi, Bruce Marshall.

El método original de Marshall sólo era aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con tamaño máximo de 25 mm (1"). Posteriormente, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró el procedimiento de prueba Marshall, logrando modificarlo para tamaños de agregado mayores a 38 mm (1,5"); el método puede ser utilizado para diseño en laboratorio y control en obra de mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba de 63,5 mm (2 ½") de altura y 101,6 mm (4") de diámetro. Se preparan usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado (ASTM D1559 o AASHTO T245). Los dos datos más importantes del método Marshall son: un análisis de la relación de vacíos-densidad, y la prueba de estabilidad-flujo de las muestras compactadas.

Asphalt Institute (1996). Según el Instituto de Asfalto, el Valor de Estabilidad Marshall del espécimen de prueba es la máxima carga bajo la cual la probeta cede o falla totalmente a una temperatura de 60 °C, el cual es

expresado en N (lb). El Valor de Fluencia Marshall es el movimiento total o deformación, en unidades de 0,25 mm (1/100”), que ocurre en el espécimen al alcanzar el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad (Garnica et al, 2005).

#### 4.1.1. Requisitos del Agregado mineral:

Tabla 4-1: Requisitos de calidad del material mineral para carpetas asfálticas de granulometría densa.

PRUEBAS	AGREGADOS MINERALES	
	GRUESOS	FINOS
<b>FORMA</b>	Caras fracturadas (>80% - 2) Planas y alargadas (<10%)	<u>Angularidad (&gt;45%)</u>
<b>DUREZA</b>	Abrasión Los Ángeles (<40%) Sulfatos (<12%)	Sulfatos (<12%)
<b>LIMPIEZA</b>	Deletéreos (<1%)	Deletéreos (<1%) Equivalente de arena (>50%) Índice de plasticidad (<4)
<b>ADHERENCIA</b>	Peladura de la mezcla en agua hirviendo (>95%)	

Fuente: MTOP de Ecuador, 2002.

#### 4.1.2. Requisitos de la granulometría:

Tabla 4-2: Requisitos de granulometría del material pétreo para carpetas asfálticas de granulometría densa

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
¾" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
½" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80		90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Fuente: MTOP de Ecuador, 2002.

#### 4.1.3. Requisitos volumétricos:

Los siguientes requisitos volumétricos son para un porcentaje de vacíos de aire de 4%, calificándolos en función del volumen de tránsito que se estima tendrá que soportar la estructura del pavimento al final de su vida útil y en los números de golpes de compactación especificados por este método.

Tabla 4-3: Requisitos volumétricos de mezclas Marshall.

Criterio de Mezcla Tipo Marshall	Tráfico Liviano		Tráfico Mediano		Tráfico Pesado	
	Superficie y Base		Superficie y Base		Superficie y Base	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Compactación, número de golpes/cara del espécimen	35		50		75	
Estabilidad, N (lb)	3336 (750)		5338 (1200)		8006 (1800)	
Fluencia, 0,25 mm (0,01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de Vacíos de Aire	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)	Ver en Tabla de Porcentaje Mínimo de VMA					
Porcentaje de Vacíos Llenos con Asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

Tabla 4-4: Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral (VMA).

Tamaño Máximo Nominal		Porcentaje Mínimo (VMA)		
		Porcentaje de Vacíos de Aire de Diseño		
mm	in	3%	4%	5%
1,18	Nº 16	21,5	22,5	23,5
2,36	Nº 8	19,0	20,0	21,0
4,75	Nº 4	16,0	17,0	18,0
9,5	3/8"	14,0	15,0	16,0
12,5	1/2"	13,0	14,0	15,0
19	3/4"	12,0	13,0	14,0
25	1	11,0	12,0	13,0
37,5	1,5	10,0	11,0	12,0
50	2	9,5	10,5	11,5
63	2,5	9,0	10,0	11,0

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1997.

A continuación se muestra gráficamente los resultados obtenidos de variar el contenido de asfalto en una mezcla en particular:

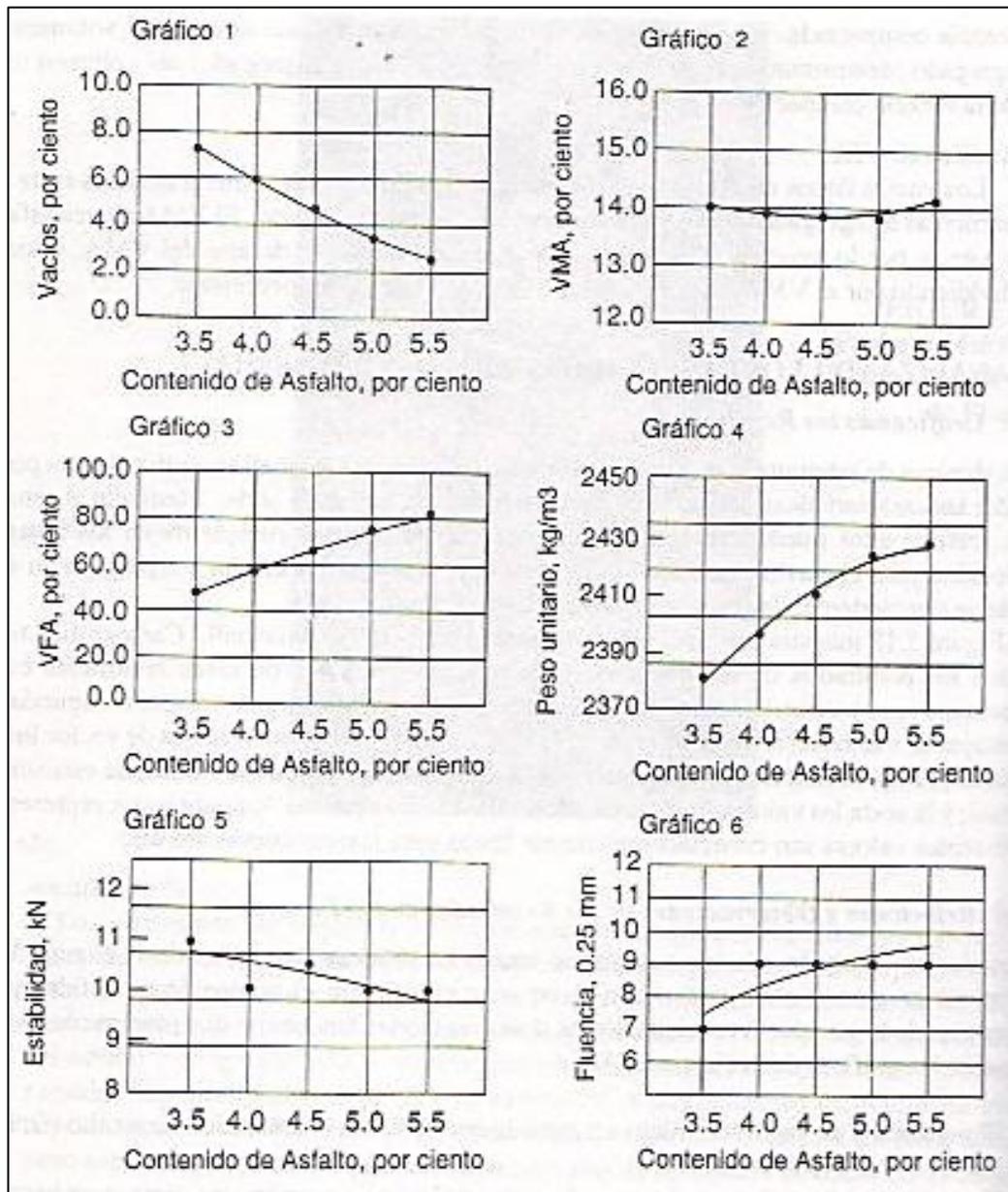


Gráfico 4-1: Esquema de los parámetros volumétricos con relación al contenido de asfalto de una mezcla en particular.

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1996.

A partir de estas gráficas se determina el contenido óptimo de asfalto para la producción de la mezcla en planta. Para ello se deberá considerar:

- La determinación del contenido de asfalto correspondiente al porcentaje de vacíos de 4%

- Chequear las magnitudes de las restantes propiedades para dicho contenido de asfalto y compararlas con los criterios de diseño. Si se llegan a cumplirse el contenido de asfalto será el de diseño, caso contrario será necesario reajustar o volver a diseñar la mezcla.

## 4.2. Método Superpave:

### 4.2.1. Requisitos del agregado pétreo:

Los investigadores de SHRP después de varias consultorías a Ingenieros expertos en el tema de agregados y algunos experimentos, entendieron que las características del agregado cumplen un papel importante en la deformación permanente y en las fisuras generadas por fatiga y bajas temperaturas.

Por tal razón se definieron dos categorías de propiedades de los agregados como son: *Propiedades de Consenso y Origen*.

En lo que respecta a las *Propiedades de Consenso* se encuentran: angularidad del agregado grueso, angularidad del agregado fino, partículas alargadas y chatas, contenido de arcilla (Equivalente de arena).

Tabla 4-5: Requisitos de propiedades de consenso del agregado.

Millones de ESALs <sup>(1)</sup>	Angularidad del agregado grueso Porcentaje mínimo		Angularidad del agregado fino Porcentaje mínimo		Equivalente de arena Porcentaje mínimo	Partículas planas y alargadas Porcentaje máximo <sup>(3)</sup>
	Distancia desde la superficie <100 mm	Distancia desde la superficie > 100 mm	Distancia desde la superficie <100 mm	Distancia desde la superficie > 100 mm		
<0,3	55/-	-/-	-	-	40	-
0,3 < 3	75/-	50/-	40	40	45	10
3 < 10	85/80 <sup>(2)</sup>	60/-	45	40	45	
10 < 30	95/90	80/75	45	40	45	
≥ 30	100/100	100/100	45	45	50	

Notas:

(1) Los ESALs de diseño son los niveles de tránsito de proyecto esperado en el carril de diseño para un periodo de de 20 años. Independientemente de la vida de diseño actual de la carretera, determine los ESAL's de diseño para 20 años y selecciona el nivel  $N_{dis}$  apropiado.

(2) 85/80 indica que el 85% del agregado grueso tiene una o más caras fracturadas, y 80% tiene dos o más caras fracturadas.

(3) Criterio basado en una relación máxima a mínima de 5:1

Fuente: SHRP, 1999.

En lo que respecta a las *Propiedades de Origen* como son: Tenacidad (Desgaste de los Ángeles), Durabilidad (Ataque por sulfatos de sodio o magnesio), Materiales Deletéreos. Para dichas propiedades no se puede acordar valores críticos de los mismos, ya que dependen de cada fuente, sin embargo SHRP recomienda algunos valores específicos como se muestra:

Tabla 4-6: Requisitos de propiedades de origen del agregado.

<b>Desgaste de los Angeles</b>	<b>Sanidad del agregado por el uso de sulfato de sodio o de magnesio</b>	<b>Lentes de arcilla y partículas friables en agregado</b>
<b>Porcentaje máximo</b>	<b>Porcentaje máximo</b>	<b>Porcentaje máximo</b>
35 - 45	10 -20 <sup>(1)</sup>	0,2 – 10 <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Para cinco ciclos

<sup>(2)</sup> Dependiendo de la composición exacta del contaminante

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1996.

#### 4.2.2. Requisitos de la granulometría:

Para especificar la granulometría, SUPERPAVE emplea una curva granulométrica de exponencial 0,45, para definir una granulometría permitida, en donde las abscisas (en escala aritmética) están compuestas por la aberturas de los tamices en *mm* elevados a la potencia (0,45), mientras que en las ordenadas (en escala aritmética) están los porcentajes del pasante acumulado de cada malla, para así definir la *Estructura del Agregado de Diseño*, término que describe la frecuencia de distribución acumulada de tamaño de partículas del agregado.

Una peculiaridad de esta curva es la *granulometría de máxima densidad*, la cual representa el arreglo volumétrico de las partículas de agregado más compacto posible; sin embargo en lo factible se debe evitar una curva de diseño similar a la misma, debido a que habría poco espacio entre los agregados como para permitir la presencia de una película de asfalto lo suficientemente gruesa como para obtener una mezcla durable.

Dicha granulometría corresponde a una línea recta que se extiende desde el origen (0mm, 0%) hasta un punto conformado por el tamaño máximo de la malla y el 100% del pasante acumulado.

Adicionalmente a lo anterior, se adicionan dos conceptos importantes: *puntos de control* y una *zona restringida*.

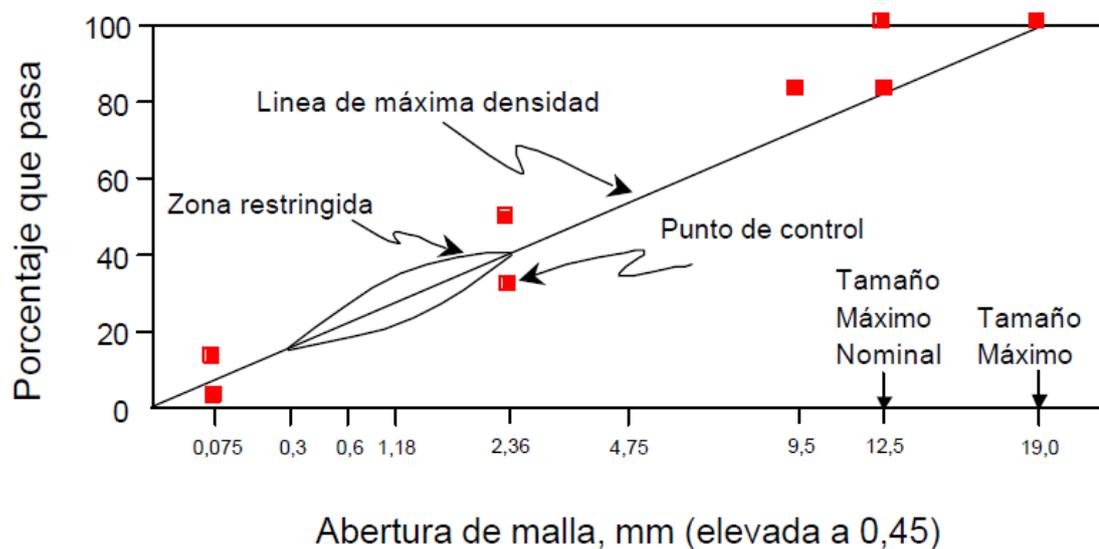


Gráfico 4-2: Curva de máxima densidad y límites para la granulometría con un tamaño máximo de agregado de 19 mm.

.Fuente: Instituto Mexicano del Transporte, 2005.

La curva granulométrica obligadamente debe pasar por los *puntos de control*; ya que corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2,36 mm); y un tamaño de finos (0,075 mm).

Se recomienda que si se prevé un aumento del nivel de tránsito esperado, la nueva granulometría se acerque más los puntos de control de tamaño grueso.

Tabla 4-7: Puntos de control de Superpave para diferentes tamaños nominales de agregados

Tamaño nominal del material pétreo mm (pulg)						
Designación	Abertura mm	37,5 (1-1/2")	25 (1")	19 (3/4")	12,5 (1/2")	9,5 (3/8")
		Porcentaje que pasa				
2"	50	100 - 100	-	-	-	-
1 1/2"	37,5	90 - 100	100 - 100	-	-	-
1"	25	-90	90 - 100	100 - 100	-	-
3/4"	19	-	-90	90 - 100	100 - 100	-
1/2"	12,5	-	-	-90	90 - 100	100 - 100
3/8"	9,5	-	-	-	-90	90 - 100
4	4,75	-	-	-	-	-90
8	2,36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67
16	1,18	-	-	-	-	-
30	0,60	-	-	-	-	-
50	0,30	-	-	-	-	-
100	0,15	-	-	-	-	-
200	0,075	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10

Fuente: Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013.

*La zona restringida* se ubica entre los tamaños intermedios (4,75 o 2,36) mm y 0,3 mm, formando una franja por la cual la curva granulométrica de diseño no debe pasar, ya que si lo hiciese dicha mezcla de agregados contendría mucha arena fina en relación al total de la misma, dando lugar a un comportamiento débil de la mezcla y una resistencia baja contra la deformación permanente durante la vida de servicio. A este tipo de mezclas se les llama "graduaciones con joroba" (por la joroba que presenta la curva de diseño al violar dicha zona). Lo recomendado por este método (no obligado), es que la granulometría de la mezcla en particular, pase por debajo de dicha zona restringida.

Por tal motivo, si una estructura del agregado de diseño pasa entre los puntos de control y evite la zona de restricción (mejor por debajo), la misma está cumpliendo con los requisitos granulométricos designados por Superpave.

Los valores de los puntos de control y de la zona restringida están identificados para cinco designaciones que esta metodología establece, basándose en los tamaños máximos nominales más utilizados y de los tamaños máximos.

Tabla 4-8: Designaciones de las mezclas Superpave.

Designación SUPERPAVE	Tamaño máximo nominal	Tamaño máximo
37,5 mm	37,5	50,0
25,0 mm	25,0	37,5
19,0 mm	19,0	25,0
12,5 mm	12,5	19,0
9,5 mm	9,5	12,5

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1996.

#### 4.2.3. Requisitos de compactación:

Una de las diferencias importantes de este nuevo método es el proceso de compactación de la mezcla asfáltica, ya que usa un *Compactador Giratorio* que produce un efecto de amasado de las briquetas, ocasionando que la mezcla en laboratorio experimente condiciones similares a las existentes en campo; a diferencia del Método Marshall que compacta la mezcla a un cierto número de impactos proporcionados por un martillo estandarizado.

Tabla 4-9: Especificaciones del Compactador Giratorio Superpave.

Parámetro	Valor
Esfuerzo vertical	600 kPa
Ángulo de giro	1,25 °
Velocidad de giro	30 rpm

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1996.

Los especímenes de prueba son compactados bajo número de giros, principalmente al número de giros máxima (Nmax) seleccionado. La selección del número de giros se define en función del número de ejes equivalentes (ESAL) del proyecto (millones) y el promedio de los 7 días más calurosos, de los años anteriores, de la temperatura del aire:

Tabla 4-10: Número de giros de compactación según Superpave.

ESAls de diseño (en millones)	Promedio de la máx. temp. del aire para el proyecto											
	< 39°C			39-40°C			41-42°C			43-44°C		
	N <sub>ini</sub>	N <sub>dis</sub>	N <sub>máx</sub>	N <sub>ini</sub>	N <sub>dis</sub>	N <sub>máx</sub>	N <sub>ini</sub>	N <sub>dis</sub>	N <sub>máx</sub>	N <sub>ini</sub>	N <sub>dis</sub>	N <sub>máx</sub>
<0.3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0.3-1	7	76	117	7	83	129	7	88	138	8	93	146
1-3	7	86	134	8	95	150	8	100	158	8	105	167
3-10	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
10-30	8	109	174	9	121	195	9	128	208	9	135	220
30-100	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
>100	9	142	233	10	158	262	10	165	275	10	172	288

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1996.

**El Número de giros iniciales (Nini):** Se define como un indicador del comportamiento del agregado y de las propiedades del ligante. Se utiliza para analizar las propiedades de densificación temprana durante su compactación. Es el número de giros necesarios para compactar una mezcla asfáltica hasta alcanzar un porcentaje de la gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm}$ ) y comparar dicho resultado con los requerimientos de diseño volumétrico de Superpave.

**El Número de giros de diseño (Ndiseño):** Es el número de giros necesarios para compactar una mezcla asfáltica a la densidad de diseño determinada por el número de ejes equivalentes, donde la mezcla asfáltica alcanza el 96% de la gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm}$ ) al contenido óptimo de asfalto (considerando los 4% de vacíos de aire). En termino

prácticos simula la compactación que proporcionarían los rodillos más el tránsito futuro.

**El Número de giros al final de la vida útil (N<sub>max</sub>):** Es el número de giros necesarios para compactar una mezcla asfáltica al 98% (como mínimo) de la gravedad específica teórica máxima (G<sub>mm</sub>). Es decir es la máxima compactación que se lograría en obra.

Instituto de Asfalto de USA (1996). Según el Instituto Americano de Asfalto, otros requerimientos de gran importancia en *Superpave* son la temperatura de mezcla y compactación, las mismas que son proporcionadas en base a la medición de la viscosidad rotacional del asfalto para al menos dos temperaturas (135 y 165 °C), aunque se pueden hacer para otras temperaturas adicionales.

- La **temperatura de mezclado** será la que sea necesaria para que el cemento asfáltico produzca una viscosidad de 170±20 centiStokes (0,17 ± 0,02 Pa.s).
- La **temperatura de compactación** en cambio, será la que sea necesaria para producir una viscosidad de 280±30 centiStokes (0,28 ± 0,03 Pa.s).

#### 4.2.4. Requisitos volumétricos:

Tabla 4-11: Requisitos volumétricos del diseño de mezclas Superpave

ESAL de diseño (millones)	Densidad requerida (porcentaje de G <sub>mm</sub> )			VMA Porcentaje mínimo					VFA Porcentaje mínimo
				Tamaño nominal máximo (mm)					
	N <sub>inicial</sub>	N <sub>diseño</sub>	N <sub>máxima</sub>	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	
<0,3	≤ 91,5	96,0	< 98,0	11,0 <sup>(4)</sup>	12,0	13,0	14,0	15,0	70-80 <sup>(2)</sup>
0.3<3	≤ 90.5								65-75 <sup>(2)</sup>
3<10									65-75 <sup>(3)</sup>
10<30	≤ 89,0								
≥30									

- <sup>(1)</sup> Los ESAL de diseño son los niveles de tránsito de proyecto esperado, para un periodo de diseño de 20 años.  
<sup>(2)</sup> Para mezclas de agregado de tamaño nominal máximo de 9,5 mm, el rango de VFA especificado debe ser de 73% a 76% para los niveles de tránsito de diseño ≥ 3 millones de ESALs  
<sup>(3)</sup> Para mezclas de agregado de tamaño nominal máximo de 25 mm, los límites inferiores especificados de VFA deben ser de 66% para niveles de tránsito de diseño < 3 millones de ESALs  
<sup>(4)</sup> Para mezclas de agregado de tamaño nominal máximo de 37,5 mm los límites inferiores especificados de VFA deben ser de 63% para todos los niveles de tránsito de diseño.  
Fuente: (C-SHRP, 1999)

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1996.

#### 4.2.5. Análisis de datos de la compactación:

- Ingresado los datos respectivos al equipo de compactación, este a su vez, al finalizar el ensayo respectivo, proporcionará las alturas para cada número de giro ejecutado, con las cuales se calcula la Gravedad Específica Bruta ( $G_{mb}$ ) *Estimada* de la Mezcla para cada altura, en especial para el  $N_{max}$ , ya que la prueba finalizará cuando la briqueta alcance dicho número de giro máximo.
- Con la briqueta totalmente compactada se obtiene La Gravedad Específica Bruta *Medida* de la Mezcla (AASHTO T166), la misma que se correlaciona con el  $G_{mb}$  *Estimada* para el  $N_{max}$ , tratando de corregir el cálculo del volumen supuesto para dicha gravedad, obteniendo un *factor de corrección* por la superficie irregular que presentan los especímenes compactados.
- Dichas Gravedades Específicas Brutas de la Mezcla *Corregidas* para cada número de giro, se dividen para la Gravedad Específica Teórica Máxima ( $G_{mm}$ ) de la Mezcla (AASHTO T209), y así se obtiene un porcentaje, para verificar si la mezcla cumple con los requisitos volumétricos impuestos por Superpave.
- Con los resultados obtenidos de la compactación, se realiza una *Curva de Densificación*, la misma que contiene en sus ordenadas (escala aritmética) el Porcentaje de la Gravedad Específica Teórica Máxima ( $\%G_{mm}$ ) de los dos especímenes de prueba y el promedio respectivo; y en sus abscisas los números de giros (escala logarítmica) correspondientes a tales porcentajes.

A manera de ejemplo, se presenta una tabla con el procesamiento de los datos exportados de la compactación y su respectiva curva de densificación:

ESALs diseño:	10 a 30	millones			Prom. Temp.:	<39	°C	
	Peso total (g):	4956,90			Gmb1(medida):	2,505		
	Gmm (medida):	2,469			Gmb2(medida):	2,505		
	Gsb (medida):	2,7			Pb (%):	6,01		

Número de Giros	Especimen 1				Especimen 2				%Gmm promedio
	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	
0	139,10	2,017	2,057	83,30	139,60	2,009	2,062	83,51	83,40
5	128,30	2,186	2,230	90,31	128,80	2,178	2,235	90,51	90,41
<b>8</b>	<b>126,00</b>	<b>2,226</b>	<b>2,270</b>	<b>91,96</b>	<b>126,40</b>	<b>2,219</b>	<b>2,277</b>	<b>92,23</b>	<b>92,09</b>
10	124,90	2,246	2,290	92,77	125,30	2,239	2,297	93,04	92,90
20	121,80	2,303	2,349	95,13	122,10	2,297	2,357	95,48	95,30
30	120,10	2,336	2,382	96,47	120,40	2,330	2,391	96,82	96,65
40	118,90	2,359	2,406	97,45	119,40	2,349	2,411	97,63	97,54
50	118,10	2,375	2,422	98,11	118,60	2,365	2,427	98,29	98,20
60	117,50	2,387	2,435	98,61	117,90	2,379	2,441	98,88	98,74
70	116,90	2,400	2,447	99,11	117,40	2,389	2,452	99,30	99,21
80	116,40	2,410	2,458	99,54	117,00	2,397	2,460	99,64	99,59
90	116,10	2,416	2,464	99,80	116,70	2,404	2,466	99,89	99,85
100	115,80	2,422	2,470	100,06	116,40	2,410	2,473	100,15	100,10
<b>109</b>	<b>115,50</b>	<b>2,429</b>	<b>2,477</b>	<b>100,32</b>	<b>116,20</b>	<b>2,414</b>	<b>2,477</b>	<b>100,32</b>	<b>100,32</b>
110	115,50	2,429	2,477	100,32	116,10	2,416	2,479	100,41	100,36
120	115,20	2,435	2,483	100,58	115,90	2,420	2,483	100,58	100,58
130	115,00	2,439	2,488	100,75	115,60	2,426	2,490	100,84	100,80
140	114,80	2,443	2,492	100,93	115,50	2,429	2,492	100,93	100,93
150	114,60	2,448	2,496	101,10	115,30	2,433	2,496	101,11	101,11
160	114,40	2,452	2,501	101,28	115,10	2,437	2,501	101,28	101,28
170	114,20	2,456	2,505	101,46	115,00	2,439	2,503	101,37	101,41
<b>174</b>	<b>114,20</b>	<b>2,456</b>	<b>2,505</b>	<b>101,46</b>	<b>114,90</b>	<b>2,441</b>	<b>2,505</b>	<b>101,46</b>	<b>101,46</b>

Gráfico 4-3: Datos de la densificación para una mezcla de prueba.



Gráfico 4-4: Curvas de densificación para una mezcla de prueba.

- En manera de resumen se extrae los datos que más interesan, que son los correspondientes a los números de giros iniciales, diseño y máximo:

<i>Espécimen #</i>	<i>%Gmm@Nini</i>	<i>%Gmm@Ndis</i>	<i>%Gmm@Nmax</i>
<i>1</i>	<i>91,96</i>	<i>100,32</i>	<i>101,46</i>
<i>2</i>	<i>92,23</i>	<i>100,32</i>	<i>101,46</i>
<b><i>Promedio</i></b>	<b><i>92,09</i></b>	<b><i>100,32</i></b>	<b><i>101,46</i></b>

Gráfico 4-5: Datos del %G<sub>mm</sub> para los números de giros inicial, diseño y máximo.

- Se calculan los parámetros volumétricos de interés como son: V<sub>aire</sub> (porcentaje de vacíos de aire), VMA (Vacíos en el agregado mineral), VFA (vacíos llenos con asfalto); para el promedio del %G<sub>mm</sub>@N<sub>diseño</sub> y considerando las características conocidas de los componentes de la mezcla asfáltica:
  - $\%Vacíos\ de\ aire = 100 - \%G_{mm}@N_{diseño}$
  - $\%VMA = 100 - (\%G_{mm}@N_{diseño} * G_{mm} * P_s) / G_{sb}$
  - $\%VFA = (\%VMA - \%Va) / \%VMA * 100$
- Por último se comparan los resultados de las fórmulas anteriores con los establecidos en los requerimientos de calidad expuestos por *Superpave* y así realizar el correspondiente análisis.



En cuanto al segundo factor, el número de ejes equivalentes (ESAL) de proyecto para las vías principales de la región en estudio, generalmente están en el rango de 15 a 25 millones considerando un periodo de diseño de 20 años, según la opinión del Ing. Rolando Vila, quien fue Asesor Técnico de las concesionarias viales CONCEGUA S.A. y CONORTE S.A. entre el año 2003 y 2011. En dichas empresas, que administran 600 km de vías en la Provincia del Guayas, el control de tráfico es muy confiable ya que corresponde al trabajo que realizan las estaciones de peajes.

Por tanto en función de la temperatura promedio 32,7°C y el volumen de tránsito (15-25 millones ESAL) antes mencionado y relacionando estos factores con las columnas y filas, respectivamente, contenidas en la tabla propuesta por el Instituto de Asfalto de U.S.A. para la selección de los Números de Giros de Compactación que se deben aplicar en el C.G.S., se establece que los Números de Giros a utilizar para este proyecto en particular son:  $N_{inicial} = 8$ ,  $N_{diseño} = 109$  y  $N_{máximo} = 174$ .

ESALs de diseño (en millones)	Promedio de la máx. temp. del aire para el proyecto											
	< 39°C			39-40°C			41-42°C			43-44°C		
	$N_{vi}$	$N_{ds}$	$N_{máx}$	$N_{vi}$	$N_{ds}$	$N_{máx}$	$N_{vi}$	$N_{ds}$	$N_{máx}$	$N_{vi}$	$N_{ds}$	$N_{máx}$
<0.3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0.3-1	7	76	117	7	83	129	7	88	138	8	93	146
1-3	7	86	134	8	95	150	8	100	158	8	105	167
3-10	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
10-30	8	109	174	9	121	195	9	128	208	9	135	220
30-100	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
>100	9	142	233	10	158	262	10	165	275	10	172	288

Gráfico 5-1: Selección de los números de giros de compactación según Superpave.

Fuente: Instituto de Asfalto de USA, 1996.

## 5.2. Plantas en estudio de la Región Costa:

Para el proyecto de investigación se han seleccionado 5 plantas de asfalto ubicadas en diferentes puntos de la Región Costa, cuyos nombres hacen referencia a lo anterior:

1. **Durán** (km. 1,5 vía a Durán-Bolicho)
2. **Km. 26** (km. 26 vía a El Triunfo-Bucay)
3. **Vía a la Costa** (km. 12,5 vía a la Costa)
4. **Chivería** (vía a Daule)
5. **Picoazá** (vía a Manta-Portoviejo)

Las mismas que presentan características particulares y de las cuales se obtuvo la siguiente información por parte de los respectivos responsables técnicos:

Tabla 5-2: Agregados minerales utilizados en cada planta.

<b>Agregados minerales utilizados</b>			
<b>Plantas</b>	<b>Tipo de Material</b>	<b>Tipo de Roca</b>	<b>Dosificación</b>
<b>DURÁN</b>	<i>Piedra 1/2"</i>	<i>Andesita</i>	<i>15%</i>
	<i>Piedra 3/8"</i>	<i>Andesita</i>	<i>65%</i>
	<i>Arena</i>	<i>Arena de río</i>	<i>20%</i>
<b>KM. 26</b>	<i>Piedra 1/2"</i>	<i>Aluvial</i>	<i>25%</i>
	<i>Piedra 3/8"</i>	<i>Aluvial</i>	<i>55%</i>
	<i>Arena</i>	<i>Arena de río</i>	<i>20%</i>
<b>VÍA A LA COSTA</b>	<i>Piedra 1/2"</i>	<i>Caliza</i>	<i>40%</i>
	<i>Piedra 3/8"</i>	<i>Caliza</i>	<i>40%</i>
	<i>Arena</i>	<i>Arena de río</i>	<i>20%</i>
<b>CHIVERÍA</b>	<i>Piedra 3/4"</i>	<i>Basalto</i>	<i>20%</i>
	<i>Piedra 3/8"</i>	<i>Basalto</i>	<i>60%</i>
	<i>Arena fina</i>	<i>Arena de río</i>	<i>20%</i>
<b>PICOAZÁ</b>	<i>Piedra 1/2"</i>	<i>Andesita</i>	<i>9,9%</i>
	<i>Piedra 3/8"</i>	<i>Andesita</i>	<i>10,7%</i>
	<i>Cisco</i>	<i>Andesita</i>	<i>71,9%</i>
	<i>Arena</i>	<i>Arena de río</i>	<i>7,5%</i>

Tabla 5-3: Parámetros básicos de la mezcla utilizados en cada planta.

<b>Parámetros relacionados con la mezcla asfáltica</b>			
<b>Plantas</b>	<i>Contenido de Asfalto</i>	<i>Gravedad Específica del Asfalto</i>	<i>Gravedad Específica bruta del agregado</i>
	<i>Pb (%)</i>	<i>Gb</i>	<i>Gsb</i>
<b>DURÁN</b>	7,02	1,018	2,170
<b>KM. 26</b>	6,01	1,018	2,674
<b>VÍA A LA COSTA</b>	6,42	1,018	2,439
<b>CHIVERÍA</b>	5,90	1,018	2,727
<b>PICOAZÁ</b>	6,80	1,018	2,587

Con respecto a la *Tabla 5-2*, las curvas granulométricas correspondientes a la dosificación del agregado combinado utilizado en las mezclas asfálticas de cada planta, se muestran en los *Anexos* (del 9 al 13 respectivamente).

## **CAPÍTULO 6: COMPACTADOR GIRATORIO SUPERPAVE PINE AFGB1:**

### **6.1. Historia:**

El portátil Compactador Giratorio Superpave AFGB1 fue propuesto originalmente por *Test Quip, Inc.* (ubicado en New Brighton, Minnesota) y comercializado como el “BGC-1 Brovold Gyrotory Compactor” durante varios años. Como parte de una “segunda generación” de este tipo de compactadores surge el diseño del AFGB1, desarrollado ahora por *Pine Instrument Company* (localizado en Grove City, Pennsylvania), el cual está implementado para la accesibilidad, portabilidad y facilidad de uso. Las principales características de este nuevo modelo es que mantiene el mismo ángulo de giro y su bajo peso total (menos que 350 lb). Con un mínimo número de partes móviles y componentes personalizados, lo cual hace al AFGB1 un compactador resistente y fácil de proporcionarle servicio y mantenimiento.

La siguiente información se basa en el *Manual de Operación del Compactador Giratorio Superpave*, difundido por la Compañía de Instrumentos Pine de USA.

### **6.2. Características:**

Este innovador sistema presenta las siguientes ventajas notables:

- ✓ Posee un peso menor a 350 lb.
- ✓ Se transporta fácilmente en un pequeño camión o camioneta.
- ✓ Cumple con todas las especificaciones impuestas por la FHWA y AASHTO.
- ✓ Provee una prueba de compactación automática y una adquisición de datos por medio impreso o digital.
- ✓ Control de la muestra por medio de una consola digital.



Gráfico 6-1: Modelo Pine AFG1 ubicado en el Laboratorio de Carreteras de la Facultad de Ingeniería de la U.C.S.G.

### 6.3. Especificaciones técnicas:

- ✓ Fuente de Alimentación: 115 Voltios, 15 Amperios, 60 Hz.
- ✓ Dimensiones:
  - Ancho de 762 mm (30 in)
  - Profundidad de 541 mm (21,3 in)
  - Altura de 1407 mm (55,4 in)

- ✓ Espacios Adicionales:
  - Arriba: 1143 mm (45 in)
  - Lados: 152 mm (6 in)
  - Atrás: 305 mm (12in)
- ✓ Peso: 1387 kg (304 lb)
- ✓ Información para transporte:
  - Peso: 205 kg (450 lb)
  - Volumen: 0,82 m<sup>3</sup> (29 ft<sup>3</sup>)
- ✓ Presión de Consolidación:
  - Rango ajustable: 300 a 1000 kPa.
  - Límite de variación de presión de +/- 5 kPa.
- ✓ Sistema Hidráulico: Usa una bomba con una potencia de 0,5 hp.
- ✓ Ángulo de Giro:
  - Externo: 1,25°C +/- 0,02°C
  - Interno: 1,16°C +/- 0,02°C
- ✓ Variación de Giro:
  - Rango ajustable: 20 a 40 rpm.
  - Ajuste de fábrica: 30 rpm.
- ✓ Altura del espécimen: 10 a 200 mm (precisión de 0,1 mm).
- ✓ Número de Giros: 0 a 299 (rango ajustable)
- ✓ Condiciones de la Prueba:
  - Compactar a un *Número Específico de Giros*.
  - Compactar a una *Altura Específica del Especimen*.
- ✓ Adquisición de datos: Altura de muestras, presión de compactación y ángulo de giro externo.
- ✓ Opciones de salida de datos:
  - Un puerto serial para conexión con una impresora o una computadora personal.
  - Datos de *alturas* se visualizan en el panel frontal.

- ✓ Almacenamiento de datos internos:
  - Los resultados de las *alturas* son retenidas en la memoria interna hasta un máximo de 10 ensayos.
  - La presión, el ángulo de giro y la altura final de la muestra son guardados del más reciente ensayo solamente.
- ✓ Molde para espécimen:
  - Dimensiones externas: 281 mm (altura), 166 mm (diámetro).
  - Altura interna disponible para la muestra: 200 mm.
  - Espesor de paredes: 8 mm.
  - Máxima temperatura: 175°C (350°F)
  - Peso: 9,1 kg (20 lb)

## 6.4. Operación:

### 6.4.1. Controles del Compactador:

Los principales controles a observar son el Panel de Control Principal, Indicador LED de rotación, Botón de Emergencia y el Encendido Principal.



Gráfico 6-2: Controles principales del Compactador AFGB1.

#### 6.4.2. Interruptor de encendido principal:

Éste interruptor se encuentra localizado en uno de los lados del gabinete electrónico principal y tiene un estilo de encendido rotatorio. Para que el AFGB1 reciba energía eléctrica dicho interruptor debe girar hasta quedar en *posición vertical*, y si la máquina no ha respondido ante tal acción, entonces el Botón de Emergencia debe ser activado. Antes de proceder al *apagado* del equipo, se debe previamente haber cancelado toda operación (cualquier acción de rotación dentro de la cámara, así como haber removido el espécimen compactado); para tal efecto se debe girar dicho interruptor hasta su posición original (horizontal).

Si el suministro de energía eléctrica es perdido durante el proceso de compactación, entonces se debe *Estacionar la cabeza giratoria y la presión* (instrucciones se proveen más adelante) después de encender nuevamente la máquina y previo a la apertura de la cámara de compactación.



Gráfico 6-3: Interruptor de encendido principal (con placa amarilla) en posición vertical.

### 6.4.3. Botón de emergencia:

Es un gran botón rojo situado en la parte superior derecha de la consola principal. Al pulsar este botón todas las actividades del compactador giratorio se cancelan, incluyendo los movimientos de rotación y presión de la cabeza giratoria. Cuando se pulsa el dispositivo, este se mantiene contraído y ninguna operación se puede ejecutar, incluso el operador no puede acceder a las funciones del Panel Control. Como función más común de este botón, es que es activado para ejercer acciones de limpieza y lubricación del *soporte esférico* (situado debajo del plato de presión) cuando la máquina está encendida.

Para desactivar o desenganchar dicho botón, el mismo debe ser rotado en sentido de las agujas del reloj, para que así se pueda reanudar las operaciones de compactación.

Cuando el Equipo es transportado desde la fábrica, el botón de parada de emergencia del AFGB1 normalmente viene pulsado o contraído y éste debe ser manualmente liberado después de ser desempaquetado e instalado.



Gráfico 6-4: Botón “Emergency Stop” (rojo) en la consola principal del AFGB1.

#### 6.4.4. Panel de control principal:

La mayoría de las instrucciones del compactador se las comanda desde éste panel, el cual consiste de una pantalla de cristal líquida de 4x20 de área y pulsadores de membrana; el teclado permite la entrada fácil de parámetros numéricos, y una fila de cinco teclas de funciones activas (localizadas justo debajo de la pantalla) las cuales inician las operaciones más comunes; un conjunto de cuatro flechas de navegación que permiten trasladar el cursor activo alrededor del área de la pantalla.

Además el panel de control incluye un Indicador LED verde a la izquierda de la pantalla, el cual parpadea cada vez que el motor hace girar una vuelta a la cabeza giratoria, proporcionando un medio conveniente para monitorear el proceso de compactación y calibrar las revoluciones por minuto.

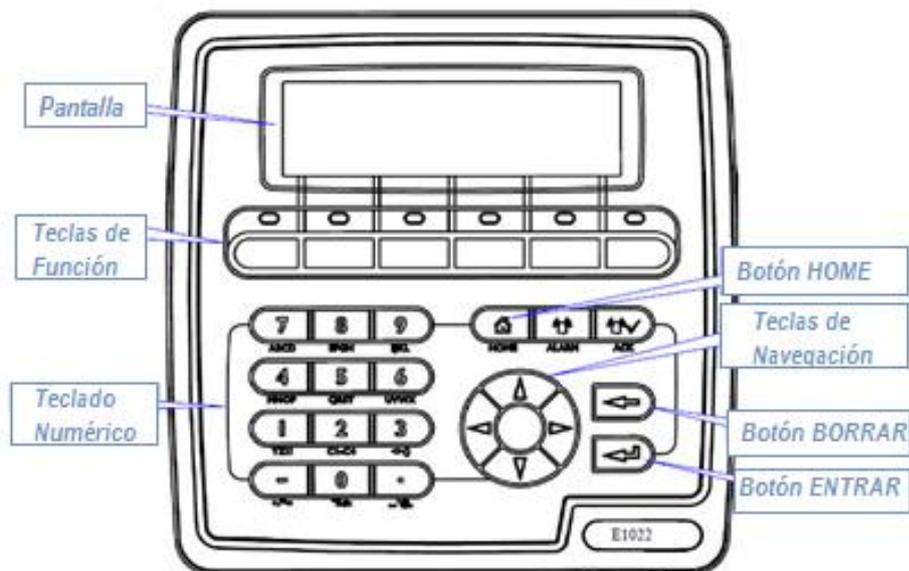


Gráfico 6-5: Panel de control principal E1022.

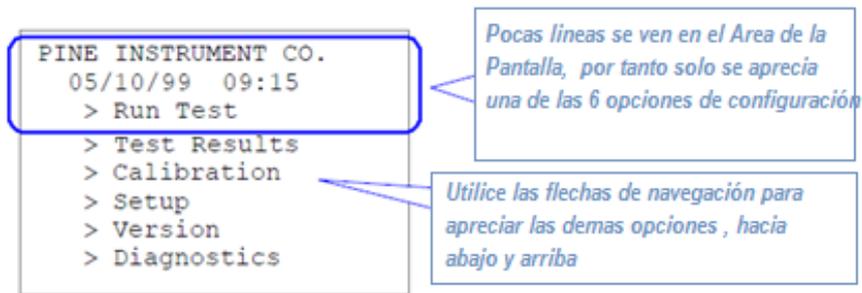


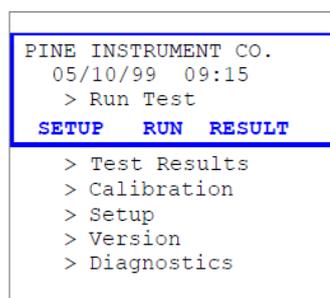
Gráfico 6-6: Área de visualización del panel de control principal.

#### 6.4.5. Teclas de función:

Las teclas de función situadas inmediatamente por debajo del área de visualización permiten al usuario iniciar rápidamente las operaciones más comunes realizadas por el compactador. El operador debe tener en cuenta que la operación (etiqueta) asignada a cada tecla de función cada vez varía, dependiendo del estado de funcionamiento del compactador. Además se debe recalcar que las etiquetas de las teclas de función son válidas sólo cuando el equipo está en el modo “RUN TEST” o “CALIBRATION”, en otras estancias, estas teclas de función tienen diferentes usos.

A continuación se muestran los *pasos a seguir* para ejecutar las acciones más comunes que se logran usando estas teclas de función:

- ❖ Especificar el número de giros máximo y la altura mínima de la muestra:
  - Presione la tecla “HOME”, entonces aparecerá el menú principal como se muestra:



- Seleccione la opción ">Setup" utilizando la flecha de navegación (hacia abajo) para ubicarse en la línea de dicha opción y pulse "ENTER"; o como alternativa rápida, solo se presiona la tecla de función situada debajo de "SETUP", entonces se mostrará:

```
TEST SET POINTS
SET GYRATIONS: 125
SET HEIGHT: 10.00mm
SET DWELLS: 2
SET kPa: 600 kPa
RPM 30 FACTORY SET
DATE/TIME
10/31/00 17:27
Set Date/Time:YES?
```

- Entonces utilizando nuevamente las flechas se procede a editar el número de giros máximo (que depende de las especificaciones de cada proyecto). Cuando la compactación se limita a la especificación de los números de giros, entonces se debería configurar a 10,00 mm la altura final de la muestra, la cual es la mínima altura a la que el espécimen puede ser compactado. Los demás parámetros (ubicados debajo de "SET HEIGHT") raramente requieren un ajuste.

```
TEST SET POINTS
SET GYRATIONS: 125
SET HEIGHT: 10.00mm
SET DWELLS: 2
SET kPa: 600 kPa
RPM 30 FACTORY SET
DATE/TIME
10/31/00 17:27
Set Date/Time:YES?
```

❖ Iniciar el proceso de compactación:

- Presione la tecla “HOME”, entonces aparecerá el menú principal como se muestra:

```
PINE INSTRUMENT CO.  
05/10/99 09:15  
> Run Test  
SETUP  RUN  RESULT  
  
> Test Results  
> Calibration  
> Setup  
> Version  
> Diagnostics
```

- Seleccione la opción “>Run Test” utilizando las flechas de navegación para ubicarse en la línea de dicha opción y pulse “ENTER”.

Esta ejecución hace aparecer el “progreso del ensayo” y además habilita las cinco teclas de función (START, STOP, RESET, UNLOAD, REVRS), las mismas que controlan la presión hidráulica y la cabeza giratoria.

```
GYRATIONS: 0 (125)  
HEIGHT: 164.34 mm  
MOLD ANGLE: 0.00 Deg  
PRESSURE: 0 kPa  
10/31/00 17:20
```

- Presione “START” para dar comienzo a la prueba de compactación. El indicador LED parpadeará una vez por cada revolución de la cabeza rotatoria. Al finalizar la prueba automáticamente el sistema deja de funcionar.

❖ Estacionar adecuadamente la cabeza giratoria:

- Una vez terminado el ensayo de compactación, justo antes de extraer la briqueta de la cámara, se recomienda estacionar o ubicar apropiadamente la cabeza giratoria, es decir lista para la próxima prueba.
- Sin regresar al Menú Principal, es decir desde el “progreso del ensayo”, se presiona la tecla de función “REVRS” para asegurar el efecto antes mencionado.

❖ Extraer el espécimen del fondo de la cámara de compactación:

- Después de haber culminado el ensayo y ejecutado la función “REVRS”, se procede a destapar la cámara y ubicar el respectivo embudo en la parte superior de la misma, asegurando dicho accesorio con las abrazaderas de ajuste.
- Sin regresar al Menú Principal, es decir desde el “progreso del ensayo”, se presiona 2 veces la tecla de función “UNLOAD” para elevar la briqueta (libre del molde) y poder extraerla.

❖ Descender el *Plato de Presión* hacia el fondo de la cámara de compactación:

- Luego de extraer la briqueta compactada y sus respectivos platos del molde, se retira el embudo antes colocado.
- Sin regresar al Menú Principal, es decir desde el “progreso del ensayo”, se presiona una sola vez la tecla de función “RESET” para ordenar descender el plato de presión hacia su posición original.

❖ Exportar los resultados del ensayo de compactación:

- Presione la tecla “HOME”, entonces aparecerá el menú principal como se muestra:

```
PINE INSTRUMENT CO.  
05/10/99 09:15  
> Run Test  
SETUP  RUN  RESULT  
  
> Test Results  
> Calibration  
> Setup  
> Version  
> Diagnostics
```

- Presione la tecla de función situada debajo de “RESULT” para activar los resultados del ensayo (TEST RESULTS), los mismos que se mostrarán así:

The screenshot shows the following screen content:

```
TEST RESULTS  
#10 10/31/00 12:28 *  
0 150.4 149.3  
SELECT PRINT SEND  
148.7 148.0 147.4  
5 146.2 145.3  
144.4 143.2 142.1  
10 141.2 140.3  
139.4 138.2 137.1  
... ETC ...  
295 115.4 115.3  
115.3 115.2 115.2
```

Callout boxes provide the following information:

- Use SELECT para escoger uno de los 10 resultados, para visualizar en la pantalla** (Use SELECT to choose one of the 10 results to visualize on the screen)
- Use PRINT para enviar los resultados a una impresora** (Use PRINT to send the results to a printer)
- Se visualiza la lista de alturas cada 5 numeros de giros** (The list of heights is visualized every 5 numbers of rotations)
- El asterisco \* representa el resultado de último ensayo de compactación.** (The asterisk \* represents the result of the last compaction test.)
- Use SEND para enviar los resultados del ensayo a un computador personal** (Use SEND to send the test results to a personal computer)
- Altura del espécimen en mm, por ejemplo para el treceavo giro (138.2 mm)** (Specimen height in mm, for example for the thirteenth rotation (138.2 mm))

## **6.5. Mantenimiento:**

El Compactador Giratorio modelo AFGB1 requiere un mantenimiento periódico para asegurar un constante desempeño seguro. No hay muchas partes en movimiento, pero hay varios elementos que requieren principal atención de vez en cuando. A continuación se mencionará los componentes que necesitan de mayor cuidado antes de elaborar cada prueba de compactación.

### **6.5.1. Lubricación:**

Hay varias superficies que se desgastan por la misma operación del equipo y que requieren suficiente lubricación sobre cada base regular:

- ✓ El soporte esférico situado en la parte inferior de la cámara de compactación (por debajo del plato de presión).
- ✓ La porción de la cabeza giratoria que está en contacto con la pared interior del molde.
- ✓ El cojinete cónico utilizado para ajustar el ángulo de giro.
- ✓ La superficie superior de la placa de presión (sobre el pistón).
- ✓ La superficie superior del plato de molde superior.
- ✓ Las tres sujeciones de las abrazaderas en la cabeza giratoria.
- ✓ El borde superior de la cámara de compactación.

En estas superficies se debe usar *lubricante antiadherente de Disulfuro de Molibdeno (moly-grade)*.

Los períodos de cada lubricación (se explican más adelante) asumen una preparación de seis especímenes por día durante una semana completa de producción de mezcla asfáltica en caliente (HMA).

El soporte esférico:

*“Esta superficie se debe lubricar después de cada seis muestras o una vez por día.”*

El soporte esférico que hace contacto con la superficie interna del molde (en la parte inferior del mismo) es la superficie de desgaste más crítico en el compactador AFGB1 y el más difícil de alcanzar. Se encuentra por debajo del plato de presión, y la mejor manera de aplicar lubricante (moly-grade) es utilizando una brocha o cepillo para frotar dicha grasa alrededor del plato de presión.



Gráfico 6-7: Lubricación del soporte esférico.

Porción de la cabeza giratoria:

*“Esta superficie se debe lubricar después de cada seis muestras o una vez por día.”*

Es una placa metálica circular situada en la parte inferior de la cabeza giratoria. Durante la compactación, esta placa mantiene la inclinación del molde forzando al mismo contra el cojinete cónico, debido a que los lados exteriores de esta placa metálica entran en contacto con la superficie interior del molde (cerca de la parte superior). Por lo tanto, el perímetro externo de dicha placa debe mantenerse lubricado en todo momento.



Gráfico 6-8: Lubricación de la placa metálica en la cabeza giratoria.

✓ El cojinete cónico:

*“Se debe aplicar lubricante fresco (moly-grade) cada 30 muestras compactadas o una vez por semana. El lubricante colocado en esta superficie debe ser redistribuido después de haberse preparado cada espécimen.”*

El cojinete cónico debe tener siempre una capa delgada de lubricante en todo momento, es decir redistribuir el recubrimiento de grasa, principalmente en la franja removida que resulta del movimiento giratorio después de la preparación de cada briqueta, esto se logra usando una brocha o cepillo fino.



Gráfico 6-9: Lubricación del *cojinete cónico* dentro de la cámara de compactación.

✓ Placa de presión:

*“Esta superficie se debe lubricar después de cada briqueta preparada”*

La placa de presión se sitúa directamente sobre el pistón de carga y ésta a su vez entra en contacto con el palto inferior del molde durante la compactación. Dicha placa debe ser lubricado inicialmente con una gruesa capa de disulfuro de molibdeno (moly-grade) y opcionalmente se puede rociar una capa adicional de polvo de grafito sobre dicha grasa. Continuación de la acumulación de la grasa y el polvo después de muchos especímenes por lo general resulta en una superficie muy brillante en la parte superior de la placa de presión.

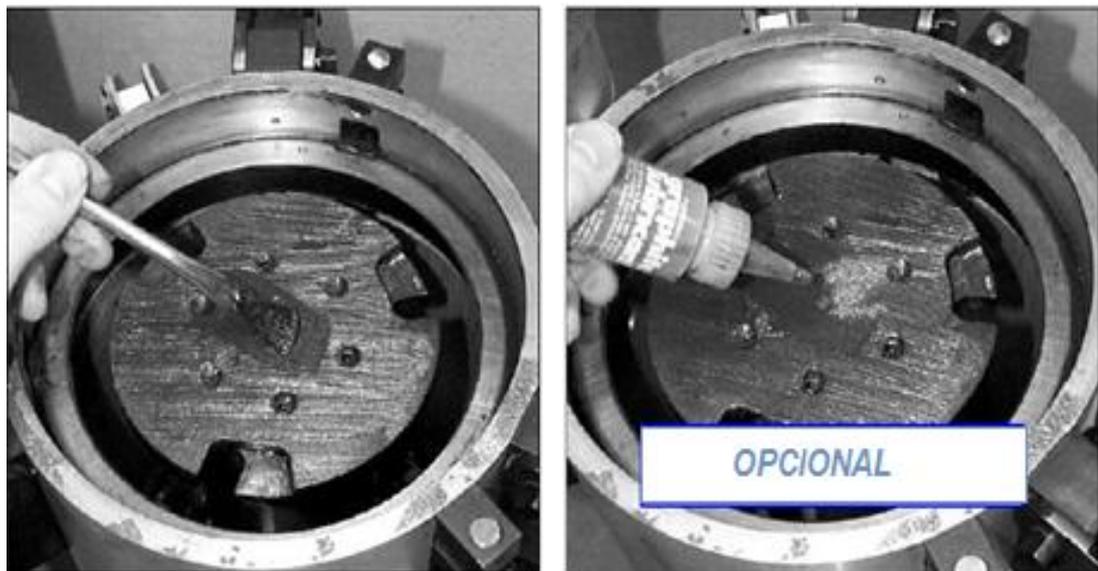


Gráfico 6-10: Lubricación de la *placa de presión*.

✓ Plato de molde superior:

*“Esta superficie se debe lubricar después de cada briqueta preparada”.*

Esta superficie se debe lubricar normalmente justo antes de cada proceso de compactación mediante la aplicación de una capa de disulfuro de molibdeno, en una franja de 1,5 pulgadas (4cm) medida desde el perímetro externo del plato de molde, ya que es la única zona de dicho plato que entra en contacto con la cabeza giratoria. El área restante (3 pulgadas de diámetro) del plato se debe mantener libre de grasa para poder facilitar el manipuleo del mismo usando el dispositivo magnético propio del equipo.

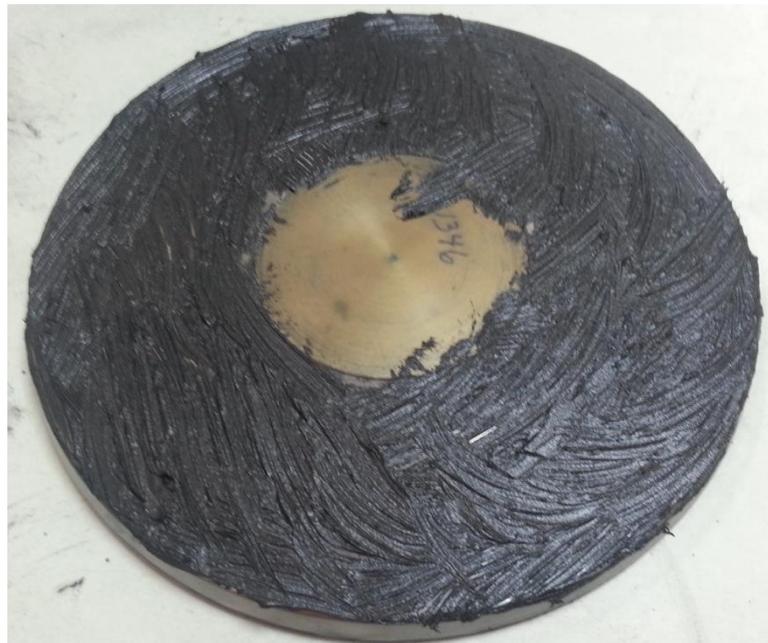


Gráfico 6-11: *Plato de molde superior* lubricado con grasa de molibdeno.

- ✓ Sujeciones de las abrazaderas y borde superior de cámara de compactación:

*“Estas superficies se deben lubricar según sea necesario”.*

Las tres sujeciones o descansos de las abrazaderas utilizadas para asegurar la cabeza giratoria a la cámara de compactación se deben lubricar con grasa de disulfuro de molibdeno, según sea necesario, para facilitar la elevación de dichos sujetadores y ubicarlos en posición vertical.

De igual forma se debe cubrir el borde superior de la cámara de compactación con disulfuro de molibdeno pero en *polvo*, para proporcionar un acople y sellado entre la cabeza giratoria y dicha cámara.



Gráfico 6-12: Lubricación de una *sujeción de la abrazadera*.



Gráfico 6-13: Polvo de disulfuro de molibdeno en borde superior de cámara.

### 6.5.2. Ajuste de abrazaderas:

Las tres abrazaderas que fijan la cabeza giratoria a la cámara de compactación deben ser ajustadas de tal forma que las tres restrinjan el movimiento de dicha cabeza en igual intensidad, caso contrario si una de ellas no está apretada como las otras dos, la superficie de la sujeción de la misma está sujeta a un mayor desgaste. La tensión de sujeción en cada abrazadera es ajustable fácilmente utilizando una llave “Allen” y una llave inglesa, tratando de considerar que la intensidad de ajuste debe ser la mayor posible y que a la vez permita activar y desactivar fácilmente dichos dispositivos.

El procedimiento descrito a continuación explica cómo ajustar la tensión de las abrazaderas:

- ✓ Asegúrese de que el pistón de carga esté retraído en la parte inferior de la cámara de compactación.
- ✓ Cierre la cámara de compactación y reprímala usando las tres abrazaderas.
- ✓ Ajuste cualquier abrazadera individual como se describe a continuación:
  - A. En primer lugar, utilice la llave Allen para aflojar el juego de tornillos hexagonales que sujetan la leva a la cámara.

- B. A continuación, utilice una llave inglesa para aflojar la propia leva de la cámara.
- C. Una vez aflojada dicha leva, la abrazadera deberá moverse libremente.
- D. Usando una mano para sujetar la abrazadera en un ángulo de 45°, utilice la otra para apretar la leva hasta tal punto que dicha abrazadera quede suspendida en la forma inclinada mencionada sin apoyo alguno.
- E. Use la llave inglesa para propiciar a la leva el ajuste necesario, similar a su estado original.
- F. Utilice nuevamente la llave Allen para apretar el conjunto de tornillos de leva.
- ✓ Una vez ajustada cada abrazadera, ésta deberá fácilmente ser activada y desactivada, en caso de lo opuesto (demasiado apretada), repita el paso anterior, teniendo cuidado con el literal E.

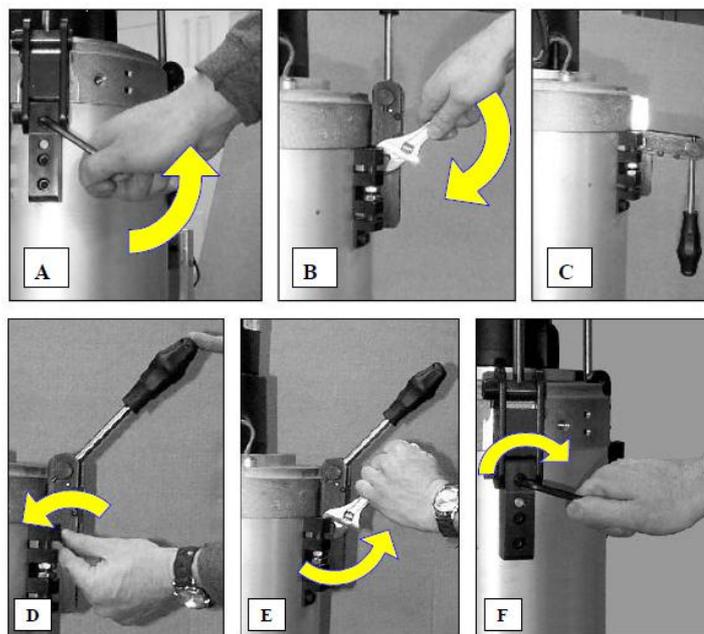


Gráfico 6-14: Ajuste de las abrazaderas en la cámara de compactación.

Fuente: Pine Instrument Company, 2011.

### 6.5.3. Sistema hidráulico:

En el sistema hidráulico se debe utilizar solamente aceite hidráulico filtrado. El nivel de aceite debe ser inspeccionado semanalmente (o cada 30 especímenes) para asegurar que el sistema hidráulico continúe funcionando adecuadamente. Si el nivel de aceite es demasiado bajo, se debe añadir aceite al sistema, el cual debe ser únicamente del tipo *Mobil DTE 24* o *ISO VG 32*.

Siempre que cualquier aceite nuevo se añada al sistema o si se lo percibe sucio después de un período prolongado de uso, en ambos casos dicho aceite debe ser filtrado a presión utilizando un equipo especial de filtro de aceite que ofrece *Pine Instrument Company*, es decir nunca agregar el aceite al sistema sin antes haber ejecutado el filtrado requerido, ya que el aceite tomado directamente del envase respectivo es demasiado sucio para utilizar en el compactador AFGB1.

A continuación se describe las instrucciones que se deben seguir para chequear el nivel de aceite requerido para el adecuado funcionamiento del equipo:

- ✓ El aceite hidráulico debe estar a temperatura ambiente durante la inspección, el pistón de carga debe estar retraído en el fondo de la cámara y el compactador debe estar apagado.
- ✓ Retire el panel frontal del gabinete hidráulico (situado debajo de la cámara de compactación).
- ✓ Limpiar a fondo la parte superior de la zona del reservorio hidráulico y el tubo de vertido, para evitar que escombros externos desciendan dentro de dicho depósito.
- ✓ Desatornille y retire el conjunto del tubo de vertido. Normalmente esto se puede hacer a mano, pero también puede utilizar una herramienta si es necesario.
- ✓ Inspeccione el nivel de aceite en el interior del reservorio. El nivel de aceite (en frío) debe ser lo suficientemente alto como para cubrir el

tubo brillante de retorno de aceite, visible dentro del reservorio; sin embargo, el nivel de aceite (en frío) no debe estar a menos de 1 pulgada de la parte superior del reservorio, esto se cumple para dejar espacio suficiente para que el aceite se expanda cuando se sea calentado.

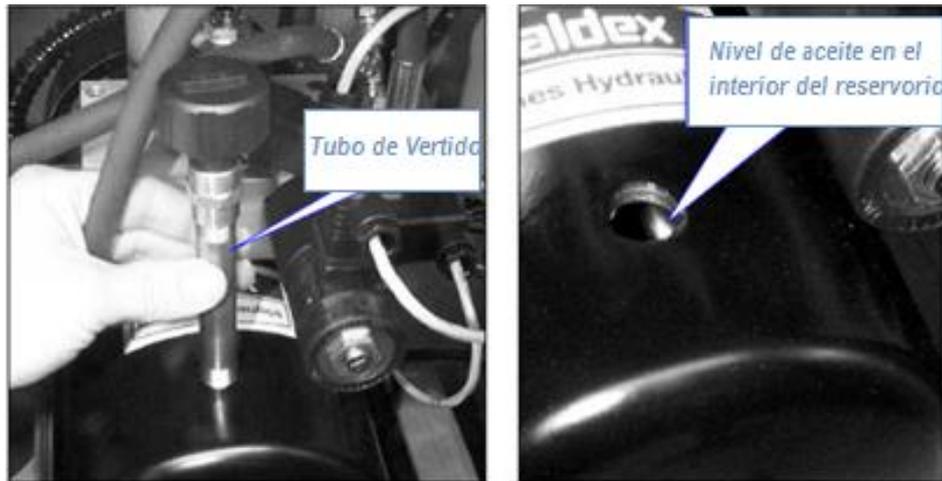


Gráfico 6-15: Chequeo del nivel de aceite hidráulico.

Fuente: Pine Instrument Company, 2011.

#### **6.5.4. Enganches de retención del molde:**

Alrededor de la parte inferior de la cámara de compactación se encuentran estos tres enganches de retención de molde, los cuales enganchan al mismo cada vez que el pistón hidráulico está activo, en donde estos enganches encajan con las tres correspondientes muescas provistas alrededor de la parte inferior del molde.

Los tres mecanismos de enganche se suelen dañar fácilmente por los escombros de la mezcla compactada, por lo que es muy importante mantener limpio el fondo de la cámara de compactación. Para tal acto, se puede usar un destornillador para disgregar los desechos y luego una aspiradora para eliminar las partículas de la cámara de compactación. Por

tal motivo se debe inspeccionar periódicamente tanto los enganches del molde como las muescas correspondientes del mismo.

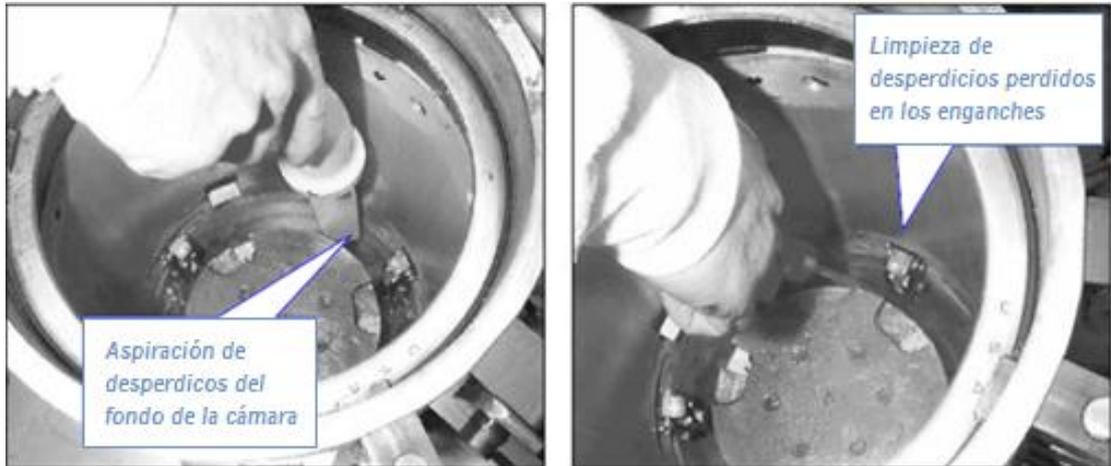


Gráfico 6-16: Limpieza del fondo de la cámara de compactación.

Fuente: Pine Instrument Company, 2011.

#### **6.5.5. Limpieza del equipo de compactación:**

Las superficies de metal en el compactador AFGB1 se pueden limpiar utilizando WD-40 o un similar desengrasante. El panel de control principal puede limpiarse con un paño suave y un detergente moderado.

Los moldes deben limpiarse cada vez que se usen y principalmente dicha tarea es más fácil cuando todavía dichos moldes están calientes, ya que el aglutinante asfáltico es menos viscoso. WD-40 es un disolvente eficaz para remover dicho fluido.

## CAPÍTULO 7: PROCEDIMIENTOS DE PRUEBAS

### 7.1. Proceso de preparación del espécimen compactado por Metodología Superpave:

A continuación se presenta en términos generales los pasos a seguir para preparar la briqueta compactada en el Compactador Giratorio Superpave (C.G.S.):

- ✓ Se importa una porción de la mezcla asfáltica en caliente (140°C) que produce cada planta en análisis, alrededor de unos 20 kg por planta, ya que se realizarán tres briquetas en el C.G.S. y tres adicionales por el Método Marshall.



Gráfico 7-1: Obtención de mezcla asfáltica en caliente directamente de la planta.

- ✓ Se pesa alrededor de 4 a 5 kg de mezcla caliente en una bandeja metálica (previamente pesada), para alcanzar un espécimen compactado de 115 mm de altura aproximadamente, lo cual depende de las características de cada mezcla.



Gráfico 7-2: Bandeja metálica con mezcla asfáltica siendo pesada.

- ✓ Se coloca el sistema antes pesado (mezcla + bandeja) en un horno eléctrico a una temperatura de 135°C por un tiempo aproximado de 2,5 horas para someter a la mezcla a un envejecimiento a corto plazo, tratando de revolver la misma cada 30 minutos para asegurar una absorción uniforme del ligante asfáltico por parte del agregado; durante el proceso de envejecimiento la mezcla debe esparcirse de tal forma que resulte en un espesor correspondiente a 21 o 22 kg/m<sup>3</sup> de mezcla en la bandeja. El molde de compactación y los platos de base del C.G.S. deben también someterse a la misma temperatura unos 45 minutos antes de retirar la mezcla del horno.



Gráfico 7-3: Bandeja metálica con mezcla, molde y platos de base dentro de horno eléctrico.

- ✓ Mientras transcurre el tiempo de calentado de la muestra en el horno, se debe avanzar con la configuración del C.G.S., en donde se debe editar principalmente el *número de giros máximos ( $N_{max}$ )*, el mismo que depende del ESAL de diseño y el promedio de la máxima temperatura del aire registrada en los 7 días más cálidos del año del sitio para el cual corresponde la mezcla en cuestión. Además de la parte digital, se debe revisar el engrasado de los componentes más involucrados en el proceso de compactación, limpieza y el nivel de aceite para el sistema hidráulico, según lo que indica el manual del equipo (explicado anteriormente).

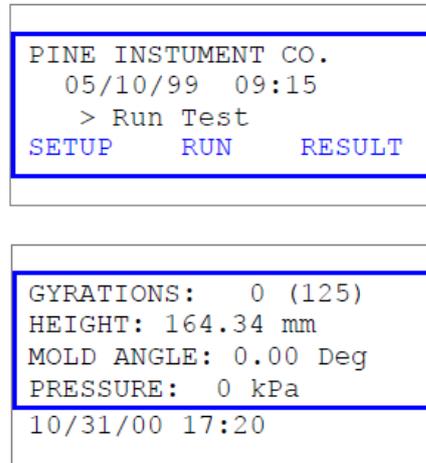


Gráfico 7-4: Función SETUP.

Fuente: Pine Instrument Company, 2011.

- ✓ Se retira el molde de compactación una vez finalizado el tiempo de calentado, se coloca sobre una superficie plana y sólida, en el interior del mismo se introduce el plato de base inferior (sin grasa) con la ayuda del dispositivo magnético correspondiente (tomando en cuenta que el bisel del mismo esté boca abajo o alejado de la mezcla), aunque el plato inferior también puede ser ingresado en el molde antes de ser calentado; sobre éste plato se coloca un disco de papel que evita que la mezcla caliente se adhiera al mismo.



Gráfico 7-5: Plato base inferior introducido con el dispositivo magnético.

Fuente: Pine Instrument Company, 2011.



Gráfico 7-6: Platos base y molde compactación.

- ✓ Se ingresa la mezcla caliente dentro del molde con el uso de un embudo y cuchara, u otros dispositivos que permitan el rápido movimiento de la misma al interior del sistema. La masa de la mezcla debe ser tal que permita obtener una briqueta compactada de 110 a 120 mm de altura (una vez aplicado el número de giros máximos).



Gráfico 7-7: Embudo y cuchara para verter la mezcla en el molde.

- ✓ Ingresada la mezcla, se coloca el segundo disco de papel y sobre éste se ubica el plato de molde superior (con grasa perimetral) con el bisel hacia arriba, usando el dispositivo magnético antes mencionado.
- ✓ Con las pinzas propias del equipo, se desplaza el molde lleno de mezcla hacia el C.G.S. insertando las clavijas en los dos agujeros situados en la parte superior del molde; para este movimiento se debe considerar una adecuada posición de elevación ya que el sistema resulta ser muy pesado.



Gráfico 7-8: Pinzas con clavijas para desplazar el molde lleno de mezcla.

- ✓ Se ingresa el molde lleno de mezcla en la cámara de compactación haciendo ligeros movimientos rotacionales con las pinzas hasta que el molde quede sentado sobre el plato de presión (situado en el fondo) y luego se debe girar el molde en dirección de las agujas del reloj hasta que los pines internos del mismo coincidan con las muescas del plato

de presión. Cuando ya no se pueda ejercer movimiento en dicha dirección, entonces el sistema está listo para ser compactado.



Gráfico 7-9: Molde siendo ingresado en la cámara de compactación.

- ✓ Se cierra la cámara de compactación, asegurando la tapa con las tres abrazaderas que deben quedar en posición vertical.

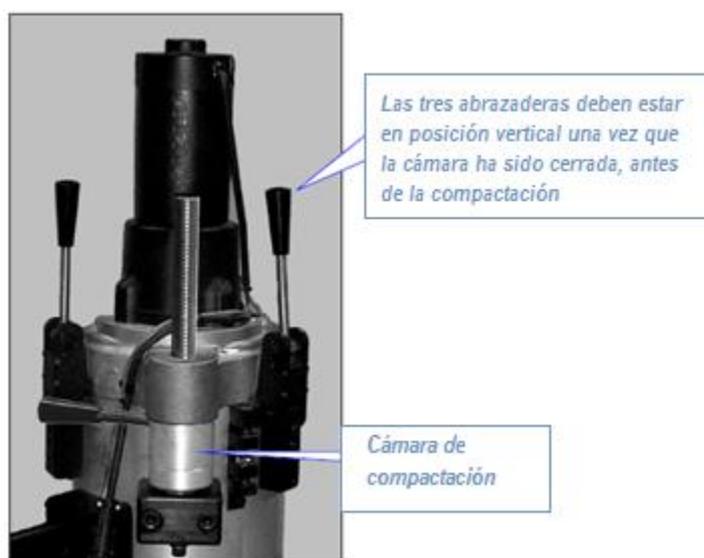


Gráfico 7-10: Abrazaderas asegurando la cámara de compactación.

- ✓ Se oprime el botón START ubicado en la consola de la máquina para comenzar la compactación, en donde la máquina en forma digital mostrará el avance el proceso exponiendo la siguiente información:
  - Número de giros completados.
  - La altura de la muestra para cada giro.
  - El ángulo del molde externo.
  - La presión de compactación.
  - La fecha y hora de la prueba.



Gráfico 7-11: Parámetros de una compactación en proceso.

- ✓ Completado el número de giros máximos, automáticamente el equipo deja de compactar, entonces se procede a aflojar las abrazaderas de manera que la cabeza giratoria esté libre para girar. Se utiliza la tuerca de elevación y el mango dispuestos en la cabeza mencionada, para elevar y girar al mismo tiempo, consiguiéndose que la cámara esté sin obstrucciones y poder extraer el espécimen.



Gráfico 7-12: Molde listo para ser extraído.

- ✓ El embudo utilizado para verter la mezcla al inicio del proceso, se ubica en la parte superior de la cámara de compactación y se conecta a éste con las tres abrazaderas en posición vertical para que el molde quede fijo al ser extraída la briqueta.
- ✓ Para extraer la muestra del fondo de la cámara, se debe oprimir dos veces el botón UNLOAD que se muestra en la consola. Previamente antes de esta ejecución se puede quitar el plato molde superior con el imán. Adicional al anterior paso se pulsa la tecla REVRS para asegurar que la cabeza giratoria está estacionado correctamente.
- ✓ Con la muestra fuera del molde, se retira el disco de papel superior y se la desplaza hasta una superficie cerca y firme, retirando el otro disco de papel inferior, se deja enfriar a temperatura ambiente. El traslado del espécimen se puede hacer de forma manual (usando guantes) o con un dispositivo propio para el efecto que eleva la muestra desde el plato molde inferior.

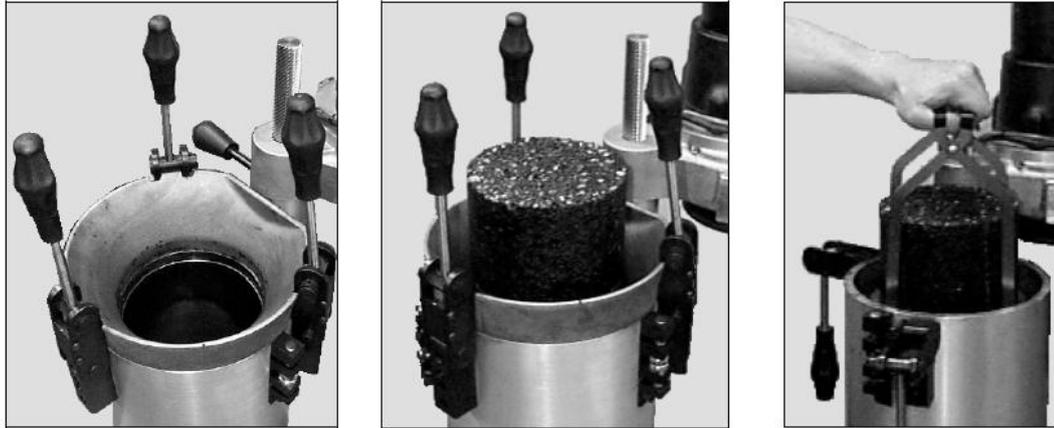


Gráfico 7-13: Embudo, muestra siendo extraída y dispositivo para elevar la briqueta.

- ✓ Se retira el embudo de la cámara y se presiona el botón RESET para desplazar hacia abajo el plato de presión, tratando de que coincidan los pines del molde con las muescas de dicho plato.
- ✓ Para remover el molde del interior de la cámara se lo puede realizar manualmente con las pinzas utilizadas anteriormente o con el sistema hidráulico del plato de presión, para el cual se debe girar el molde en sentido contrario a las agujas del reloj, haciendo que los pines se alejen de las muescas. Una vez ubicada en la posición descrita, se presiona dos veces nuevamente UNLOAD para extraer el molde y luego ser trasladado al igual que la muestra a un sitio cercano, manipulado con las manos (con guantes) o con las pinzas de clavijas.



Gráfico 7-14: Extracción manual del molde con las pinzas de clavijas.

- ✓ Si se usó el método hidráulico para extraer el molde, se presiona RESET para que el plato de presión descienda a su posición original y se cierra la cámara de compactación.
- ✓ El molde y los platos base, deben ser limpiados después de cada prueba con un disolvente (puede ser desengrasante) para remover residuos de grasa y betún.
- ✓ Finalmente para exportar los datos de la prueba, se puede presionar PRINT para enviar la información directamente a una impresora contactada al equipo o usando la función SEND para enviarla a una computadora personal. Ambas funciones se encuentran en el comando RESULT del Menú Principal (HOME).



Gráfico 7-15: Impresora de cinta conectada al C.G.S.



Gráfico 7-16: Molde, platos de base y briqueta después de un ensayo de compactación.

## 7.2. Proceso de preparación del espécimen compactado por Metodología Marshall:

A continuación se expone en términos generales los pasos a seguir para preparar la briqueta compactada tipo Marshall:

- ✓ De la cantidad de mezcla asfáltica caliente (alrededor de 20 kg) tomada originalmente en la planta específica, cierta porción se designa para preparar tres briquetas de aproximadamente 1100 gramos cada una.
- ✓ La temperatura de los moldes de compactación (con sus accesorios) y la mezcla asfáltica debe ser de 135°C, en caso contrario si dicha mezcla redujo su temperatura (tiempo de transporte entre planta y laboratorio), entonces se debe proceder al recalentado de la misma.



Gráfico 7-17: Moldes de compactación (4" de diámetro x 3" de altura) con sus respectivos collarines y bases.

- ✓ El recalentado de la mezcla se puede realizar en una cocineta, tratando de conseguir un calentamiento uniforme y rápido mediante el uso de una espátula. El avance del crecimiento del calor se lo mide gradualmente con un termómetro análogo de varilla de acero que registra la temperatura entre 10° y 290°C con una precisión de 2,5 °C.



Gráfico 7-18: Mezcla asfáltica siendo recalentada en una cocineta convencional.

- ✓ Cabe recalcar que la porción a recalentar correspondería al de las tres briquetas (no individual), es decir en una cantidad de aproximadamente 3300 gramos.
- ✓ Una vez que la mezcla ha alcanzado la temperatura deseada, se extrae los moldes (con sus accesorios) que previamente se introdujeron en el horno eléctrico (alrededor de 30 minutos antes del recalentado de la mezcla) y se aplica aceite en las paredes internas de los mismos para facilitar la extracción de la briqueta compactada.
- ✓ Se procede al vaciado de la porción de mezcla caliente de 1100 gramos o hasta alcanzar una altura que sobrepase 0,5 cm por encima del borde superior del molde (una vez proporcionado las punzadas que se indican en seguida). Se empareja la mezcla con una espátula, propiciando hincados superficiales, unas 15 veces alrededor del perímetro y 10 veces en la parte central.
- ✓ Se coloca el conjunto (molde más base y collarín) con la respectiva mezcla caliente sobre el pedestal (soporte de madera sobre el cual descansa una placa de acero) del dispositivo electromecánico propio para el ensayo Marshall.



Gráfico 7-19: Compactador electromecánico para el ensayo Marshall.

- ✓ Se aplica el soporte del molde (dispositivo de tensión elástica) a la parte superior del collarín para mantener firme el conjunto con el pedestal. Se acopla el martillo de compactación al equipo compactador (compuesto por un cilindro o mazo de acero 10 libras (4,5Kg) con una perforación central que permite su deslizamiento vertical por una guía o varilla de acero).
- ✓ Se enciende la máquina de compactación, entonces el martillo comienza a golpear (con su pieza circular de 98.4mm de diámetro en su extremo) directamente sobre la superficie de la mezcla, con una altura de caída de 18" (457,2mm).



Gráfico 7-20: Compactación tipo Marshall en proceso.

- ✓ Se dejar caer 75 veces (golpes) el martillo sobre la mezcla, es decir que según el procedimiento Marshall se propicia la máxima energía de compactación, esto se hace para el presente proyecto, en otros casos puede variar el número de golpes. Finalizado la cantidad respectiva de golpes, se desarma el conjunto y se quita el collarín del molde, se da vuelta el molde (para exponer la cara inferior de la mezcla ante el martillo) y se vuelve a ejecutar los 75 golpes a la cara opuesta.
- ✓ Se desarma el equipo de compactación, se extrae solamente el molde (sin base y collarín) y se somete a la briqueta compactada a un enfriamiento forzado por sumergencia en agua, hasta alcanzar la temperatura ambiente (por lo menos 30 minutos), tratando de mantener así sus dimensiones e impedir la aparición de fisuras.



Gráfico 7-21: Molde sumergido completamente en agua.

- ✓ Transcurrido el tiempo necesario para que el molde alcance la temperatura ambiente y la briqueta adquiriera cierta consistencia, se lo coloca en el extractor de muestras o prensa hidráulica, que permite extraer adecuadamente la briqueta del interior del molde.



Gráfico 7-22: Molde colocado en el extractor de muestras.

- ✓ Se procede inmediatamente la identificación de cada espécimen con un crayón o tiza especial, para evitar posibles confusiones y resultados erróneos.

### **7.3. Proceso para la determinación de la Gravedad específica bruta de la mezcla asfáltica (Gmb):**

#### **7.3.1. Para briquetas tipo Marshall:**

- ✓ Con la ayuda de una balanza electrónica de precisión 0,1 gramos, se pesa al aire cada una de las 3 briquetas de cada planta (con un total de 15 unidades), enumerándolas de acuerdo al orden de pesado y en lo posterior distinguirlas con su respectivo **Peso en Aire (P.A.)**.



Gráfico 7-23: Balanza electrónica de precisión 0,1 g registrando el Peso Seco.

- ✓ Luego, se sumerge cada briqueta identificada mediante un sistema de alambres que las hacen colgar dentro de un recipiente con agua y a la

vez conectarlas con la balanza, a este valor registrado se lo conoce como **Peso en Agua (P.Ag.)**.

- ✓ De forma inmediata, se extrae la briqueta saturada y se aplica un papel absorbente en su superficie hasta retirar el baño de agua visible, rápidamente se ubica en la balanza y se obtiene el **Peso en Aire con Superficie Seca (P.S.S.)**, el cual es ligeramente mayor al Peso Seco.

Nota: La diferencia entre el (P.S.S.) y el (P.Ag.), es el peso equivalente de agua para ocupar el mismo volumen de la briqueta, es decir es el volumen bruto de la mezcla compactada (Vmb).

Utilizando los datos anteriores se consigue el Gmb de la mezcla compactada:

$$G_{mb} = \frac{\text{Peso en Aire}}{\text{Peso en Aire con Superficie Seca} - \text{Peso en Agua}}$$

Este procedimiento lo consideramos válido ya que se trata de briquetas confeccionadas con mezclas densas.

### **7.3.2. Para cilindros tipo Superpave:**

Se puede utilizar el procedimiento anterior para el cálculo del Gmb incorporando el uso de parafina, debido a que estos especímenes tienen una gran superficie cilíndrica (diámetro 150mm y altura 115mm) en comparación con las briquetas tipo Marshall, por tanto la absorción que se presentaría al sumergir en agua sería muy grande y no permitiría calcular correctamente el volumen bruto de la mezcla compactada. Un detalle de interés es que al aplicar el procedimiento SUPERPAVE la superficie de los cilindros siempre queda más porosa que en el procedimiento Marshall.

Como alternativa de solución se puede obtener dicho volumen midiendo la altura en diferentes posiciones con un calibrador Vernier y luego determinando la altura promedio ( $h$ ). El diámetro ( $d$ ) es establecido por el molde empleado (150 mm).

$$\gamma_{mb} = \frac{\text{Peso Seco}}{(\pi d^2/4)(h)} = \frac{g}{cm^3}$$

$$G_{mb} = \frac{\gamma_{mb}}{1 \frac{g}{cm^3}}$$



Gráfico 7-24: Foto comparativa de briquetas y cilindros.

#### 7.4. Proceso para la determinación del valor de estabilidad y flujo de las briquetas tipo Marshall:

- ✓ Utilizando la enumeración hecha en el ensayo de *Gmb*, se miden las alturas correspondientes a cada biqueta, con el fin de aplicar el factor de corrección por altura en la Estabilidad Marshall.



Gráfico 7-25: Briquetas tipo Marshall enumeradas con relación a cada planta asfáltica.

- ✓ Posteriormente, las muestras compactadas se sumergen totalmente en un baño de agua (a 2 cm por encima de los especímenes y un falso fondo perforado para mantenerlos a 5 cm sobre el fondo del reservorio) a una temperatura de 60°C (140°F) por un lapso de 30 minutos. Generalmente dicha temperatura es la más alta que alcanza un pavimento asfáltico en servicio.
- ✓ Las briquetas son removidas del agua y secadas superficialmente de forma inmediata, para luego ser ubicadas dentro de un sistema de mordazas, en las cuales sus barras guías son lubricadas para que la mordaza superior se deslice libremente. Posteriormente, dicho sistema se coloca en la prensa electrónica Marshall y se ajustan secuencialmente el deformímetro del anillo de carga y el medidor de flujo diametral.



Gráfico 7-26: Briquetas tipo Marshall sumergidas en un baño de agua a 60°C.



Gráfico 7-27: Briqueta colocada en la prensa electrónica Marshall.

- ✓ Al iniciar el ensayo (Run Test), el equipo aplica una compresión diametral a la muestra a una velocidad de 2 in/min hasta registrar un máximo valor en el deformímetro del anillo de carga (en

0,0001pulgada), dando por terminado el ensayo. A éste valor se lo trasforma en *carga (sin corregir)* utilizando las tablas de calibración del anillo o su ecuación correspondiente. Por último, se aplica un factor de corrección por altura de briquetas con relación a la estándar (63,5 mm ó 2,5 in) determinándose así la *carga corregida* o **Estabilidad Marshall**.

Tabla 7-1: Factores de corrección por altura en la Estabilidad Marshall.

Volume of Specimen, cm <sup>3</sup>	Approximate Thickness of Specimen,		Correlation Ratio
	mm	in.	
200 to 213	25.4	1	5.56
214 to 225	27.0	1 1/16	5.00
226 to 237	28.6	1 1/8	4.55
238 to 250	30.2	1 3/16	4.17
251 to 264	31.8	1 1/4	3.85
265 to 276	33.3	1 5/16	3.57
277 to 289	34.9	1 3/8	3.33
290 to 301	36.5	1 7/16	3.03
302 to 316	38.1	1 1/2	2.78
317 to 328	39.7	1 9/16	2.50
329 to 340	41.3	1 5/8	2.27
341 to 353	42.9	1 11/16	2.08
354 to 367	44.4	1 3/4	1.92
368 to 379	46.0	1 13/16	1.79
380 to 392	47.6	1 7/8	1.67
393 to 405	49.2	1 15/16	1.56
406 to 420	50.8	2	1.47
421 to 431	52.4	2 1/16	1.39
432 to 443	54.0	2 1/8	1.32
444 to 456	55.6	2 3/16	1.25
457 to 470	57.2	2 1/4	1.19
471 to 482	58.7	2 5/16	1.14
483 to 495	60.3	2 3/8	1.09
496 to 508	61.9	2 7/16	1.04
509 to 522	63.5	2 1/2	1.00
523 to 535	65.1	2 9/16	0.96
536 to 546	66.7	2 5/8	0.93
547 to 559	68.3	2 11/16	0.89
560 to 573	69.8	2 3/4	0.86
574 to 585	71.4	2 13/16	0.83
586 to 598	73.0	2 7/8	0.81
599 to 610	74.6	2 15/16	0.78
611 to 625	76.2	3	0.76

*Ecuación para transformar la lectura registrada en el deformímetro del anillo de carga (0,0001 in) a la Carga (sin corregir) en Lbf:*

$$\text{Carga (sin corregir)} = (7,406613 * \text{Lectura Anillo}) + 12,69187$$

- ✓ Al concluir el ensayo, a su vez se observa el valor del deformímetro diametral o medidor de **Flujo Marshall** en centésimas de pulgada (0,01 in), que corresponde a la variación del diámetro de la briqueta entre la carga cero y la de rotura.

### **7.5. Proceso para la determinación de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica (Gmm):**

#### **Equipos:**

- Picnómetro de Vacío: Recipiente volumétrico de aluminio con un volumen de 4,34 litros y una capacidad máxima para alojar la muestra asfáltica de 2,9 litros o 2500 gramos; presenta un diámetro de aproximadamente 7,5 pulgadas (190,5 mm) y una altura de 6 pulgadas (152,4 mm); y está equipado con una tapa transparente con empaquetadura de goma y una conexión para la línea de vacío.
- Balanza: Con una precisión de 0.1 gr y conforme a los requerimientos 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 30 mmHg) 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: De escala, 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 mantener una temperatura constante de 110°C.

### **Procedimiento:**

- ✓ Primero se debe calibrar el picnómetro, el cual ha sido utilizado para registrar el peso en aire, para lo cual se debe determinar adecuadamente el peso del agua requerido para llenarlo a una temperatura de 25°C mediante el uso de una placa de vidrio que sirva de cubierta y enrase (PESO PICNÓMETRO + AGUA).
- ✓ Si se parte de briquetas compactadas, entonces debe calentar las mismas el tiempo suficiente para desmenuzarlas a mano, teniendo cuidado de no fracturar las partículas minerales. Luego se deja enfriar la muestra a temperatura ambiente.
- ✓ Pesar el recipiente volumétrico con la muestra desmenuzada y designar un peso neto (PESO MEZCLA SUELTA). Agregar suficiente agua a una temperatura de 25°C, para cubrir la mezcla completamente.
- ✓ Colocar el picnómetro de vacío con la muestra y el agua, en el dispositivo de agitación mecánica y se procede a remover 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 y aplicando una agitación a intervalos de 2 minutos (casi 8 veces). El vacío puede aplicarse y disminuirse gradualmente empleando la válvula de vacío.

- ✓ Inmediatamente, luego de remover el aire atrapado, se introduce agua lentamente en el picnómetro de vacío, tratando de no introducir aire en la muestra y se registra la temperatura en el interior.
- ✓ Se retira el termómetro a escala y se llena totalmente el picnómetro con agua, utilizando la placa de vidrio anterior para cubrir y verificar el nivel del líquido, sin dejar aire atrapado por debajo de dicha placa.
- ✓ Se Elimina cualquier humedad del exterior del picnómetro de vacío y de la placa y enseguida se determine la masa del picnómetro de vacío más la placa y sus contenidos completamente lleno de agua, designando a este sistema como el PESO PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL.
- ✓ Por último, para la obtención del RICE o  $G_{mm}$ , se debe de usar la siguiente ecuación:

$$G_{mm} = \frac{C}{(A + C - B)}$$

Donde:

A = PESO PICNÓMETRO + AGUA (gr)

B = PESO PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL (gr)

C = PESO DE LA MEZCLA SUELTA (gr)

## 7.6. Resultados obtenidos:

A continuación se presentan los parámetros volumétricos más importantes y de interés en este análisis para cada mezcla asfáltica de las 5 plantas involucradas, los mismos que fueron calculados mediante las fórmulas de la Sección 3.3. (Capítulo 3) a partir de sus correspondientes parámetros conocidos (Pb, Gb y Gsb) expuestos en la *Tabla 5-3* (Capítulo 5), del Gmm (*Tabla 7-2*) y del Gmb expresado en el *Anexo 1* para las briquetas tipo Marshall elaboradas bajo 75 golpes/cara (Tráfico Pesado):

Tabla 7-2: Gravedad específica teórica máxima de las mezclas (Rice).

<b>Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (Rice)</b>				
<i>Plantas de Asfalto</i>	<i>Picnómetro + agua</i>	<i>Picnómetro + agua + material</i>	<i>Mezcla Suelta</i>	<b>Gmm</b>
	<i>gramos</i>	<i>gramos</i>	<i>gramos</i>	$\frac{C}{(A + C - B)}$
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	
<i>DURÁN</i>	7191	7773	1120	<b>2,082</b>
<i>KM. 26</i>	7191	7870	1125	<b>2,522</b>
<i>VÍA A LA COSTA</i>	7191	8082	1567	<b>2,318</b>
<i>CHIVERIA</i>	7191	7842	1066	<b>2,569</b>
<i>PICOAZÁ</i>	7191	7780	1003	<b>2,423</b>

Tabla 7-3: Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica de la Planta de “Durán”

<i>Parámetros conocidos de los componentes de la HMA compactada:</i>				
	$G_{mb} =$	1,989		
	$G_{sb} =$	2,170		
	$G_{mm} =$	2,082		
	$G_b =$	1,018		
	$P_b =$	7,02	%	
<i>Gravedad Específica Efectiva del Agregado:</i>				
		$G_{se} =$	2,260	
<i>Contenido de Asfalto Absorbido:</i>				
		$P_{ba} =$	1,87	%
<i>Contenido de Asfalto Efectivo:</i>				
		$P_{be} =$	5,28	%
<i>Porcentaje de vacíos de aire:</i>				
		$V_{aire} =$	4,43	%
<i>Vacíos en el agregado mineral:</i>				
		$VMA =$	14,75	%
<i>Vacíos llenos de asfalto:</i>				
		$VFA =$	69,95	%

Tabla 7-4: Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica de la Planta de “Km.26”

<i>Parámetros conocidos de los componentes de la HMA compactada:</i>					
	$G_{mb} =$	2,411			
	$G_{sb} =$	2,674			
	$G_{mm} =$	2,522			
	$G_b =$	1,018			
	$P_b =$	6,01	%		
<i>Gravedad Específica Efectiva del Agregado:</i>					
		$G_{se} =$	2,786		
<i>Contenido de Asfalto Absorbido:</i>					
		$P_{ba} =$	1,53	%	
<i>Contenido de Asfalto Efectivo:</i>					
		$P_{be} =$	4,58	%	
<i>Porcentaje de vacíos de aire:</i>					
		$V_{aire} =$	4,43	%	
<i>Vacíos en el agregado mineral:</i>					
		$VMA =$	15,26	%	
<i>Vacíos llenos de asfalto:</i>					
		$VFA =$	70,98	%	

Tabla 7-5: Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica de la Planta de “Vía a la Costa”

<i>Parámetros conocidos de los componentes de la HMA compactada:</i>				
	$G_{mb} =$	2,215		
	$G_{sb} =$	2,439		
	$G_{mm} =$	2,318		
	$G_b =$	1,018		
	$P_b =$	6,42	%	
<i>Gravedad Específica Efectiva del Agregado:</i>				
		$G_{se} =$	2,541	
<i>Contenido de Asfalto Absorbido:</i>				
		$P_{ba} =$	1,67	%
<i>Contenido de Asfalto Efectivo:</i>				
		$P_{be} =$	4,86	%
<i>Porcentaje de vacíos de aire:</i>				
		$V_{aire} =$	4,45	%
<i>Vacíos en el agregado mineral:</i>				
		$VMA =$	15,02	%
<i>Vacíos llenos de asfalto:</i>				
		$VFA =$	70,36	%

Tabla 7-6: Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica de la Planta de “Chivería”

<i>Parámetros conocidos de los componentes de la HMA compactada:</i>					
	$G_{mb} =$	2,453			
	$G_{sb} =$	2,727			
	$G_{mm} =$	2,569			
	$G_b =$	1,018			
	$P_b =$	5,90	%		
<i>Gravedad Específica Efectiva del Agregado:</i>					
		$G_{se} =$	2,840		
<i>Contenido de Asfalto Absorbido:</i>					
		$P_{ba} =$	1,48	%	
<i>Contenido de Asfalto Efectivo:</i>					
		$P_{be} =$	4,50	%	
<i>Porcentaje de vacíos de aire:</i>					
		$V_{aire} =$	4,51	%	
<i>Vacíos en el agregado mineral:</i>					
		$VMA =$	15,36	%	
<i>Vacíos llenos de asfalto:</i>					
		$VFA =$	70,63	%	

Tabla 7-7: Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica de la Planta de "Picoazá"

<i>Parámetros conocidos de los componentes de la HMA compactada:</i>				
	$G_{mb} =$	2,328		
	$G_{sb} =$	2,587		
	$G_{mm} =$	2,423		
	$G_b =$	1,018		
	$P_b =$	6,80	%	
<i>Gravedad Específica Efectiva del Agregado:</i>				
		$G_{se} =$	2,694	
<i>Contenido de Asfalto Absorbido:</i>				
		$P_{ba} =$	1,56	%
<i>Contenido de Asfalto Efectivo:</i>				
		$P_{be} =$	5,34	%
<i>Porcentaje de vacíos de aire:</i>				
		$V_{aire} =$	3,92	%
<i>Vacíos en el agregado mineral:</i>				
		$VMA =$	16,14	%
<i>Vacíos llenos de asfalto:</i>				
		$VFA =$	75,71	%

A partir de las *Tablas 7-3 a 7-7*, se ha elaborado un resumen de los 3 parámetros en que se fundamenta esta investigación para la metodología Marshall:

Tabla 7-8: Resumen de parámetros volumétricos de las plantas asfálticas.

<b>Parámetros volumétricos de las mezclas asfálticas para briquetas tipo Marshall</b>					
<b>Plantas</b>	<i>Vacíos de aire</i>	<i>Vacíos en el agregado mineral</i>	<i>Vacíos rellenos con asfalto</i>	<i>Gmb</i>	<i>Gmm</i>
	<i>Va (%)</i>	<i>VMA (%)</i>	<i>VFA (%)</i>		
<b>DURÁN</b>	4,43	14,75	69,95	1,989	2,082
<b>KM. 26</b>	4,43	15,26	70,98	2,411	2,522
<b>VÍA A LA COSTA</b>	4,45	15,02	70,36	2,215	2,318
<b>CHIVERÍA</b>	4,51	15,36	70,63	2,453	2,569
<b>PICOAZÁ</b>	3,92	16,14	75,71	2,328	2,423

De la *Tabla 7-8* y a partir de los requisitos volumétricos planteados en las *Tablas 4-3 y 4-4*, se observa que:

- En cuanto al porcentaje de vacíos de aire, todas las mezclas asfálticas cumplen con el rango especificado en el respectivo método (3 a 5%), notando que la mezcla de *Picoazá* presenta el menor porcentaje (3,92%) y *Chivería* el mayor (4,51%), percibiendo que esta última muestra un incremento del 6,03% del Gmm y un 5,37% del Gmb, con respecto al primero. En otro caso las mezclas de *Durán* y *Km.26* indican similares vacíos de aire (4,43%), apreciando que esta última muestra un incremento del 21,13% del Gmm y un 21,21% del Gmb, con respecto al primero. Lo que indica que una diferencia de variación de más de 0,5% entre incrementos de Gmm y Gmb, provocaría un acrecentamiento de los *vacíos de aire* entre ambas mezclas.

- Con respecto a los vacíos en el agregado mineral, considerando que el tamaño máximo nominal de los agregados de todas las plantas es de  $\frac{1}{2}$ " a excepción de *Chivería* que es de  $\frac{3}{4}$ ", el mínimo VMA para las mezclas de *Durán*, *Km.26* y *Vía a la Costa* puede considerarse como 14,5%, para *Picoazá* igual a 14% y para *Chivería* de 13,5%. En cuanto a los tres primeros, todos cumplen con la especificación, siendo *Durán* la de menor valor a pesar que tiene el más alto porcentaje de asfalto (7,02%) lo que indica presencia de agregado poroso (absorbente de asfalto), la del *Km.26* es la de mayor valor de este grupo y presentando un bajo contenido de asfalto (6,01%) así mismo lo que revela un agregado compacto (baja permeabilidad). Analizando la planta de *Picoazá*, esta es la que más alto VMA posee y menor  $V_a$ , con un contenido de asfalto casi similar a la de *Durán* (6,80%) lo que evidencia un mayor VFA (*Tabla 7-8*). Por último *Chivería* cumple holgadamente con el VMA mínimo, presentando semejanzas en los resultados con la del *Km.26* fundamentado por tener contenidos de asfalto y gravedades específicas de los agregados muy parecidas.
- En cuanto a los vacíos rellenos con asfalto, todas las mezclas caen en el rango establecido para Tráfico Pesado (65 a 75%) excepto *Picoazá* (75,71%) lo que corrobora la poca absorción de asfalto, y bajo porcentaje de vacíos de aire.

Para finalizar con los parámetros de resistencia y deformación del método Marshall, se aprecia enseguida los resultados de la Estabilidad y Flujo obtenidos de las mezclas asfálticas en estudio:

Tabla 7-9: Resumen de Estabilidad y Flujo Marshall de las plantas asfálticas.

<b>Estabilidad y Flujo Marshall</b>		
<b>Plantas</b>	<i>Estabilidad</i>	<i>Flujo</i>
	<i>(libras)</i>	<i>(0,01 in)</i>
<b>DURÁN</b>	2940	14
<b>KM. 26</b>	2869	11
<b>VÍA A LA COSTA</b>	2364	12
<b>CHIVERÍA</b>	3861	12
<b>PICOAZÁ</b>	3441	14

En la *Tabla 7-9* se observa que:

- El valor de estabilidad para todas las mezclas sobrepasa el mínimo especificado de 1800 lb (MTO, 2002) en especial la planta de *Chivería*, ya que sobrepasa en más de dos veces dicha exigencia, mientras que en la planta de *Vía a la Costa*, la de menor estabilidad, la relación es de 1,3 veces respecto al exigido. El mayor problema que se podría presentar en las plantas con estabilidades muy elevadas (mayores a 3000 libras) es la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga.
- En cambio el valor de flujo de dichas mezclas si cumplen con el rango requerido de 8 a 14 pulg/100. *Durán* y *Picoazá* son los que están en el límite superior de este rango, debido a que son las dos mezclas de mayor contenido de asfalto y por tanto se ofrece una fricción interna entre agregados relativamente baja, lo que podría ocasionar ahuellamiento (deformación permanente).

En referencia al segundo *método de diseño Superpave*, se presenta a continuación los mismos parámetros volumétricos de interés presentados en el método anterior pero en este caso utilizando los cilindros obtenidos en el *Compactador Giratorio Superpave*, a partir de los mismos parámetros ya conocidos (Pb, Gb y Gsb), del Gmm (*Tabla 7-2*), del Gmb expresado en el *Anexo 3* para dichos cilindros tipo Superpave e incorporando las curvas de densificación propias de esta metodología de compactación:

Tabla 7-10: Parámetros de densificación en el C.G.S. Planta “Durán”.

ESALs diseño:	10 a 30	millones			Prom. Temp.:	<39	°C		
	Peso total (g):	4117,55				Gmb2(medida):	2,019		
	Gmm (medida):	2,082				Gmb3(medida):	2,031		
	Gsb (medida):	2,170				Pb (%):	7,02		
Número de Giros	Cilindro 2				Cilindro 3				%Gmm promedio
	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	
0	142,60	1,634	1,624	78,00	142,50	1,635	1,636	78,59	78,29
5	131,00	1,779	1,768	84,91	131,20	1,776	1,777	85,36	85,13
<b>8</b>	<b>128,40</b>	<b>1,815</b>	<b>1,804</b>	<b>86,63</b>	<b>128,60</b>	<b>1,812</b>	<b>1,813</b>	<b>87,08</b>	<b>86,85</b>
10	127,10	1,833	1,822	87,51	127,40	1,829	1,830	87,90	87,71
15	125,00	1,864	1,853	88,98	125,20	1,861	1,862	89,45	89,22
20	123,50	1,887	1,875	90,06	123,70	1,884	1,885	90,53	90,30
25	122,30	1,905	1,894	90,95	122,60	1,901	1,902	91,34	91,15
30	121,50	1,918	1,906	91,55	121,80	1,913	1,914	91,94	91,75
35	120,70	1,930	1,919	92,15	121,10	1,924	1,925	92,48	92,31
40	120,10	1,940	1,928	92,61	120,40	1,935	1,937	93,01	92,81
45	119,60	1,948	1,936	93,00	119,90	1,943	1,945	93,40	93,20
50	119,20	1,955	1,943	93,31	119,50	1,950	1,951	93,71	93,51
55	118,80	1,961	1,949	93,63	119,00	1,958	1,959	94,11	93,87
60	118,40	1,968	1,956	93,94	118,70	1,963	1,964	94,35	94,14
65	118,10	1,973	1,961	94,18	118,40	1,968	1,969	94,58	94,38
70	117,80	1,978	1,966	94,42	118,10	1,973	1,974	94,82	94,62
75	117,60	1,981	1,969	94,58	117,80	1,978	1,979	95,07	94,82
80	117,30	1,986	1,974	94,82	117,50	1,983	1,984	95,31	95,07
85	117,00	1,992	1,979	95,07	117,30	1,986	1,988	95,47	95,27
90	116,80	1,995	1,983	95,23	117,00	1,992	1,993	95,72	95,47
95	116,60	1,998	1,986	95,39	116,90	1,993	1,995	95,80	95,60
100	116,50	2,000	1,988	95,48	116,70	1,997	1,998	95,96	95,72
105	116,30	2,003	1,991	95,64	116,50	2,000	2,001	96,13	95,88
<b>109</b>	<b>116,20</b>	<b>2,005</b>	<b>1,993</b>	<b>95,72</b>	<b>116,30</b>	<b>2,003</b>	<b>2,005</b>	<b>96,29</b>	<b>96,01</b>
110	116,20	2,005	1,993	95,72	116,30	2,003	2,005	96,29	96,01
115	116,00	2,009	1,996	95,89	116,20	2,005	2,007	96,38	96,13
120	115,80	2,012	2,000	96,05	116,00	2,009	2,010	96,54	96,30
125	115,70	2,014	2,002	96,14	115,90	2,010	2,012	96,62	96,38
130	115,60	2,016	2,003	96,22	115,80	2,012	2,013	96,71	96,46
135	115,50	2,017	2,005	96,30	115,60	2,016	2,017	96,88	96,59
140	115,40	2,019	2,007	96,39	115,50	2,017	2,019	96,96	96,67
145	115,30	2,021	2,008	96,47	115,40	2,019	2,020	97,04	96,76
150	115,10	2,024	2,012	96,64	115,30	2,021	2,022	97,13	96,88
155	115,00	2,026	2,014	96,72	115,20	2,023	2,024	97,21	96,97
160	114,90	2,028	2,015	96,81	115,10	2,024	2,026	97,30	97,05
165	114,80	2,030	2,017	96,89	115,00	2,026	2,027	97,38	97,14
170	114,80	2,030	2,017	96,89	114,80	2,030	2,031	97,55	97,22
<b>174</b>	<b>114,70</b>	<b>2,031</b>	<b>2,019</b>	<b>96,97</b>	<b>114,80</b>	<b>2,030</b>	<b>2,031</b>	<b>97,55</b>	<b>97,26</b>

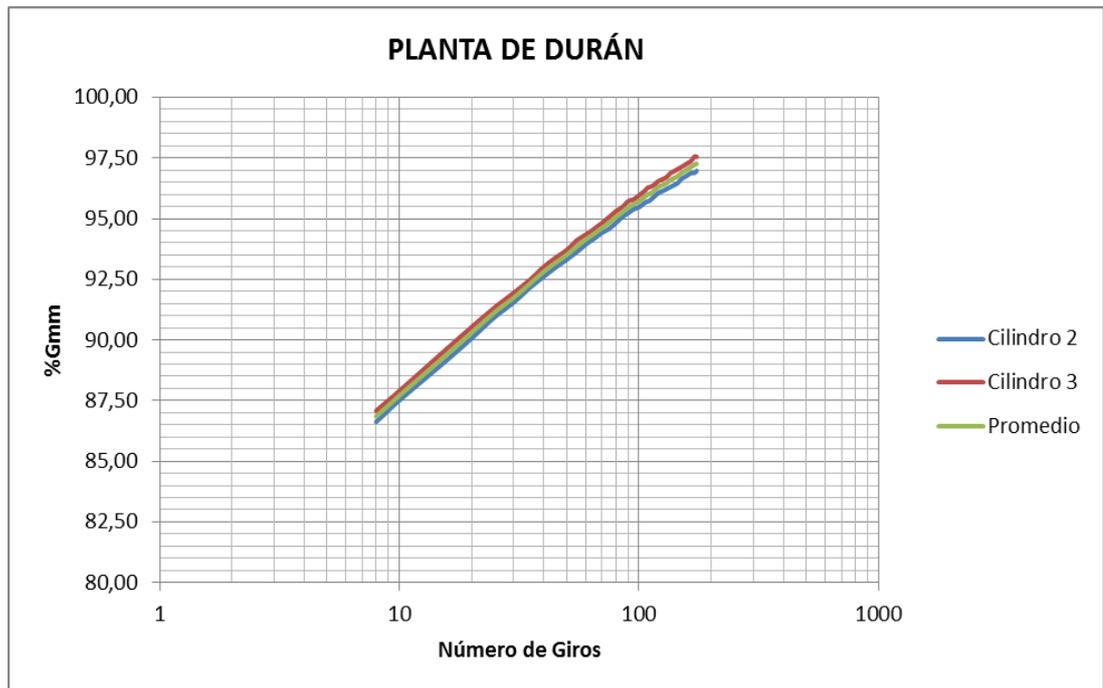


Gráfico 7-28: Curvas de densificación para la mezcla asfáltica de “Durán”.

Cilindro #	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndis	%Gmm@Nmax
2	86,63	95,72	96,97
3	87,08	96,29	97,55
<b>Promedio</b>	<b>86,85</b>	<b>96,01</b>	<b>97,26</b>
<b>%Vacíos de aire = 100 - %G<sub>mm</sub>@N<sub>diseño</sub></b>			
	<b>%Vacíos:</b>	<b>4,0</b>	
<b>%VMA = 100 - (%G<sub>mm</sub>@N<sub>diseño</sub> * G<sub>mm</sub> * P<sub>s</sub>)/G<sub>sb</sub></b>			
	<b>%VMA:</b>	<b>14,4</b>	
<b>%VFA = (%VMA - %Va)/%VMA * 100</b>			
	<b>%VFA:</b>	<b>72,2</b>	

Tabla 7-11: Parámetros de densificación en el C.G.S. Planta “Km.26”.

ESALs diseño:	10 a 30	millones			Prom. Temp.:	<39	°C		
		Peso total (g):	4938,70			Gmb2(medida):	2,435		
		Gmm (medida):	2,522			Gmb3(medida):	2,426		
		Gsb (medida):	2,674			Pb (%):	6,01		
Número de Giros	Cilindro 2				Cilindro 3				%Gmm promedio
	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	
0	139,10	2,009	1,999	79,27	139,60	2,002	1,997	79,17	79,22
5	128,30	2,178	2,167	85,94	128,80	2,170	2,164	85,81	85,88
<b>8</b>	<b>126,00</b>	<b>2,218</b>	<b>2,207</b>	<b>87,51</b>	<b>126,40</b>	<b>2,211</b>	<b>2,205</b>	<b>87,44</b>	<b>87,48</b>
10	124,90	2,238	2,226	88,28	125,30	2,230	2,225	88,21	88,24
15	123,10	2,270	2,259	89,57	123,40	2,265	2,259	89,57	89,57
20	121,80	2,295	2,283	90,53	122,10	2,289	2,283	90,52	90,52
25	120,80	2,314	2,302	91,28	121,20	2,306	2,300	91,19	91,23
30	120,10	2,327	2,315	91,81	120,40	2,321	2,315	91,80	91,80
35	119,50	2,339	2,327	92,27	119,90	2,331	2,325	92,18	92,23
40	118,90	2,350	2,339	92,73	119,40	2,341	2,335	92,57	92,65
45	118,50	2,358	2,347	93,05	118,90	2,350	2,344	92,96	93,00
50	118,10	2,366	2,355	93,36	118,60	2,356	2,350	93,19	93,28
55	117,80	2,372	2,361	93,60	118,20	2,364	2,358	93,51	93,55
60	117,50	2,378	2,367	93,84	117,90	2,370	2,364	93,75	93,79
65	117,10	2,387	2,375	94,16	117,70	2,374	2,368	93,91	94,03
70	116,90	2,391	2,379	94,32	117,40	2,381	2,374	94,15	94,23
75	116,70	2,395	2,383	94,48	117,20	2,385	2,378	94,31	94,39
80	116,40	2,401	2,389	94,73	117,00	2,389	2,382	94,47	94,60
85	116,30	2,403	2,391	94,81	116,80	2,393	2,387	94,63	94,72
90	116,10	2,407	2,395	94,97	116,70	2,395	2,389	94,71	94,84
95	115,90	2,411	2,399	95,13	116,50	2,399	2,393	94,87	95,00
100	115,80	2,413	2,401	95,22	116,40	2,401	2,395	94,95	95,09
105	115,60	2,418	2,406	95,38	116,20	2,405	2,399	95,12	95,25
<b>109</b>	<b>115,50</b>	<b>2,420</b>	<b>2,408</b>	<b>95,46</b>	<b>116,20</b>	<b>2,405</b>	<b>2,399</b>	<b>95,12</b>	<b>95,29</b>
110	115,50	2,420	2,408	95,46	116,10	2,407	2,401	95,20	95,33
115	115,30	2,424	2,412	95,63	116,00	2,409	2,403	95,28	95,46
120	115,20	2,426	2,414	95,71	115,90	2,411	2,405	95,36	95,54
125	115,10	2,428	2,416	95,80	115,80	2,413	2,407	95,45	95,62
130	115,00	2,430	2,418	95,88	115,60	2,418	2,411	95,61	95,74
135	114,80	2,434	2,422	96,05	115,50	2,420	2,413	95,69	95,87
140	114,80	2,434	2,422	96,05	115,50	2,420	2,413	95,69	95,87
145	114,70	2,437	2,424	96,13	115,30	2,424	2,418	95,86	95,99
150	114,60	2,439	2,427	96,21	115,30	2,424	2,418	95,86	96,04
155	114,50	2,441	2,429	96,30	115,20	2,426	2,420	95,94	96,12
160	114,40	2,443	2,431	96,38	115,10	2,428	2,422	96,03	96,20
165	114,30	2,445	2,433	96,47	115,00	2,430	2,424	96,11	96,29
170	114,20	2,447	2,435	96,55	115,00	2,430	2,424	96,11	96,33
<b>174</b>	<b>114,20</b>	<b>2,447</b>	<b>2,435</b>	<b>96,55</b>	<b>114,90</b>	<b>2,432</b>	<b>2,426</b>	<b>96,19</b>	<b>96,37</b>

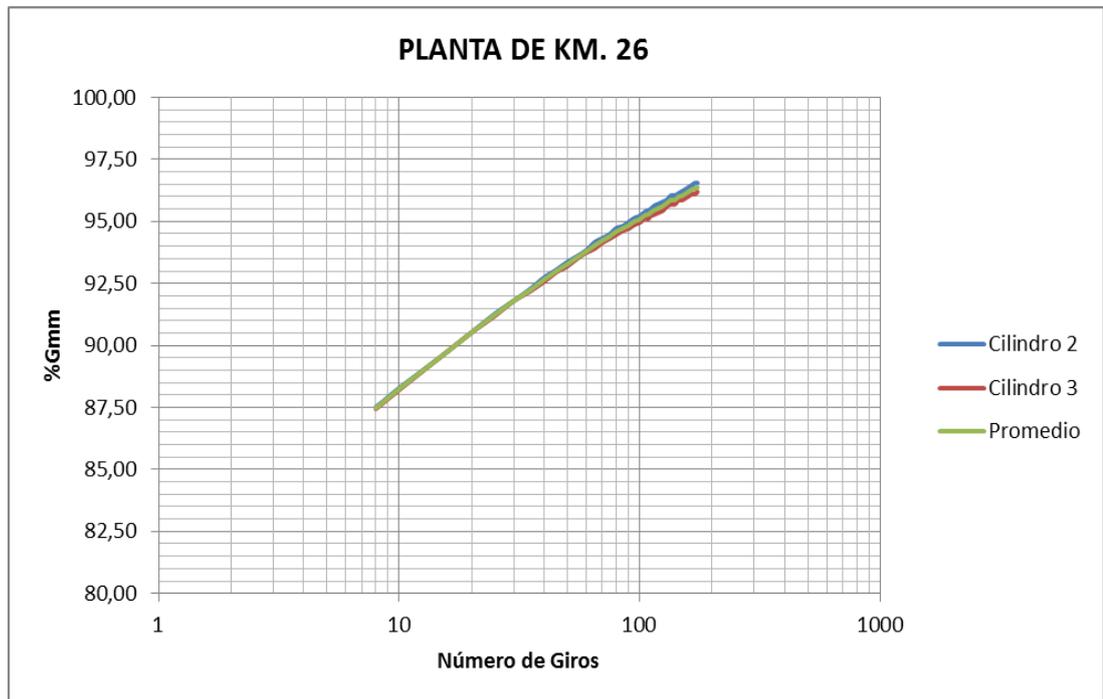


Gráfico 7-29: Curvas de densificación para la mezcla asfáltica de “Km.26”.

Cilindro #	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndis	%Gmm@Nmax
2	87,51	95,46	96,55
3	87,44	95,12	96,19
<b>Promedio</b>	<b>87,48</b>	<b>95,29</b>	<b>96,37</b>
<b>%Vacíos de aire = 100 - %G<sub>mm</sub>@N<sub>diseño</sub></b>			
	<b>%Vacíos:</b>	<b>4,7</b>	
<b>%VMA = 100 - (%G<sub>mm</sub>@N<sub>diseño</sub> * G<sub>mm</sub> * P<sub>s</sub>)/G<sub>sb</sub></b>			
	<b>%VMA:</b>	<b>15,7</b>	
<b>%VFA = (%VMA - %V<sub>a</sub>)/%VMA * 100</b>			
	<b>%VFA:</b>	<b>70,0</b>	

Tabla 7-12: Parámetros de densificación en C.G.S. Planta “Vía a Costa”.

ESALs diseño:		10 a 30	millones			Prom. Temp.:	<39	°C	
		Peso total (g):	4607,50			Gmb2(medida):	2,278		
		Gmm (medida):	2,318			Gmb4(medida):	2,276		
		Gsb (medida):	2,439			Pb (%):	6,42		

Número de Giros	Cilindro 2				Cilindro 4				%Gmm promedio
	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	
0	143,60	1,816	1,801	77,68	146,20	1,783	1,793	77,37	77,52
5	131,30	1,986	1,969	84,95	133,30	1,956	1,967	84,86	84,90
<b>8</b>	<b>128,50</b>	<b>2,029</b>	<b>2,012</b>	<b>86,80</b>	<b>130,40</b>	<b>1,999</b>	<b>2,011</b>	<b>86,74</b>	<b>86,77</b>
10	127,10	2,051	2,034	87,76	129,10	2,020	2,031	87,62	87,69
15	124,80	2,089	2,072	89,38	126,70	2,058	2,069	89,28	89,33
20	123,20	2,116	2,099	90,54	125,10	2,084	2,096	90,42	90,48
25	122,00	2,137	2,119	91,43	123,90	2,104	2,116	91,29	91,36
30	121,00	2,155	2,137	92,18	122,90	2,121	2,133	92,04	92,11
35	120,20	2,169	2,151	92,80	122,10	2,135	2,147	92,64	92,72
40	119,50	2,182	2,164	93,34	121,40	2,148	2,160	93,17	93,26
45	118,90	2,193	2,175	93,81	120,80	2,158	2,170	93,64	93,72
50	118,40	2,202	2,184	94,21	120,30	2,167	2,180	94,03	94,12
55	118,00	2,210	2,191	94,53	119,90	2,175	2,187	94,34	94,43
60	117,60	2,217	2,199	94,85	119,50	2,182	2,194	94,65	94,75
65	117,20	2,225	2,206	95,17	119,10	2,189	2,201	94,97	95,07
70	116,90	2,230	2,212	95,42	118,70	2,197	2,209	95,29	95,35
75	116,60	2,236	2,217	95,66	118,40	2,202	2,214	95,53	95,60
80	116,30	2,242	2,223	95,91	118,10	2,208	2,220	95,78	95,84
85	116,00	2,248	2,229	96,16	117,90	2,211	2,224	95,94	96,05
90	115,80	2,252	2,233	96,32	117,60	2,217	2,230	96,18	96,25
95	115,60	2,255	2,237	96,49	117,40	2,221	2,233	96,35	96,42
100	115,40	2,259	2,240	96,66	117,20	2,225	2,237	96,51	96,58
105	115,20	2,263	2,244	96,82	117,00	2,228	2,241	96,68	96,75
<b>109</b>	<b>115,10</b>	<b>2,265</b>	<b>2,246</b>	<b>96,91</b>	<b>116,90</b>	<b>2,230</b>	<b>2,243</b>	<b>96,76</b>	<b>96,83</b>
110	115,00	2,267	2,248	96,99	116,80	2,232	2,245	96,84	96,92
115	114,90	2,269	2,250	97,08	116,70	2,234	2,247	96,93	97,00
120	114,70	2,273	2,254	97,25	116,50	2,238	2,251	97,09	97,17
125	114,60	2,275	2,256	97,33	116,40	2,240	2,253	97,18	97,25
130	114,40	2,279	2,260	97,50	116,20	2,244	2,256	97,34	97,42
135	114,30	2,281	2,262	97,59	116,10	2,246	2,258	97,43	97,51
140	114,20	2,283	2,264	97,67	115,90	2,250	2,262	97,60	97,63
145	114,00	2,287	2,268	97,84	115,80	2,252	2,264	97,68	97,76
150	114,00	2,287	2,268	97,84	115,70	2,254	2,266	97,76	97,80
155	113,80	2,291	2,272	98,02	115,60	2,255	2,268	97,85	97,93
160	113,70	2,293	2,274	98,10	115,50	2,257	2,270	97,93	98,02
165	113,60	2,295	2,276	98,19	115,40	2,259	2,272	98,02	98,10
170	113,60	2,295	2,276	98,19	115,30	2,261	2,274	98,10	98,15
<b>174</b>	<b>113,50</b>	<b>2,297</b>	<b>2,278</b>	<b>98,27</b>	<b>115,20</b>	<b>2,263</b>	<b>2,276</b>	<b>98,19</b>	<b>98,23</b>



Gráfico 7-30: Curvas de densificación para la mezcla asfáltica de “Vía a la Costa”.

Cilindro #	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndis	%Gmm@Nmax
2	86,80	96,91	98,27
4	86,74	96,76	98,19
<b>Promedio</b>	<b>86,77</b>	<b>96,83</b>	<b>98,23</b>
<b>%Vacíos de aire = 100 - %G<sub>mm</sub>@N<sub>diseño</sub></b>			
	<b>%Vacíos:</b>	<b>3,2</b>	
<b>%VMA = 100 - (%G<sub>mm</sub>@N<sub>diseño</sub> * G<sub>mm</sub> * P<sub>s</sub>)/G<sub>sb</sub></b>			
	<b>%VMA:</b>	<b>16,6</b>	
<b>%VFA = (%VMA - %Va)/%VMA * 100</b>			
	<b>%VFA:</b>	<b>80,9</b>	

Tabla 7-13: Parámetros de densificación en el C.G.S. Planta “Chivería”.

ESALs diseño:		10 a 30	millones		Prom. Temp.:	<39	°C		
	Peso total (g):	5007,85			Gmb1(medida):	2,472			
	Gmm (medida):	2,569			Gmb3(medida):	2,469			
	Gsb (medida):	2,727			Pb (%):	5,90			
Número de Giros	Cilindro 1				Cilindro 3				%Gmm promedio
	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	
0	140,40	2,018	2,028	78,95	140,00	2,024	2,018	78,53	78,74
5	129,10	2,195	2,206	85,86	128,50	2,205	2,198	85,56	85,71
<b>8</b>	<b>126,80</b>	<b>2,235</b>	<b>2,246</b>	<b>87,42</b>	<b>126,10</b>	<b>2,247</b>	<b>2,240</b>	<b>87,19</b>	<b>87,31</b>
10	125,70	2,254	2,266	88,19	125,00	2,267	2,260	87,96	88,07
15	123,80	2,289	2,300	89,54	123,00	2,304	2,296	89,39	89,46
20	122,50	2,313	2,325	90,49	121,70	2,329	2,321	90,34	90,42
25	121,50	2,332	2,344	91,23	120,80	2,346	2,338	91,02	91,13
30	120,80	2,346	2,357	91,76	120,00	2,362	2,354	91,62	91,69
35	120,20	2,358	2,369	92,22	119,40	2,373	2,366	92,08	92,15
40	119,70	2,367	2,379	92,61	118,90	2,383	2,376	92,47	92,54
45	119,20	2,377	2,389	93,00	118,50	2,391	2,384	92,78	92,89
50	118,80	2,385	2,397	93,31	118,10	2,400	2,392	93,10	93,20
55	118,50	2,391	2,403	93,54	117,70	2,408	2,400	93,41	93,48
60	118,20	2,398	2,409	93,78	117,50	2,412	2,404	93,57	93,68
65	117,90	2,404	2,415	94,02	117,20	2,418	2,410	93,81	93,92
70	117,70	2,408	2,419	94,18	116,90	2,424	2,416	94,05	94,12
75	117,50	2,412	2,424	94,34	116,70	2,428	2,420	94,21	94,28
80	117,30	2,416	2,428	94,50	116,50	2,433	2,424	94,38	94,44
85	117,10	2,420	2,432	94,66	116,30	2,437	2,429	94,54	94,60
90	116,90	2,424	2,436	94,82	116,20	2,439	2,431	94,62	94,72
95	116,80	2,426	2,438	94,91	116,00	2,443	2,435	94,78	94,84
100	116,60	2,430	2,442	95,07	115,90	2,445	2,437	94,86	94,97
105	116,50	2,433	2,444	95,15	115,80	2,447	2,439	94,95	95,05
<b>109</b>	<b>116,40</b>	<b>2,435</b>	<b>2,447</b>	<b>95,23</b>	<b>115,60</b>	<b>2,451</b>	<b>2,443</b>	<b>95,11</b>	<b>95,17</b>
110	116,40	2,435	2,447	95,23	115,60	2,451	2,443	95,11	95,17
115	116,20	2,439	2,451	95,40	115,50	2,454	2,445	95,19	95,29
120	116,10	2,441	2,453	95,48	115,40	2,456	2,448	95,27	95,38
125	116,00	2,443	2,455	95,56	115,20	2,460	2,452	95,44	95,50
130	115,90	2,445	2,457	95,64	115,20	2,460	2,452	95,44	95,54
135	115,80	2,447	2,459	95,73	115,00	2,464	2,456	95,61	95,67
140	115,70	2,449	2,461	95,81	114,90	2,466	2,458	95,69	95,75
145	115,60	2,451	2,463	95,89	114,90	2,466	2,458	95,69	95,79
150	115,60	2,451	2,463	95,89	114,80	2,469	2,460	95,77	95,83
155	115,50	2,454	2,466	95,97	114,70	2,471	2,463	95,86	95,92
160	115,40	2,456	2,468	96,06	114,60	2,473	2,465	95,94	96,00
165	115,40	2,456	2,468	96,06	114,50	2,475	2,467	96,02	96,04
170	115,30	2,458	2,470	96,14	114,50	2,475	2,467	96,02	96,08
<b>174</b>	<b>115,20</b>	<b>2,460</b>	<b>2,472</b>	<b>96,22</b>	<b>114,40</b>	<b>2,477</b>	<b>2,469</b>	<b>96,11</b>	<b>96,17</b>

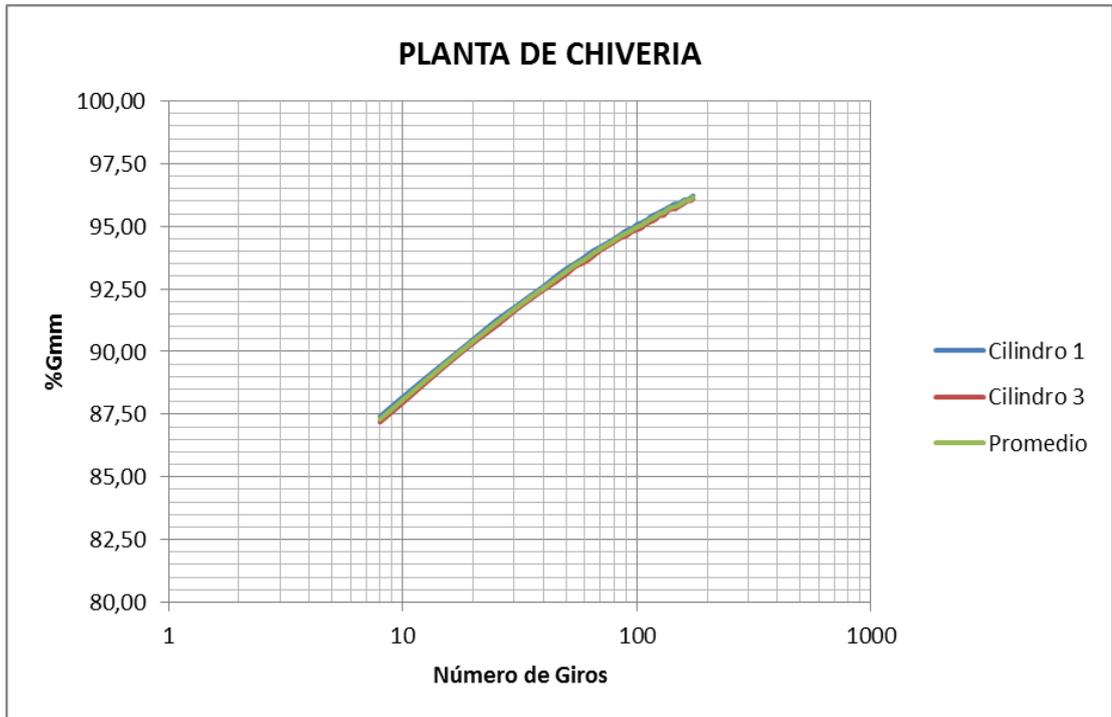


Gráfico 7-31: Curvas de densificación para la mezcla asfáltica de “Chivería”.

Cilindro #	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndis	%Gmm@Nmax
1	87,42	95,23	96,22
3	87,19	95,11	96,11
<b>Promedio</b>	<b>87,31</b>	<b>95,17</b>	<b>96,17</b>
<b>%Vacíos de aire = 100 - %G<sub>mm</sub>@N<sub>diseño</sub></b>			
	<b>%Vacíos:</b>	<b>4,8</b>	
<b>%VMA = 100 - (%G<sub>mm</sub>@N<sub>diseño</sub> * G<sub>mm</sub> * P<sub>s</sub>)/G<sub>sb</sub></b>			
	<b>%VMA:</b>	<b>15,7</b>	
<b>%VFA = (%VMA - %V<sub>a</sub>)/%VMA * 100</b>			
	<b>%VFA:</b>	<b>69,3</b>	

Tabla 7-14: Parámetros de densificación en el C.G.S. Planta “Picoazá”.

ESALs diseño:		10 a 30	millones			Prom. Temp.:	<39	°C	
		Peso total (g):	4705,95			Gmb3(medida):	2,325		
		Gmm (medida):	2,423			Gmb4(medida):	2,327		
		Gsb (medida):	2,587			Pb (%):	6,8		
Número de Giros	Cilindro 3				Cilindro 4				%Gmm promedio
	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	Ht (mm)	Gmb (estimado)	Gmb (corregido)	Gmm (%)	
0	139,20	1,913	1,916	79,07	139,40	1,910	1,911	78,88	78,98
5	127,90	2,082	2,085	86,05	127,50	2,089	2,090	86,25	86,15
<b>8</b>	<b>125,40</b>	<b>2,124</b>	<b>2,127</b>	<b>87,77</b>	<b>125,00</b>	<b>2,130</b>	<b>2,132</b>	<b>87,97</b>	<b>87,87</b>
10	124,30	2,142	2,145	88,54	123,90	2,149	2,150	88,75	88,65
15	122,30	2,177	2,181	89,99	121,90	2,185	2,186	90,21	90,10
20	120,90	2,203	2,206	91,03	120,50	2,210	2,211	91,26	91,15
25	119,90	2,221	2,224	91,79	119,50	2,228	2,230	92,02	91,91
30	119,20	2,234	2,237	92,33	118,80	2,242	2,243	92,56	92,45
35	118,60	2,245	2,249	92,80	118,20	2,253	2,254	93,03	92,92
40	118,10	2,255	2,258	93,19	117,70	2,263	2,264	93,43	93,31
45	117,70	2,263	2,266	93,51	117,30	2,270	2,271	93,75	93,63
50	117,30	2,270	2,273	93,83	116,90	2,278	2,279	94,07	93,95
55	117,00	2,276	2,279	94,07	116,70	2,282	2,283	94,23	94,15
60	116,70	2,282	2,285	94,31	116,40	2,288	2,289	94,47	94,39
65	116,50	2,286	2,289	94,47	116,20	2,292	2,293	94,63	94,55
70	116,40	2,288	2,291	94,55	116,00	2,296	2,297	94,80	94,68
75	116,10	2,294	2,297	94,80	115,80	2,300	2,301	94,96	94,88
80	116,00	2,296	2,299	94,88	115,70	2,302	2,303	95,04	94,96
85	115,80	2,300	2,303	95,04	115,60	2,304	2,305	95,12	95,08
90	115,70	2,302	2,305	95,13	115,50	2,306	2,307	95,21	95,17
95	115,60	2,304	2,307	95,21	115,30	2,310	2,311	95,37	95,29
100	115,50	2,306	2,309	95,29	115,30	2,310	2,311	95,37	95,33
105	115,40	2,308	2,311	95,37	115,20	2,312	2,313	95,45	95,41
<b>109</b>	<b>115,30</b>	<b>2,310</b>	<b>2,313</b>	<b>95,46</b>	<b>115,10</b>	<b>2,314</b>	<b>2,315</b>	<b>95,54</b>	<b>95,50</b>
110	115,30	2,310	2,313	95,46	115,10	2,314	2,315	95,54	95,50
115	115,20	2,312	2,315	95,54	115,00	2,316	2,317	95,62	95,58
120	115,10	2,314	2,317	95,62	114,90	2,318	2,319	95,70	95,66
125	115,10	2,314	2,317	95,62	114,90	2,318	2,319	95,70	95,66
130	115,00	2,316	2,319	95,71	114,80	2,320	2,321	95,79	95,75
135	115,00	2,316	2,319	95,71	114,80	2,320	2,321	95,79	95,75
140	114,90	2,318	2,321	95,79	114,70	2,322	2,323	95,87	95,83
145	114,90	2,318	2,321	95,79	114,70	2,322	2,323	95,87	95,83
150	114,80	2,320	2,323	95,87	114,60	2,324	2,325	95,95	95,91
155	114,80	2,320	2,323	95,87	114,60	2,324	2,325	95,95	95,91
160	114,80	2,320	2,323	95,87	114,50	2,326	2,327	96,04	95,95
165	114,70	2,322	2,325	95,96	114,60	2,324	2,325	95,95	95,95
170	114,70	2,322	2,325	95,96	114,50	2,326	2,327	96,04	96,00
<b>174</b>	<b>114,70</b>	<b>2,322</b>	<b>2,325</b>	<b>95,96</b>	<b>114,50</b>	<b>2,326</b>	<b>2,327</b>	<b>96,04</b>	<b>96,00</b>

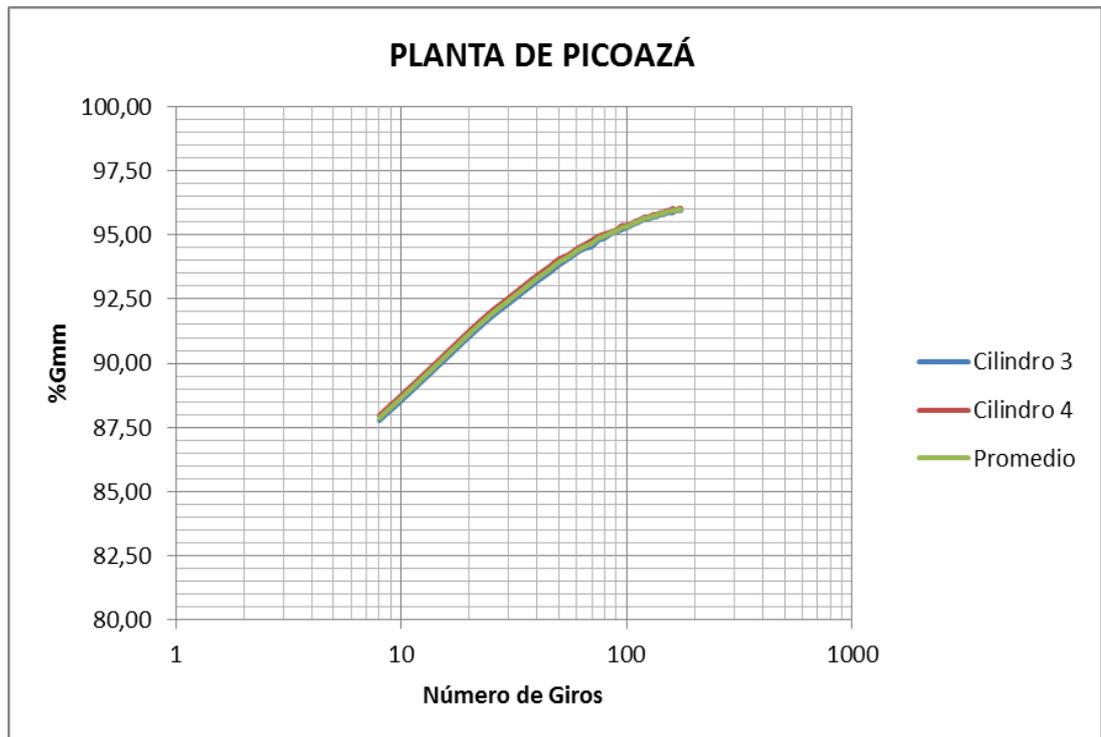


Gráfico 7-32: Curvas de densificación para la mezcla asfáltica de “Picoazá”.

Cilindro #	%Gmm@Nini	%Gmm@Ndis	%Gmm@Nmax
3	87,77	95,46	95,96
4	87,97	95,54	96,04
<b>Promedio</b>	<b>87,87</b>	<b>95,50</b>	<b>96,00</b>
<b>%Vacíos de aire = 100 - %G<sub>mm</sub>@N<sub>diseño</sub></b>			
	<b>%Vacíos:</b>	<b>4,5</b>	
<b>%VMA = 100 - (%G<sub>mm</sub>@N<sub>diseño</sub> * G<sub>mm</sub> * P<sub>s</sub>)/G<sub>sb</sub></b>			
	<b>%VMA:</b>	<b>18,1</b>	
<b>%VFA = (%VMA - %Va)/%VMA * 100</b>			
	<b>%VFA:</b>	<b>75,2</b>	

De las *Tablas 7-10 a 7-14*, surge la siguiente recopilación del *porcentaje del Gmm promedio* para los diferentes números de giros de compactación aplicados en las cinco mezclas asfálticas en análisis:

Tabla 7-15: Porcentaje de  $G_{mm}$  promedio para las 5 mezclas asfálticas en estudio.

Número de Giros	%Gmm Promedio (Gmb/Gmm)				
	Durán	KM.26	Vía a la Costa	Chivería	Picoazá
0	78,29	79,22	77,52	78,74	78,98
5	85,13	85,88	84,90	85,71	86,15
<b>8</b>	<b>86,85</b>	<b>87,48</b>	<b>86,77</b>	<b>87,31</b>	<b>87,87</b>
10	87,71	88,24	87,69	88,07	88,65
15	89,22	89,57	89,33	89,46	90,10
20	90,30	90,52	90,48	90,42	91,15
25	91,15	91,23	91,36	91,13	91,91
30	91,75	91,80	92,11	91,69	92,45
35	92,31	92,23	92,72	92,15	92,92
40	92,81	92,65	93,26	92,54	93,31
45	93,20	93,00	93,72	92,89	93,63
50	93,51	93,28	94,12	93,20	93,95
55	93,87	93,55	94,43	93,48	94,15
60	94,14	93,79	94,75	93,68	94,39
65	94,38	94,03	95,07	93,92	94,55
70	94,62	94,23	95,35	94,12	94,68
75	94,82	94,39	95,60	94,28	94,88
80	95,07	94,60	95,84	94,44	94,96
85	95,27	94,72	96,05	94,60	95,08
90	95,47	94,84	96,25	94,72	95,17
95	95,60	95,00	96,42	94,84	95,29
100	95,72	95,09	96,58	94,97	95,33
105	95,88	95,25	96,75	95,05	95,41
<b>109</b>	<b>96,01</b>	<b>95,29</b>	<b>96,83</b>	<b>95,17</b>	<b>95,50</b>
110	96,01	95,33	96,92	95,17	95,50
115	96,13	95,46	97,00	95,29	95,58
120	96,30	95,54	97,17	95,38	95,66
125	96,38	95,62	97,25	95,50	95,66
130	96,46	95,74	97,42	95,54	95,75
135	96,59	95,87	97,51	95,67	95,75
140	96,67	95,87	97,63	95,75	95,83
145	96,76	95,99	97,76	95,79	95,83
150	96,88	96,04	97,80	95,83	95,91
155	96,97	96,12	97,93	95,92	95,91
160	97,05	96,20	98,02	96,00	95,95
165	97,14	96,29	98,10	96,04	95,95
170	97,22	96,33	98,15	96,08	96,00
<b>174</b>	<b>97,26</b>	<b>96,37</b>	<b>98,23</b>	<b>96,17</b>	<b>96,00</b>

A partir de la *Tabla 7-15*, se ha perfilado en un solo esquema las cinco curvas de densificación de las correspondientes plantas asfálticas:

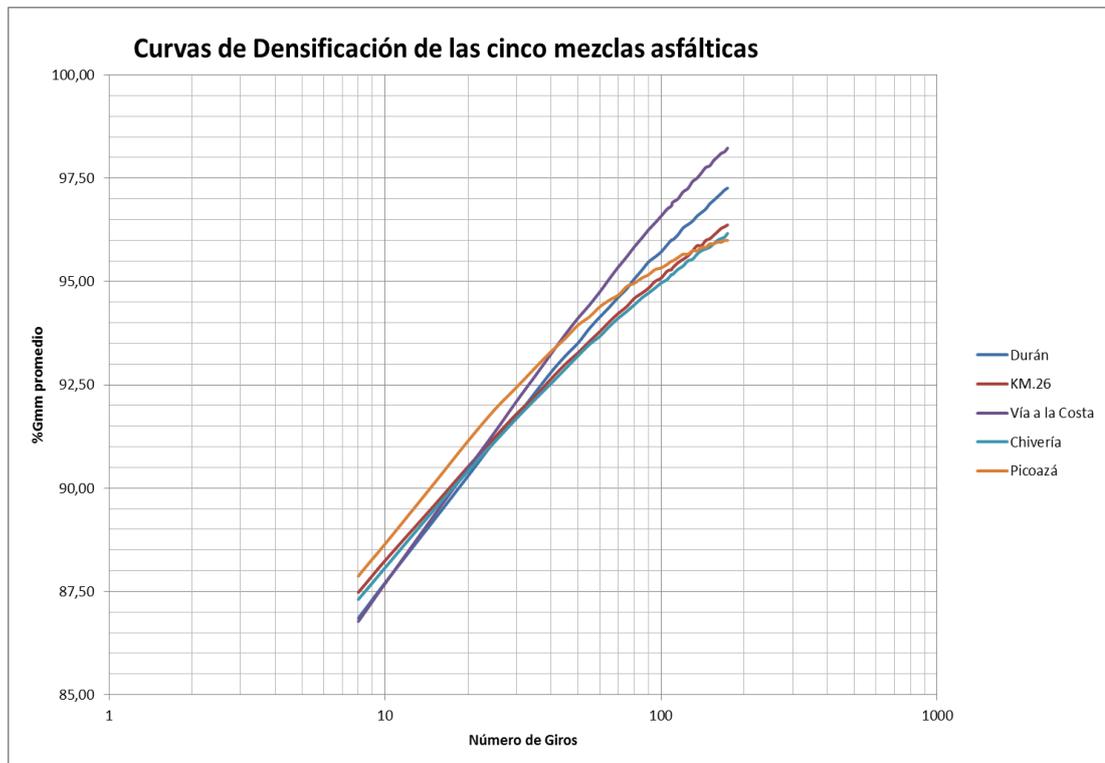


Gráfico 7-33: Curvas de densificación para las 5 mezclas asfálticas en estudio.

De la *Gráfica 7-33*, considerando los requerimientos de diseño de *Superpave* dispuestos en la *Tabla 4-11*, se avista que:

- Para el Número de Giros Inicial (8), todas las mezclas tienen más del 11% de vacíos de aire, cumpliendo así con la especificación para un nivel de tránsito entre 10-30 millones de ESALs de diseño ( $\%Gmm < 89$ ). *Picoazá* es la más próxima al límite con casi 88% de Gmm (12% de vacíos de aire).

- Para el Número de Giros de Diseño (109), la única mezcla que cumple con el porcentaje de vacíos de aire de 4% (%Gmm  $\approx$  96%) es la de *Durán*, las demás presentan una variación en el rango de  $\pm$  1% con respecto a la establecida.
- Para el Número de Giros Máximo (174), nuevamente *Durán* es la que más se aproxima a los 2% de vacíos de aire al final de la vida de diseño de la vía, con un %Gmm= 97,26% (2,74% de vacíos); las demás mezclas están más cercanas al porcentaje de diseño (%Gmm  $\approx$  96%), a excepción de *Vía a la Costa* que ostenta un %Gmm=98,23% que sobrepasa el límite (%Gmm<98%) produciendo un mínimo vacíos de aire (1,77%).
- Como se observa en el *Gráfico 7-33* la mezcla de *Picoazá* presenta un %Gmm mayor al de las otras mezclas hasta el número de giro 40 y en adelante comienza a perder dominio hasta ubicarse con el menor valor (96%) para el número de giros máximo; lo que indica que si el nivel de tránsito se asemeja a las condiciones de laboratorio, entonces ésta mezcla presentará exceso de vacíos de aire provocando un mezcla más abierta (permeable) permitiendo el paso del aire y agua fácilmente.

En la *Tabla 7-16* se presenta un resumen de los parámetros volumétricos de interés obtenidos a partir de los datos de los cilindros compactados en el C.G.S.:

Tabla 7-16: Resumen de parámetros volumétricos de las plantas asfálticas

<b>Parámetros volumétricos de las mezclas asfálticas para cilindros tipo Superpave</b>					
<b>Plantas</b>	<i>Vacíos de aire</i>	<i>Vacíos en el agregado mineral</i>	<i>Vacíos rellenos con asfalto</i>	<i>Gmb</i>	<i>Gmm</i>
	<i>Va (%)</i>	<i>VMA (%)</i>	<i>VFA (%)</i>		
<b>DURÁN</b>	3,99	14,35	72,18	1,999	2,082
<b>KM. 26</b>	4,71	15,69	69,97	2,403	2,522
<b>VÍA A LA COSTA</b>	3,17	16,60	80,93	2,245	2,318
<b>CHIVERÍA</b>	4,83	15,72	69,28	2,445	2,569
<b>PICOAZÁ</b>	4,50	18,14	75,18	2,314	2,423

De la *Tabla 7-16*, con relación a los requerimientos de Superpave dispuestos en la *Tabla 4-11*, se analiza lo siguiente:

- En cuanto al porcentaje de vacíos de aire, solo la mezcla asfáltica de *Durán* cumple con el requisito de Superpave (4% de vacíos) y todas las demás están en un rango de  $\pm 1\%$  con respecto a esta media. *Vía a la Costa* es la que posee el menor valor de vacíos (3,17%) aun teniendo un *Gmb* y *Gmm* superiores al de los de *Durán*.
- Con respecto a los vacíos en el agregado mineral, considerando que el tamaño máximo nominal de los agregados de todas las plantas es de  $\frac{1}{2}$ " (12,5mm) a excepción de *Chivería* que es de  $\frac{3}{4}$ " (19mm), el mínimo VMA para las mezclas de *Durán*, *Km.26*, *Vía a la Costa* y *Picoazá* es 14% y para *Chivería* un 13%. En cuanto a las cuatro primeras, todas cumplen con la especificación, siendo *Durán* la de menor valor (14,35%) y *Picoazá* es la que más alto VMA posee (18,14%) similar que en el método Marshall. Por último *Chivería* cumple también con el VMA mínimo, presentando semejanzas en los resultados con la del *Km.26* fundamentado por tener contenidos de asfalto y gravedades específicas de los agregados muy parecidas.

- En cuanto a los vacíos rellenos con asfalto, todas las mezclas caen en el rango establecido para el nivel de tránsito utilizado (VFA= 65 a 75%) excepto *Picoazá* (75,18%) y *Vía a la Costa* (80,93%), las mismas que pudieran tener un exceso de asfalto efectivo en correspondencia a las características de su agregado.

A modo de comparación de los resultados obtenidos por ambas metodologías de compactación, se presenta la siguiente tabla:

Tabla 7-17: Comparación de resultados para ambos métodos de diseño de mezclas asfálticas

<b>Comparación de parámetros volumétricos de las mezclas asfálticas por ambos métodos de diseño</b>						
<b>Plantas</b>	<b>Vacíos de aire (%)</b>		<b>Vacíos en el agregado mineral (%)</b>		<b>Vacíos rellenos con asfalto (%)</b>	
	<i>Superpave</i>	<i>Marshall</i>	<i>Superpave</i>	<i>Marshall</i>	<i>Superpave</i>	<i>Marshall</i>
<b>DURÁN</b>	3,99	4,43	14,35	14,75	72,18	69,95
<b>KM. 26</b>	4,71	4,43	15,69	15,26	69,97	70,98
<b>VÍA A LA COSTA</b>	3,17	4,45	16,60	15,02	80,93	70,36
<b>CHIVERÍA</b>	4,83	4,51	15,72	15,36	69,28	70,63
<b>PICOAZÁ</b>	4,50	3,92	18,14	16,14	75,18	75,71

De la *Tabla 7-17* se aprecia que:

- Si se considera como base de análisis los *vacíos de aire*, se observa claramente que no existe una relación directa en cuanto si un método siempre me da mayores valores con respecto al otro, esto se debe a que dependiendo del tipo de agregado utilizado en cada mezcla se podría requerir un contenido mayor o menor de asfalto en Superpave, lo que evidencia que el *Pb requerido* para cumplir con los 4% de vacíos por ambos métodos es totalmente diferente.

## CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- ✓ Los números de giros dispuestos por Superpave para ser aplicados en el CGS son muy sensibles a la elección del Nivel de Tránsito (ESALs de diseño) y la temperatura máxima del aire de la vía en estudio, afectándolos considerablemente, en especial a los  $N_{\text{diseño}}$  y  $N_{\text{máximo}}$ , los mismos que definen los vacíos de aire de diseño y al final de su vida útil, así como a los VMA y VFA.
- ✓ *La curva de densificación* obtenida del CGS permite conocer la variación de los vacíos de aire en la mezcla (densidad) a lo largo del proceso de compactación, para así observar el comportamiento de la mezcla a ciertos números de giros, lo que no puede evaluarse en el método Marshall basado en compactación por impacto.
- ✓ La mezcla procedente de la planta de *Picoazá* presenta una pendiente positiva pronunciada en la *curva de densificación* hasta aproximadamente la cuarta parte de los números de giros máximos para luego tender a una pendiente horizontal, atribuyendo dicho efecto a la gran cantidad de partículas minerales finas (0 a 10mm) que posee la misma. Por tanto el acomodo de dichas partículas es rápida y alcanzan densidades elevadas tempranamente.
- ✓ Todas las mezclas asfálticas analizadas, producidas en planta y diseñadas por el método Marshall, al ser compactadas en el CGS cumplen con el  $\%G_{mm@N_{\text{inicial}}}$  (<89%) según lo especificado en Superpave, aunque llama la atención que los valores obtenidos están muy próximos al exigido. Respecto al  $\%G_{mm@N_{\text{diseño}}}$  (=96%) las mezclas generalmente caen en el rango  $\pm 1\%$  con respecto al establecido, siendo *Durán* y *Vía a la Costa* las que sobrepasan el requerido, mientras que *Km.26*, *Chivería* y *Picoazá* quedan por debajo de dicho porcentaje. En el análisis del  $\%G_{mm@N_{\text{máximo}}}$  (<98%), ninguna mezcla llega a cumplir los 2% de vacíos de aire, muchas de

ellas apenas sobrepasan al de diseño (*Km.26, Chivería y Picoazá*) y otras en  $\pm 1\%$  con respecto al límite (*Durán y Vía a la Costa*).

- ✓ Con los resultados obtenidos en base al porcentaje de densidades (%Gmm), se demuestra que la mezcla con el diseño más cercano al requerido por Superpave en cuanto a los *vacíos de aire*, es la de *Durán*; mientras que la mezcla de *Vía a la Costa* presenta problemas con su densificación elevada, ya que sus %Gmm exceden los permitidos para el  $N_{\text{diseño}}$  y  $N_{\text{máximo}}$ , lo que podría provocar exudación de asfalto en condiciones de alta temperatura por no existir la cantidad de vacíos requeridos para el acomodo del ligante; y respecto a las mezclas restantes (*Km.26, Chivería y Picoazá*), no cumplen con la especificación debido a la existencia de densidades inferiores a las requeridas (en diseño y al final de su vida útil) lo que evidencia un exceso de vacíos, por tanto el pavimento correspondiente tendería a sufrir un agrietamiento prematuro, desprendimientos de agregados y baja durabilidad.
- ✓ Los *vacíos de aire* obtenidos de las mezclas compactadas en el CGS, no dependen directamente de los valores de *Gmb* y *Gmm* medidos en los cilindros compactados, sino que además obedecen a una relación (factor de corrección) entre los datos extraídos de la máquina y el medido manualmente en el espécimen terminado.
- ✓ Los *vacíos en el agregado mineral (VMA)* de las mezclas en análisis provenientes de Superpave, son mayores que los de Marshall, siempre que el *Gsb* de los agregados tenga un valor por encima de 2,1, ya que si no se cumple con tal condición, se genera el efecto contrario.
- ✓ Las características físicas del agregado (absorción, porosidad) influyen notoriamente en el *VMA*, ya que pueden aumentar su valor a pesar de tener un *Va* y *contenido de asfalto* bajos, en comparación con otras mezclas.

- ✓ El valor del *Rice (Gmm)* influye rotundamente en los *vacíos de aire*, ya que un incremento de 0,01 unidades de *Gmm* aumenta en 0,45% dichos vacíos.

### **Recomendaciones**

Las mezclas que pretenden cumplir con los requisitos de Superpave, deben seguir el procedimiento de diseño que establece este nuevo método, considerando lo siguiente:

- ❖ Rediseñar las características de sus agregados combinados (dosificación y granulometría) para evaluar si sus propiedades de consenso y de origen, gravedad específica bruta (*Gsb*) y granulometría cumplen con la estructura del agregado de diseño para el respectivo tamaño máximo nominal (puntos de control y zona restringida).
- ❖ Verificar la influencia del agregado combinado en el comportamiento de la mezcla asfáltica mediante la compactación en el CGS, adoptando un *Pb* y *Gb* del ligante asfáltico para su análisis.
- ❖ Comprobar que los parámetros volumétricos (*Va*, *VMA*, *VFA*, *DP*), criterios de densificación (*%Gmm@Ninicial* y *%Gmm@Nmáximo*), obtenidos de los especímenes compactados, cumplan con el criterio establecido.
- ❖ Obtener el contenido de ligante asfáltico óptimo, variando dicho porcentaje para una misma mezcla de agregados, para así conocer la variación de los parámetros antes mencionados y llegar a encontrar un *Pb*(%) que satisfaga todo los requerimientos volumétricos.

## BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2013) *Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013: Diseño de mezclas asfálticas de granulometría densa de alto desempeño*. (Ed.3), México: Gráfica, Creatividad y Diseño, S.A. de C.V.
- ✓ Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2012) *Certificación en diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño*. (Ed.1), México: Autor.
- ✓ Andaluz, A. (2013) *Estudio de mezclas asfálticas colocadas en vías de la región costa del Ecuador mediante pruebas de desempeño*. (Ed.1), Ecuador: Autor.
- ✓ García, Gustavo. (Entrevista). *Uso del Compactador Giratorio Superpave*. Guayaquil, 01 de noviembre de 2013.
- ✓ Garnica, P., Delgado, H., Gómez, J., Alonso S., Alarcón H. (2004) *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Recuperado de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt246.pdf>
- ✓ Garnica, P., Delgado, H., Sandoval, C. (2005) *Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*. Recuperado de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt271.pdf>
- ✓ Garnica, P., Delgado, H., Gómez, J. (2003) *Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio*. Recuperado de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt228.pdf>
- ✓ Garnica, P., Flores, M., Gómez, J., Delgado, H. (2005) *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Recuperado de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt267.pdf>

- ✓ Instituto de Asfalto. (1996) *Antecedentes del Diseño y Análisis de Mezclas Asfálticas SUPERPAVE*. (Ed.1), USA: Autor.
- ✓ Instituto de Asfalto. (1997) *Método de diseño de mezclas para concreto asfáltico y otros tipos de mezclas calientes*. (Ed.6), USA: Autor.
- ✓ Instituto Nacional de Vías. (1998) *Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. Tomo III. Materiales y mezclas asfálticas*. (Ed. 3), Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- ✓ MTOP. (2002) *Capítulo 400: Estructura del Pavimento*. (Ed.1), Ecuador: Autor.
- ✓ Monsalve, L., Giraldo, L., Maya, J. (2012) *Diseño de pavimento flexible y rígido*. Recuperado de <http://jessycamaya.files.wordpress.com/2012/11/proyecto-final-pavimentos-llj-reparado.pdf>
- ✓ Parrales, R. (2013) *Consideraciones para el Empleo de Pruebas Reológicas en el Control de Calidad de Mezclas Asfálticas*. (Ed.1), Ecuador: Autor.
- ✓ Pine Instrument Company. (2011) *Manual de Operación del Compactador Giratorio Superpave*. (Ed. 11), USA: LMAFGB1.
- ✓ Rondón, H., Reyes, F., González, L., Vásquez, S. (2012) *Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas*. (Ed.1), Colombia: UD.
- ✓ Velázquez, M. (1972) *Asfaltos*. (Ed. 1), Cuba: Instituto Cubano del Libro.
- ✓ Vila, Rolando. (Entrevista). *Uso del Martillo Marshall Automático*. Guayaquil, 15 de noviembre de 2013.
- ✓ Villatoro, G. (2007) *Influencia del agregado en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente*. (Ed.1), México: Autor.
- ✓ Vintimilla, A. (2014) *Análisis de factores climáticos en las diferentes regiones del ecuador para el diseño de pavimentos*. (Ed.1), Ecuador: Autor.

## ANEXOS

### Para briquetas tipo Marshall:

Anexo 1: Gravedad específica bruta de las mezclas asfálticas para briquetas tipo Marshall (Gmb).

<b>DURÁN</b>					
<i>Muestra</i>	<i>PESO</i>			<i>Volumen</i>	<i>Gmb</i>
	<i>Seco</i>	<i>En agua</i>	<i>S.S.S.</i>		
<i>#</i>	<i>gramos</i>	<i>gramos</i>	<i>gramos</i>	<i>cm3</i>	
1	1053,8	527,8	1058,2	530,4	1,987
2	1054,2	534	1060,4	526,4	2,003
3	1026,3	513,7	1032,3	518,6	1,979
				<b>Promedio:</b>	<b>1,989</b>
				<b>Desviación Estándar:</b>	<b>0,01</b>
				<b>Coefficiente de Variación:</b>	<b>0,61%</b>

<b>KM. 26</b>					
<i>Muestra</i>	<i>PESO</i>			<i>Volumen</i>	<i>Gmb</i>
	<i>Seco</i>	<i>En agua</i>	<i>S.S.S.</i>		
<i>#</i>	<i>gramos</i>	<i>gramos</i>	<i>gramos</i>	<i>cm3</i>	
1	1128,3	659	1130,6	471,6	2,392
2	1137,2	670	1139,7	469,7	2,421
3	1130,4	665,3	1132,7	467,4	2,418
				<b>Promedio:</b>	<b>2,411</b>
				<b>Desviación Estándar:</b>	<b>0,02</b>
				<b>Coefficiente de Variación:</b>	<b>0,66%</b>

<b>VÍA A LA COSTA</b>					
<i>Muestra</i>	<i>PESO</i>			<i>Volumen</i>	<i>Gmb</i>
	<i>Seco</i>	<i>En agua</i>	<i>S.S.S.</i>		
<i>#</i>	<i>gramos</i>	<i>gramos</i>	<i>gramos</i>	<i>cm3</i>	
1	1027,2	571,2	1028,3	457,1	2,247
2	1034,7	567,8	1038,3	470,5	2,199
3	1034,7	567,6	1038,3	470,7	2,198
				<b>Promedio:</b>	<b>2,215</b>
				<b>Desviación Estándar:</b>	<b>0,03</b>
				<b>Coefficiente de Variación:</b>	<b>1,27%</b>

<b>CHIVERIA</b>					
Muestra	PESO			Volumen	Gmb
	Seco	En agua	S.S.S.		
#	gramos	gramos	gramos	cm <sup>3</sup>	
1	1038,8	617,8	1039,9	422,1	2,461
2	1047	620,6	1047,4	426,8	2,453
3	1053,7	623,3	1054,4	431,1	2,444
				<b>Promedio:</b>	<b>2,453</b>
				<b>Desviación Estándar:</b>	<b>0,01</b>
				<b>Coefficiente de Variación:</b>	<b>0,34%</b>

<b>PICOAZÁ</b>					
Muestra	PESO			Volumen	Gmb
	Seco	En agua	S.S.S.		
#	gramos	gramos	gramos	cm <sup>3</sup>	
1	1035,4	589,1	1035,7	446,6	2,318
2	1040,3	594	1040,4	446,4	2,330
3	1040,2	594,6	1040,2	445,6	2,334
				<b>Promedio:</b>	<b>2,328</b>
				<b>Desviación Estándar:</b>	<b>0,01</b>
				<b>Coefficiente de Variación:</b>	<b>0,36%</b>

Anexo 2: Valor de la Estabilidad y Flujo Marshall para las mezclas de cada planta asfáltica.

<b>DURÁN</b>							
Muestra	Estabilidad						Flujo
	Lectura del anillo	Carga (lb) sin corregir	Altura mm	Volumen cm <sup>3</sup>	Factor de Corrección	Carga (lb) corregida	0,01 in
1	440	3272	66,10	535,89	0,96	3141	12
2	410	3049	65,64	532,16	0,96	2927	14
3	370	2753	65,09	527,71	1,00	2753	15
					<b>Promedio:</b>	<b>2940</b>	<b>14</b>
					<b>Desviación Estándar:</b>	<b>194,4</b>	<b>1,5</b>
					<b>Coefficiente de Variación:</b>	<b>6,6%</b>	<b>11,2%</b>

<b>KM. 26</b>							
Muestra	Estabilidad						Flujo
	Lectura del anillo	Carga (lb) sin corregir	Altura mm	Volumen cm <sup>3</sup>	Factor de Corrección	Carga (lb) corregida	0,01 in
1	320	2383	59,00	478,33	1,14	2717	12
2	340	2531	59,10	479,14	1,19	3012	10
3	325	2420	58,59	475,01	1,19	2880	11
<b>Promedio:</b>						<b>2869</b>	<b>11</b>
<b>Desviación Estándar:</b>						<b>147,9</b>	<b>1,0</b>
<b>Coefficiente de Variación:</b>						<b>5,2%</b>	<b>9,1%</b>

<b>VÍA A LA COSTA</b>							
Muestra	Estabilidad						Flujo
	Lectura del anillo	Carga (lb) sin corregir	Altura mm	Volumen cm <sup>3</sup>	Factor de Corrección	Carga (lb) corregida	0,01 in
1	318	2368	56,90	461,31	1,19	2818	11
2	243	1812	58,35	473,06	1,14	2066	13
3	260	1938	58,20	471,85	1,14	2209	13
<b>Promedio:</b>						<b>2364</b>	<b>12</b>
<b>Desviación Estándar:</b>						<b>399,4</b>	<b>1,2</b>
<b>Coefficiente de Variación:</b>						<b>16,9%</b>	<b>9,4%</b>

<b>CHIVERIA</b>							
Muestra	Estabilidad						Flujo
	Lectura del anillo	Carga (lb) sin corregir	Altura mm	Volumen cm <sup>3</sup>	Factor de Corrección	Carga (lb) corregida	0,01 in
1	370	2753	52,75	427,66	1,39	3827	12
2	395	2938	53,00	429,69	1,39	4084	11
3	355	2642	53,74	435,69	1,39	3672	13
<b>Promedio:</b>						<b>3861</b>	<b>12</b>
<b>Desviación Estándar:</b>						<b>207,9</b>	<b>1,0</b>
<b>Coefficiente de Variación:</b>						<b>5,4%</b>	<b>8,3%</b>

<b>PICOZÁ</b>							
Muestra	Estabilidad						Flujo
	Lectura del anillo	Carga (lb) sin corregir	Altura mm	Volumen cm <sup>3</sup>	Factor de Corrección	Carga (lb) corregida	0,01 in
1	325	2420	55,90	453,20	1,25	3025	15
2	395	2938	55,50	449,96	1,25	3673	14
3	390	2901	55,46	449,63	1,25	3626	14
<b>Promedio:</b>						<b>3441</b>	<b>14</b>
<b>Desviación Estándar:</b>						<b>361,2</b>	<b>0,6</b>
<b>Coefficiente de Variación:</b>						<b>10,5%</b>	<b>4,0%</b>

**Para cilindros tipo Superpave:**

Anexo 3: Gravedad específica bruta de las mezclas asfálticas para cilindros tipo Superpave (Gmb).

<b>DURÁN</b>				
<i>Muestra</i>	<i>PESO</i>	<i>ALTURA</i>	<i>Volumen</i>	<i>Gmb</i>
	<i>Seco</i>	<i>Nmax</i>		
<i>#</i>	<i>gramos</i>	<i>mm</i>	<i>cm3</i>	
2	4110,3	115,20	2035,75204	2,019
3	4124,8	114,94	2031,15746	2,031
			<b>Promedio:</b>	<b>2,025</b>
			<b>Desviación Estándar:</b>	<b>0,01</b>
			<b>Coefficiente de Variación:</b>	<b>0,41%</b>

<b>KM. 26</b>				
<i>Muestra</i>	<i>PESO</i>	<i>ALTURA</i>	<i>Volumen</i>	<i>Gmb</i>
	<i>Seco</i>	<i>Nmax</i>		
<i>#</i>	<i>gramos</i>	<i>mm</i>	<i>cm3</i>	
2	4918,5	114,29	2019,671012	2,435
3	4958,9	115,68	2044,23434	2,426
			<b>Promedio:</b>	<b>2,431</b>
			<b>Desviación Estándar:</b>	<b>0,01</b>
			<b>Coefficiente de Variación:</b>	<b>0,28%</b>

<b>VÍA A LA COSTA</b>				
<i>Muestra</i>	<i>PESO</i>	<i>ALTURA</i>	<i>Volumen</i>	<i>Gmb</i>
	<i>Seco</i>	<i>Nmax</i>		
<i>#</i>	<i>gramos</i>	<i>mm</i>	<i>cm3</i>	
2	4573,8	113,63	2008,007849	2,278
4	4641,2	115,40	2039,286331	2,276
			<b>Promedio:</b>	<b>2,277</b>
			<b>Desviación Estándar:</b>	<b>0,00</b>
			<b>Coefficiente de Variación:</b>	<b>0,06%</b>

<b>CHIVERIA</b>				
<i>Muestra</i>	<i>PESO</i>	<i>ALTURA</i>	<i>Volumen</i>	<i>Gmb</i>
	<i>Seco</i>	<i>Nmax</i>		
<i>#</i>	<i>gramos</i>	<i>mm</i>	<i>cm3</i>	
1	5024,1	115,00	2032,217748	2,472
3	4991,6	114,4	2021,614873	2,469
		<b>Promedio:</b>		<b>2,471</b>
		<b>Desviación Estándar:</b>		<b>0,00</b>
		<b>Coefficiente de Variación:</b>		<b>0,09%</b>

<b>PICOAZÁ</b>				
<i>Muestra</i>	<i>PESO</i>	<i>ALTURA</i>	<i>Volumen</i>	<i>Gmb</i>
	<i>Seco</i>	<i>Nmax</i>		
<i>#</i>	<i>gramos</i>	<i>mm</i>	<i>cm3</i>	
3	4705,1	114,52	2023,735448	2,325
4	4706,8	114,45	2022,498446	2,327
		<b>Promedio:</b>		<b>2,326</b>
		<b>Desviación Estándar:</b>		<b>0,00</b>
		<b>Coefficiente de Variación:</b>		<b>0,07%</b>

Como grupo de anexos, se presenta los datos exportados del equipo CGS para dos muestras de cada mezcla asfáltica, en donde se aprecia las variaciones de las alturas (mm) que va teniendo el cilindro a medida que aumentan los números de giros en el proceso de compactación hasta concluir con el *Número de Giro Máximo*; además se observa la presión (600 kPa), el diámetro interno del molde (150mm), la fecha y hora de la prueba:

Specimen Size: 150 mm Date: 11/26/13  
 Pressure: 600 kPa Time: 14:19  
 Specimen ID: \_\_\_\_\_ Test#: 4 Technician: \_\_\_\_\_

SPECIMEN HEIGHT (mm) vs. GYRATION NO.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	142.6	138.8	135.8	133.7	132.2	131.0	130.0	129.1	128.4	127.7
10	127.1	126.6	126.1	125.7	125.3	125.0	124.6	124.3	124.0	123.7
20	123.5	123.2	123.0	122.8	122.5	122.3	122.1	122.0	121.8	121.6
30	121.5	121.3	121.1	121.0	120.9	120.7	120.6	120.5	120.4	120.2
40	120.1	120.0	119.9	119.8	119.7	119.6	119.5	119.4	119.3	119.2
50	119.2	119.1	119.0	118.9	118.8	118.8	118.7	118.6	118.5	118.5
60	118.4	118.3	118.3	118.2	118.1	118.1	118.0	118.0	117.9	117.9
70	117.8	117.7	117.7	117.7	117.6	117.6	117.5	117.4	117.4	117.4
80	117.3	117.2	117.2	117.1	117.1	117.0	117.0	117.0	116.9	116.9
90	116.8	116.8	116.8	116.7	116.7	116.6	116.6	116.6	116.6	116.5
100	116.5	116.4	116.4	116.4	116.3	116.3	116.3	116.2	116.2	116.2
110	116.2	116.2	116.1	116.1	116.0	116.0	116.0	116.0	115.9	115.9
120	115.8	115.8	115.8	115.8	115.7	115.7	115.7	115.6	115.6	115.6
130	115.6	115.6	115.5	115.5	115.5	115.5	115.4	115.4	115.4	115.4
140	115.4	115.3	115.3	115.3	115.3	115.3	115.2	115.2	115.2	115.1
150	115.1	115.1	115.1	115.1	115.0	115.0	115.0	115.0	114.9	114.9
160	114.9	114.9	114.9	114.9	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8
170	114.8	114.8	114.7	114.7	114.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Specimen Size: 150 mm Date: 11/26/13  
 Pressure: 600 kPa Time: 14:46  
 Specimen ID: \_\_\_\_\_ Test#: 5 Technician: \_\_\_\_\_

SPECIMEN HEIGHT (mm) vs. GYRATION NO.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	142.5	138.9	135.9	133.9	132.4	131.2	130.2	129.3	128.6	128.0
10	127.4	126.9	126.4	126.0	125.6	125.2	124.9	124.6	124.3	124.0
20	123.7	123.5	123.3	123.1	122.9	122.6	122.5	122.3	122.1	121.9
30	121.8	121.6	121.5	121.3	121.2	121.1	120.9	120.8	120.7	120.6
40	120.4	120.3	120.2	120.1	120.0	119.9	119.8	119.7	119.6	119.5
50	119.5	119.4	119.3	119.2	119.1	119.0	119.0	118.9	118.8	118.7
60	118.7	118.6	118.5	118.5	118.4	118.4	118.3	118.2	118.2	118.1
70	118.1	118.0	117.9	117.9	117.8	117.8	117.7	117.7	117.6	117.6
80	117.5	117.5	117.4	117.4	117.3	117.3	117.2	117.2	117.2	117.1
90	117.0	117.0	117.0	116.9	116.9	116.9	116.8	116.8	116.7	116.7
100	116.7	116.6	116.6	116.6	116.6	116.5	116.5	116.4	116.4	116.3
110	116.3	116.3	116.3	116.2	116.2	116.2	116.1	116.1	116.1	116.1
120	116.0	116.0	116.0	115.9	115.9	115.9	115.8	115.8	115.8	115.8
130	115.8	115.7	115.7	115.7	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6	115.5
140	115.5	115.5	115.4	115.4	115.4	115.4	115.3	115.3	115.3	115.3
150	115.3	115.3	115.2	115.2	115.2	115.2	115.1	115.1	115.1	115.1
160	115.1	115.0	115.0	115.0	115.0	115.0	114.9	114.9	114.9	114.9
170	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Anexo 4: Datos de las alturas de los cilindros para cada número de giro exportados del CGS para “Durán”.

Specimen Size: 150 mm Date: 11/13/13  
 Pressure: 600 kPa Time: 14:58  
 Specimen ID: \_\_\_\_\_ Test#: 7 Technician: \_\_\_\_\_

SPECIMEN HEIGHT (mm) vs. GYRATION NO.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	139.1	135.1	132.7	130.8	129.4	128.3	127.4	126.6	126.0	125.4
10	124.9	124.5	124.0	123.7	123.3	123.1	122.8	122.5	122.2	122.0
20	121.8	121.6	121.4	121.2	121.0	120.8	120.7	120.5	120.4	120.3
30	120.1	119.9	119.8	119.7	119.6	119.5	119.3	119.3	119.2	119.1
40	118.9	118.9	118.8	118.7	118.6	118.5	118.4	118.3	118.2	118.2
50	118.1	118.0	118.0	117.9	117.8	117.8	117.7	117.6	117.6	117.5
60	117.5	117.4	117.3	117.3	117.2	117.1	117.1	117.0	117.0	117.0
70	116.9	116.9	116.8	116.8	116.7	116.7	116.6	116.6	116.5	116.5
80	116.4	116.4	116.4	116.3	116.3	116.3	116.2	116.2	116.2	116.2
90	116.1	116.0	116.0	116.0	115.9	115.9	115.9	115.8	115.8	115.8
100	115.8	115.7	115.7	115.7	115.7	115.6	115.6	115.5	115.5	115.5
110	115.5	115.4	115.4	115.4	115.3	115.3	115.3	115.3	115.3	115.2
120	115.2	115.2	115.1	115.1	115.1	115.1	115.1	115.0	115.0	115.0
130	115.0	115.0	114.9	114.9	114.9	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8
140	114.8	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.6	114.6	114.6
150	114.6	114.5	114.5	114.5	114.5	114.5	114.5	114.4	114.4	114.4
160	114.4	114.4	114.3	114.3	114.3	114.3	114.3	114.3	114.3	114.2
170	114.2	114.2	114.2	114.2	114.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Specimen Size: 150 mm Date: 11/13/13  
 Pressure: 600 kPa Time: 17:14  
 Specimen ID: \_\_\_\_\_ Test#: 8 Technician: \_\_\_\_\_

SPECIMEN HEIGHT (mm) vs. GYRATION NO.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	139.6	135.7	132.9	131.4	129.9	128.8	127.8	127.1	126.4	125.8
10	125.3	124.8	124.4	124.1	123.7	123.4	123.1	122.9	122.6	122.4
20	122.1	121.9	121.7	121.5	121.4	121.2	121.0	120.9	120.7	120.6
30	120.4	120.3	120.2	120.1	120.0	119.9	119.8	119.7	119.5	119.5
40	119.4	119.3	119.2	119.1	119.0	118.9	118.8	118.8	118.7	118.6
50	118.6	118.5	118.4	118.4	118.3	118.2	118.2	118.1	118.0	118.0
60	117.9	117.9	117.8	117.8	117.7	117.7	117.6	117.6	117.5	117.5
70	117.4	117.4	117.4	117.3	117.3	117.2	117.2	117.1	117.1	117.0
80	117.0	117.0	116.9	116.9	116.9	116.8	116.8	116.8	116.7	116.7
90	116.7	116.7	116.6	116.6	116.5	116.5	116.5	116.4	116.4	116.4
100	116.4	116.3	116.3	116.3	116.3	116.2	116.2	116.2	116.2	116.2
110	116.1	116.1	116.0	116.0	116.0	116.0	115.9	115.9	115.9	115.9
120	115.9	115.8	115.8	115.8	115.8	115.8	115.8	115.7	115.7	115.6
130	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6	115.5	115.5	115.5	115.5	115.5
140	115.5	115.5	115.5	115.4	115.4	115.3	115.3	115.3	115.3	115.3
150	115.3	115.3	115.2	115.2	115.2	115.2	115.2	115.2	115.2	115.2
160	115.1	115.1	115.1	115.1	115.1	115.0	115.0	115.0	115.0	115.0
170	115.0	115.0	115.0	114.9	114.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Anexo 5: Datos de las alturas de los cilindros para cada número de giro exportados del CGS para "Km.26".

Specimen Size: 150 mm Date: 11/15/13  
 Pressure: 600 kPa Time: 14:34  
 Specimen ID: \_\_\_\_\_ Test#:10 Technician: \_\_\_\_\_

SPECIMEN HEIGHT (mm) vs. GYRATION NO.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	143.6	139.6	136.4	134.2	132.6	131.3	130.2	129.3	128.5	127.8
10	127.1	126.6	126.1	125.6	125.1	124.8	124.4	124.0	123.7	123.4
20	123.2	122.9	122.6	122.4	122.2	122.0	121.7	121.5	121.3	121.1
30	121.0	120.8	120.6	120.5	120.3	120.2	120.0	119.9	119.8	119.6
40	119.5	119.4	119.3	119.2	119.1	118.9	118.8	118.7	118.7	118.5
50	118.4	118.4	118.3	118.2	118.1	118.0	117.9	117.8	117.7	117.7
60	117.6	117.5	117.4	117.4	117.3	117.2	117.1	117.1	117.0	117.0
70	116.9	116.8	116.8	116.7	116.6	116.6	116.5	116.5	116.4	116.4
80	116.3	116.3	116.2	116.2	116.1	116.0	116.0	116.0	115.9	115.9
90	115.8	115.8	115.7	115.7	115.6	115.6	115.6	115.5	115.5	115.4
100	115.4	115.4	115.3	115.3	115.3	115.2	115.2	115.2	115.1	115.1
110	115.0	115.0	115.0	114.9	114.9	114.9	114.8	114.8	114.8	114.7
120	114.7	114.7	114.7	114.6	114.6	114.6	114.5	114.5	114.5	114.5
130	114.4	114.4	114.4	114.3	114.3	114.3	114.3	114.2	114.2	114.2
140	114.2	114.1	114.1	114.1	114.1	114.0	114.0	114.0	114.0	114.0
150	114.0	113.9	113.9	113.9	113.9	113.8	113.8	113.8	113.8	113.7
160	113.7	113.7	113.7	113.7	113.6	113.6	113.6	113.6	113.6	113.6
170	113.6	113.5	113.5	113.5	113.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Specimen Size: 150 mm Date: 11/15/13  
 Pressure: 600 kPa Time: 16:08  
 Specimen ID: \_\_\_\_\_ Test#: 2 Technician: \_\_\_\_\_

SPECIMEN HEIGHT (mm) vs. GYRATION NO.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	146.2	142.0	138.6	136.4	134.7	133.3	132.2	131.3	130.4	129.7
10	129.1	128.6	128.0	127.6	127.1	126.7	126.3	126.0	125.7	125.4
20	125.1	124.8	124.5	124.3	124.1	123.9	123.6	123.5	123.2	123.1
30	122.9	122.7	122.5	122.4	122.2	122.1	121.9	121.8	121.7	121.5
40	121.4	121.3	121.2	121.1	120.9	120.8	120.7	120.6	120.5	120.4
50	120.3	120.2	120.1	120.1	119.9	119.9	119.8	119.7	119.6	119.5
60	119.5	119.4	119.3	119.2	119.1	119.1	119.0	118.9	118.8	118.8
70	118.7	118.7	118.6	118.6	118.5	118.4	118.4	118.3	118.2	118.2
80	118.1	118.1	118.0	118.0	118.0	117.9	117.8	117.8	117.7	117.7
90	117.6	117.6	117.6	117.5	117.5	117.4	117.4	117.3	117.3	117.3
100	117.2	117.2	117.1	117.1	117.1	117.0	117.0	116.9	116.9	116.9
110	116.8	116.8	116.8	116.7	116.7	116.7	116.7	116.6	116.6	116.5
120	116.5	116.4	116.4	116.4	116.4	116.4	116.3	116.3	116.3	116.2
130	116.2	116.2	116.2	116.1	116.1	116.1	116.1	116.0	116.0	116.0
140	115.9	115.9	115.9	115.9	115.9	115.8	115.8	115.8	115.7	115.7
150	115.7	115.7	115.7	115.6	115.6	115.6	115.6	115.5	115.5	115.5
160	115.5	115.5	115.5	115.4	115.4	115.4	115.4	115.3	115.3	115.3
170	115.3	115.3	115.3	115.2	115.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Anexo 6: Datos de las alturas de los cilindros para cada número de giro exportados del CGS para “Vía a la Costa”.

Specimen Size: 150 mm Date: 12/03/13  
 Pressure: 600 kPa Time: 14:56  
 Specimen ID: \_\_\_\_\_ Test#: 6 Technician: \_\_\_\_\_

SPECIMEN HEIGHT (mm) vs. GYRATION NO.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	140.4	136.2	133.5	131.6	130.2	129.1	128.2	127.5	126.8	126.2
10	125.7	125.3	124.9	124.5	124.1	123.8	123.5	123.2	123.0	122.7
20	122.5	122.3	122.1	121.9	121.7	121.5	121.4	121.2	121.1	120.9
30	120.8	120.7	120.5	120.4	120.3	120.2	120.1	120.0	119.9	119.8
40	119.7	119.6	119.5	119.4	119.3	119.2	119.1	119.1	119.0	118.9
50	118.8	118.8	118.7	118.6	118.6	118.5	118.4	118.4	118.3	118.2
60	118.2	118.1	118.1	118.0	118.0	117.9	117.9	117.8	117.8	117.7
70	117.7	117.6	117.6	117.6	117.5	117.5	117.4	117.4	117.3	117.3
80	117.3	117.2	117.2	117.1	117.1	117.1	117.0	117.0	117.0	117.0
90	116.9	116.9	116.9	116.8	116.8	116.8	116.7	116.7	116.7	116.6
100	116.6	116.6	116.6	116.5	116.5	116.5	116.4	116.4	116.4	116.4
110	116.4	116.3	116.3	116.3	116.3	116.2	116.2	116.2	116.2	116.1
120	116.1	116.1	116.1	116.0	116.0	116.0	116.0	116.0	115.9	115.9
130	115.9	115.9	115.9	115.9	115.8	115.8	115.8	115.8	115.8	115.7
140	115.7	115.7	115.7	115.7	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6
150	115.6	115.5	115.5	115.6	115.5	115.5	115.5	115.5	115.5	115.5
160	115.4	115.4	115.4	115.4	115.4	115.4	115.3	115.3	115.3	115.3
170	115.3	115.3	115.3	115.3	115.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Specimen Size: 150 mm Date: 12/03/13  
 Pressure: 600 kPa Time: 15:58  
 Specimen ID: \_\_\_\_\_ Test#: 8 Technician: \_\_\_\_\_

SPECIMEN HEIGHT (mm) vs. GYRATION NO.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	140.0	136.4	133.3	131.2	129.7	128.5	127.6	126.8	126.1	125.5
10	125.0	124.5	124.1	123.7	123.3	123.0	122.7	122.4	122.2	121.9
20	121.7	121.5	121.3	121.1	120.9	120.8	120.6	120.4	120.3	120.2
30	120.0	119.9	119.8	119.6	119.5	119.4	119.3	119.2	119.1	119.0
40	118.9	118.8	118.7	118.6	118.5	118.5	118.4	118.3	118.2	118.1
50	118.1	118.0	117.9	117.9	117.8	117.7	117.7	117.6	117.6	117.5
60	117.5	117.4	117.3	117.3	117.2	117.2	117.1	117.1	117.0	117.0
70	116.9	116.9	116.9	116.8	116.8	116.7	116.7	116.6	116.6	116.6
80	116.5	116.5	116.4	116.4	116.4	116.3	116.3	116.3	116.2	116.2
90	116.2	116.2	116.1	116.1	116.0	116.0	116.0	115.9	115.9	115.9
100	115.9	115.8	115.8	115.8	115.8	115.8	115.7	115.7	115.6	115.6
110	115.6	115.6	115.5	115.5	115.5	115.5	115.5	115.4	115.4	115.4
120	115.4	115.3	115.3	115.3	115.3	115.2	115.2	115.2	115.2	115.2
130	115.2	115.1	115.1	115.1	115.1	115.0	115.0	115.0	115.0	115.0
140	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.8	114.8
150	114.8	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7
160	114.6	114.6	114.6	114.5	114.5	114.5	114.5	114.5	114.5	114.5
170	114.5	114.5	114.5	114.5	114.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Anexo 7: Datos de las alturas de los cilindros para cada número de giro exportados del CGS para "Chivería".

Specimen Size: 150 mm

Date: 12/05/13

Pressure: 600 kPa

Time: 20:00

Specimen ID: \_\_\_\_\_ Test#: 1

Technician: \_\_\_\_\_

## SPECIMEN HEIGHT (mm) vs. GYRATION NO.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	139.2	135.6	132.6	130.5	129.0	127.9	126.9	126.1	125.4	124.8
10	124.3	123.8	123.4	123.0	122.6	122.3	122.0	121.7	121.4	121.2
20	120.9	120.7	120.5	120.3	120.1	119.9	119.8	119.6	119.5	119.3
30	119.2	119.1	118.9	118.8	118.7	118.6	118.5	118.4	118.2	118.2
40	118.1	118.0	117.9	117.8	117.7	117.7	117.6	117.5	117.4	117.4
50	117.3	117.3	117.2	117.1	117.1	117.0	117.0	116.9	116.8	116.8
60	116.7	116.7	116.7	116.6	116.6	116.5	116.5	116.4	116.4	116.4
70	116.4	116.3	116.2	116.2	116.2	116.1	116.1	116.1	116.0	116.0
80	116.0	116.0	115.9	115.9	115.9	115.8	115.8	115.8	115.8	115.7
90	115.7	115.7	115.7	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6	115.5	115.5
100	115.5	115.5	115.4	115.4	115.4	115.4	115.4	115.4	115.3	115.3
110	115.3	115.3	115.2	115.2	115.2	115.2	115.2	115.2	115.2	115.2
120	115.1	115.1	115.1	115.1	115.1	115.1	115.1	115.0	115.0	115.0
130	115.0	115.0	115.0	115.0	115.0	115.0	115.0	114.9	114.9	114.9
140	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9
150	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8
160	114.8	114.8	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7
170	114.7	114.8	114.7	114.7	114.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Specimen Size: 150 mm

Date: 12/05/13

Pressure: 600 kPa

Time: 20:38

Specimen ID: \_\_\_\_\_ Test#: 2

Technician: \_\_\_\_\_

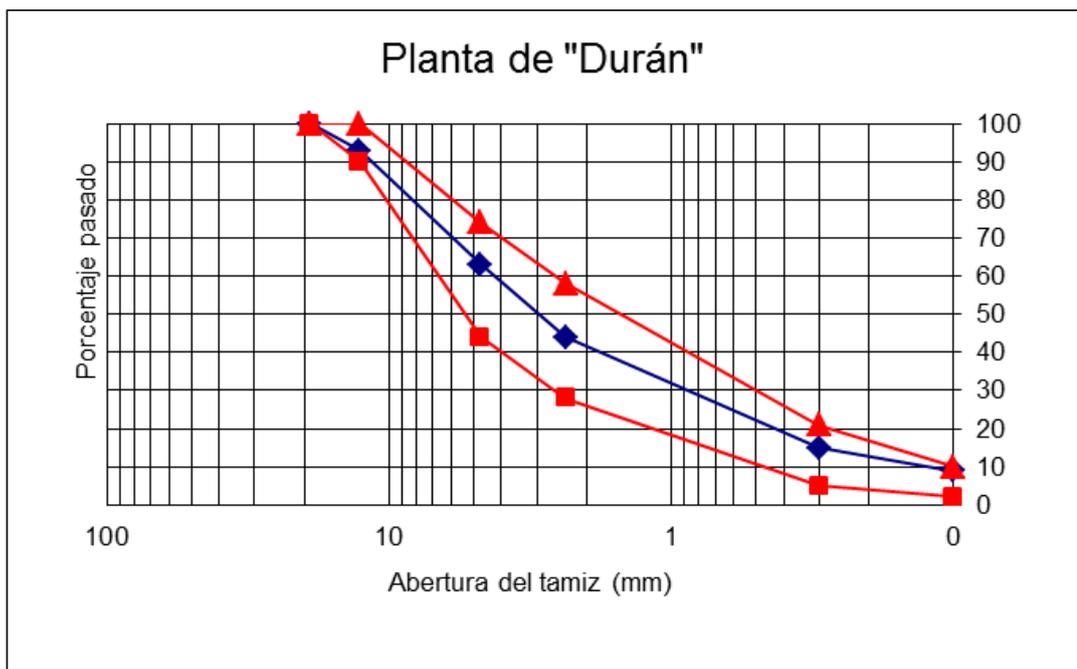
## SPECIMEN HEIGHT (mm) vs. GYRATION NO.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	139.4	135.7	132.4	130.3	128.7	127.5	126.5	125.7	125.0	124.4
10	123.9	123.4	123.0	122.6	122.2	121.9	121.5	121.3	121.0	120.7
20	120.5	120.3	120.1	119.9	119.7	119.5	119.4	119.2	119.1	118.9
30	118.8	118.7	118.5	118.4	118.3	118.2	118.1	118.0	117.9	117.8
40	117.7	117.6	117.5	117.4	117.4	117.3	117.2	117.1	117.1	117.0
50	116.9	116.9	116.8	116.8	116.7	116.7	116.6	116.6	116.5	116.4
60	116.4	116.3	116.3	116.3	116.2	116.2	116.2	116.1	116.1	116.0
70	116.0	115.9	115.9	115.9	115.9	115.8	115.8	115.8	115.8	115.8
80	115.7	115.6	115.6	115.6	115.6	115.6	115.5	115.5	115.5	115.5
90	115.5	115.5	115.4	115.4	115.3	115.3	115.3	115.3	115.3	115.3
100	115.3	115.3	115.2	115.2	115.2	115.2	115.1	115.1	115.1	115.1
110	115.1	115.1	115.1	115.1	115.0	115.0	115.0	115.0	115.0	114.9
120	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.9	114.8	114.8	114.8	114.8
130	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	114.8	114.7	114.7	114.7	114.7
140	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.6	114.6	114.6	114.6
150	114.6	114.6	114.6	114.6	114.6	114.6	114.5	114.5	114.5	114.5
160	114.5	114.5	114.5	114.5	114.5	114.6	114.5	114.5	114.5	114.5
170	114.5	114.5	114.5	114.5	114.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Anexo 8: Datos de las alturas de los cilindros para cada número de giro exportados del CGS para "Picoazá".

<b>Granulometría del agregado de "Durán"</b>				
<b>Abertura de Tamices</b>		<b>% Pasante Acumulado</b>	<b>ESPEC. 1/2" MOP 2002</b>	
<b>No.</b>	<b>mm</b>		<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
3/4"	19,00	<b>100,0</b>	100	100
1/2"	12,70	<b>93,0</b>	90	100
# 4	4,75	<b>63,0</b>	44	74
# 8	2,36	<b>44,0</b>	28	58
# 50	0,30	<b>15,0</b>	5	21
# 200	0,10	<b>9,0</b>	2	10

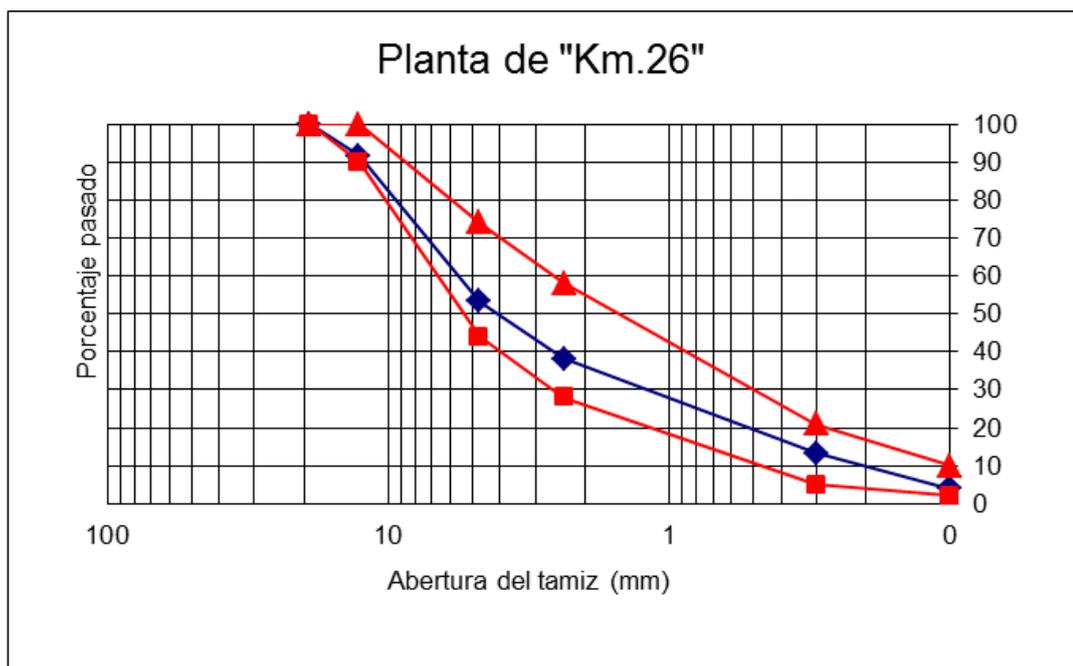
ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.



Anexo 9: Granulometría del agregado combinado utilizado en la mezcla asfáltica de "Durán".

<b>Granulometría del agregado de "Km.26"</b>				
<b>Abertura de Tamices</b>		<b>% Pasante Acumulado</b>	<b>ESPEC. 1/2" MOP 2002</b>	
<b>No.</b>	<b>mm</b>		<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
3/4"	19,00	<b>100,0</b>	100	100
1/2"	12,70	<b>91,8</b>	90	100
# 4	4,75	<b>53,4</b>	44	74
# 8	2,36	<b>38,2</b>	28	58
# 50	0,30	<b>13,2</b>	5	21
# 200	0,10	<b>4,0</b>	2	10

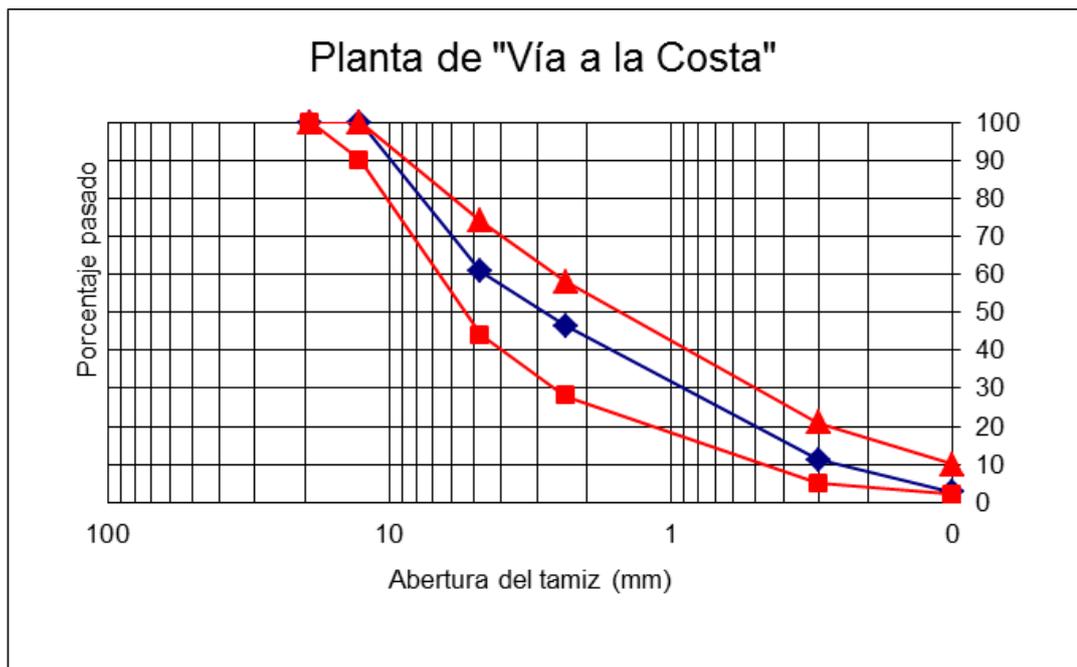
ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.



Anexo 10: Granulometría del agregado combinado utilizado en la mezcla asfáltica de "Km.26".

<b>Granulometría del agregado de "Vía a la Costa"</b>				
<b>Abertura de Tamices</b>		<b>% Pasante Acumulado</b>	<b>ESPEC. 1/2" MOP 2002</b>	
<b>No.</b>	<b>mm</b>		<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
3/4"	19,00	<b>100,0</b>	100	100
1/2"	12,70	<b>100,0</b>	90	100
# 4	4,75	<b>60,8</b>	44	74
# 8	2,36	<b>46,5</b>	28	58
# 50	0,30	<b>11,2</b>	5	21
# 200	0,10	<b>2,6</b>	2	10

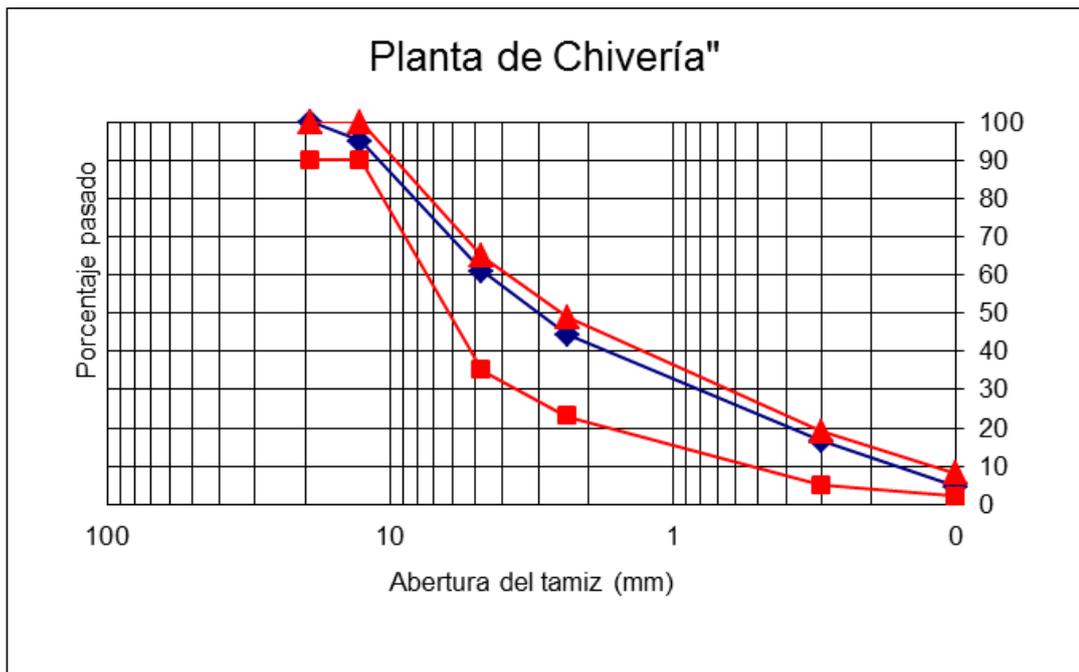
ESPECIFICACIÓN: 1/2". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.



Anexo 11: Granulometría del agregado combinado utilizado en la mezcla asfáltica de "Vía a la Costa".

<b>Granulometría del agregado de "Chivería"</b>				
<b>Abertura de Tamices</b>		<b>% Pasante Acumulado</b>	<b>ESPEC. 3/4" MOP 2002</b>	
<b>No.</b>	<b>mm</b>		<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
3/4"	19,00	<b>100,0</b>	90	100
1/2"	12,70	<b>95,1</b>	90	100
# 4	4,75	<b>61,0</b>	35	65
# 8	2,36	<b>44,4</b>	23	49
# 50	0,30	<b>16,6</b>	5	19
# 200	0,10	<b>4,6</b>	2	8

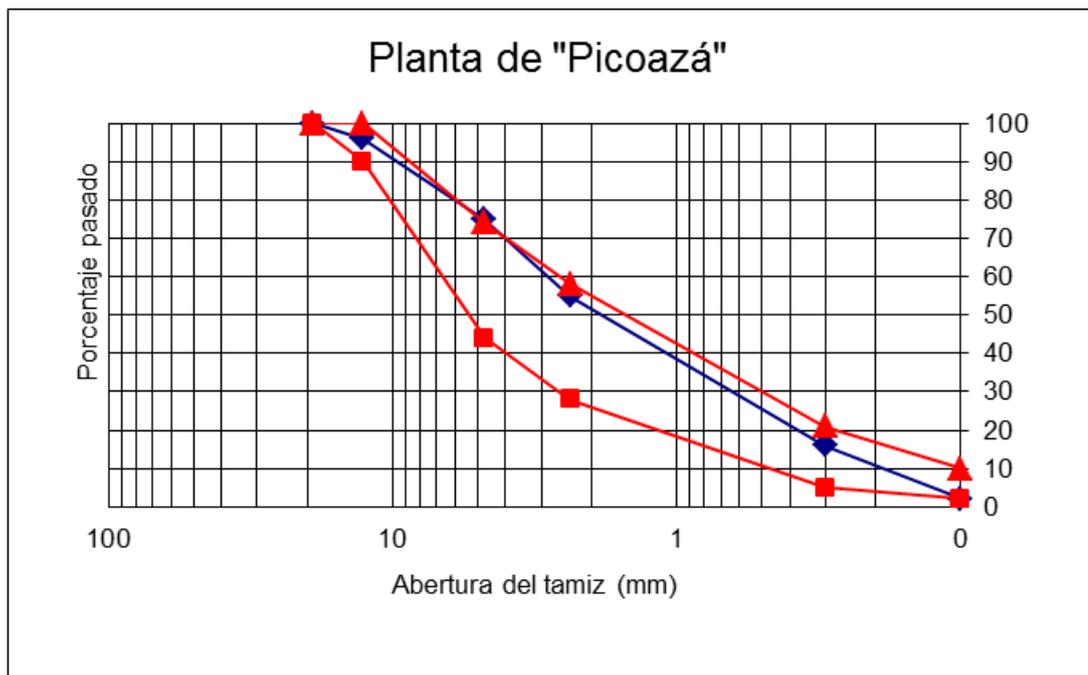
ESPECIFICACIÓN: 3/4". MOP- 001 F- 2002. TABLA 405-5.1.



Anexo 12: Granulometría del agregado combinado utilizado en la mezcla asfáltica de "Chivería".

<b>Granulometría del agregado de "Picoazá"</b>				
<b>Abertura de Tamices</b>		<b>% Pasante Acumulado</b>	<b>ESPEC. 1/2" MOP 2002</b>	
<b>No.</b>	<b>mm</b>		<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
3/4"	19,00	<b>100,0</b>	100	100
1/2"	12,70	<b>96,0</b>	90	100
# 4	4,75	<b>75,0</b>	44	74
# 8	2,36	<b>55,0</b>	28	58
# 50	0,30	<b>16,0</b>	5	21
# 200	0,10	<b>2,0</b>	2	10

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



Anexo 13: Granulometría del agregado combinado utilizado en la mezcla asfáltica de "Picoazá".