

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIVIL**

**DISERTACION PREVIA A LA OBTENCION DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**TEMA:
COMPARACIÓN DE MÓDULOS DE RIGIDEZ POR
TENSION INDIRECTA UTILIZANDO MÉTODO DE
COMPACTACIÓN MARSHALL Y SUPERPAVE PARA EL
DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**

NOMBRES:

**CARLOS JAVIER MONTESINOS CLAVIJO
PATRICIO JAVIER REYES VELASTEGUI**

DIRECTOR DE DISERTACIÓN:

ING. GUSTAVO YANEZ

QUITO 2010

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por darme la vida y por culminar mis estudios satisfactoriamente.

A mis padres y toda mi familia, por su amor, esfuerzo, y apoyo incondicional, durante mi formación tanto personal como profesional.

A mis profesores, por brindarme su guía y sabiduría en el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros por su amistad y compañía durante toda la carrera.

RESUMEN

JUSTIFICACIÓN

La práctica de diseño de mezclas asfálticas, ha recurrido a diferentes métodos para establecer un diseño óptimo en el laboratorio; el más utilizado en el Ecuador es el método Marshall; las mezclas asfálticas han sido típicamente diseñadas con procedimientos empíricos de laboratorio, lo que significa que se requiere la experiencia en campo para determinar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del pavimento. De cualquier manera, aun con la correcta conjunción de estos procedimientos y el desarrollo del criterio de diseño de la mezcla, no se aseguran buenos grados de desempeño.

El advenimiento de tráfico pesado y altas presiones en neumáticos ha requerido la búsqueda de pavimentos de comportamiento superior, lo que dio origen al método de diseño de mezclas Superpave, el cual pone énfasis en el diseño volumétrico adecuado, para obtener pavimentos de comportamiento superior durante su vida útil, sin embargo, aún quedan por implementar ensayos de resistencia que relacionen directamente el diseño con el comportamiento mecánico. El método de diseño de mezclas asfálticas convencionales, el método Marshall, provee parámetros volumétricos tanto como una información empírica sobre la resistencia de la mezcla a través del ensayo de estabilidad y flujo. Pero estos parámetros pierden relevancia en las mezclas llamadas de comportamiento superior, en las que se hace necesario estudiar los parámetros mecánicos que pueden ser utilizados para controlar la calidad en laboratorio y obra.

En nuestra investigación realizaremos el ensayo de Tracción Indirecta que nos ayuda a obtener los módulos de rigidez que serán utilizados como verificación de un adecuado diseño que permita complementar los conocimientos adquiridos con los diseños tradicionales (Marshall) y además analizar nuevos diseños (Superpave).

Los resultados que se obtuvieron de la investigación, nos indican la capacidad del ensayo de Tracción Indirecta para estudiar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas compactadas por el método Marshall y Superpave. Entre estos dos diseños de mezclas, se utilizó como única variable la forma de compactación, la cual es diferente para cada caso; el método Marshall se realiza mediante compactación manual con un martillo de impacto, el cual no representa lo que realmente pasa en el campo, mientras el método de diseño Superpave utiliza por el contrario un compactador giratorio (mecánico) que se acerca más a la realidad.

El ensayo de Tracción Indirecta por compresión diametral se utilizó por su simplicidad, fácil aplicación y gran sensibilidad a los parámetros volumétricos y componentes constitutivos de la mezcla.

Anteriormente en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, se han realizado investigaciones de mezclas asfálticas utilizando solamente el método Marshall, pero en la actualidad el laboratorio de pavimentos también está en capacidad de realizar mezclas asfálticas mediante el método Superpave. Esta investigación ayudara a conocer este nuevo método y también proveerá información de las diferencias que existen entre el método Marshall y Superpave.

OBJETIVOS

General:

- Comparar los módulos de rigidez de mezclas asfálticas compactadas por el método Marshall y Superpave, para obtener un factor de corrección que permita relacionar los módulos entre los dos sistemas de diseño.

Específicos:

- Caracterizar los agregados a utilizarse en la realización de las mezclas.
- Realizar los diseños de mezclas asfálticas mediante el método Marshall y el método Superpave.
- Realizar el ensayo de tensión indirecta en las mezclas Marshall y Superpave.
- Realizar una comparación a nivel volumétrico entre las mezclas asfálticas compactadas con ambas metodologías.
- Lograr complementar los conocimientos del Método Marshall, y además conocer la nueva técnica de diseño de mezclas Superpave, y establecer las diferencias que existen entre estos dos métodos.
- Realizar una correlación entre los resultados obtenidos en cada método de diseño Marshall y Superpave, para que en caso de requerir realizar un ensayo de tracción indirecta, nuestra investigación ayude a escoger un método de diseño de acuerdo a las circunstancias requeridas y establecer posibles resultados que se pueden obtener si se hubiere utilizado otro método de diseño, manteniendo las características de los agregados y asfalto utilizados.

ALCANCE:

- Se logró analizar las diferencias que existen entre los métodos de diseño Marshall y Superpave, además se pudo apreciar la influencia de la forma de compactación en la resistencia de las mezclas asfálticas.
- Con los módulos de rigidez de las briquetas compactadas por el método Marshall, se logró obtener módulos de rigidez aproximados para briquetas compactadas por el método Superpave y viceversa, con la utilización del factor de corrección. Cabe recalcar que los resultados obtenidos tienen valor específicamente para las condiciones y características de los agregados y asfalto que corresponden al sector de Guayllabamba.
- La investigación se realizó con material de la cantera de Guayllabamba, cumpliendo con las normas necesarias para el caso.
- El asfalto que se usó en la investigación es el AC-20.

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN.....	iv
JUSTIFICACIÓN	iv
OBJETIVOS.....	vi
ALCANCE:	vii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades de los materiales	2
1.1.1. Agregados Pétreos	2
1.1.1.1. Propiedades físicas de los agregados	4
1.1.1.2. Limpieza.....	5
1.1.1.3. Tenacidad y Resistencia a la Abrasión	5
1.1.1.4. Durabilidad y Resistencia.....	5
1.1.2. Asfaltos	5
1.1.2.1. Antecedentes históricos.....	6
1.1.2.2. Refinamiento del asfalto	7
1.1.2.3. Tipos de asfaltos	7
1.1.2.3.1.Cementos asfálticos.....	8
1.1.2.3.2.Emulsiones Asfálticas	9
1.1.2.3.3.Asfaltos diluidos o cut back.....	11
1.2.Origen de los materiales	12
1.2.1.Reseña histórica.....	12
1.2.2.Canteras.....	13
CAPÍTULO II.....	15
DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	15
2.1.Selección de los materiales	15
2.1.1.Agregado mineral	15
2.1.1.1.Dosificación de la mezcla de agregados	16
2.1.1.2.Graduación	17
2.1.2. Ligante asfáltico	17
2.2.Características y elaboración de las mezclas asfálticas	18
2.2.1.Porcentajes de asfalto	18

2.2.2.Elaboración de las mezclas asfálticas	18
2.2.3.Niveles de compactación	20
2.3.Pruebas fundamentales a la mezcla asfáltica	22
2.4.Análisis de los parámetros volumétricos de las mezclas asfálticas.....	22
2.5.Selección del contenido óptimo de asfalto	23
2.6.Ensayo de Tracción Indirecta.....	23
2.7.Tablas comparativas y resultados.....	23
CAPITULO III	24
CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	24
3.1.Ensayos a los materiales granulares	24
3.1.1.Granulometría (ASTM C136-99).....	24
3.1.2.Gravedad Específica (ASTM C127-81, C128-79).....	25
3.1.3.Abrasión (Resistencia a degradación del agregado grueso – Máquina de los Ángeles) (ASTM C 131-99).....	26
3.1.4.Equivalente de Arena (ASTM D2419-79).....	27
3.1.5.Determinación de Materiales Deletéreos (ASTM C142)	27
3.1.6.Partículas Alargadas y Aplanadas (ASTM D 4791).....	28
3.1.7.Angularidad del agregado (ASTM D5821-D1252).....	29
3.2.Ensayos a los materiales bituminosos	29
3.2.1.Gravedad específica (ASTM D70-97).....	30
3.2.2.Viscosidad Rotacional (ASTM D 4402).....	30
3.2.3.Ductilidad (ASTM D113-99).....	31
3.2.4.Penetración (ASTM D5-97).....	31
3.2.5.Punto de Inflamación y combustión (ASTM D92-78).....	32
3.2.6.Punto de Reblandecimiento (ASTM D36-76).....	33
3.3.Ensayos a las mezclas asfálticas	33
3.3.1.Método de Bruce Marshall (ASTM D 1559)	33
3.3.1.1.Granulometría	35
3.3.1.2.Procedimiento.....	35
3.3.2.Método Superpave.....	39
3.3.2.1.Pruebas a los materiales	39
3.3.2.2.Parámetros Volumétricos	40
3.3.2.3.Selección de la granulometría	42
3.3.2.4.Determinación del porcentaje inicial de asfalto	43
3.3.2.5.Definir el esfuerzo de compactación.....	44

3.3.2.6.Compactador Giratorio TROXLER.....	46
3.3.2.7.Pruebas para las mezclas asfálticas.....	47
3.3.3.Ensayo de tracción indirecta (NORMA BS EN12697-26:2004)	49
3.3.3.1.Introducción.....	49
3.3.3.2.Equipo	52
3.3.3.2.2.Equipo para medir deformaciones	53
3.3.3.2.3.Equipo de alineación	54
3.3.3.3.Preparación de la muestra	54
3.3.3.4.Condiciones de almacenamiento	55
3.3.3.5.Procedimiento del ensayo.....	55
3.3.3.5.1.Montaje de la muestra	55
3.3.3.5.2.Medición de la rigidez y deformación.....	56
3.3.3.5.3.Cálculo del módulo de rigidez	56
CAPÍTULO IV	58
DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS	58
4.1. Agregados.....	59
4.1.1.Caracterización de la mina de Guayllabamba:.....	59
4.2. Materiales Bituminosos	74
4.2.1. Caracterización del cemento asfáltico	74
4.3.Diseño de mezcla asfáltica Marshall	82
4.4. Diseño de mezcla asfáltica Superpave	87
4.5. Ensayo de Tracción Indirecta.....	94
4.5.1.Módulo de Rigidez en briquetas Marshall a 75 Golpes.....	94
4.5.2.Módulo de Rigidez en briquetas Superpave	96
4.5.2.1.Briquetas Compactadas a 75 Giros.....	96
4.5.2.2.Briquetas Compactadas a 100 Giros.....	97
4.5.2.3.Briquetas Compactadas a 120 Giros.....	98
CAPITULO V.....	99
EVALUACIÓN DE RESULTADOS	99
5.1.Evaluación volumétrica entre briquetas Marshall y Superpave.....	99
5.1.1.Gravedad Bulk (Gb.) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 75 Giros	100
5.1.2.Gravedad Bulk (Gb.) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 100 Giros	101
5.1.3.Gravedad Bulk (Gb.) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 120 Giros	102
5.1.4.Análisis de la Gravedad específica de las mezclas (Gb.)	103

5.1.5.Porcentaje de vacios (Va) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 75 Giros	104
5.1.6.Porcentaje de vacios (Va) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 100 Giros	105
5.1.7.Porcentaje de vacios (Va) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 120 Giros	106
5.1.8.Análisis del porcentaje de vacios de las mezclas compactadas (Va)	107
5.1.9.Volumen de vacios en el agregado mineral (VAM) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 75 Giros	108
5.1.10.Volumen de vacios en el agregado mineral (VAM) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 100 Giros	109
5.1.11.Volumen de vacios en el agregado mineral (VAM) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 120 Giros	110
5.1.12.Análisis de volumen de vacios en el agregado mineral de las mezclas (VAM)	111
5.2.Comparación de Módulos de Rigidez entre briquetas Marshall y Superpave	112
5.2.1.Módulos de Rigidez Marshall 75 Golpes vs. Superpave 75 Giros.....	112
5.2.2.Módulos de Rigidez Marshall 75 Golpes vs. Superpave 100 Giros.....	113
5.2.3.Módulos de Rigidez Marshall 75 Golpes vs. Superpave 120 Giros.....	114
5.2.4.Análisis de los Módulos de Rigidez entre briquetas Marshall y Superpave	115
5.3.Factor de Corrección	115
CAPITULO VI	117
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
6.1.Conclusión General	117
6.2.Conclusiones Específicas	119
BIBLIOGRAFÍA	124
ANEXOS.....	125
ANEXO I.....	126
REPORTE DEL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA EN BRIQUETAS COMPACTADAS POR EL METODO MARSHALL.....	126
ANEXOS II	142
REPORTE DEL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA EN BRIQUETAS COMPACTADAS POR EL METODO SUPERPAVE	142
ANEXOS III.....	156
ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES.....	156
(MOP-001-F2002 TOMO II).....	156

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La práctica de diseño de mezclas asfálticas, ha recurrido a diferentes métodos para establecer un diseño óptimo en el laboratorio; el más utilizado en el Ecuador es el método Marshall; las mezclas asfálticas han sido típicamente diseñadas con procedimientos empíricos de laboratorio, lo que significa que se requiere la experiencia en campo para determinar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del pavimento. De cualquier manera, aun con la correcta conjunción de estos procedimientos y el desarrollo del criterio de diseño de la mezcla, no se aseguran buenos grados de desempeño.

Los métodos de diseño de mezclas asfálticas en laboratorio usualmente utilizados son el Marshall y Hveem. El método Marshall, provee parámetros volumétricos tanto como una información empírica sobre la resistencia de la mezcla a través del ensayo de estabilidad y flujo. Pero estos parámetros pierden relevancia en las mezclas llamadas de comportamiento superior, en las que se hace necesario estudiar los parámetros mecánicos que pueden ser utilizados para controlar la calidad en laboratorio y obra.

El advenimiento de tráfico pesado y altas presiones en neumáticos ha requerido la búsqueda de pavimentos de comportamiento superior, lo que dio origen al método de diseño de mezclas Superpave, el cual pone énfasis en el diseño volumétrico adecuado, para obtener pavimentos de comportamiento superior durante su vida útil, sin embargo, aún quedan por implementar ensayos de resistencia que relacionen directamente el diseño con el comportamiento mecánico.

La práctica actual del diseño de mezclas asfálticas, deja ver la importancia de lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica terminada, ya que de esto depende en gran medida el desempeño de la superficie de

rodamiento en su vida de servicio. De ahí, la trascendencia de simular de manera adecuada la densificación que ocurre en campo, bajo la acción vehicular y de esta forma, llegar a fórmulas de trabajo que permitan dosificar mezclas que exhiban un mejor comportamiento en condiciones específicas de tránsito y clima.

En nuestra investigación se pretende mostrar, una comparación en el comportamiento de mezclas asfálticas diseñadas por el método Marshall (utilizado en Ecuador) y por el método volumétrico Superpave con agregados y asfalto nacionales, teniendo en cuenta las condiciones del clima y el tránsito ecuatorianos. El análisis de los resultados está orientado hacia lograr una mejor explotación del potencial de nuestros materiales viales, y la premisa de este trabajo es que a partir de unos mismos materiales, se puede lograr un mejor producto si se aplica una fórmula de trabajo obtenida por un método de diseño que realice controles efectivos, para predecir con mayor certeza el comportamiento de las mezclas asfálticas en servicio.

Finalmente, dicha comparación se hace mediante los módulos de rigidez obtenidos de probetas construidas por las dos metodologías.

1.1. Generalidades de los materiales

1.1.1. Agregados Pétreos

Los agregados usados en construcción de carreteras se obtienen de rocas naturales. Las rocas naturales se clasifican geológicamente en tres grupos dependiendo de su origen: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Otro tipo de agregados, algunas veces usados en mezclas asfálticas en caliente, son los agregados livianos, producto de arcillas calentadas a temperaturas muy altas y escorias de altos hornos. Estos dos agregados proporcionan buena resistencia al patinaje cuando se utilizan en mezclas asfálticas en caliente. ¹

¹ Manual de laboratorio Ensayos para pavimentos, Vol. I, Sección Mineralogía, Pág. 59

En la tabla 1.1 se resumen propiedades deseables de rocas para agregados utilizados en Mezclas Asfálticas en Caliente.

Tabla 1.1. Propiedades de rocas

Tipo de Roca	Dureza/Tenacidad	Resistencia al desprendimiento	Textura superficial	Forma fracturada
Ignea:				
Granito	Regular	Regular	Regular	Regular
Sienita	Bueno	Regular	Regular	Regular
Diorita	Bueno	Regular	Regular	Bueno
Basalto	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Diabasa	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Gabro	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Sedimentaria:				
Caliza, Dolomita	Pobre	Bueno	Bueno	Regular
Arenisca	Regular	Bueno	Bueno	Bueno
Chert	Bueno	Regular	Pobre	Bueno
Lutita	Pobre	Pobre	Regular	Regular
Metamórfica:				
Gneis	Regular	Regular	Bueno	Bueno
Esquisto	Regular	Regular	Bueno	Regular
Pizarra	Bueno	Regular	Regular	Regular
Cuarcita	Bueno	Regular	Bueno	Bueno
Mármol	Pobre	Bueno	Regular	Regular
Serpentina	Bueno	Regular	Regular	Regular

La mayoría de los agregados están compuestos por varios minerales. Algunos departamentos de carreteras especifican un mínimo de 10% de ácidos insolubles que aseguran propiedades aceptables de fricción. ²

Los agregados con sustancias deletéreas no son deseables en Mezclas Asfálticas en Caliente y no deberían usarse a menos que la cantidad de la matriz se reduzca por lavado u otro medio. Las especificaciones para agregados normalmente enumeran una lista de materiales deletéreos (terrones de arcilla, lutita, partículas blandas). Otras agencias especifican un mínimo de Equivalente de Arena (ASTM

² Manual de laboratorio Ensayos para pavimentos, Vol. I, Sección Mineralogía, Pág. 60

D-2419) o Índice Máximo de Plasticidad (ASTM D-4318). AASHTO M-283 sugiere que la capa en agregados después de humedecidos no deben exceder el 0.5% al ser ensayados.

Uno de los más importantes efectos de la mineralogía de los agregados, en el comportamiento de Mezclas Asfálticas en Caliente, es su influencia en la adhesión y perjuicio por humedad. ³

1.1.1.1. Propiedades físicas de los agregados

Los agregados para Mezclas Asfálticas en Caliente son usualmente clasificados por tamaños, en agregados gruesos, agregados finos, o filler mineral. ASTM define a los agregados gruesos como las partículas retenidas en la malla N^o4 (4.75 mm); y filler mineral como el material que pasa la malla N^o200 (75µm) en un porcentaje mínimo de 70%.

Las especificaciones de agregados gruesos, finos, y filler mineral se dan en ASTM D-692, D-1073 y D-242, respectivamente. Los agregados adecuados para su uso en Mezclas Asfálticas en Caliente se determinan evaluándolos para las siguientes características mecánicas:

- Tamaño y gradación
- Limpieza / materiales deletéreos
- Tenacidad / dureza
- Durabilidad / resistencia
- Textura superficial
- Forma de partículas
- Absorción
- Afinidad por el asfalto

³ Manual de laboratorio Ensayos para pavimentos, Vol. I, Sección Mineralogía, Pág. 60

1.1.1.2. Limpieza

El ensayo de Equivalente de Arena, desarrollado por la *California División of Highways* descrito en ASTM D-2419, es un método para determinar la proporción relativa de polvo o arcilla en la porción de agregado que pasa la malla N°4.

1.1.1.3. Tenacidad y Resistencia a la Abrasión

Los agregados sufren desgaste abrasivo durante su construcción, colocación y compactación de mezclas asfálticas para pavimentos. Los agregados también están sujetos a abrasión por efecto de la carga de tránsito. Los agregados de la superficie requieren mayor tenacidad que los agregados de capas menores que reciben cargas disipadas.

El ensayo de abrasión con la máquina de los Ángeles, mide el desgaste o resistencia a la abrasión del agregado mineral. El equipo y procedimiento se detallan en las normas AASHTO T-96 y ASTM C-131. El ensayo de prueba da rangos de 10% para rocas ígneas muy duras a 60% para calizas y areniscas. El máximo desgaste para agregados gruesos usados en carreteras de primera categoría con Mezclas Asfálticas en Caliente se limita el porcentaje de desgaste a 40% y otras agencias en 60%. ASTM D-1073 no especifica el porcentaje máximo de pérdida por abrasión.

1.1.1.4. Durabilidad y Resistencia

Los agregados deben ser resistentes a la falla, desintegración por efectos del humedecimiento-secado y congelamiento-deshielo. El ensayo ASTM C-88 es una medida empírica que pretende indicar la durabilidad debido a variaciones del clima, no se encontraron registros históricos por ser una nueva fuente para evaluar agregados.⁴

1.1.2. Asfaltos

⁴ Manual de laboratorio Ensayos para pavimentos, Vol. I, Sección Agregados, Pág. 61

1.1.2.1. Antecedentes históricos

El cemento asfáltico y el alquitrán son considerados materiales bituminosos. Frecuente, estos dos términos son usados intercambiando hábilmente sus conceptos resultado de su similitud en apariencia y algunas aplicaciones. Sin embargo, el cemento asfáltico y el alquitrán son dos materiales diferentes; con diferentes orígenes y características químicas y físicas. El cemento asfáltico es de color marrón oscuro a negro material cementado que se origina de manera natural o como producto de la destilación del petróleo. El alquitrán, es primeramente fabricado por la destilación seca del carbón bituminoso y tiene un olor muy diferente. El cemento asfáltico es usado principalmente en los Estados Unidos en aplicaciones de pavimentos. El alquitrán es difícilmente usado en pavimentación porque algunas de sus características físicas no deseables tal como el ser muy susceptible a altas temperaturas, y significando un peligro para la salud causando daño a los ojos e irritando la piel cuando se expone a sus gases.

Los tipos comerciales de asfalto son clasificados en dos categorías:

- ***Asfalto Natural***

Estos estuvieron almacenados bajo estratos geológicos surgiendo materiales asfálticos blandos y duros, friable, material negro en vetas de formaciones rocosas, o impregnadas en calizas, formaciones de areniscas y similares. El material asfáltico relativo blando, casi siempre es semejante al petróleo pesado

- ***Asfalto de Petróleo***

Estos son coloides dispersos en hidrocarburos en el crudo de petróleo y se obtienen por su refinación. Con el descubrimiento del proceso de refinación en 1900 y la popularidad de los automóviles, grandes cantidades de petróleo fueron

procesados para obtener asfalto. Gradualmente el proceso de refinamiento de asfaltos es de mejor calidad.⁵

1.1.2.2. Refinamiento del asfalto

Casi todo el cemento asfáltico empleado en trabajos de pavimento se obtiene por procesamiento del crudo del petróleo. Los procesos de refinación para la obtención de asfaltos dependen de las características del crudo y el rendimiento del asfalto que representa. Si este rendimiento es alto y el crudo presenta características asfálticas, basta una etapa de destilación al vacío. Para los crudos que presentan rendimientos medios de asfalto son necesarias dos etapas de destilación: una a presión atmosférica y otra a vacío. Para crudos muy livianos de bajo rendimiento de asfaltos es necesario además de las etapas mencionadas otra final adicional de extracción. Estos procesos de obtención por destilación y extracción, consisten básicamente en la separación física de los hidrocarburos componentes constituidos como mezcla en el crudo, por diferencia en sus puntos de ebullición y de condensación.

1.1.2.3. Tipos de asfaltos

Los asfaltos comúnmente usados para la construcción de pavimentos flexibles se dividen en tres tipos:

- Cementos asfálticos
- Emulsiones asfálticas
- Asfaltos Diluidos o Cut Back.

⁵ Manual de Laboratorio Ensayos para pavimentos, Vol. I, Sección Asfaltos, Pág. 62

1.1.2.3.1.Cementos asfálticos

Como ya se mencionó el cemento asfáltico se obtiene, por destilación del crudo del petróleo mediante diferentes técnicas de refinación. El producto obtenido en los fondos de la torre de vacío luego de procesos de destilación por unidades primarias y de vacío, es el cemento asfáltico de petróleo, de consistencia semisólida a temperatura ambiente.

A temperatura ambiente el cemento asfáltico es negro, pegajoso, semi-sólido y altamente viscoso. Este es resistente y durable con excelente adhesividad y características a prueba de agua, altamente resistente a la acción de ácidos, álcalis y sales. El cemento asfáltico se usa en grandes cantidades, para la producción de Mezclas Asfálticas en Caliente (HMA), primordialmente usado en la construcción de pavimentos flexibles en todo el mundo. El cemento asfáltico puede ser mezclado con agregados para la producción del HMA, su propiedad de adhesividad facilita la unión con el agregado que después de poner a temperatura ambiente, el HMA es un muy fuerte material de pavimento que puede soportar el tráfico pesado.

Tres métodos basados en su penetración, viscosidad o comportamiento se usan para clasificar el cemento asfáltico en diferentes grados. El grado de penetración del cemento asfáltico se especifica en ASTM D-946, con cinco penetraciones estándares, 40-50, 60-70, 85-100, 120-150, 200-300. El ensayo de penetración mide la penetración de una aguja estándar dentro de un cemento para pavimentación bajo cierta temperatura, tiempo y carga. Obviamente un alto valor de penetración representa un cemento asfáltico blando. Por ejemplo, 40-50 es un grado alto, y 200-300 es un grado blando.

El segundo método para clasificación del cemento asfáltico es por el grado de viscosidad, especificado en ASTM D-3381. Este se basa en la viscosidad del cemento asfáltico original o por la viscosidad del cemento asfáltico después de curado en el horno de película delgada (RTFO). Ambas viscosidades se miden en

140 °F (60 °C) y reportado en poises. El grado de viscosidad basado sobre el cemento asfáltico original incluye AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-30y AC-40. El grado de viscosidad del Residuo Asfáltico (AR) por el ensayo RTFO incluye AR-1000, AR-2000, AR-4000, AR-8000, y AR-16000. El valor numérico indica viscosidades a 140 °F (60 °C) en poises.

El tercer método de clasificación asfáltica involucra el comportamiento que se fundamenta en el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP).

La mayoría de las Mezclas Asfálticas en Caliente, entre los años 1940 a 1990, fueron diseñadas usando los métodos Marshall o Hveem. De acuerdo con la bibliografía consultada, aproximadamente el 75% de los departamentos de carreteras en Estados Unidos emplean el método Marshall, mientras que el 25% el método Hveem. Algunos estados de los Estados Unidos usan ambos métodos para materiales similares consiguiendo un mejor entendimiento de las características de mezcla.

En 1995, algunos estados comienzan a usar el método de diseño *Superpave* en un número pequeño de proyectos, se espera que en los próximos años los proyectos de Mezclas Asfálticas en Caliente sean diseñados con este método. Es importante reconocer que los tres métodos de diseño ayudan en la tecnología del asfalto a elegir un apropiado contenido de asfalto.

Las especificaciones para Cemento Asfáltico son aquellas que cumplen con propiedades normadas por la ASTM *Requirements for Penetration Graded Asphalt Cements*.

1.1.2.3.2.Emulsiones Asfálticas

La emulsión asfáltica (también llamada emulsión) es una mezcla de cemento asfáltico, agua y agente emulsificante.

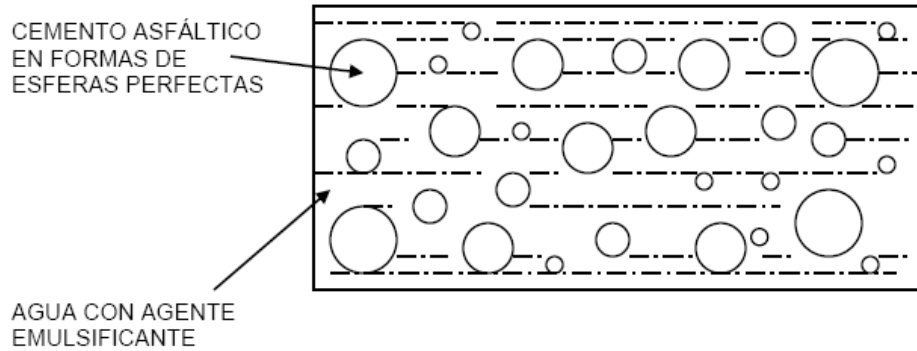


Fig. 1.1 Estructura de emulsión asfáltica

Las emulsiones se preparan para reducir la viscosidad del asfalto pudiendo aplicarse en zonas con bajas temperaturas. Los dos tipos comúnmente usados de emulsiones asfálticas se especifican en ASTM D977 y ASTM D2397:

- Aniónicas
- Catiónicas

Los agregados minerales pueden estar cargados positiva o negativamente en su superficie. Los agregados silicios, como las areniscas, cuarzo y gravas silíceas, están cargadas negativamente siendo generalmente compatibles con las cargas positivas catiónicas de la emulsión asfáltica. Algunos agregados como las calizas tienen en su superficie carga positiva, de esta manera generalmente son compatibles con la carga negativa aniónica de la emulsión asfáltica. Esto sucede porque las cargas opuestas se atraen entre sí.

La emulsión asfáltica aniónica es de Rotura Rápida (*rapid setting*, RS), Rotura Media (*medium setting*, MS), y Rotura Lenta (*slow setting*, SS) como se especifica en ASTM D977 y se muestra. La relación de rotura se controla por el tipo y cantidad del agente emulsificante. Los grados aniónicos son: RS-1, HF RS-2, RS-2, MS-1, HF MS-2, MS-2, MS-2h, SS-1, y SS-1h. La designación “h”, significa la utilización de cemento asfáltico duro usado en la emulsión. El “HF” se refiere a un alto residuo flotante, el cual es indicador del proceso químico del residuo emulsificante.

La emulsión asfáltica catiónica especificada en ASTM D2397, también incluye Rotura Rápida (*rapid setting*, CRS), Rotura Media (*medium setting*, CMS), y Rotura Lenta (*slow setting*, CSS). Los grados catiónico son CRS-1, CRS-2, CMS-2, CMS-2h, CSS-1, y CSS-1h.

La elección y usos de las emulsiones asfálticas se dan en ASTM D3628. Generalmente, se emplean como sigue:

- Emulsión de Rotura Rápida: tratamiento superficial y macadams de penetración.
- Emulsión de Rotura Media: mezcla asfálticas en frío de gradación abierta.
- Emulsión de Rotura Lenta: riego de liga, fog seal, mezclas asfálticas en frío de gradación densa, y slurry seal.

1.1.2.3.3. Asfaltos diluidos o cut back

Los Asfaltos diluidos son producto de la adición de algún destilado del petróleo al cemento asfáltico, resultando menos viscoso y por ello aplicable en zonas de baja temperatura. El solvente se pierde por evaporación quedando el cemento asfáltico sobre la superficie luego de su aplicación. Se dividen en tres tipos:

- **Curado Rápido** (RC) – producto de la adición de un diluyente ligero de alta volatilidad (generalmente gasolina o nafta) en el cemento asfáltico. Se usa principalmente como capa ligante y tratamiento superficial.
- **Curado Medio** (MC) – producto de la adición de un diluyente medio de volatilidad intermedia (generalmente kerosene) al cemento asfáltico.
- **Curado Lento** (SC) – producto de la adición de aceites de baja volatilidad (generalmente diesel u otros gases aceitosos) en el cemento asfáltico.

Las especificaciones para SC, MC y RC, se dan en ASTM D2026, ASTM D2027 y ASTM D2028. ⁶

1.2.Origen de los materiales

1.2.1.Reseña histórica

La provincia de Pichincha es, incuestionablemente, la más volcánica de todo el Ecuador, pues en su territorio aparece el mayor número de cráteres en el menor espacio de tierra. El volcanismo en la era cuaternaria configuró la fisonomía actual de la provincia, particularmente la hoya de Quito. Afortunadamente sólo dos cráteres están apenas activos en estado de solfataras; el Pichincha, que da su nombre a la provincia y el Ninahuilca, volcán cercano al propio Pichincha, adosado al cráter del Atacazo.

Estos volcanes, en sus períodos de actividad, arrojaron grandes cantidades de materiales en forma de lava andesítica, piedra pómez (lava esponjosa), arena y cenizas volcánicas (originadas por la trituración y pulverización de materiales líquidos y sólidos de cráter). Esa realidad geológico-volcánica explica la existencia de cangahuas amarillentas, negros chocolates, cenizas pomáceas granuladas, pedriscos, corridas de piedras andesíticas y más material estrictamente volcánico y fluvio-volcánico, resultado de los depósitos volcánicos o de la acción aluvial. Los mejores ejemplos de relleno volcánico propio de la era cuaternaria en la región interandina septentrional pueden observarse en los grandes cortes de Guayllabamba al lado oriental y norte, entre Tumbaco, al pie de Calderón y especialmente al pie del valle San Antonio, entre la Providencia y Perucho.

Con sólo observar los volcanes se puede, aun a simple vista, descubrir las calderas de sus cráteres, o lo que queda de ellas por haber sufrido los embates de la erosión, los valles en U por donde se desgalaron los glaciares, las canteras de

⁶ Manual de laboratorio Ensayos para pavimentos, Vol. I, Sección Asfaltos, Pág. 62-68

andesitas, las corrientes de lava, los acumulamientos de piedras en las morrenas terminales, los depósitos de cenizas volcánicas y arenas lacustres, los mantos de cangahua y de chocolate.⁷

1.2.2.Canteras

Por sus características geológicas, la zona interandina presenta condiciones óptimas para la localización de yacimientos no metálicos, rocas ornamentales y materiales de construcción. Las rocas que afloran en el Distrito Metropolitano de Quito, son arcillas, arenas, areniscas, gravas conglomeradas, piedra pómez, perlita, andesita, etc. muchas de las cuales se utilizan en la industria de la construcción. La explotación, en la mayoría de las canteras existentes en el territorio, se hace en forma semi-mecanizada y, en menor porcentaje en forma manual predominado el sistema de cielo abierto.

De acuerdo a la ubicación geográfica de las canteras y de los principales consumidores de materia prima a utilizarse en la construcción, se identifican los siguientes sectores:

- Sector Pululahua: se encuentran, exclusivamente, minas de roca volcánica.
- Sector Pomasqui - San Antonio: se encuentran minas de rocas volcánicas y piedra pómez.
- Sector Guayllabamba - San Pedro - Pita: predominan minas de arena y grava.
- Sector Antisana: está localizado hacia la parte oriental y presenta, en su mayoría, minas de roca volcánica, algunas de pómez de caliza.

⁷ Prefectura de la Provincia de Pichincha, www.edufuturo.com, Sección Provincia de Pichincha-Geología

La presencia de estas canteras contribuye a incrementar la contaminación, dada por el proceso de explotación, el incremento de la erosión y, en general, porque afectan la estabilidad de las áreas de explotación.⁸

Para esta investigación se utilizaron los materiales granulares y asfalto de la empresa TEA ubicada en el sector de Guayllabamba Panamericana Norte Km. 32 junto al puente Guayllabamba. Los agregados de esta zona son muy utilizados porque su manto rocoso posee buenas características estructurales y de calidad, ya que estos agregados provienen de la trituración de las rocas. Esta mina es muy usada en obras civiles sean estructurales, viales u otras en Quito y sus alrededores.



Fig. 1.2 Ubicación Campamento TEA

⁸ Dirección Metropolitana de Planificación Territorial, www.quito.gov.ec, Sección Canteras 2003.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo principal de esta investigación es, comparar los módulos de rigidez de especímenes compactados por el método Marshall y por el método Superpave; para esto se realizó el ensayo de Tracción Indirecta, que nos permite obtener los módulos de rigidez para las dos metodologías. Los resultados que se obtuvieron en la investigación, nos indican la capacidad del ensayo de Tracción Indirecta para estudiar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas compactadas por el método Marshall y Superpave; entre estos dos diseños de mezclas, se utilizó como única variable la forma de compactación, la cual es diferente para cada caso; el método Marshall se realiza mediante compactación manual con un martillo de impacto, el cual no representa lo que realmente pasa en el campo, mientras el método de diseño Superpave utiliza por el contrario un compactador giratorio (mecánico) que se acerca más a la realidad.

A continuación se describe la metodología y desarrollo de la experimentación que se utilizó en la caracterización de los materiales, y ensayos mecánicos realizados a las mezclas asfálticas compactadas.

2.1. Selección de los materiales

2.1.1. Agregado mineral

El material pétreo que se utilizó para la elaboración de la mezcla asfáltica proviene de la empresa TEA, ubicada en la cantera de Guayllabamba, y consta básicamente de roca triturada; las pruebas al agregado se realizaron de acuerdo con los requerimientos establecidos por la metodología Marshall y Superpave. A continuación se muestra los ensayos realizados al material pétreo.

- Gravedad específica
- Abrasión
- Equivalente de arena
- Determinación de materiales deletéreos
- Partículas planas y alargadas
- Angularidad del agregado grueso y fino

2.1.1.1. Dosificación de la mezcla de agregados

Se utilizó una mezcla de tres agregados, y se definió la estructura del agregado de diseño, calculando la granulometría de la mezcla por medio de combinaciones matemáticas de las granulometrías individuales de los materiales. Los materiales constitutivos de la mezcla de agregados son:

- Grava (3/4 – 3/8)
- Material para sello (3/8 – 4)
- Arena de trituración (Pasa No. 4)

Para la fabricación de las probetas Superpave (150 mm de diámetro), se emplearon aproximadamente 2250 gr. de material pétreo, lo que resulta en probetas con una altura de 65 ± 3 mm, altura requerida para realizar el ensayo de tracción indirecta por compresión diametral en el equipo de pruebas.

Para la fabricación de las probetas Marshall (100 mm de diámetro), se utilizaron aproximadamente 1100 g de material; la altura de estas probetas también resulta adecuada para el ensayo de tracción indirecta por compresión diametral.

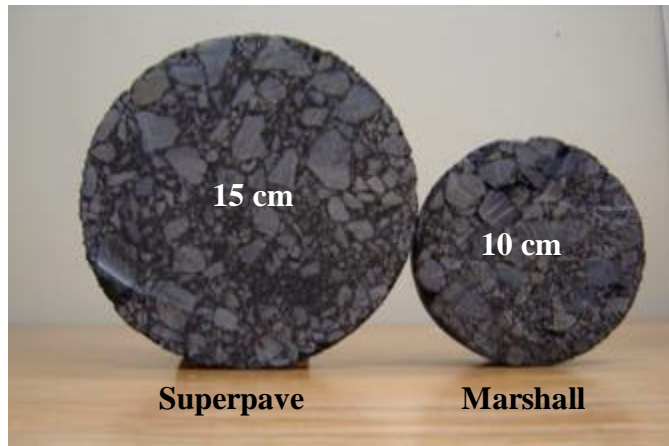


Fig. 2.1 Diámetro de probetas

2.1.1.2. Graduación

Como nuestra única variable es el método de compactación, la granulometría se la hizo como se describe en el método Marshall, esta granulometría sirve para los dos métodos de compactación. Para el método Superpave existe otro criterio para la obtención de la granulometría, estos criterios se encuentran descritos en el capítulo 3.

2.1.2. Ligante asfáltico

El asfalto utilizado en el presente trabajo es del tipo AC-20, proveniente de la empresa TEA ubicada en el sector de Guayllabamba. Se elaboraron las probetas con asfalto AC-20 sin modificar, con el propósito de caracterizar el tipo de ligante utilizado se realizaron los siguientes ensayos:

- Gravedad específica
- Penetración
- Ductilidad
- Punto de Reblandecimiento
- Punto de inflamación y combustión

- Viscosidad (Viscosímetro Rotacional)

2.2.Características y elaboración de las mezclas asfálticas

Ya caracterizados los materiales se procedió a realizar el diseño de la mezcla asfáltica. Como punto de partida se realizó un diseño Marshall, basándonos en los ensayos de estabilidad y flujo. Este procedimiento es el más utilizado en el país, por lo tanto, es en el que más experiencia se tiene. Con este diseño se obtuvo el porcentaje óptimo de asfalto en el Marshall.

2.2.1.Porcentajes de asfalto

Los porcentajes de asfalto que son utilizados en los especímenes, se tomaron partiendo del porcentaje óptimo de asfalto Marshall (%Asf.) de la siguiente manera:

- %Asf – 1
- %Asf – 0.5
- %Asf
- %Asf + 0.5
- %Asf + 1

Estos contenidos de asfalto son utilizados en los dos métodos de compactación con el propósito de obtener curvas de comparación mejor definidas.

2.2.2.Elaboración de las mezclas asfálticas

Una vez que los materiales se acondicionan cercanos a la temperatura de mezclado, se dosifica el asfalto al peso con respecto a la mezcla total. Posteriormente se procede al cubrimiento del agregado pétreo, manteniendo la temperatura de mezclado dentro del rango especificado, hasta que las partículas más gruesas se hayan cubierto totalmente. Las temperaturas de mezclado y

compactación, se las obtiene de la carta de viscosidad, realizando el ensayo con el viscosímetro rotacional, este ensayo esta descrito en el capítulo 3.



Fig. 2.2 Preparación del agregado



Fig. 2.3 Envuelta de la mezcla

Cuando la mezcla haya alcanzado la temperatura de compactación, se coloca dentro de los moldes donde va ser compactada. Los moldes deberán estar calientes, así como los demás accesorios que se utilicen en el vaciado y acomodo de la mezcla, con el fin de evitar una reducción de temperatura de la mezcla asfáltica, previa a su compactación.



Fig. 2.4 Molde Superpave



Fig. 2.5 Molde Marshall

2.2.3. Niveles de compactación

Con el propósito de realizar un análisis comparativo entre las dos metodologías, se tomó como referencia un nivel de tránsito de 10 millones de ejes equivalentes (ESAL's) que corresponde a un tráfico pesado. Los equivalentes ESAL's es el nivel de tráfico esperado para el carril de diseño en un período de 20 años.

La metodología Superpave, en sus inicios tomaba como factores para la selección de la energía de compactación (número de giros), el nivel de tránsito (ESAL's) y la temperatura. Recientes modificaciones al método, establecen que la elección del número de giros de diseño ($N_{diseño}$) a la que se compactará la mezcla, va en función del nivel del tránsito; este mismo criterio lo comparte el método Marshall.

En las tablas 2.1 y 2.2 se indica la energía de compactación en función del nivel de tránsito (ejes equivalentes ESAL's) en las dos metodologías.

Tabla 2.1 Energía de compactación Método Marshall

Método Marshall	Tráfico ligero Carpeta y base ($< 10^4$ ESAL's)		Tráfico medio Carpeta y base ($10^4 - 10^6$ ESAL's)		Tráfico pesado Carpeta y base ($> 10^6$ ESAL's)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	

Tabla 2.2 Energía de compactación Método Superpave

ESAL's de diseño (millones)	Número de Giros		
	Ninicial	$N_{diseño}$	$N_{máximo}$
$< 0,3$	6	50	75
$0,3 - < 3$	7	75	115
$3 - < 30$	8	100	160
> 30	9	125	205

Basándose en el nivel de tránsito, se aplica una energía de compactación similar en las dos metodologías. Como se puede observar en las tablas anteriores, es difícil saber cuántos golpes del martillo de impacto equivalen al número de giros del compactador giratorio, porque los rangos son muy amplios. Es por esto, que en la investigación se ha escogido 3 niveles de compactación en el método Superpave y 1 para el método Marshall, con lo que se cubre estos grandes rangos, y obtener mejores comparaciones.

Para 10 millones de ejes equivalentes (ESAL's) hemos escogido los siguientes niveles de compactación:

Tabla 2.3 Características de las probetas Marshall

Tipo de asfalto	Nivel de compactación (golpes)	Contenido de asfalto (%)
AC-20	75	%Asf - 1 %Asf - 0,5 %Asf %Asf + 0,5 %Asf + 1

- Se realizaron 3 probetas por cada porcentaje de contenido de asfalto, en total 15 probetas.

Tabla 2.4 Características de las probetas Superpave

Tipo de asfalto	Nivel de compactación (giros)	Contenido de asfalto (%)
AC-20	75	%Asf -1 %Asf - 0,5
	100	%Asf %Asf + 0,5
	120	%Asf + 1

- Se realizó 1 probeta por cada porcentaje de contenido de asfalto y por cada número de giros, en total 15 probetas.



Fig. 2.6 Probetas Marshall y Superpave

Tanto los rangos de nivel de compactación, como los contenidos de asfalto elegidos para cada metodología, contemplan valores típicos que se manejan en la práctica, para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente en el laboratorio.

2.3. Pruebas fundamentales a la mezcla asfáltica

Con el objeto de determinar los parámetros volumétricos de las mezclas asfálticas, se realizaron los ensayos correspondientes para determinar la gravedad específica neta (Gmb.) y la gravedad específica teórica máxima (Gmm.).

2.4. Análisis de los parámetros volumétricos de las mezclas asfálticas

Una vez determinados los ensayos de densidad para la mezcla asfáltica suelta (Gmm.) y compactada (Gmb.), en las probetas elaboradas con la metodología Marshall y Superpave, se tiene toda la información necesaria para determinar los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica, y obtener el porcentaje óptimo de asfalto Superpave.

2.5. Selección del contenido óptimo de asfalto

Para el método Marshall, se utilizó el criterio de la Estabilidad y Flujo. Para el método Superpave se recomienda como primer criterio de selección elegir aquel contenido de asfalto correspondiente al 4 % de vacíos de aire (V_a), y verificar después que los parámetros volumétricos restantes se encuentren dentro de los rangos establecidos por el método. Pero para nuestra investigación se cambió el criterio, ya que no se cumple con el 4% de vacíos de aire y se escogió el porcentaje de asfalto correspondiente al porcentaje de vacíos de aire en el método Marshall.

2.6. Ensayo de Tracción Indirecta

Luego de realizados los diseños de mezclas asfálticas y las pruebas a los especímenes, se realizó el ensayo de tracción indirecta. Con este ensayo se pudo obtener los módulos de rigidez de cada espécimen compactado por ambas metodologías.

2.7. Tablas comparativas y resultados

Con los resultados obtenidos, se realizó comparaciones volumétricas y de los módulos de rigidez entre los dos métodos, además se hizo el cálculo de un factor de corrección.

Finalmente después de analizados los resultados, se sacaron conclusiones con sus debidas recomendaciones.

CAPITULO III

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

El agregado granular utilizado en la investigación proviene de la empresa TEA, ubicada en el sector de Guayllabamba Panamericana Norte Km. 32, junto al puente Guayllabamba. Por medio de la trituración de rocas, los agregados deben tener características específicas en tamaño, dureza y resistencia; también deben cumplir con ensayos normalizados que se realizan en el laboratorio, como la granulometría, ya que existen especificaciones máximas y mínimas para una mezcla óptima del pavimento. El material debe estar libre de impurezas y su forma irregular, para brindar mayor adherencia a la mezcla. Existen dos grupos de agregados: el agregado grueso es aquel en el cual sus partículas son mayores al tamiz #4, y el agregado fino es aquel que sus partículas son menores al tamiz #4, a su vez estos grupos se subdividen en diferentes tamaños por medio de tamices.

3.1. Ensayos a los materiales granulares

Los agregados empleados en la construcción de carreteras, deben cumplir con requisitos de granulometría y especificaciones técnicas, que garanticen un buen comportamiento durante su periodo de vida. A su llegada al laboratorio, las muestras deben ser preparadas para someterlas a diferentes ensayos de calidad de agregados.

3.1.1. Granulometría (ASTM C136)

La granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado, y se la determina haciendo pasar y separando una muestra representativa del material por medio de tamices ordenados de mayor a menor,

con aberturas cuadradas de dimensiones establecidas y determinando el porcentaje retenido en cada malla. La serie de tamices utilizados para un agregado grueso son: 3", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8" y No. 4, y para agregados finos: No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100 y No. 200.

La granulometría de un agregado, ya sea grueso o fino, es importante, ya que estos constituyen el 75% en volumen de una mezcla típica de hormigón. El análisis granulométrico determina con gran exactitud la capacidad de compactación del concreto, y permite determinar si un agregado es económico; un agregado con buena distribución de tamaños de partículas requiere de menos pasta de cemento para ser cubierto.⁹



Fig. 3.1 Tamizador



Fig. 3.2 Tamices

3.1.2. Gravedad Específica (ASTM C127, C128)

Este ensayo se usa para determinar la gravedad específica Bulk, la gravedad específica saturada con superficie seca, la gravedad específica aparente y la absorción del agregado grueso. La gravedad específica Bulk es el valor que generalmente se requiere para cálculos relacionados con el hormigón de cemento Pórtland.

Este método de ensayo, es usado principalmente para determinar la gradación de los materiales propuestos para ser usados como agregado. Los resultados son utilizados para determinar la conformación de la distribución del tamaño de las

⁹ Manual Visualizado de Laboratorio de Pavimentos, Capítulo 1 Materiales Naturales, Sección 1.4

partículas con la aplicación de requisitos especificados. La información puede ser útil en el desarrollo de relaciones de porosidad y compactación.¹⁰



Fig. 3.3 Material de ensayo

3.1.3. Abrasión (Resistencia a degradación del agregado grueso – Máquina de los Ángeles) (ASTM C 131)

Este método sirve para determinar la resistencia al desgaste de piedras machacadas, escorias machacadas, gravas sin machacar y gravas machacadas. Las Normas ASTM especifican que el agregado grueso deberá tener un desgaste menor al 40% para que sea un material adecuado para las mezclas asfálticas.¹¹



Fig. 3.4 Máquina de los ángeles

¹⁰ Manual Visualizado de Laboratorio de Pavimentos, Capítulo 1 Materiales Naturales, Sección 1.8

¹¹ Manual Visualizado de Laboratorio de Pavimentos, Capítulo 1 Materiales Naturales, Sección 1.13

3.1.4. Equivalente de Arena (ASTM D2419)

Este ensayo tiene por objeto determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino o material arcilloso perjudicial que contienen los suelos o agregados. Es un procedimiento que se utiliza en el campo para una rápida determinación de esta proporcionalidad. (MOP E108).

Un pavimento necesita la menor cantidad de finos posible, sobre todo de arcillas, que son los materiales que en contacto con el agua causan un gran daño al pavimento, pues es necesario saber si la cantidad de finos que contienen los materiales que serán utilizados en la estructura del pavimento es la adecuada.¹²



Fig. 3.5 Material de ensayo

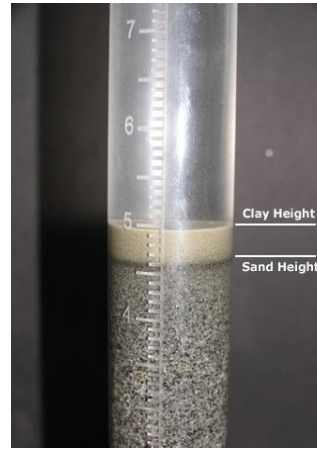


Fig. 3.6 Señales en probeta

3.1.5. Determinación de Materiales Deletéreos (ASTM C142)

Este método se refiere a la determinación aproximada de los terrones de arcilla y de las partículas deleznableles (friables) en los agregados. Los materiales deletéreos son definidos como el porcentaje en peso de contaminantes como esquistos, madera, mica y carbón mezclados con los agregados. La norma es la ASTM C142, "Clays lumps and friable particles in aggregates". Puede aplicarse tanto a agregados finos como a gruesos. El ensayo se realiza tamizando el agregado, por vía húmeda, sobre tamices prescritos. El porcentaje en peso del

¹² Manual Visualizado de Laboratorio de Pavimentos, Capítulo 1 Materiales Naturales, Sección 1.16

material perdido como resultado del tamizado húmedo se informa como el porcentaje de la masa de arcilla y partículas friables. Hay, evidentemente, un amplio rango de máximos porcentajes permisibles de arcilla y partículas friables.¹³



Fig. 3.7 Material en agua destilada



Fig. 3.8 Disgregación de terrones

3.1.6. Partículas Alargadas y Aplanadas (ASTM D 4791)

El concepto es el porcentaje en peso del agregado grueso cuya relación entre las dimensiones máximas y mínimas es mayor a 5. Las partículas alargadas son indeseables porque tienen a quebrarse durante la construcción y bajo tránsito. El procedimiento es la Norma ASTM D 4791, “Partículas alargadas y planas en el agregado grueso” y se aplica a agregados mayores de 4.75 mm. Para medir la relación de dimensiones de una muestra representativa de las partículas del agregado se emplea un calibrador. Se miden dos valores: porcentaje de partículas planas y porcentaje de partículas alargadas.¹⁴



Fig. 3.9 Partículas



Fig. 3.10 Partículas Planas y alargadas

¹³ Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas Superpave, Sección III Materiales, Pág. 46

¹⁴ Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas Superpave, Sección III Materiales, Pág. 42

3.1.7. Angularidad del agregado (ASTM D5821-D1252)

La forma de la partícula de los agregados puede afectar la trabajabilidad durante su colocación; así como la cantidad de fuerza necesaria para compactarla a la densidad requerida y la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida de servicio.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que se entrelazan al ser compactadas. El mejor entrelazamiento se da, generalmente, con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre por trituración. Este método describe la determinación del porcentaje, en peso, de una muestra de agregado grueso que presenta una, dos o más caras fracturadas.

Cara Fracturada: una cara angular, lisa o superficie fracturada de una partícula de agregado formada por trituración, otros medios artificiales o por la naturaleza.

Partícula fracturada: una partícula de agregado es fracturada si tiene el número mínimo de caras fracturadas especificadas (usualmente uno o dos).¹⁵



Fig.3.11 Partículas con caras fracturadas

3.2. Ensayos a los materiales bituminosos

Se utilizó el cemento asfáltico AC-20 ya que es para mezclas en caliente.

¹⁵ Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas Superpave, Sección III Materiales, Pág. 40

3.2.1. Gravedad específica (ASTM D70)

Se entiende como gravedad específica de un material, a la relación de su peso en aire a una temperatura determinada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, generalmente a los 25 °C y se expresa como Gravedad Específica a 25 °C.¹⁶



Fig. 3.12 Probetas para el ensayo

3.2.2. Viscosidad Rotacional (ASTM D 4402)

La viscosidad rotacional se utiliza para evaluar la manejabilidad del asfalto a altas temperaturas. Se usa un viscosímetro cilíndrico coaxial rotacional, como el aparato Brookfield, antes que un viscosímetro capilar. Se mide la viscosidad del ligante asfáltico a alta temperatura con el objetivo de asegurar que el asfalto es suficientemente fluido para las operaciones de bombeo y mezcla. La viscosidad rotacional se determina midiendo el torque necesario para mantener constante la velocidad rotacional de un vástago cilíndrico sumergido en la muestra en una temperatura constante.

La prueba del viscosímetro rotacional se utiliza para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en el laboratorio. Se determinan las viscosidades a distintas temperaturas, y se construye una carta de viscosidad en donde se seleccionan las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a los rangos de viscosidades de 0.17 ± 0.02 y 0.28 ± 0.03 Pa.s respectivamente.¹⁷

¹⁶ Manual Visualizado de Laboratorio de Pavimentos, Capítulo Asfaltos, Sección 9

¹⁷ Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave, Sección V, Pág. 45



Fig.3.13 Viscosímetro Rotacional

3.2.3.Ductilidad (ASTM D113)

El ensayo de ductilidad, da la distancia en centímetros que una muestra normalizada de un producto asfáltico puede alargarse antes de romperse. Este ensayo se realiza con cementos asfálticos y con los residuos de destilación de los asfaltos líquidos y emulsionantes. El ensayo se hace con una briqueta moldeada del material que se va a probar, traccionando las dos extremidades de la briqueta a una velocidad de 5 ± 0.25 cm. por minuto y a una temperatura de 25 ± 0.5 °C.¹⁸



Fig.3.14 Ensayo ductilidad



Fig.3.15 Probetas

3.2.4.Penetración (ASTM D5)

La penetración, está definida como la consistencia de un material bituminoso y es expresada por la distancia que una aguja standard penetra verticalmente en una muestra de material en condiciones de peso, tiempo y temperatura conocidas. Si las condiciones del ensayo no son especificadas se entiende que el peso total de

¹⁸ Manual Visualizado de Laboratorio de Pavimentos, Capítulo Asfaltos, Sección 13

la aguja y accesorios, el tiempo y la temperatura son respectivamente 100 gr., 5 seg. y 25°C.¹⁹ La penetración se indica en centésimos de centímetro.



Fig. 3.16 Equipo de penetración

3.2.5. Punto de Inflamación y combustión (ASTM D92)

Se define el punto de Inflamación (o de llama) como la temperatura a la que se producen destellos por inflamación de los vapores desprendidos por el material bituminoso al ser éste tratado en las condiciones que se especifican en el ensayo. El punto de inflamación indica la temperatura crítica por encima de la cual habrán de tomarse las precauciones adecuadas durante la manipulación y puesta en obra del producto bituminoso de manera de evitar el peligro de incendio, así como para determinar la calidad del solvente y del asfalto.

El punto de combustión (o de fuego) es la temperatura a la que se produce la combustión de estos vapores, por lo menos durante cinco segundos, en condiciones de ensayo.²⁰



Fig. 3.17 Equipo de ensayo

¹⁹ Manual Visualizado de Laboratorio de Pavimentos, Capítulo Asfaltos, Sección 10

²⁰ Manual Visualizado de Laboratorio de Pavimentos, Capítulo Asfaltos, Sección 12

3.2.6. Punto de Reblandecimiento (ASTM D36)

Se define el punto de reblandecimiento de un material bituminoso, como la temperatura a la cual una probeta (pastilla) del material en forma de disco, mantenida horizontalmente dentro de un anillo, es obligada a deformarse por el peso de una bola de acero y toca una superficie de un baño (matraz de vidrio) situada a una pulgada (2,54 cm) cuando se calienta a una velocidad determinada dentro del baño con agua destilada y glicerina.

Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas distintas. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los asfaltos de pavimentación, se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura en la cual los asfaltos se hacen fluidos.²¹



Fig. 3.18 Equipo de ensayo

3.3. Ensayos a las mezclas asfálticas

3.3.1. Método de Bruce Marshall (ASTM D 1559)

Los conceptos del método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas, fueron formulados inicialmente por Bruce Marshall, Ingeniero de mezclas asfálticas en el

²¹ Manual Visualizado de Laboratorio de Pavimentos, Capítulo Asfaltos, Sección 11

Mississippi State Highway Department. El Army Corps of Engineers de los Estados Unidos mejoró y añadió ciertas características al procedimiento de ensayo Marshall, mediante estudios de correlación completos y desarrolló los criterios para el diseño de mezclas. El Método Marshall tal como se usó y desarrolló por el U.S. Army Corps of Engineers, sólo es aplicable a las mezclas asfálticas en caliente para pavimentos obtenidos empleando cemento asfáltico y agregado cuyo tamaño máximo es de una pulgada o menor. El método puede emplearse tanto para proyectos en el Laboratorio como para control en la obra de las mezclas asfálticas en caliente para pavimentación. El ensayo sólo puede aplicarse a mezclas asfálticas en caliente en las que el aglomerante, debe ser cemento asfáltico mezclado con áridos cuyo tamaño máximo sea de 25.4 mm (1") o menor. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 6.35 cm. De alto y 10 cm. De diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar mezclas de asfalto-agregado (ASTM D1559).

Una de las virtudes del Método Marshall, es la importancia que asigna a las propiedades densidad/vacios del material asfáltico. Este análisis garantiza que las importantes proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla están dentro de rangos adecuados para asegurar una HMA durable. Otra ventaja del método es que el equipamiento requerido no es caro y es muy portable, y, así, se presta a operaciones de control de calidad a distancia. Desafortunadamente, muchos ingenieros creen que el método de compactación de laboratorio por impacto usado en el método Marshall no simula la densificación de la mezcla que ocurre bajo tránsito en un pavimento real. Más aún, el parámetro de resistencia usado en este enfoque, estabilidad Marshall, no estima en forma adecuada la resistencia al corte de la HMA. Estas dos situaciones pueden resultar en mezclas asfálticas propensas al ahuellamiento. En consecuencia, ha habido un sentimiento creciente entre los tecnólogos del asfalto de que el método Marshall ha sobrevivido más allá de su utilidad como moderno método de diseño de mezclas asfálticas.²²

22 Manual Visualizado de Laboratorio de Pavimentos, Sección Método Marshall para mezclas en caliente

3.3.1.1. Granulometría

La metodología Marshall, utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica. La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior).

3.3.1.2. Procedimiento

Se realiza la mezcla de los agregados pétreos con el asfalto, hasta que se obtenga la temperatura necesaria de compactación.



Fig. 3.19 Envuelta de la mezcla

Una vez realizada la mezcla en caliente, se introduce todo este material en un molde en el cual se debe compactar al material con una masa de 4.536 Kg. Cayendo desde una altura fija de 0.457 m. realizando repeticiones de golpes en 25, 50 o 75 golpes dependiendo del tráfico.



Fig.3.20 Compactador



Fig. 3.21 Probetas Marshall

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se hace de acuerdo a la norma ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas mediante superficies saturadas de especímenes secos, tomando muy en cuenta los pesos secos, los pesos sumergidos y los saturados con superficie seca.



Fig. 3.22 Probeta Sumergida



**Fig. 3.23 Probeta Saturada
con Superficie seca**

Después de que la gravedad específica sea determinada, se procede a la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en baño maría a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

Con el equipo de prueba listo se remueve el espécimen colocado en baño maría y cuidadosamente se seca la superficie, ubicando y centrando el espécimen en la

mordaza inferior, se coloca la mordaza superior y se centra completamente en el aparato de carga.



Fig. 3.23 Equipo Marshall

Posteriormente, se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51mm. (5´´) por minuto hasta la falla. El punto de falla se define por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb.) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall. Mientras la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático, se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir se deberá tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresada en unidades de 0.25 mm. (1/100´´), será el valor de flujo Marshall. En nuestro país, este ensayo para mezclas asfálticas está normado por el MOP, en donde se muestra que el registro mínimo en Marshall debe ser:

Tabla 3.1 Tabla de estabilidad Marshall especificada por MOP²³:

Tabla 405.5.4								
Tipo de Tráfico	Muy pesado		Pesado		Medio		Liviano	
Criterios Marshall	Min	Máx.	Min	Máx.	Min	Máx.	Min	Máx.
N° de golpes/cara	75		75		50		50	
Estabilidad (lbs)	2200	----	1800	----	1200	-----	1000	----
Flujo (pulg/100)	8	14	8	14	8	16	8	16

²³ Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, MOP-001-F-2002 TOMOII, Sección 800, Pág. 379

Una vez leídos los valores marcados en la pantalla se procede a corregir la estabilidad multiplicando por un factor de corrección determinado por el volumen de la briqueta indicado en la siguiente tabla.

Tabla 3.24 CORRECCION DE LOS VALORES DE ESTABILIDAD ²⁴

VOLUMEN DE LA BRIQUETA EN CM3	ESPEJOR APROXIAMDO DE LA BRIQUETA EN CM	FACTOR DE CORRECCION
200-213	2,54	5,56
214-225	2,70	5,00
226-237	2,86	4,55
238-250	3,02	4,17
251-264	3,17	3,85
265-276	3,33	3,57
277-289	3,49	3,33
290-301	3,65	3,03
302-316	3,81	2,78
317-328	3,97	2,50
329-340	4,13	2,27
341-353	4,29	2,08
354-367	4,44	1,92
368-379	4,60	1,79
380-392	4,76	1,67
393-405	4,92	1,56
406-420	5,08	1,47
421-431	5,24	1,39
432-443	5,4	1,32
444-456	5,56	1,25
457-470	5,71	1,19
471-482	5,87	1,14
483-495	6,03	1,09
496-508	6,19	1,04
509-522	6,35	1,00
523-535	6,51	0,96
536-546	6,67	0,93
547-559	6,82	0,89
560-573	6,96	0,86
574-585	7,14	0,83
586-598	7,30	0,81
599-610	7,46	0,78
611-625	7,62	0,76

²⁴ Manual Visualizado de Laboratorio de Pavimentos, Sección Método Marshall para mezclas en caliente

3.3.2.Método Superpave

En 1987, el Strategic Highway Research Program (SHRP) fue establecido por el Congreso de los Estados Unidos con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación, a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas. Un tercio de este presupuesto se empleó en el desarrollo de especificaciones de desempeños basados en asfalto, directamente relacionados con análisis de laboratorio y con aplicaciones en campo. Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (Superior Performing Asphalt Pavement). Representa una tecnología provista de tal manera que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral; desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento. Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfalto), y su interacción cuando están mezclados. ²⁵

El método Superpave está compuesto por tres niveles. Debido a que el análisis y el diseño de una mezcla en el sistema Superpave son complejos, la extensión del uso de esta metodología (según los investigadores del SHRP) depende del nivel de tránsito y de la función de la mezcla en el pavimento.

Para alcanzar nuestros objetivos la presente investigación se realizara para un diseño Superpave de nivel 1. El requerimiento de nivel 1 es solamente un diseño volumétrico.

3.3.2.1.Pruebas a los materiales

- **Pruebas al agregado mineral**

²⁵ Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas Superpave, Prólogo, Pág. i

Las pruebas a los agregados están clasificadas en dos grupos: de consenso y de origen.

De consenso

- Angularidad del agregado grueso y fino
- Partículas alargadas y aplanadas
- Equivalente de arena

De origen

- La prueba de desgaste de Los Ángeles
- Intemperismo acelerado
- Materiales deletéreos

- **Pruebas al ligante asfáltico**

Existe una amplia gama de equipo y pruebas para evaluar a los ligantes asfálticos, para el caso del diseño volumétrico en laboratorio (Nivel 1), solamente se necesitará realizar pruebas en el viscosímetro rotacional para determinar las temperaturas de mezclado y compactación, por medio de la elaboración de la carta de viscosidad.

3.3.2.2. Parámetros Volumétricos

Las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica compactada forman parte fundamental en la selección del contenido óptimo de asfalto. Los parámetros más importantes son; los vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VMA),

vacíos llenados con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo (P_{be}), estos proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica. ²⁶

En la figura 3.24 se presenta un diagrama de componentes de una mezcla asfáltica compactada.

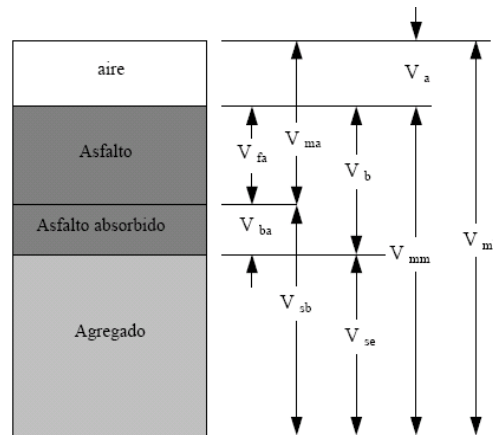


Fig. 3.24 Mezcla Asfáltica compactada

- V_{ma} = Volumen de vacíos en agregado mineral
- V_{mb} = Volumen total de la mezcla asfáltica.
- V_{mm} = Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos
- V_{fa} = Volumen de vacíos llenados con asfalto
- V_a = Volumen de vacíos de aire
- V_b = Volumen de asfalto
- V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido
- V_{sb} = Volumen de agregado mineral
(Gravedad específica de la masa)
- V_{se} = Volumen de agregado mineral
(Gravedad específica efectiva)

²⁶ Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas Superpave, Sección IV Parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica, Pág. 53

3.3.2.3. Selección de la granulometría

Para especificar la granulometría, Superpave ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall. Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría (gráfica de Fuller). Esta carta usa una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados. Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan; las abscisas, en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45. Un rango importante de esta carta es la línea de máxima densidad; corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100% hasta el origen (0 %, 0 mm). La granulometría de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre sí, conformando el arreglo volumétrico más compacto posible. Para especificar la granulometría del agregado, se emplean dos conceptos adicionales: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y dependen del tamaño máximo nominal del agregado, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm). Por su parte, la zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 ó 2.36 mm) y 0.3 mm. Forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una buena con resistencia al corte en la mezcla asfáltica. La figura 3.25 muestra un esquema para un tamaño máximo de agregado de 19 mm.²⁷

²⁷ Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas Superpave, Sección III Materiales, Pág. 46

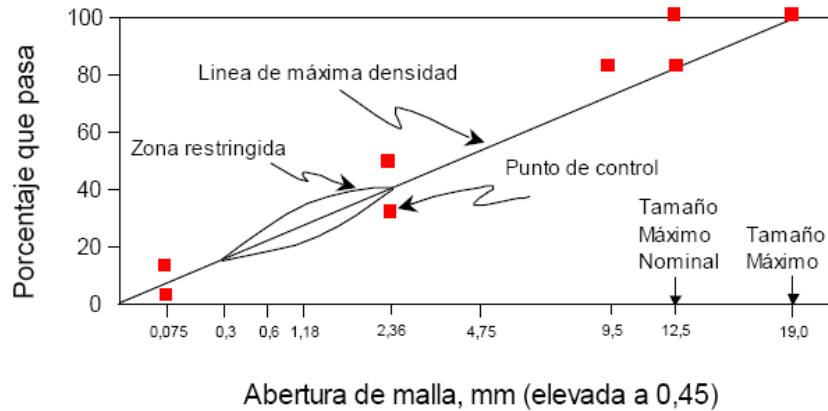


Fig. 3.25 Grafica de granulometría

3.3.2.4. Determinación del porcentaje inicial de asfalto

Después de haber determinado las propiedades del agregado y la granulometría de diseño, se calcula el porcentaje de asfalto inicial mediante las fórmulas siguientes.

$$G_{se} = G_{sb} + 0,8(G_{sa} - G_{sb}) \quad (1)$$

G_{se} = Gravedad específica efectiva del agregado

G_{sa} = Gravedad específica aparente del agregado

G_{sb} = Gravedad específica neta del agregado

$$V_{ba} = \frac{P_s - (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}\right)} \times \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}}\right) \quad (2)$$

V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido, cm^3/cm^3 de mezcla

P_s = Porcentaje de agregado con respecto a la mezcla total

P_b = Porcentaje de asfalto con respecto a la mezcla total

G_b = Gravedad específica del asfalto

V_a = volumen de vacíos de aire

$$V_{be} = 0,176 - 0,0675 \log(S_n) \quad (3)$$

V_{be} = Volumen de asfalto efectivo

S_n = tamaño máximo nominal de la mezcla de agregados (mm)

$$P_{bi} = \frac{G_b \times (V_{be} + V_{ba})}{(G_b \times (V_{be} + V_{ba}) + W_s)} \times 100 \quad (4)$$

P_{bi} = Porcentaje de asfalto inicial, con respecto a la mezcla total.

W_s = Masa del agregado, gramos

$$W_s = \frac{P_s \times (1 - V_a)}{\left(\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}} \right)} \quad (5)$$

Como se pudo observar en las fórmulas anteriores, los parámetros de mayor influencia en la selección del contenido inicial de asfalto, son las densidades del agregado (G_{sb} , G_{sa} y G_{se}) y los porcentaje de asfalto y de agregado mineral utilizados. ²⁸

En la figura 3.26 se exhibe una representación de estos valores en la mezcla asfáltica compactada.

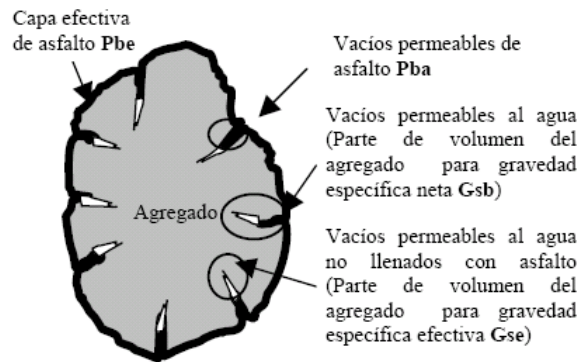


Fig. 3.26 Mezcla Asfáltica compactada

3.3.2.5. Definir el esfuerzo de compactación

En la selección de un método de compactación de laboratorio, los investigadores de SHRP se plantearon varias metas. La más importante fue diseñar un equipo que pudiera compactar en forma realista los especímenes de mezcla a la densidad

²⁸ Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas Superpave, Sección VI Diseño volumétrico de la mezcla, Pág. 75

alcanzada bajo las condiciones de clima y carga del pavimento. Se necesitaba un dispositivo capaz de compactar mezclas con grandes agregados. Además se deseaba que brindara una medida de la compactabilidad de modo de poder identificar el comportamiento de una potencial mezcla blanda (tender mixture) y otros similares problemas de compactación. Una prioridad esencial de los investigadores era lograr un dispositivo apropiado para el control y la verificación de la calidad. Ningún compactador en uso corriente satisfacía todos estos objetivos.

Consecuentemente, un nuevo compactador fue desarrollado, el Compactador Giratorio Superpave (SGC = Superpave Gyratory Compactor).

La base para el SGC fue el compactador giratorio de Texas modificado para aplicar los principios de compactación del compactador giratorio francés. El dispositivo de Texas cumplió los objetivos de densificación realista de los especímenes y era razonablemente portable. Los moldes de 6 pulgadas de diámetro (finalmente de 150mm en el SGC) pudieron acomodar mezclas con agregados de un tamaño máximo de hasta 50 mm (37,5 nominal). Los investigadores de SHRP modificaron el dispositivo de Texas reduciendo el ángulo y la velocidad de giro y adicionando un registro en tiempo real de la altura.

El esfuerzo de compactación está en función de los ejes equivalentes (ESAL's). Los ESAL's de diseño es el nivel de tránsito esperado para el carril de diseño en un periodo de 20 años. Se debe determinar los ESAL's de diseño a los 20 años para seleccionar un valor correcto de $N_{\text{diseño}}$. En la tabla 3.3 se presentan los diferentes rangos de esfuerzos de compactación.

Tabla 3.3 Esfuerzos de compactación

ESALs de diseño (millones)	Parámetros de compactación		
	N_{inicial}	$N_{\text{diseño}}$	$N_{\text{máximo}}$
< 0,3	6	50	75
0,3 a 3	7	75	115
3 a 30	8	100	160
> 30	9	125	205

Se puede observar que para un ESAL's de diseño existen tres valores de compactación.

- N_{inicial} = es el número de giros que produce la mínima compactación que se debe presentar en el campo
- $N_{\text{diseño}}$ = es el número de giros que se necesitan para producir la compactación de diseño en campo
- $N_{\text{máximo}}$ = es el número de giros que produce la máxima compactación que se debe presentar en el campo.²⁹

3.3.2.6. Compactador Giratorio TROXLER

Para la investigación se utilizó el compactador giratorio Superpave™ de TROXLER que está construido de conformidad con las especificaciones del programa SHRP y de la Administración Federal de Carreteras (FHWA). Permite compactar, por el método giratorio, los especímenes necesarios para una adecuada evaluación del desempeño de la mezcla asfáltica a largo plazo. El sistema Superpave del programa SHRP requiere la medición de la altura del espécimen para cada giro, durante el ciclo de densificación, como información básica para el diseño de mezcla asfáltica. Esta información no es generada por los sistemas de compactación Marshall ni por otros tipos de equipos para la compactación en el laboratorio. La medición de la altura de espécimen es realizada automáticamente durante el proceso de densificación con el compactador giratorio Superpave.

El compactador giratorio Superpave de TROXLER también suministra un perfil de densificación, utilizado para seleccionar un contenido óptimo de asfalto en el diseño de mezcla.

²⁹ Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas Superpave, Sección V Compactación Giratoria Superpave, Pág. 65-68

Troxler utiliza un método patentado, nuevo, para la inducción del ángulo de giro. La parte superior del molde es sujeta en una posición fija, mientras el ángulo es inducido en la base del molde. Rotando la base suspendida se obtiene un modo de giro con un excelente control de la inclinación y con eficiencia en el consumo de corriente eléctrica.



Fig. 3.27 Compactador Giratorio

3.3.2.7. Pruebas para las mezclas asfálticas

Se deberán realizar dos pruebas a la mezcla asfáltica con el fin de conocer sus propiedades volumétricas.

- **Gravedad específica teórica máxima:** esta prueba se realiza en la mezcla asfáltica en forma suelta.

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} \quad (6)$$

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

A = masa de la muestra seca, g

B = masa del picnómetro con agua a 25 °C, g

C = masa del picnómetro con agua y muestra a 25 °C, g

- **Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada:** esta prueba se realiza en la mezcla asfáltica compactada.

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w} \quad (7)$$

G_{mb} = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

W_a = masa de la probeta en el aire

W_w = masa de la probeta en el agua

W_{ss} = masa de la probeta saturada y superficialmente seca



Fig. 3.28 Peso de Briqueta



Fig. 3.29 Briqueta S.S.S.

Se deberá calcular los parámetros volumétricos; vacíos en el agregado mineral (VAM), vacíos llenos de asfalto (VFA) y vacíos de aire (V_a), a continuación se presentan las fórmulas de cada parámetro volumétrico.

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (8)$$

Para este parámetro la especificación establece un rango de 3 a 5 % de vacíos de aire.

V_a = porcentaje de vacíos de aire (%)

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

G_{mb} = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad (9)$$

VMA = Vacíos en el agregado mineral (%)

Los valores mínimos de VMA, se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Valores Mínimos VMA

Tamaño máximo nominal del agregado	Mínimo % de VMA
9.5 mm	15.0
1.25 mm	14.0
19 mm	13.0
25 mm	12.0
37.5 mm	11.0

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - V_a}{VMA} \quad (10)$$

VFA = Vacíos llenos de asfalto

Los rangos de valores en que se debe encontrar el VFA se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores VFA

ESALs de diseño (millones)	Vacío llenos de asfalto, VFA (Porcentaje mínimo)
< 0,3	70 - 80
0,3 a 3	65 - 75
3 a 30	
> 30	

3.3.3. Ensayo de tracción indirecta (NORMA BS EN12697-26:2004)

3.3.3.1. Introducción

El ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romperse.

Hasta 1965, sólo se utilizaba para determinar la resistencia a tracción indirecta, pero desde entonces se ha ido profundizando en su estudio llegando a ser un ensayo con grandes perspectivas de futuro. Estados Unidos destaca como pionero

en el avance de su estudio en la década de los 90, donde se realizan un gran número de investigaciones, muchas de ellas quedan recogidas en el Internacional Symposium de la RILEM.

Actualmente es un ensayo ampliamente utilizado para medir la resistencia a tracción de las mezclas bituminosas, además es un procedimiento muy simple y está especificado en la norma NLT-346/90 “Resistencia a compresión diametral de mezclas bituminosas”.

Este ensayo, consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura. Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral.

En los últimos años, este ensayo se lo ha realizado tal como indica la norma ASTM D 1559 “Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas”, pero nuevas investigaciones determinaron que existía el problema de tener una gran dispersión resultados. Para solucionar esta falta de consistencia en los resultados, se diseñó un nuevo instrumento adaptable al ensayo de tracción indirecta, con las siguientes características:

- La deformación de la probeta ensayada se puede medir en 3 direcciones, utilizando uno o dos sensores en cada dirección.
- El aparato de medida se puede utilizar con diferentes sistemas de carga: hidráulico o triaxial, con un sistema de guía para evitar posibles rotaciones y oscilaciones.

- Facilita la alineación en cualquier tipo de prensa y la utilización de sensores LVTD (Linear Variable Differential Transducer).³⁰



Fig. 3.30 Equipo de ensayo

A partir de los resultados de los ensayos y los análisis analíticos y estadísticos, se extrajeron las siguientes conclusiones:

- Con el nuevo aparato de tracción indirecta, los resultados son constantes, razonables y se pueden reproducir exactamente para cualquier combinación de variables.
- La dispersión de resultados entre las probetas ensayadas con la misma dosificación y condiciones de ensayo da valores inferiores al 7%.
- La temperatura de ensayo y el porcentaje de vacíos en la mezcla, son las variables que tienen más influencia en las características resilientes de la mezcla.

El ensayo de tracción indirecta por compresión diametral con dichas modificaciones, se detalla en la normativa británica **BS EN12697-26:2004**

³⁰ Procedimiento de ensayo para evaluar la tenacidad de las mezclas bituminosas, Capítulo 3 Ensayo de Tracción indirecta, Pág. 16

(BRITISH STANDARD-Bituminous mixtures- Test methods for hot mix asphalt- Part 26- Anexo C). Esta norma es la que se utilizó en la presente investigación, y a continuación se describe el procedimiento de este ensayo.

3.3.3.2. Equipo

- Termómetro y / o sensores de resistencia de platino, de rango adecuado, que deberá ser capaz de medir a $\pm 0,1$ ° C para la determinación de la temperatura de la muestra.
- Regla de acero.
- Pinzas exteriores, capaz de medir a $\pm 0,1$ mm.
- Vidrio o placa de acero, para que la condición de la superficie superior de la placa no sea. Un tamaño adecuado es de aproximadamente 250 mm. x 250 mm.
- Sierra, capaz de cortar y recortar las muestras a las dimensiones requeridas. Se recomienda que la hoja de la sierra sea con punta de diamante.

3.3.3.2.1. Equipo de pruebas

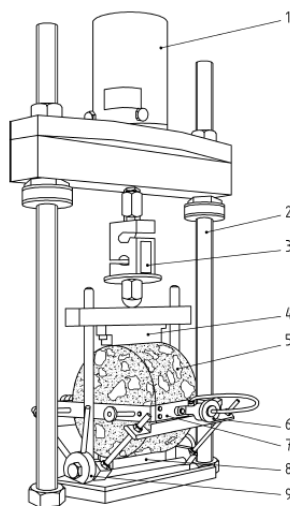


Fig. 3.31 Equipo de pruebas

- 1.- Neumático de carga de acero
- 2.- Marco de carga de acero
- 3.- Celda de carga
- 4.- Carga superior de la platina
- 5.- Muestra de ensayo
- 6.- Ajustador de LVDT (Linear Variable Differential Transducer).
- 7.- LVDT marco de montaje
- 8.- Platina
- 9.- Alineación LVDT

Tabla 3.6 Tabla de dimensiones

CUADRO DE DIMENSIONES		
Diámetro del modelo nominal mm.	Ancho de la franja de carga mm.	Profundidad nominal del segmento cóncavo mm.
80	10 ± 1	$0,3 \pm 0,05$
100	12 ± 1	$0,4 \pm 0,05$
120	15 ± 1	$0,5 \pm 0,05$
150	19 ± 1	$0,6 \pm 0,05$
200	25 ± 1	$0,8 \pm 0,05$

3.3.3.2. Equipo para medir deformaciones

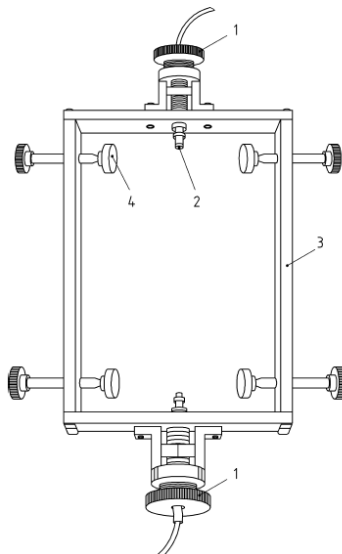


Fig. 3.32 Equipo para deformaciones

- 1.- Ajustador de LVDT
2. - LVDT (Linear Variable Differential Transducer).
3. - Marco de montaje
- 4.- Sujetadores

Este equipo es capaz de controlar la deformación diametral y horizontal de la muestra, durante la aplicación de un pulso de carga, y la precisión de la medición es de 1 micra en el rango de ± 50 micras. El máximo registro en deformación horizontal, será la amplitud del cambio de diámetro horizontal de la muestra. (FIG. 3.32).

3.3.3.2.3. Equipo de alineación

Existen dos equipos LVDT que están montados uno frente al otro en un marco rígido. Durante la prueba, el marco solo se sostendrá con las pinzas y no podrán estar en contacto con cualquier otra parte del equipo. (FIG.3.33)

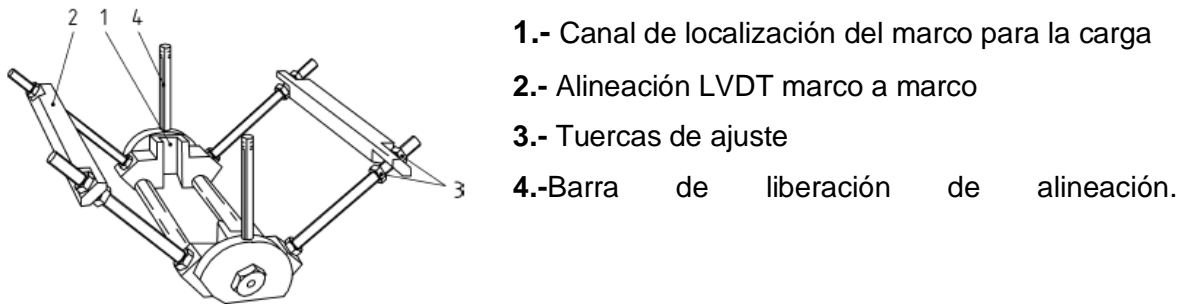


Fig. 3.33 Equipo de alineación

3.3.3.3. Preparación de la muestra

Los especímenes cilíndricos tendrán un espesor entre 30 mm y 75 mm, y un diámetro nominal de 80 mm, 100 mm, 120 mm, 150 mm o 200 mm. Ambas dimensiones serán elegidas en relación con el tamaño máximo total de la mezcla, el espesor de cada muestra se determinará conforme con la norma EN 12627-29.

3.3.3.4. Condiciones de almacenamiento

Si el período de almacenamiento es inferior a 4 días, la temperatura de almacenamiento no será superior a 25 ° C., para el almacenamiento de 4 días, la temperatura no superará los 5 ° C. Las temperaturas de almacenamiento y el tiempo deberán ser registrados y las muestras se almacenarán en una cara plana sobre una superficie horizontal y no se deberá poner una muestra sobre otra.

3.3.3.5. Procedimiento del ensayo

La muestra se colocará en un entorno de temperatura controlada y vigilada hasta que se haya alcanzado la temperatura de ensayo. La temperatura de la muestra deberá ser determinada por sensores en la superficie curva y el centro de la muestra. La diferencia de temperatura entre el exterior y el centro no debe ser superior a 0,4 ° C. Con el fin de garantizar que la temperatura es la correcta en el momento de la prueba, una segunda muestra ficticia, nominalmente idéntica a la descrita anteriormente, se mantendrá al lado del punto de prueba. La temperatura de ensayo será de $\pm 0,5$ ° C de la temperatura de destino. Las temperaturas de ensayo recomendado para las pruebas de rutina son +2 ° C, +10 ° C y 20 ° C. A temperaturas más altas de prueba, algunas mezclas pueden presentar una deformación excesiva que conduce al colapso.

3.3.3.5.1. Montaje de la muestra

Los rodillos de carga se deberán limpiar con un disolvente si es necesario, y después de obtener la muestra a la temperatura especificada, se alineará con uno de los diámetros verticales. El procedimiento de ajuste de los transductores y del sistema de medición, se hará de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

Es importante, que el bastidor de montaje se sujete de manera uniforme y a la muestra. Se debe tener cuidado, que no exista una sobre-tensión de las abrazaderas.

3.3.3.5.2. Medición de la rigidez y deformación

Se aplican al menos 10 pulsos, con el fin de que el equipo ajuste la magnitud de la carga, y luego se obtiene, la deformación diametral horizontal especificada y el tiempo de ensayo.

3.3.3.5.3. Cálculo del módulo de rigidez

Usando las mediciones de los pulsos de carga, el módulo de rigidez está determinado por la siguiente fórmula.

$$S_m = \frac{F \times (v + 0,27)}{(z \times h)}$$

- Sm:** Módulo de rigidez medida, expresado en mega pascales (MPa.)
- F:** Es el valor máximo de la carga vertical expresado en Newtons (N)
- z:** Amplitud de la deformación horizontal obtenido durante el ciclo de carga, expresado en milímetros (mm.)
- h:** Es el espesor medio de la muestra, expresado en milímetros (mm.)
- v:** Es la relación de Poisson.

Si la relación de Poisson no se determina se asume un valor de 0.35 para todas las temperaturas.

El módulo de rigidez, deberá ajustarse a un factor de la zona de carga de 0,60 usando la siguiente fórmula.

$$S'_m = S_m \times (1 - 0,322 \times (\log(S_m) - 1,82) \times (0,60 - k))$$

Donde:

S'm: Es el módulo de rigidez expresado en megapascales (Mpa.), ajustado a un factor de la zona de carga de 0.60.

k: Factor que mide la zona de carga

Sm: Es el módulo de rigidez expresado en megapascales (Mpa.) para un factor de carga k, expresado en grados Celsius (°C).

La muestra se extrae del equipo de prueba, y se gira $90^{\circ} \pm 10^{\circ}$ alrededor de su eje horizontal y se repite el ensayo.

Si el valor medio del módulo de rigidez de la segunda prueba, es decir cuando se le giró 90° , es de +10% o -20% del valor medio registrado de la primera prueba, entonces la media de las dos pruebas se calcularán y se registrarán como el módulo de rigidez de la muestra. Por el contrario, si la diferencia entre los dos valores es mayor que el indicado anteriormente, los resultados se rechazan.³¹

31 Bituminous mixtures test methods for hot mix asphalt, BS EN 12697-26 Stiffness, Annex C

CAPÍTULO IV

CALCULOS Y RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los ensayos antes mencionados en el capítulo 3, que corresponde a:

- Caracterización de los agregados pétreos
- Caracterización del Cemento asfáltico
- Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall y Superpave
- Ensayo de tracción indirecta para briquetas Marshall y Superpave.

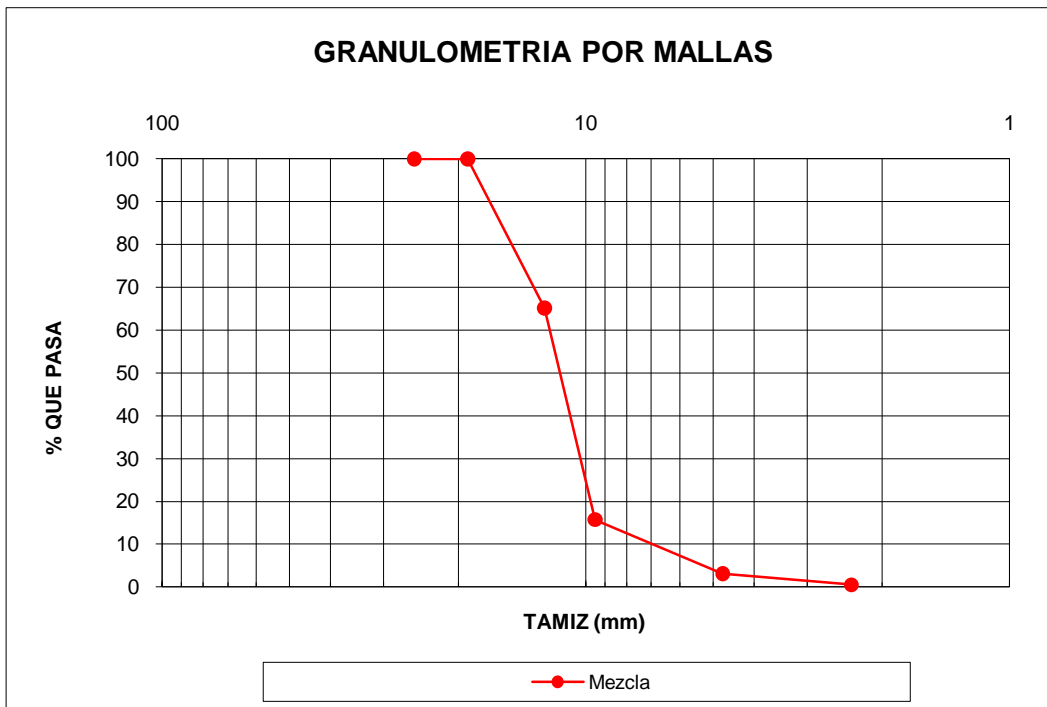


Fig. 4.1 Curva Granulométrica Agregado Grueso

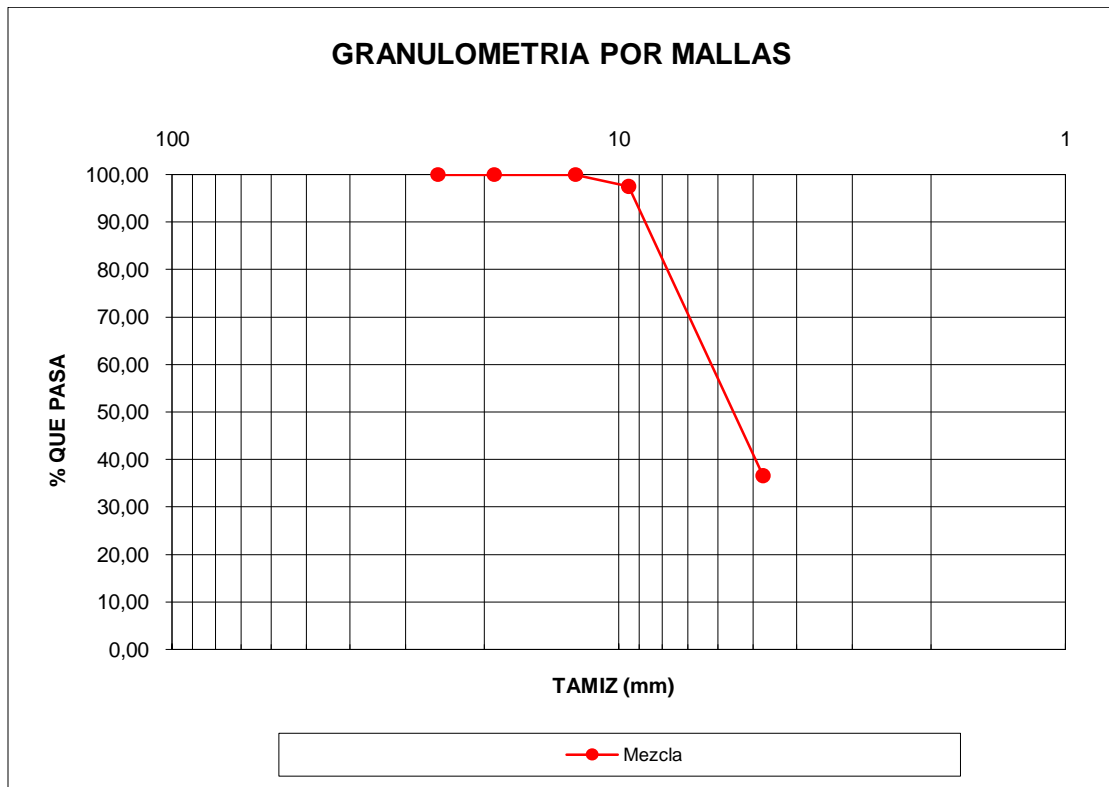


Fig. 4.2 Curva Granulométrica Agregado Intermedio

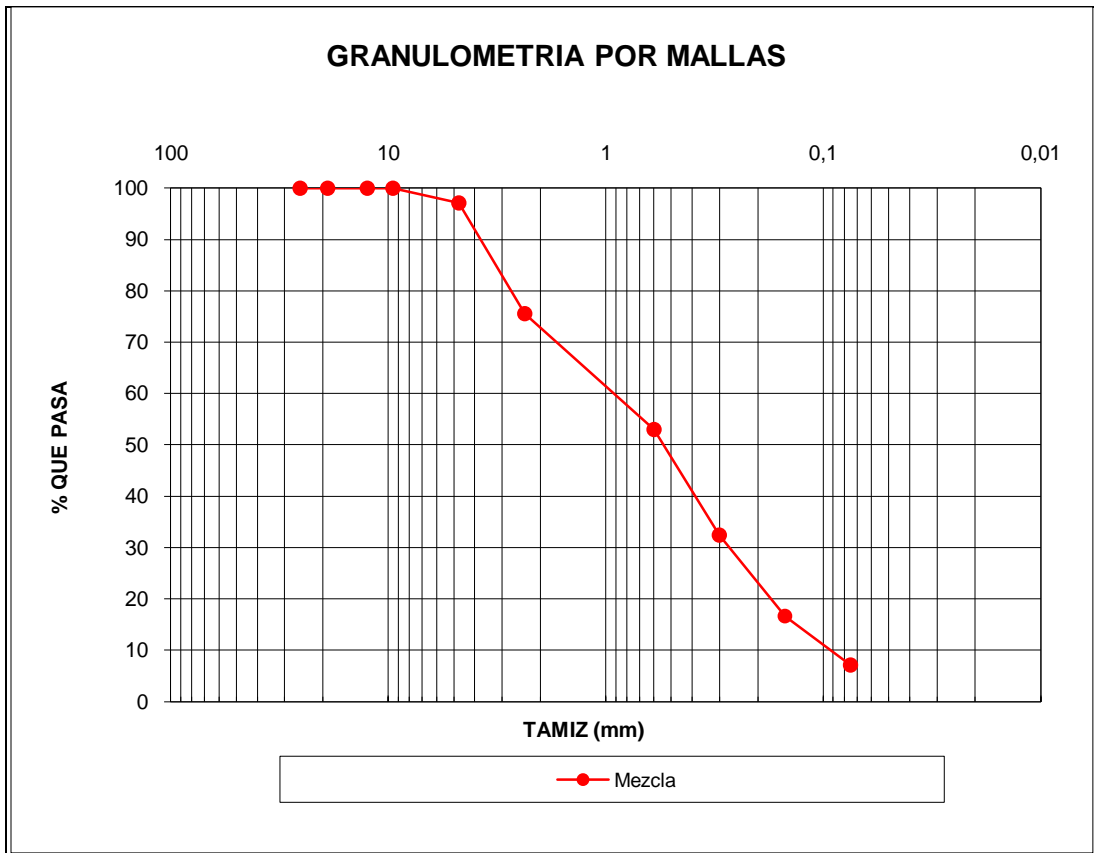


Fig. 4.3 Curva Granulométrica Agregado Fino

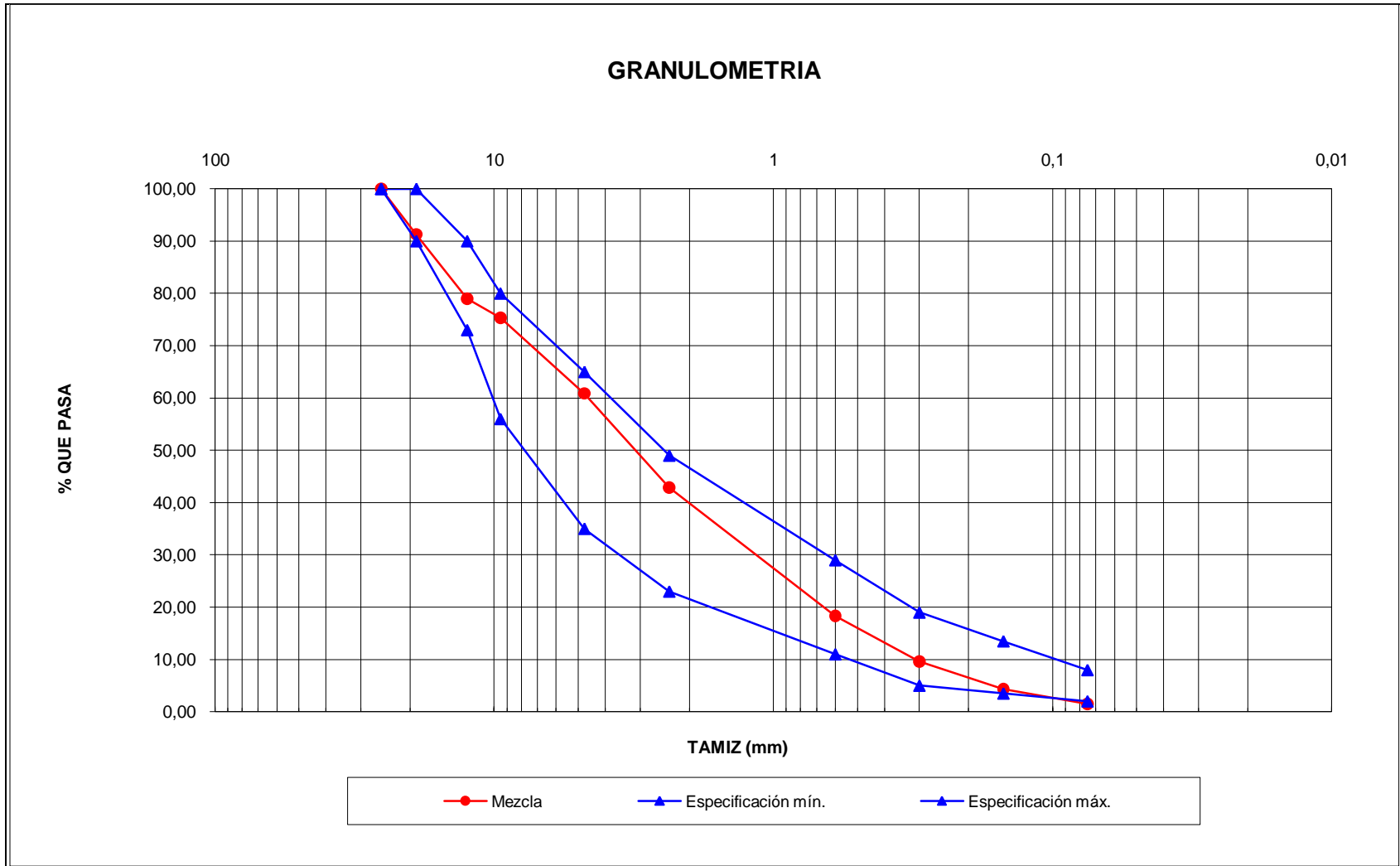


Fig. 4.4 Curva Granulométrica de la mezcla de agregados (Especificaciones MOP-001-f Tabla 405.5.1)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MATERIALES

PROYECTO: Tesis	FECHA:	may-10
MATERIAL: Agregado grueso y fino	REALIZADO POR:	Javier Montesinos
LOCALIZACIÓN: Guayllabamba		Patricio Reyes
RECEPCIÓN: Ing. Gustavo Yáñez	NORMA:	ASTM C127

Tabla 4.5 Gravedad Específica Agregado Grueso

Masa de la muestra saturada con superficie seca (gr.)	5177
Masa de la muestra seca (gr.)	5102
Masa de la muestra sumergida en agua (gr.)	3096
Gravedad específica Bulk. (gr./cm³)	2.45
Gravedad específica saturada con superficie seca (gr./cm³)	2.49
Gravedad específica aparente (gr./cm³)	2.54
Porcentaje de absorción (%)	1.47

Tabla 4.6 Gravedad Específica Agregado Fino

Masa del matraz (gr.)	178.51
Masa del conjunto: matraz, agua y muestra (gr.)	982.9
Masa de la muestra saturada con superficie seca (gr.)	500.03
Masa de la muestra seca (gr.)	487.68
Masa de agua añadida al matraz (gr.)	304.36
Gravedad específica Bulk. (gr./cm³)	2.49
Gravedad específica saturada con superficie seca (gr./cm³)	2.56
Gravedad específica aparente (gr./cm³)	2.66
Porcentaje de absorción (%)	2.53

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA**

LABORATORIO DE MATERIALES

A

PROYECTO: Tesis	FECHA:	may-10
MATERIAL: Agregado grueso	REALIZADO POR:	Javier Montesinos
LOCALIZACIÓN: Guayllabamba		Patricio Reyes
RECEPCIÓN: Ing. Gustavo Yáñez	NORMA:	ASTM C 131

Tabla 4.7 Abrasión Tipo de gradación: A

Masa inicial de la muestra (gr.)	5010
Masa retenida en el tamiz Nro. 12 después de 500 revoluciones (gr.)	3600
Masa que pasa el tamiz Nro. 12 (gr.)	1410
Porcentaje de desgaste (%)	28.14

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA**

LABORATORIO DE MATERIALES

PROYECTO: Tesis	FECHA:	may-10
MATERIAL: Agregado fino	REALIZADO POR:	Javier Montesinos
LOCALIZACIÓN: Guayllabamba		Patricio Reyes
RECEPCIÓN: Ing. Gustavo Yánez	NORMA:	ASTM D2419

Tabla 4.8 Equivalente de Arena

MUESTRA	1	2
Lectura inicial	4	4
Lectura final	3,8	3,7
Equivalente de arena	95%	93%
Promedio	94%	

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA**

LABORATORIO DE MATERIALES

PROYECTO: Tesis	FECHA:	may-10
MATERIAL: Agregado grueso y fino	REALIZADO POR:	Javier Montesinos Patricio Reyes
LOCALIZACIÓN: Guayllabamba	NORMA:	ASTM C142
RECEPCIÓN: Ing. Gustavo Yáñez		

Tabla 4.9 Deletéreos Agregado grueso

Tamiz	3/4	3/8	4
Peso de muestra (gr.)	3005	2000	1000
Peso de partículas retenidas (gr.)	2975	1820	981
Porcentaje de terrones de arcilla	1	9	1,9

Tabla 4.10 Deletéreos Agregado fino

Peso de la muestra (gr.)	106,66
Peso de partículas retenidas (gr.)	104,24
Porcentaje de terrones de arcilla	2,27

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA**

LABORATORIO DE MATERIALES

PROYECTO: Tesis	FECHA:	may-10
MATERIAL: Agregado grueso e intermedio	REALIZADO POR:	Javier Montesinos
LOCALIZACIÓN: Guayllabamba		Patricio Reyes
RECEPCIÓN: Ing. Gustavo Yáñez	NORMA:	ASTM D 4791

Tabla 4.11 Partículas Alargadas Aplanadas

Tamiz	3/8	1/2	3/4
Masa de la muestra (gr.)	1000,4	2000,5	4741,88
Masa de partículas alargadas (gr.)	294,27	561,5	861,1
Masa de partículas aplanadas (gr.)	153,13	393,41	1187,03
Porcentaje de partículas alargadas	29,42	28,07	18,16
Porcentaje de partículas aplanadas	15,31	19,67	25,03

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA**

LABORATORIO DE MATERIALES

PROYECTO: Tesis	FECHA:	may-10
MATERIAL: Agregado grueso	REALIZADO POR:	Javier Montesinos
LOCALIZACIÓN: Guayllabamba		Patricio Reyes
RECEPCIÓN: Ing. Gustavo Yáñez	NORMA:	ASTM D 5821

Tabla 4.12 Angularidad del Agregado:

Tamiz	% 1 Cara Fracturada	% 2 o más caras fracturadas
1	96%	95%
½	98%	97%
3/8	99%	98%

Tabla 4.13 Resumen de resultados de los ensayos a los Agregados

Ensayo		Resultados			Especificaciones del MOP32		Control	
Gravedad específica Bulk (gr./cm3)	Agregado fino	2.45						
	Agregado grueso	2.49						
Abrasión	% de desgaste	28.14			40% máx.	ASTM C131	*Cumple	
Equivalente de arena	%	94			45% mín.	ASTM D2419-79	*Cumple	
Determinación de deletéreos		Agregado Grueso		Agregado fino		ASTM C142		
	Tamiz	3/4	3/8	4				
	%	1	9	1.9	2.27		0.2% - 10 %	*Cumple
Partículas alargadas aplanadas	Tamiz	3/8	1/2	3/4		ASTM D4791		
	% de partic. Alargadas	29.42	28.07	18.16			10 % máx.	no cumple
	% de partic. Aplanadas	15.31	19.67	25.03			10% máx.	no cumple
Angularidad del agregado	Tamiz	1	1/2	3/8		ASTM D1252		
	1 cara fracturada (%)	96	98	99			85% mín.	*Cumple
	2 o más caras fracturadas(%)	95	97	98			80% mín.	*Cumple

32 Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. MOP-001-f-2002. Tomo II. Sección 811, pág. 373-377

4.2. Materiales Bituminosos

4.2.1. Caracterización del cemento asfáltico

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MATERIALES

PROYECTO: Tesis	FECHA:	may-10
MATERIAL: Cemento asfáltico	REALIZADO POR:	Javier Montesinos
LOCALIZACIÓN: Guayllabamba		Patricio Reyes
RECEPCIÓN: Ing. Gustavo Yáñez	NORMA:	ASTM D 70

Tabla 4.14 Gravedad Específica

	Muestra 1	Muestra 2
Peso de la muestra del molde	8.58	8.74
Peso de la muestra en agua destilada a 25°C	0,11	0,12
Ge	1,01	1,01
Ge promedio	1,01	

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MATERIALES**

PROYECTO: Tesis	FECHA:	may-10
MATERIAL: Cemento asfáltico	REALIZADO POR:	Javier Montesinos
LOCALIZACIÓN: Guayllabamba		Patricio Reyes
RECEPCIÓN: Ing. Gustavo Yáñez	NORMA:	ASTM D 5

Tabla 4.15 Penetración

Muestra	Valor
1	62
2	63
3	62
4	62
Promedio	62,25

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MATERIALES**

PROYECTO: Tesis	FECHA:	may-10
MATERIAL: Cemento asfáltico	REALIZADO POR:	Javier Montesinos
LOCALIZACIÓN: Guayllabamba		Patricio Reyes
RECEPCIÓN: Ing. Gustavo Yánez	NORMA:	ASTM D 92

Tabla 4.16 Punto de inflamación y combustión

Punto de Inflamación (°c)	236
Punto de Combustión (°c)	246

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MATERIALES**

PROYECTO: Tesis	FECHA: REALIZADO	may-10
MATERIAL: Cemento asfáltico	POR:	Javier Montesinos
LOCALIZACIÓN: Guayllabamba		Patricio Reyes
RECEPCIÓN: Ing. Gustavo Yánez	NORMA:	ASTM D 36

Tabla 4.17 Punto de reblandecimiento

Punto de Reblandecimiento (°C)	50
---------------------------------------	-----------

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERIA
LABORATORIO DE MATERIALES**

PROYECTO: Tesis	FECHA:	may-10
MATERIAL: Cemento asfáltico	REALIZADO	
LOCALIZACIÓN: Guayllabamba	POR:	Javier Montesinos
RECEPCIÓN: Ing. Gustavo Yánez	NORMA:	Patricio Reyes ASTM D 4402

Tabla 4.19 Viscosidad cemento asfaltico sin polímero

Lectura	Temperatura	Visc (cP)	Torque (%)	Velocidad (rpm)	Husillo
1	135°C	335.00	13,4	100	SC4-27
2	135°C	335.00	13,4	100	SC4-27
3	135°C	335.00	13,4	100	SC4-27
1	155°C	136.25	10,9	200	SC4-27
2	155°C	136.25	10,9	200	SC4-27
3	155°C	136.25	10,9	200	SC4-27

Equipo: Brookfield DV-II+Pro + Thermosel

Fig. 4.5 Carta de Viscosidad

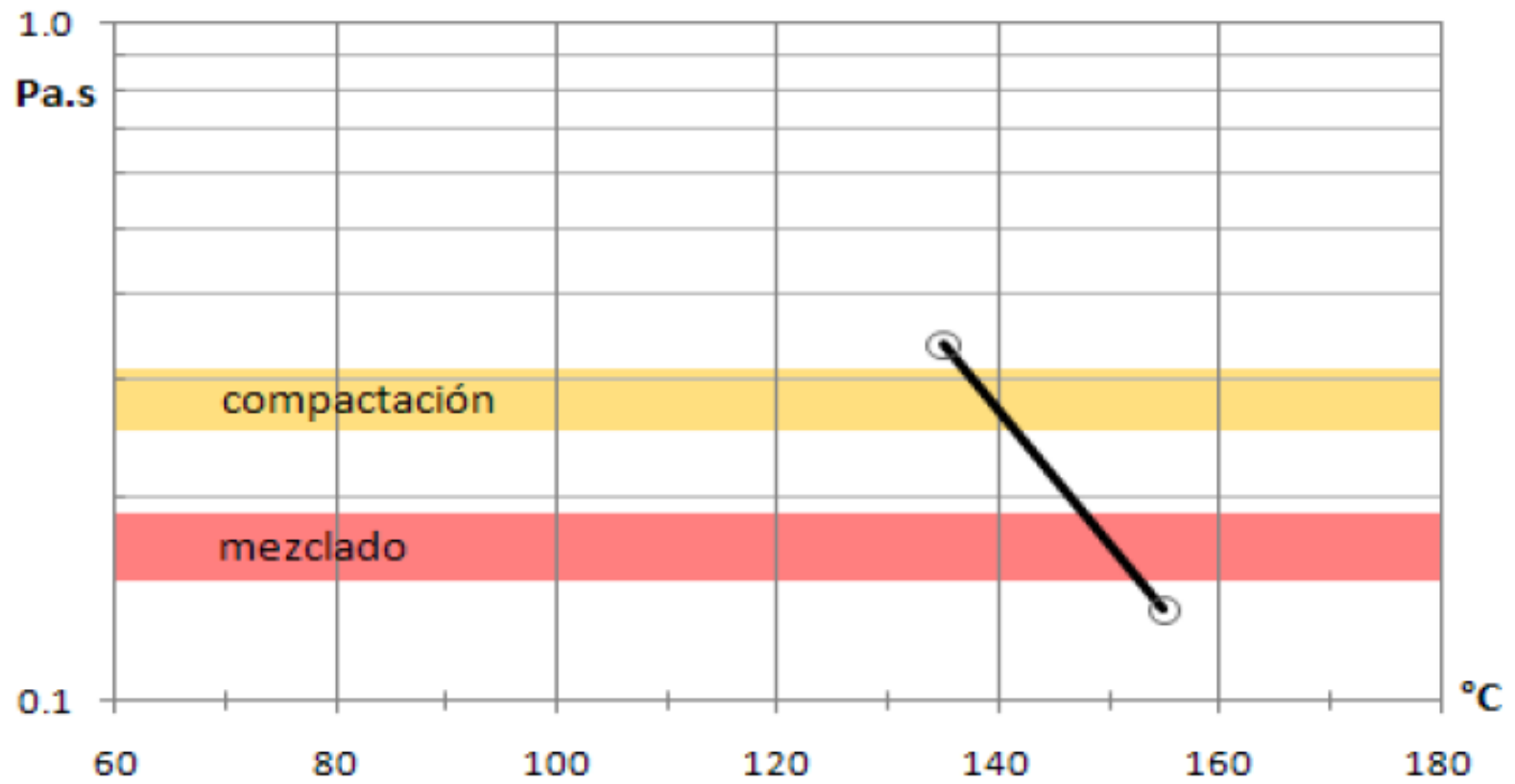


Tabla 4.20 Resumen de ensayos del cemento asfáltico

Ensayo	Resultado	Norma	Especificación del MOP ³³	
Gravedad Específica (gr./cm ³)	1.01	Mín. 1.00	ASTM D70-97	*Cumple
Penetración(mm)	62.25	60 a 70	ASTM D5-97	*Cumple
Ductilidad (cm)	111	Mín. 100	ASTM D113-99	*Cumple
Viscosidad rotac. a 135° C (Pa.s)	0.34	Máx. 3	ASTM D 4402	* Cumple
Viscosidad rotac. a 155° C (Pa.s)	0.15	-----	ASTM D 4402	-----
Punto de Inflamación (°c)	236	Mín. 232	ASTM D92-78	* Cumple
Punto de Combustión (°c)	246		ASTM D92-78	
Punto de Reblandecimiento (°C)	50	48 a 57	ASTM D36-76	* Cumple

³³ Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. MOP-001-f-2002. Tomo II. Sección 810, Tabla 810.2.1. pág. 357

4.3.Diseño de mezcla asfáltica Marshall

Tabla 4.21 Resultados del Diseño Marshall

Mezcla #	Bitumen %	Factor Correc.	Peso			Volumen	G.Bulk g/cm3	Gmm g/cm3	Volumen			VAM	Estabilidad (lb) Medida	Corregida	Flujo 0.01"
			Seco	S.S.S.	Agua				Va	Vagr	Vae				
1	5,0	0,93	1128,9	1133,5	594,7	539	2,095						2024	1882	9
2		0,93	1144,6	1147,6	607,6	540	2,120						1998	1858	9
3		0,93	1134,8	1140,9	598,4	543	2,092						2122	1973	9
Promedio							2,102	2,321	9,4	81,5	9,1	18,5		1905	9
4	5,5	0,93	1147,0	1151,6	606,1	546	2,103						2230	2074	10
5		0,93	1155,7	1158,3	616,2	542	2,132						2345	2181	10
6		0,93	1149,0	1155,0	611,8	543	2,115						2210	2055	10
Promedio							2,117	2,306	8,2	81,6	10,1	18,4		2103	10
7	6,0	0,93	1162,6	1169,2	625,2	544	2,137						2470	2297	13
8		0,93	1155,6	1160,0	615,2	545	2,121						2530	2353	11
9		0,93	1155,7	1161,8	618,4	543	2,127						2730	2539	12
Promedio							2,128	2,290	7,1	81,7	11,3	18,3		2396	12
10	6,5	0,89	1167,0	1173,6	620,5	553	2,110						2460	2189	12
11		0,89	1168,9	1176,6	621,8	555	2,107						2303	2050	13
12		0,93	1162,5	1166,8	621,9	545	2,133						2614	2431	13
Promedio							2,117	2,275	7,0	80,8	12,3	19,2		2223	13
13	7,0	0,89	1164,4	1170,0	618,2	552	2,110						2230	2074	14
14		0,89	1163,0	1169,1	616,5	553	2,105						2120	1887	15
15		0,89	1161,8	1168,9	615,2	554	2,099						2270	2020	14
Promedio							2,105	2,260	6,9	79,9	13,2	20,1		1994	14

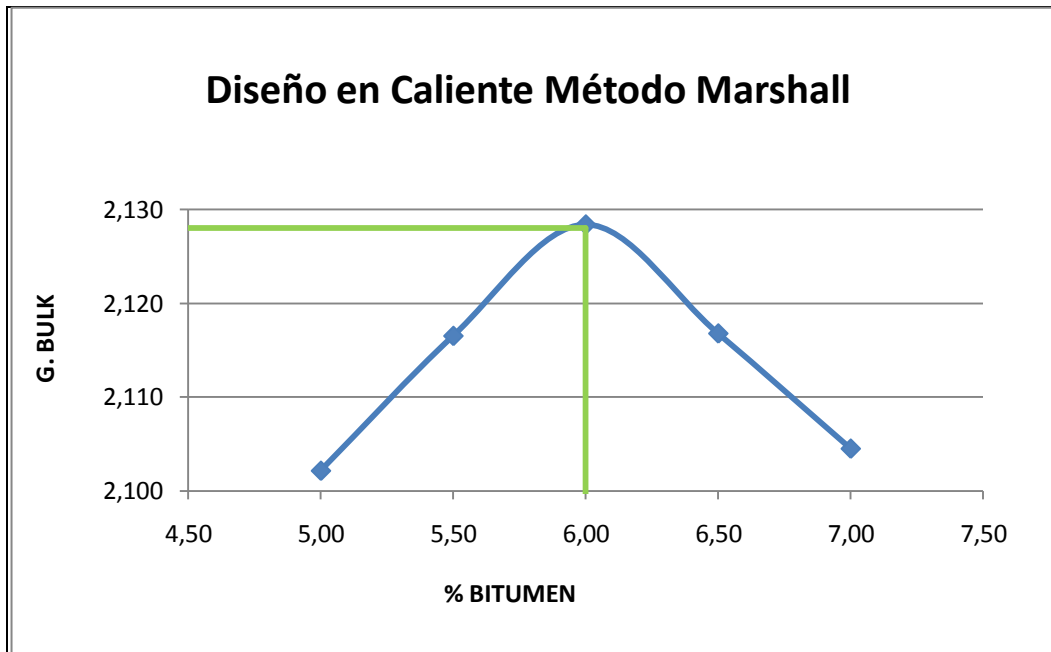


Fig. 4.6 **G. Bulk = 2.128**

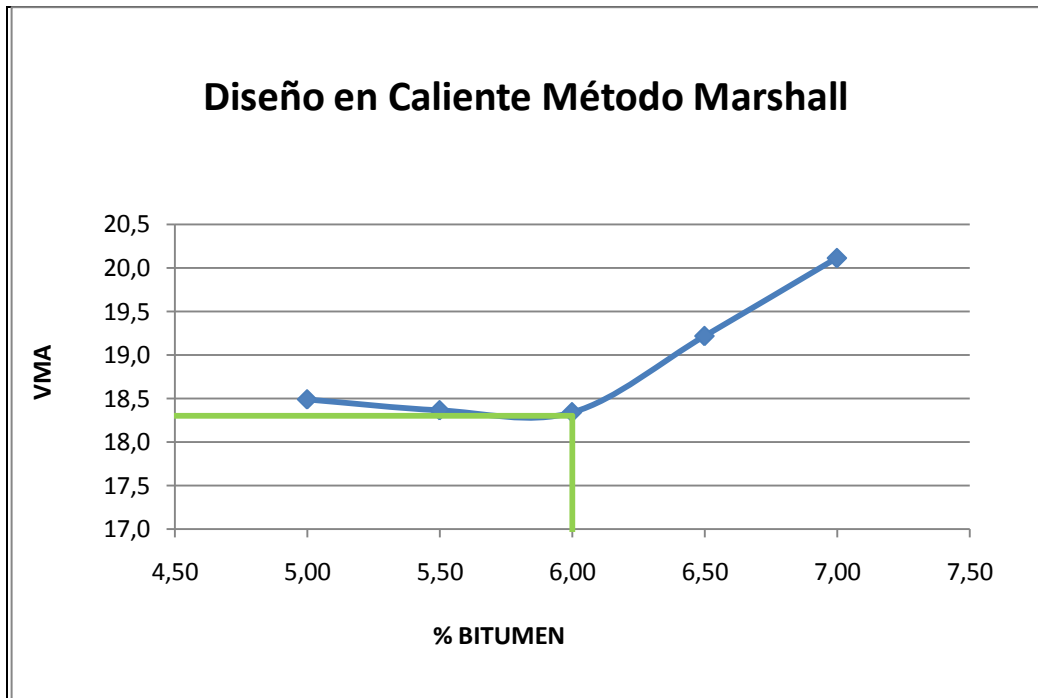


Fig. 4.7 **VMA = 18.3 %**

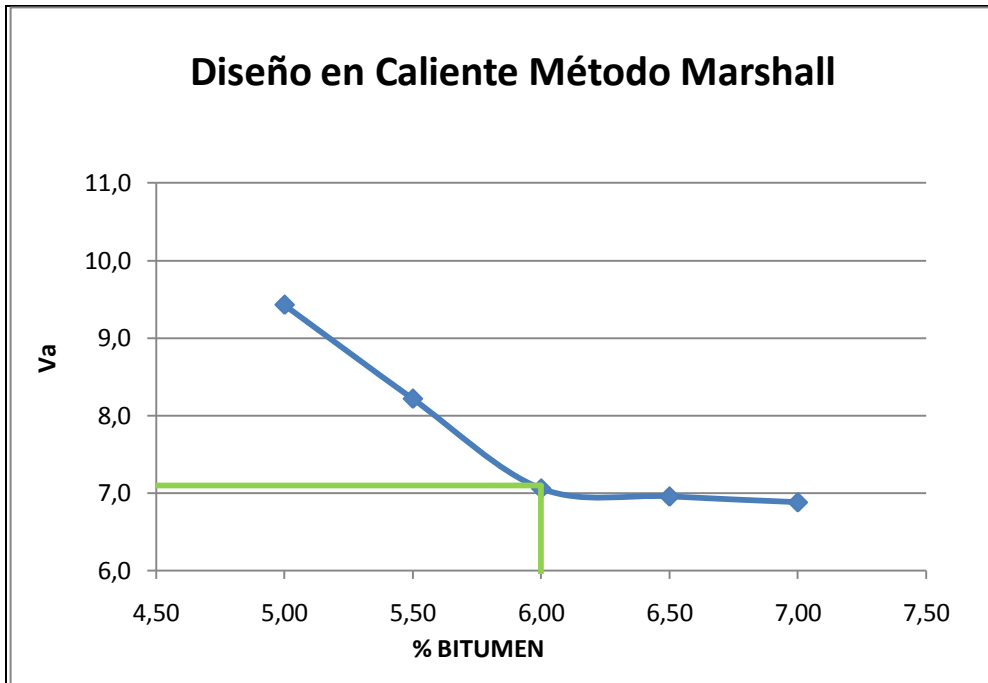


Fig. 4.8 **VA = 7.1 %**

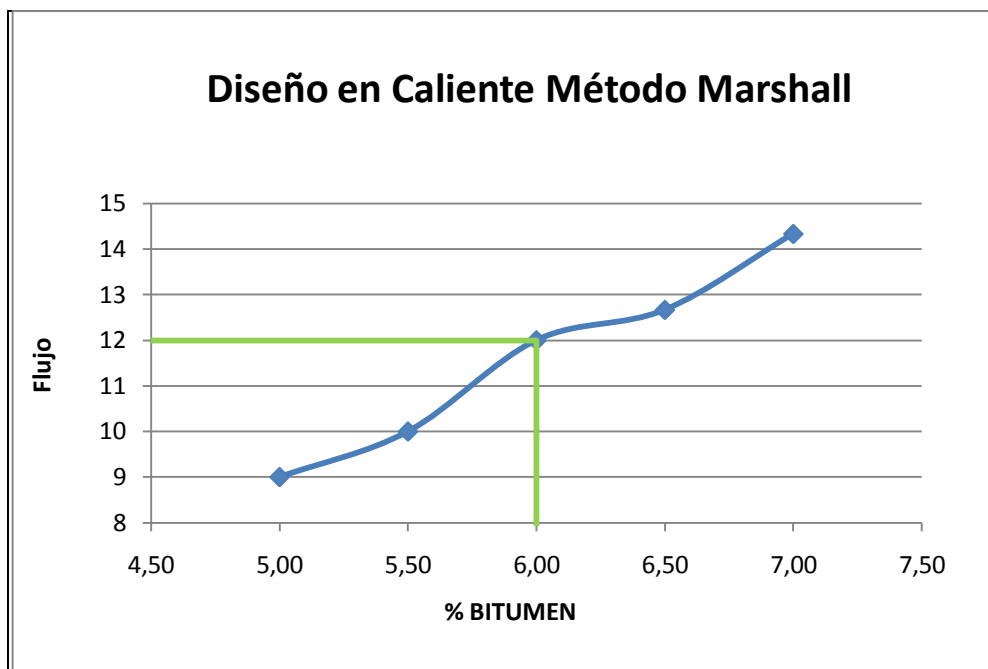


Fig. 4.9 **Flujo = 12**

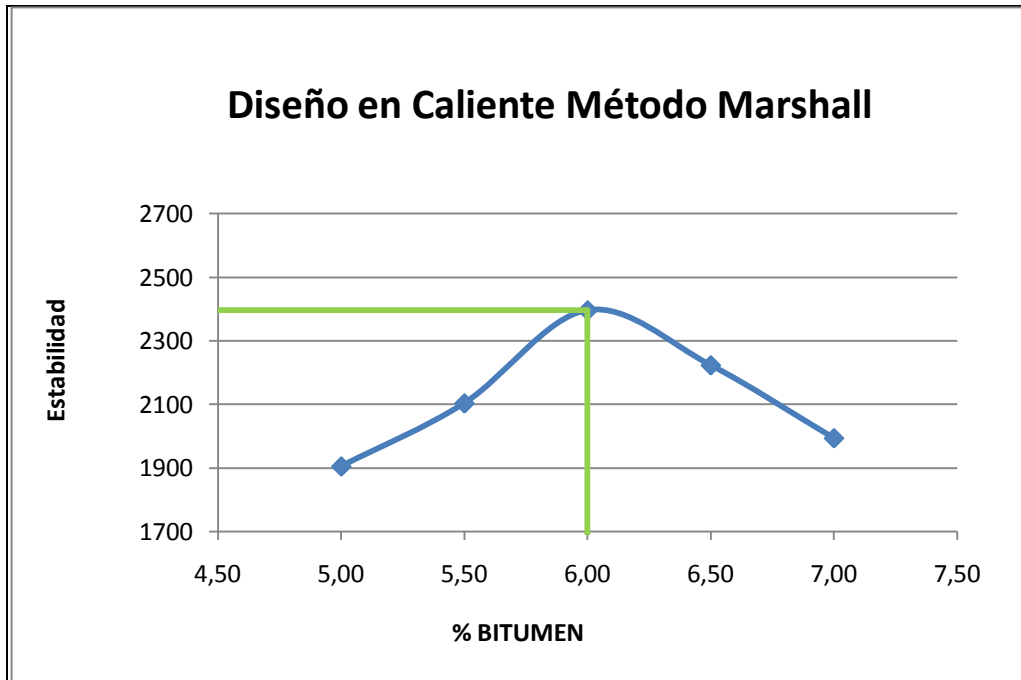


Fig. 4.10 Estabilidad = 2396

- **Selección del contenido óptimo Marshall**

La selección del contenido óptimo de asfalto se lo realizó con el criterio de Estabilidad y Flujo que se describe en el Método Marshall.

Tabla 4.22 Resumen de resultados del Diseño Marshall

Parámetro	Marshall	Norma	Especificación del MOP ³⁴	
Contenido de asfalto%	6,00	-		-
VMA %	18,3	13 Mín.	ASTM D 1559	Cumple
Va %	7,1	3 a 5	ASTM D 1559	No Cumple
Gmb.	2,13	-	ASTM D1188	-
Gmm.	2,29	-	ASTM D2041	-
Estabilidad (lb.)	2396	2200 Mín.	ASTM D 1559	Cumple
Flujo (pulg/100)	12	8 - 14	ASTM D 1559	Cumple

³⁴ Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes. MOP-001-f-2002. Tomo II. Sección 800, Tabla 405-5-2, pág. 379

4.4. Diseño de mezcla asfáltica Superpave

- Número de giros=75

Tabla 4.23 Resultados del Diseño Superpave Número de giros= 75

Mezcla	Bitumen	Peso			Volumen	G.Bulk	Gmm	Volumen			VAM
		Seco	S.S.S.	Agua				g/cm3	g/cm3	Va	
1	5,0	2346,42	2363,93	1225,27	1139	2,061	2,301	10,43	79,90	9,67	20,10
2	5,5	2366,94	2383,87	1244,05	1140	2,077	2,285	9,13	80,10	10,78	19,90
3	6,0	2385,64	2398,50	1261,17	1137	2,098	2,270	7,60	80,48	11,93	19,52
4	6,5	2374,70	2407,33	1268,89	1138	2,086	2,255	7,50	79,61	12,90	20,39
5	7,0	2381,99	2412,66	1268,85	1144	2,083	2,240	7,04	79,05	13,91	20,95

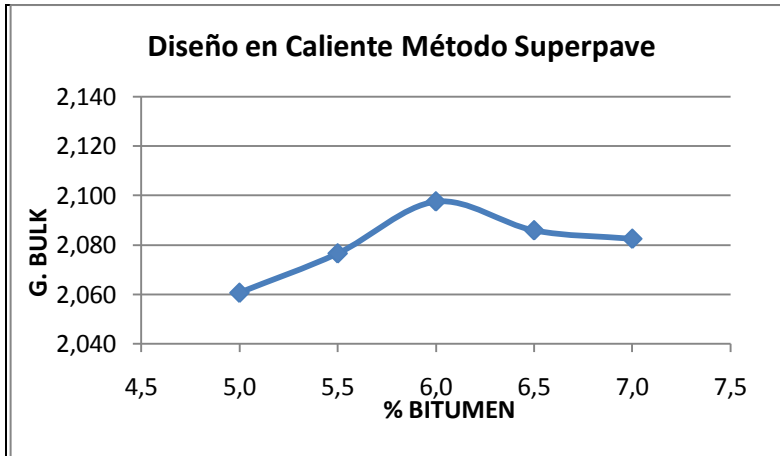


Fig. 4.11 G. Bulk

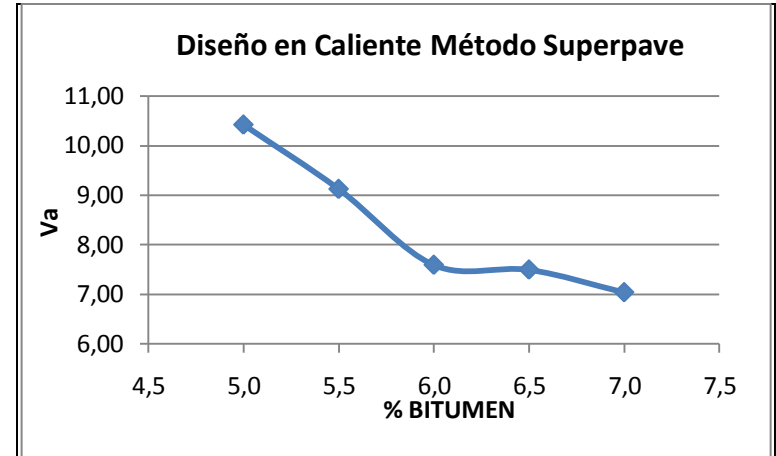


Fig. 4.12 Va

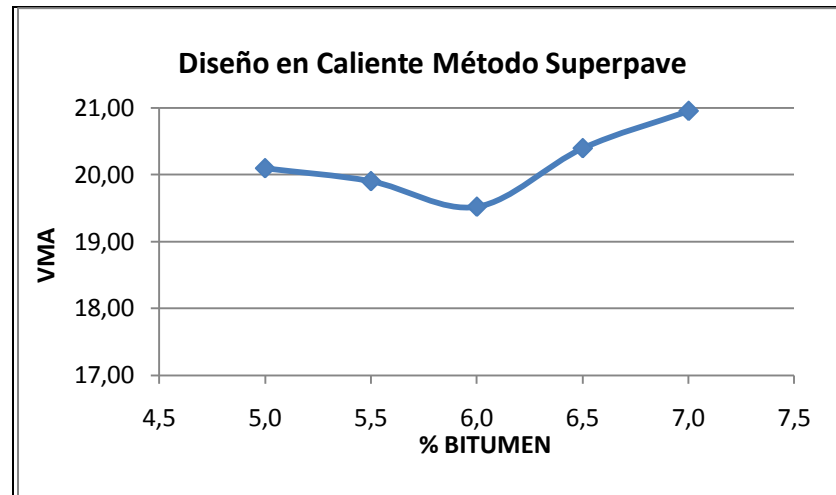


Fig. 4.13 VMA

- Número de giros= 100 (Diseño)

Tabla 3.24 Resultados del Diseño Superpave Número de giros= 100

Mezcla	Bitumen	Peso			Volumen	G.Bulk	Gmm.	Volumen			VAM
		Seco	S.S.S.	Agua				g/cm3	g/cm3	Va	
1	5,0	2355,27	2374,41	1235,15	1139	2,067	2,301	10,14	80,16	9,70	19,84
2	5,5	2392,34	2409,14	1264,60	1145	2,090	2,285	8,53	80,62	10,85	19,38
3	6,0	2359,33	2379,31	1263,92	1115	2,115	2,270	6,82	81,16	12,03	18,84
4	6,5	2379,23	2389,91	1260,10	1130	2,106	2,255	6,61	80,37	13,02	19,63
5	7,0	2365,05	2402,00	1275,80	1126	2,100	2,240	6,26	79,72	14,02	20,28

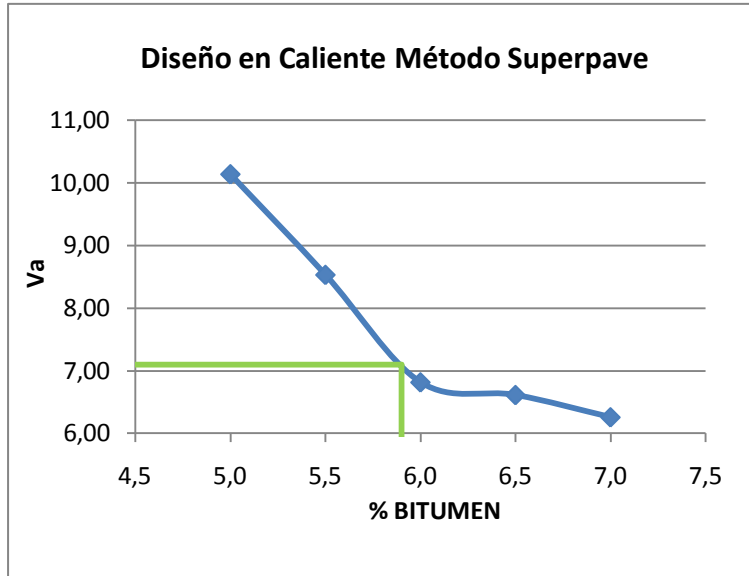


Fig. 4.14 Va = 7.1

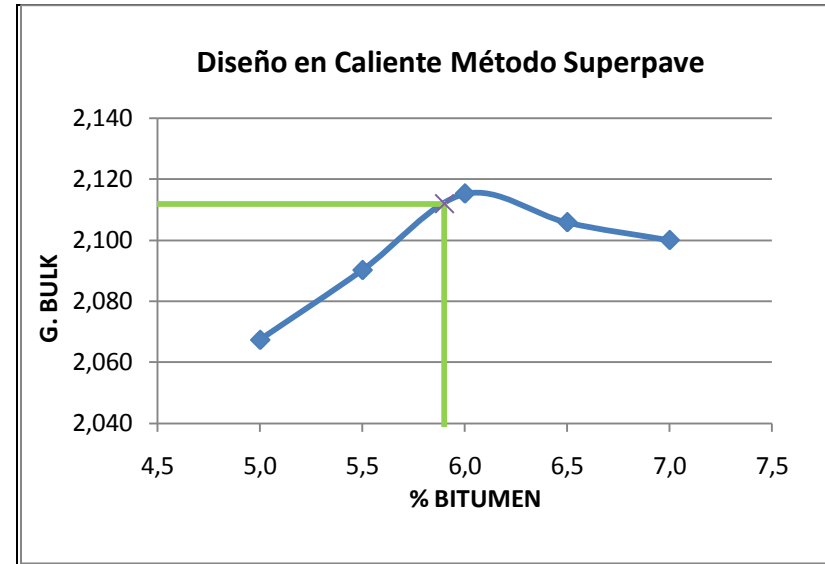


Fig. 4.15 G. Bulk = 2.112

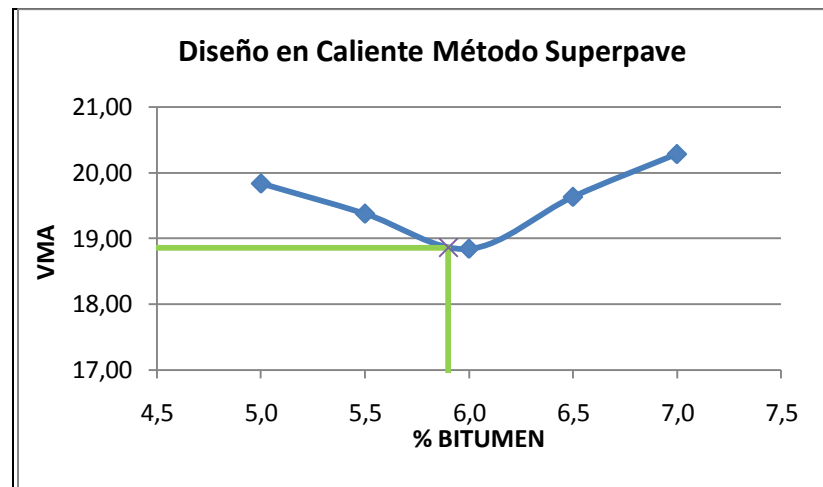


Fig. 4.16 VMA = 18.86

- Número de giros= 120

Tabla 4.25 Resultados del Diseño Superpave Número de giros= 120

Mezcla	Bitumen	Peso			Volumen	G.Bulk	Gmm.	Volumen			VAM
		Seco	S.S.S.	Agua				g/cm3	g/cm3	Va	
1	5,0	2352,48	2380,17	1247,95	1132	2,078	2,301	9,68	80,57	9,75	19,43
2	5,5	2368,92	2383,17	1248,57	1135	2,088	2,285	8,63	80,53	10,83	19,47
3	6,0	2377,30	2395,73	1266,73	1129	2,106	2,270	7,24	80,79	11,97	19,21
4	6,5	2386,63	2405,60	1263,67	1142	2,090	2,255	7,32	79,76	12,92	20,24
5	7,0	2392,56	2408,78	1259,74	1149	2,082	2,240	7,05	79,04	13,91	20,96

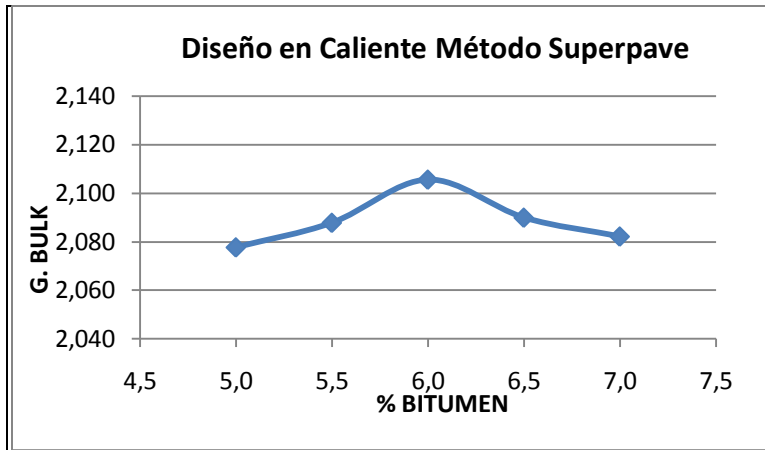


Fig. 4.17 G. Bulk

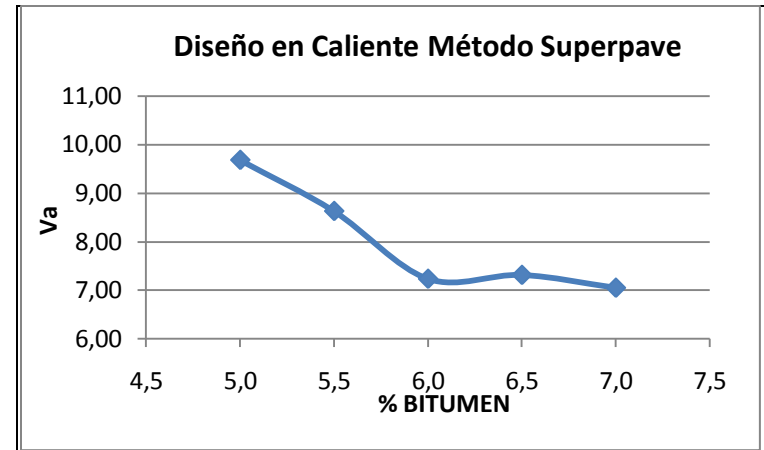


Fig. 4.18 Va

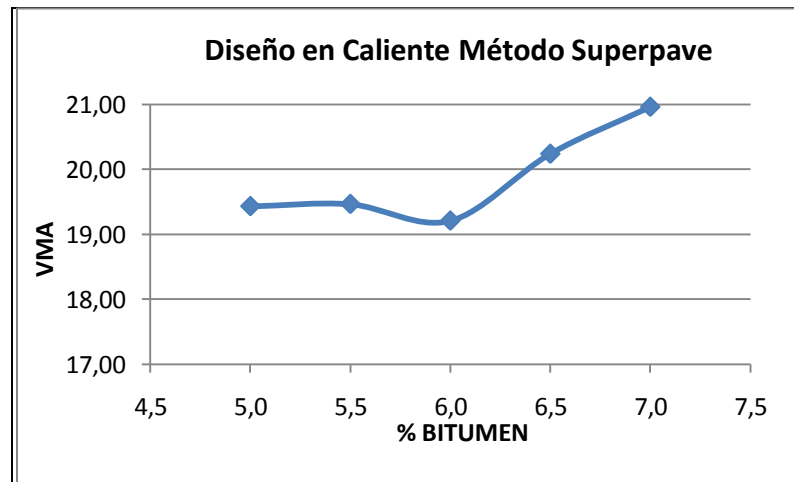


Fig 4.19 VMA

- **Selección del contenido óptimo Superpave**

Este parámetro se lo obtiene, bajo el criterio de elegir aquel contenido de asfalto correspondiente al 4% de vacíos de aire (Va), y luego se verifica, que los parámetros volumétricos restantes se encuentren dentro de los rangos establecidos por el método. Pero se puede observar, los resultados de vacíos de aire en las briquetas compactadas a los 100 giros (Ndiseño) son mayores a 4%, y es por esta razón que se decidió tomar el porcentaje de asfalto correspondiente al porcentaje de vacíos de aire en el método Marshall.

Tabla 4.26 Resumen de resultados del Diseño Superpave briquetas 100 Giros

Parámetro	Superpave	Norma	Especificación Superpave35	
Contenido de asfalto%	5,9	-		-
VMA %	18,86	13 Mín.	ASTM D 1559	Cumple
Va %	7,1	3 a 5	ASTM D 1559	No Cumple
Gmb.	2,11	-	ASTM D1188	-
Gmm.	2,27	-	ASTM D2041	-

4.5. Ensayo de Tracción Indirecta

4.5.1. Módulo de Rigidez en briquetas Marshall a 75 Golpes

Tabla 4.27 Resultados Módulos de Rigidez Marshall

Muestra #	Bitumen %	Módulo Rigidez (Mpa.)
1	5	2080
2	5	1554
3	5	1873
Promedio		1835,7
4	5,5	2356
5	5,5	2366
6	5,5	1620
Promedio		2114
7	6	1812
8	6	1779
9	6	2720
Promedio		2103,7
10	6,5	2008
11	6,5	1959
12	6,5	1709
Promedio		1892
13	7	1765
14	7	1589
15	7	1712
Promedio		1688,67

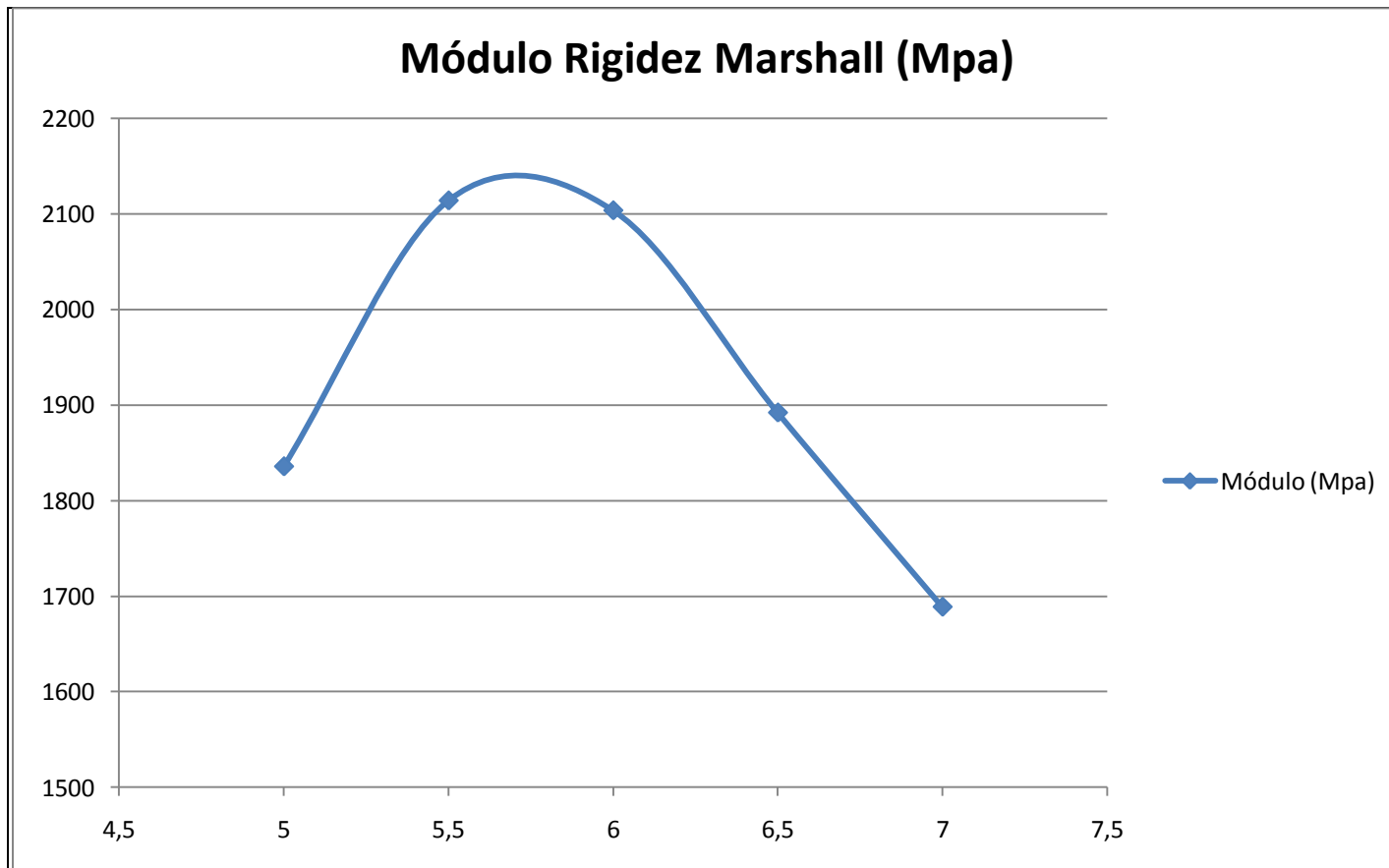


Fig. 4.19 Gráfica Módulos de Rigidez Marshall

4.5.2. Módulo de Rigidez en briquetas Superpave

4.5.2.1. Briquetas Compactadas a 75 Giros

Tabla 4.28 Resultados Módulos Superpave 75 Giros

Muestra #	Bitumen %	Nro. Giros	Módulo (Mpa.)
1	5,0	75	2192
2	5,5	75	2450
3	6,0	75	2932
4	6,5	75	3120
5	7,0	75	3016

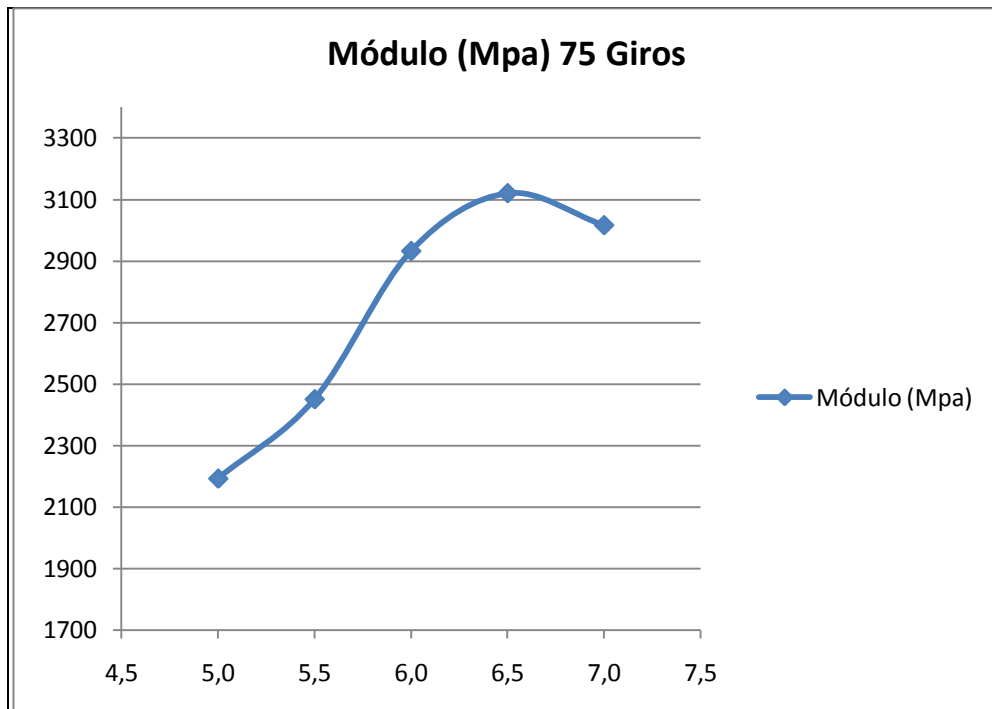


Fig. 4.20 Gráfica Módulos Superpave 75 Giros

4.5.2.2. Briquetas Compactadas a 100 Giros

Tabla 4.29 Resultados Módulos Superpave 100 Giros

Muestra #	Bitumen %	Nro. Giros	Módulo (Mpa)
6	5,0	100	2331
7	5,5	100	2756
8	6,0	100	2880
9	6,5	100	2811
10	7,0	100	2712

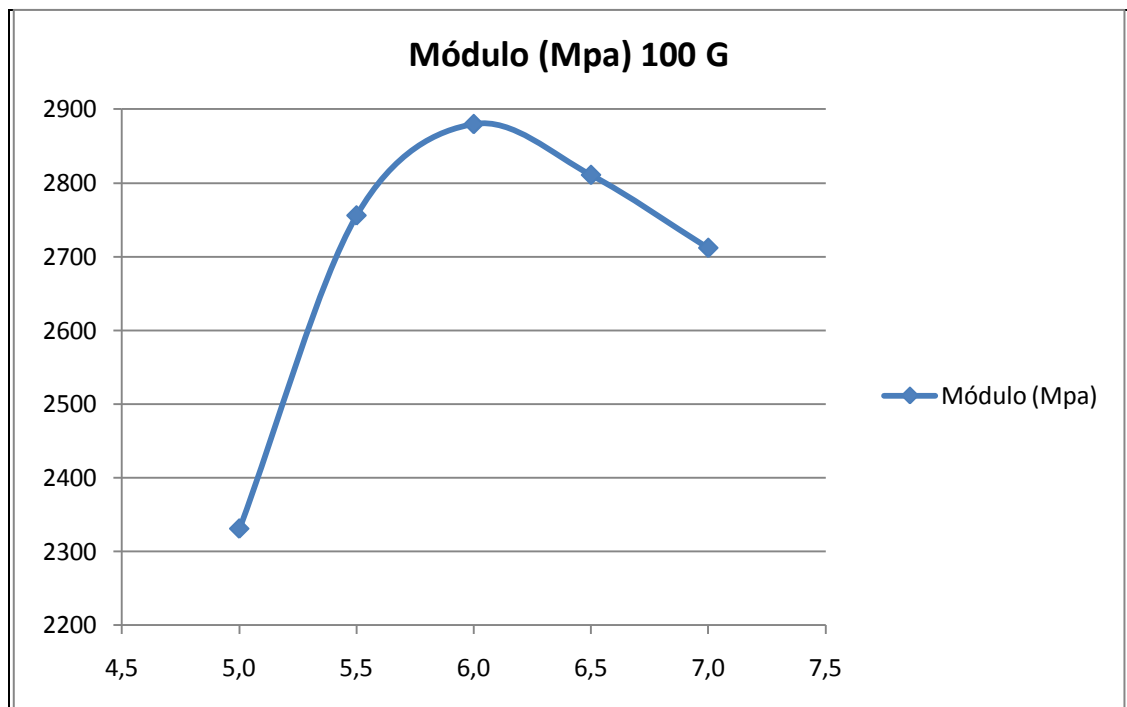


Fig. 4.21 Gráfica Módulos Superpave 100 Giros

4.5.2.3. Briquetas Compactadas a 120 Giros

Tabla 4.30 Resultados Módulos Superpave 120 Giros

Muestra #	Bitumen %	Nro. Giros	Módulo (Mpa.)
11	5,0	120	2025
12	5,5	120	2606
13	6,0	120	2862
14	6,5	120	2671
15	7,0	120	1537

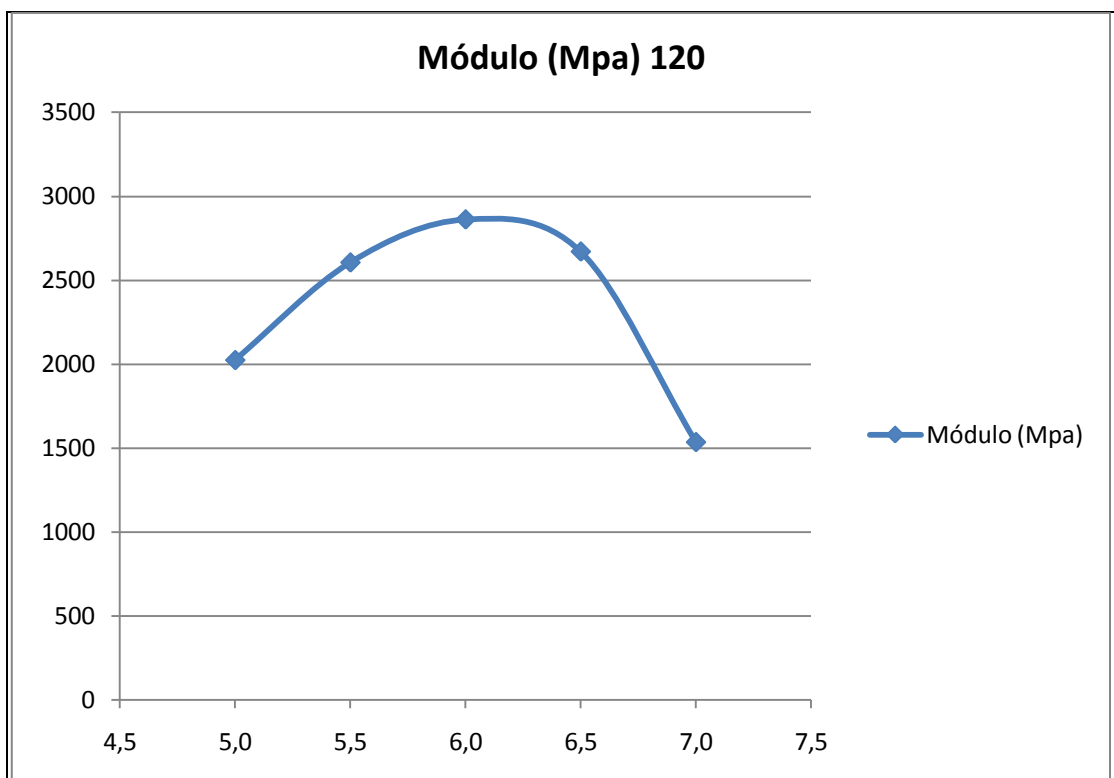


Fig. 4.22 Gráfica Módulos Superpave 120 Giros

CAPITULO V

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

5.1.Evaluación volumétrica entre briquetas Marshall y Superpave

Un factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica, es el de las proporciones volumétricas del asfalto y de los componentes del agregado, o más simplemente, parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.

Al respecto, las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica compactada, son los vacíos de aire (V_a); vacíos en el agregado mineral (VMA); la gravedad Bulk (G_b); y contenido de asfalto efectivo (P_{be}). Son los que proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica.

Con el desarrollo de la metodología Superpave, y la aparición del compactador giratorio, la práctica actual de diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA), se encuentra en una etapa de redefinición, de ahí la importancia de la comparación contra el método Marshall, que ha sido el más utilizado para el diseño de mezclas asfálticas en Ecuador.

A continuación se muestran las gráficas para el análisis volumétrico de la mezcla asfáltica en el estudio, compactada con las dos metodologías de diseño.

5.1.1.Gravedad Bulk (Gb.) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 75 Giros

Tabla 5.1 Comparación G. Bulk

Bitumen %	Gb	
	Marshall 75 Golpes	Superpave (75 Giros)
5,0	2,102	2,061
5,5	2,117	2,077
6,0	2,128	2,098
6,5	2,117	2,086
7,0	2,105	2,083

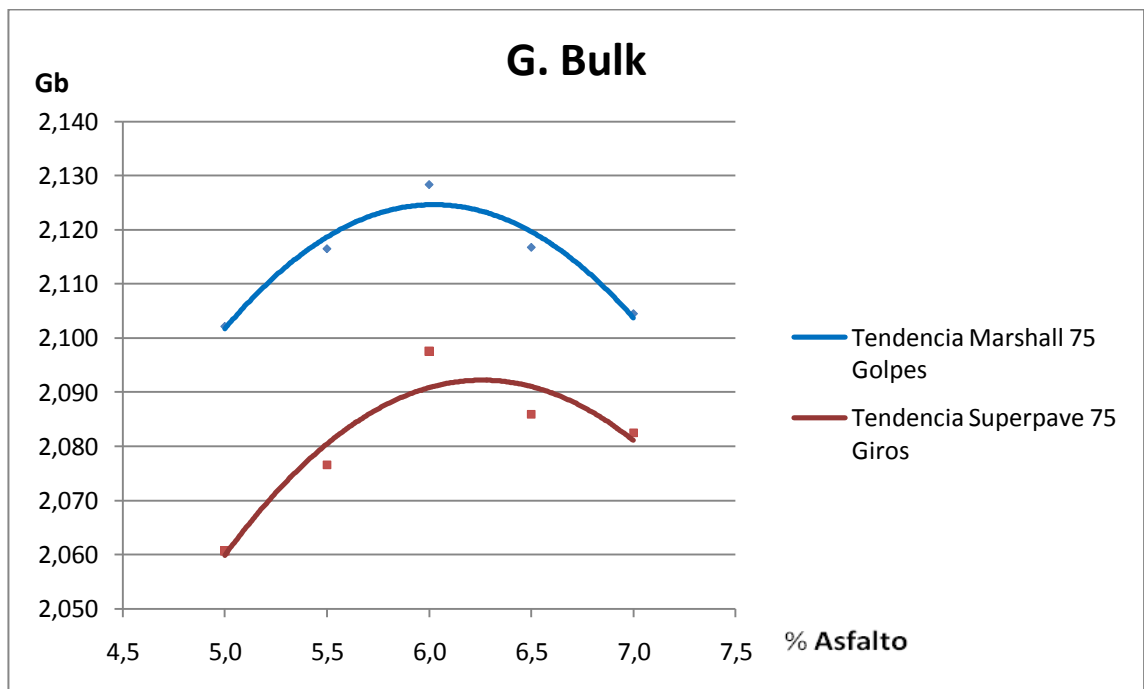


Fig. 5.1 Comparación G. Bulk

5.1.2.Gravedad Bulk (Gb.) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 100 Giros

Tabla 5.2 Comparación G. Bulk

Bitumen %	Gb	
	Marshall 75 Golpes	Superpave (100 Giros)
5,0	2,102	2,067
5,5	2,117	2,090
6,0	2,128	2,115
6,5	2,117	2,106
7,0	2,105	2,100

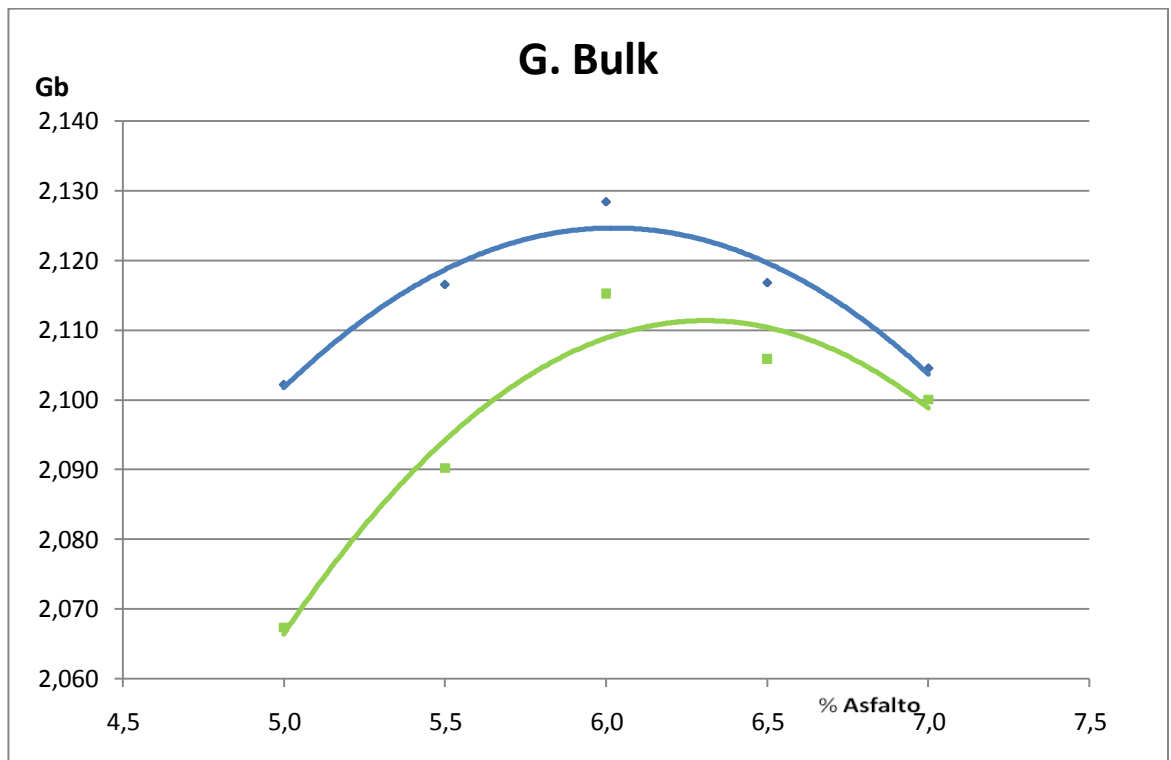


Fig. 5.2 Comparación G. Bulk

5.1.3.Gravedad Bulk (Gb.) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 120 Giros

Tabla 5.3 Comparación G. Bulk

Bitumen %	Gb	
	Marshall 75 Golpes	Superpave (120 Giros)
5,0	2,102	2,078
5,5	2,117	2,088
6,0	2,128	2,106
6,5	2,117	2,090
7,0	2,105	2,082

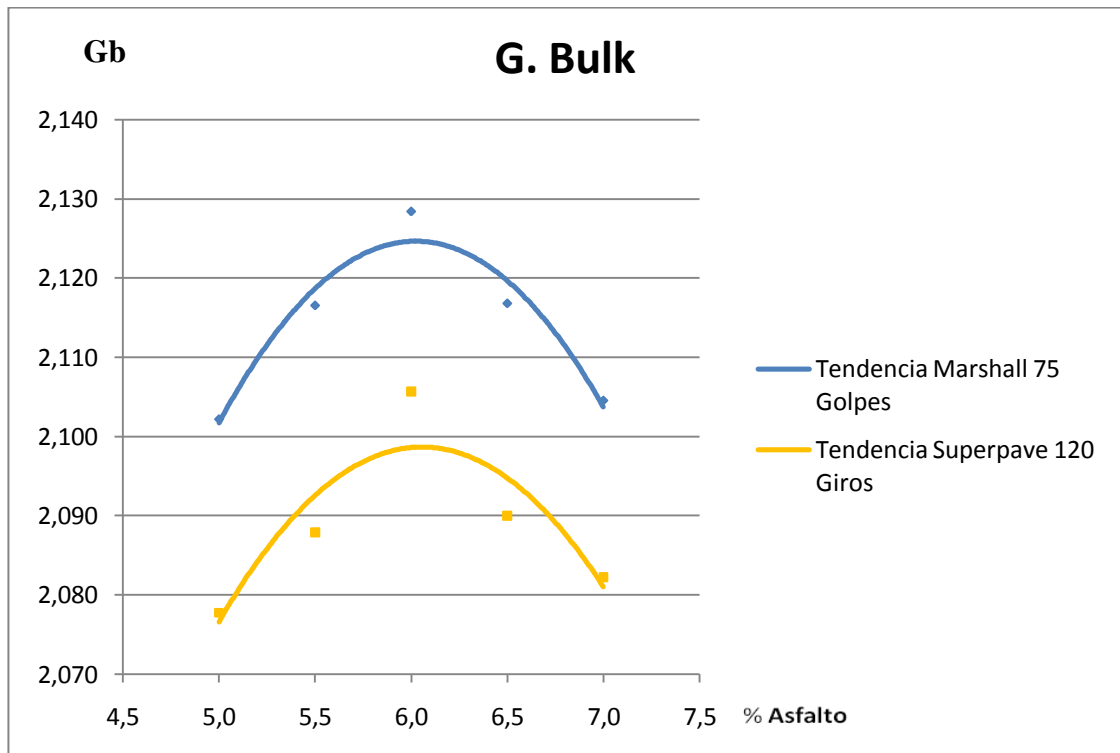


Fig. 5.3 Comparación G. Bulk

5.1.4. Análisis de la Gravedad específica de las mezclas (Gb.)

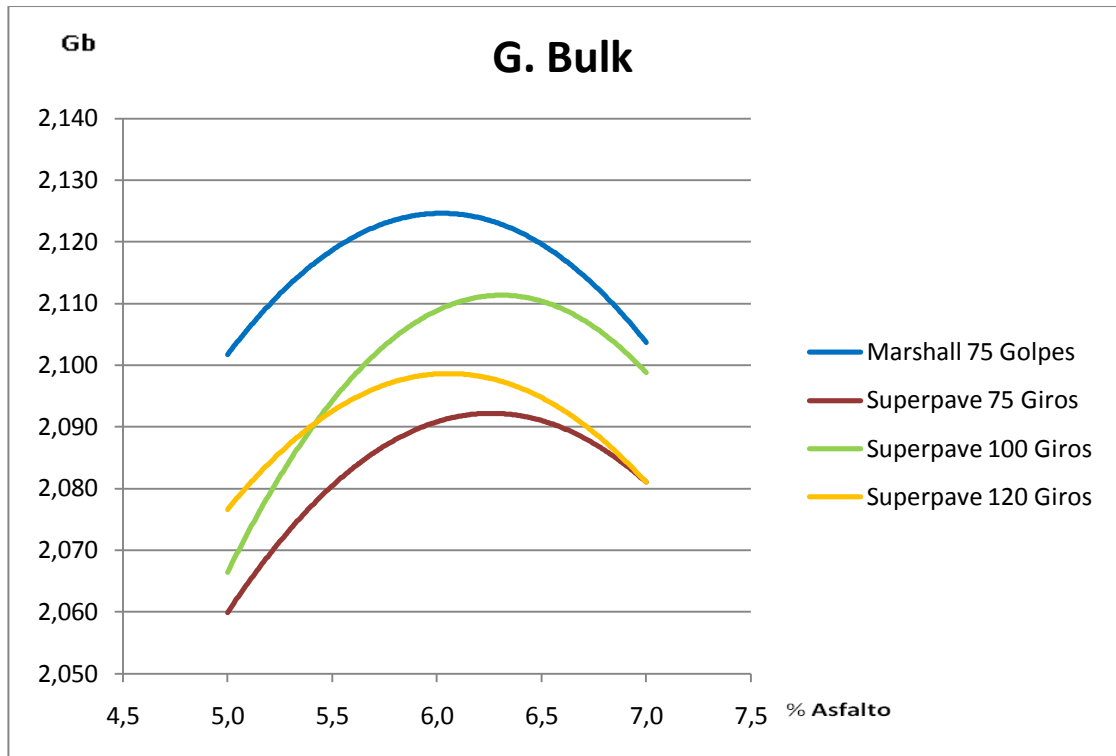


Fig. 5.4 Comparación G. Bulk Marshall vs. Superpave

Como se puede apreciar en la gráfica, la Gb del Marshall es siempre mayor que las Gb de Superpave para todos los porcentajes de asfalto, siendo la Gb de Superpave correspondiente a 100 giros la que más se le acerca.

5.1.5. Porcentaje de vacíos (Va) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 75 Giros

Tabla 5.4 Comparación Va

Bitumen %	Va	
	Marshall 75 Golpes	Superpave (75 Giros)
5,0	9,4	10,43
5,5	8,2	9,13
6,0	7,1	7,60
6,5	7,0	7,50
7,0	6,9	7,04

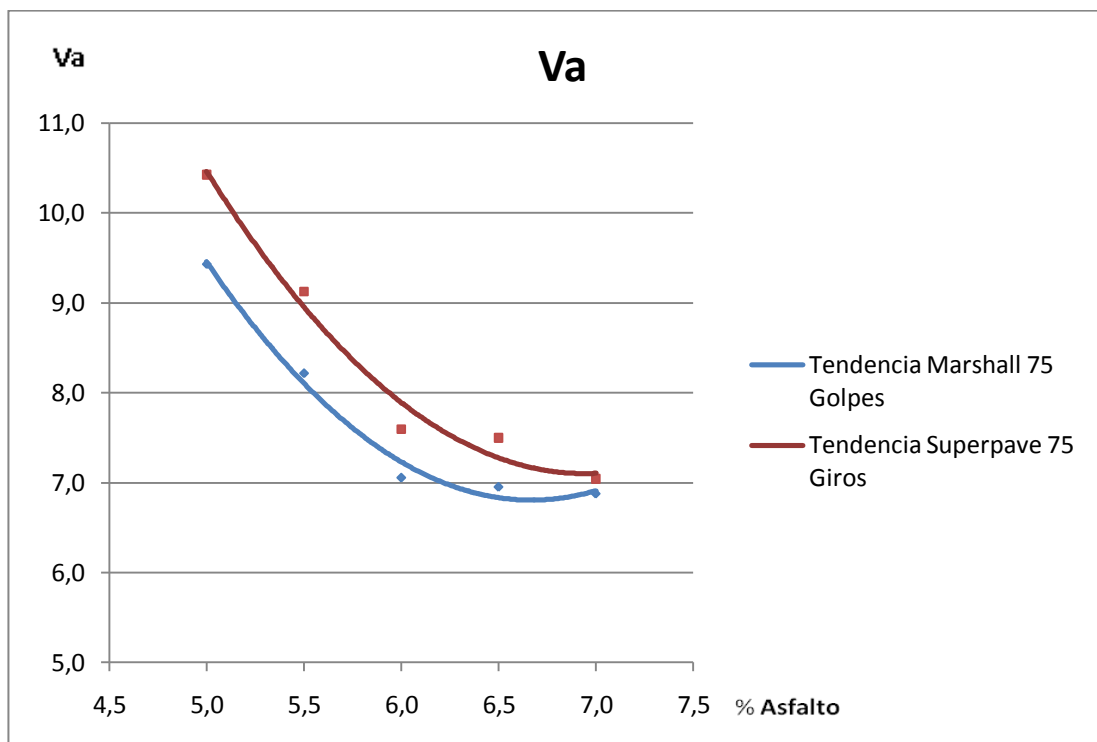


Fig. 5.5 Comparación Va

5.1.6. Porcentaje de vacíos (Va) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 100 Giros

Tabla 5.5 Comparación Va

Bitumen %	Va	
	Marshall 75 Golpes	Superpave (100 Giros)
5,0	9,4	10,14
5,5	8,2	8,53
6,0	7,1	6,82
6,5	7,0	6,61
7,0	6,9	6,26

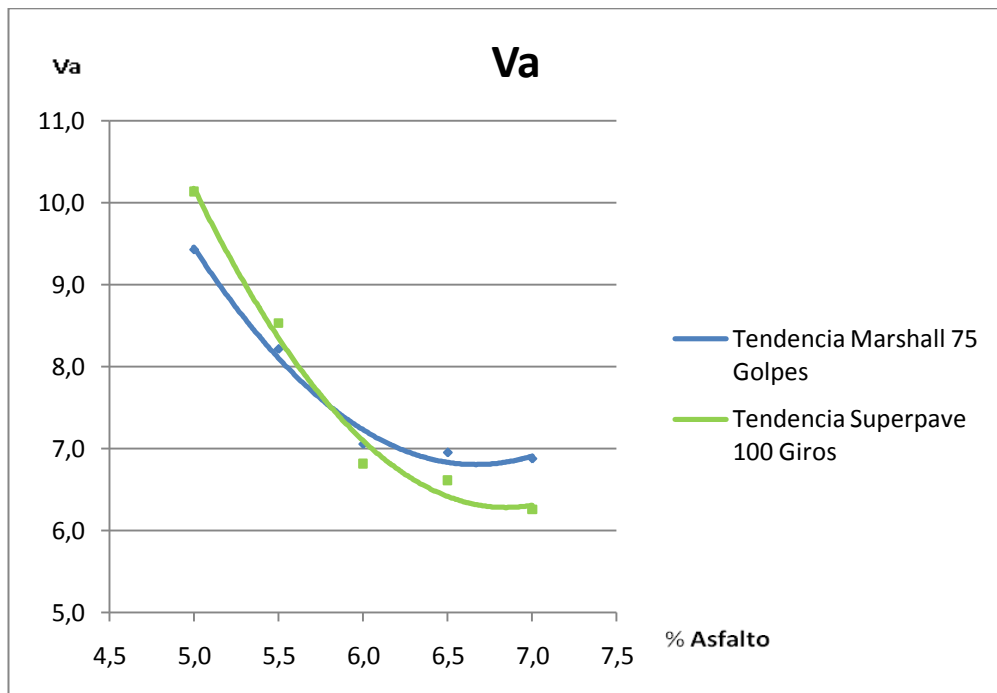


Fig. 5.6 Comparación Va

5.1.7. Porcentaje de vacios (Va) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 120 Giros

Tabla 5.6 Comparación Va

Bitumen %	Va	
	Marshall 75 Golpes	Superpave (120 Giros)
5,0	9,4	9,68
5,5	8,2	8,63
6,0	7,1	7,24
6,5	7,0	7,32
7,0	6,9	7,05

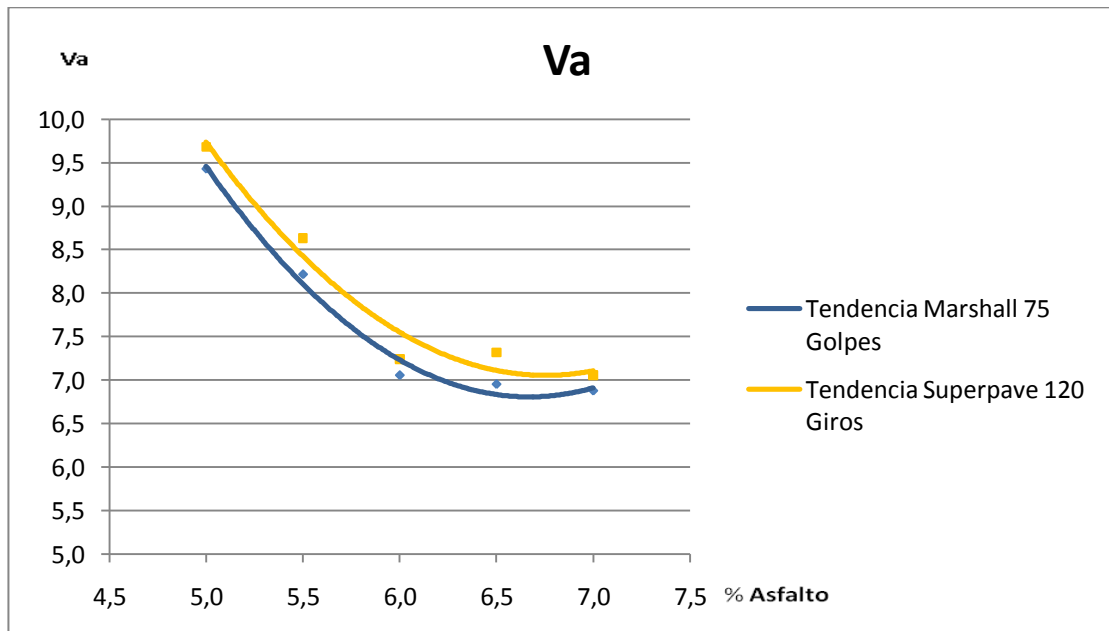


Fig. 5.7 Comparación Va

5.1.8. Análisis del porcentaje de vacíos de las mezclas compactadas (Va)

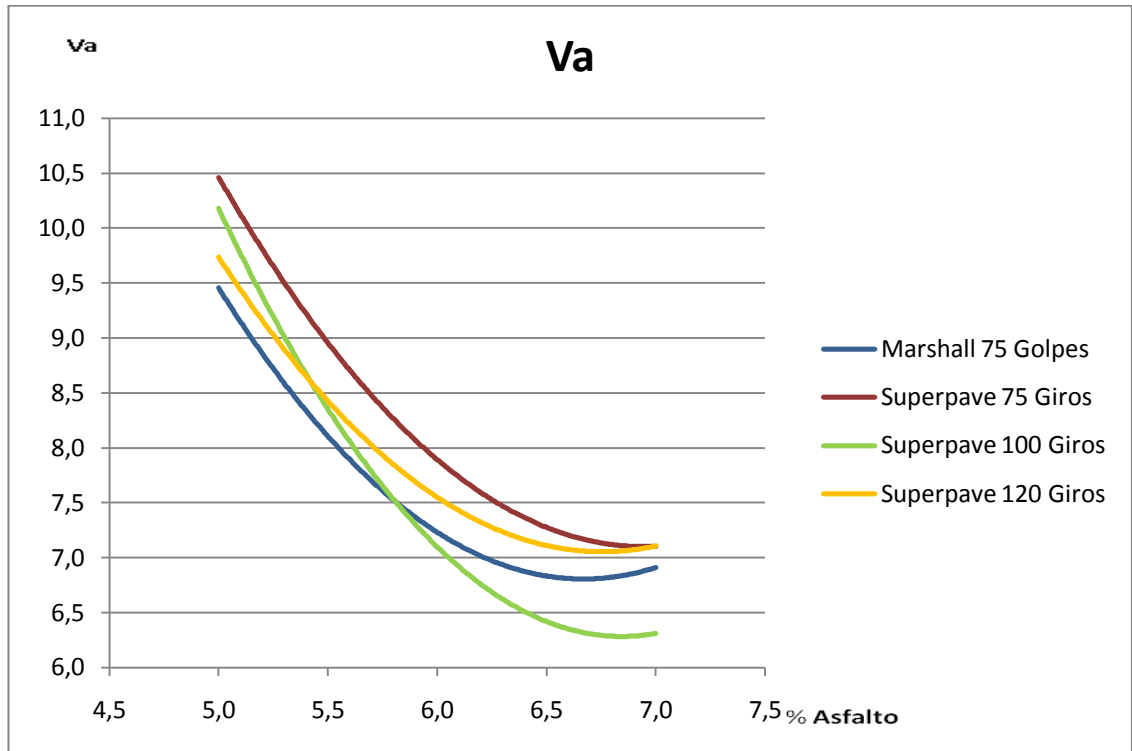


Fig. 5.8 Comparación Va

En la gráfica se puede apreciar, que el Va de Marshall se mantiene por debajo de los valores Va de Superpave, a excepción del correspondiente a 100 giros, donde a partir de un determinado porcentaje de asfalto el Va de Superpave se pone por debajo del Va de Marshall mientras aumenta el porcentaje de asfalto.

5.1.9. Volumen de vacios en el agregado mineral (VAM) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 75 Giros

Tabla 5.7 Comparación VAM

Bitumen %	VAM	
	Marshall 75 Golpes	Superpave (75 Giros)
5,0	18,5	20,10
5,5	18,4	19,90
6,0	18,3	19,52
6,5	19,2	20,39
7,0	20,1	20,95

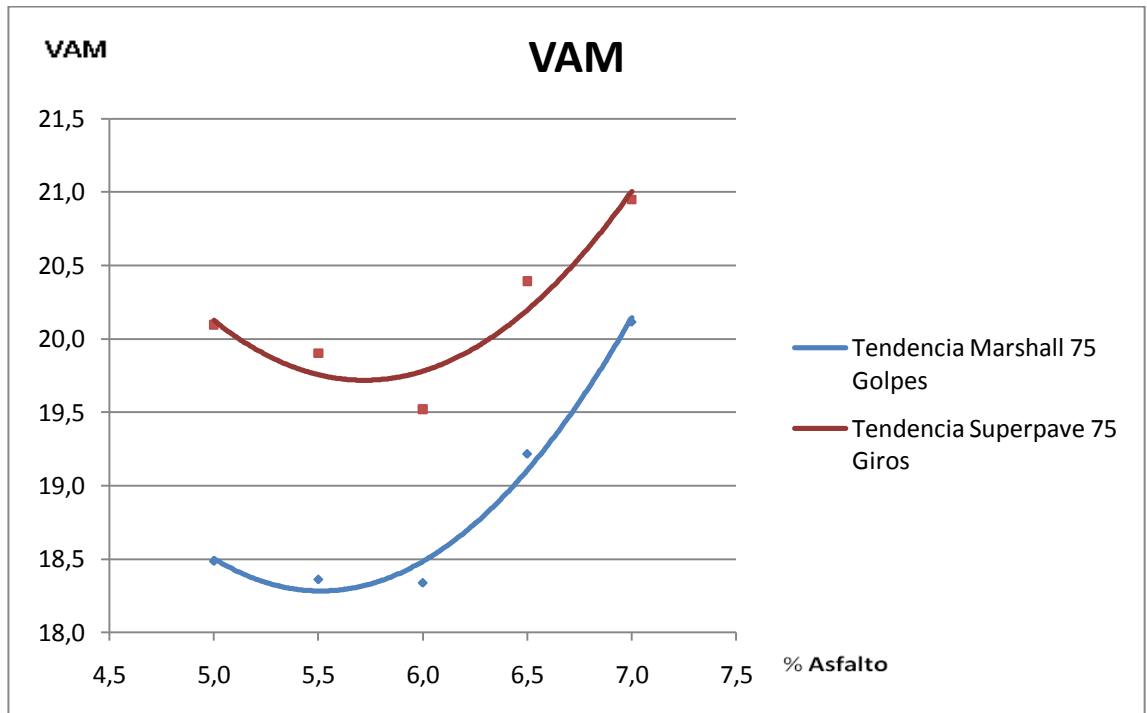


Fig. 5.9 Comparación VAM

5.1.10. Volumen de vacios en el agregado mineral (VAM) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 100 Giros

Tabla 5.8 Comparación VAM

Bitumen %	VAM	
	Marshall 75 Golpes	Superpave (100 Giros)
5,0	18,5	19,84
5,5	18,4	19,38
6,0	18,3	18,84
6,5	19,2	19,63
7,0	20,1	20,28

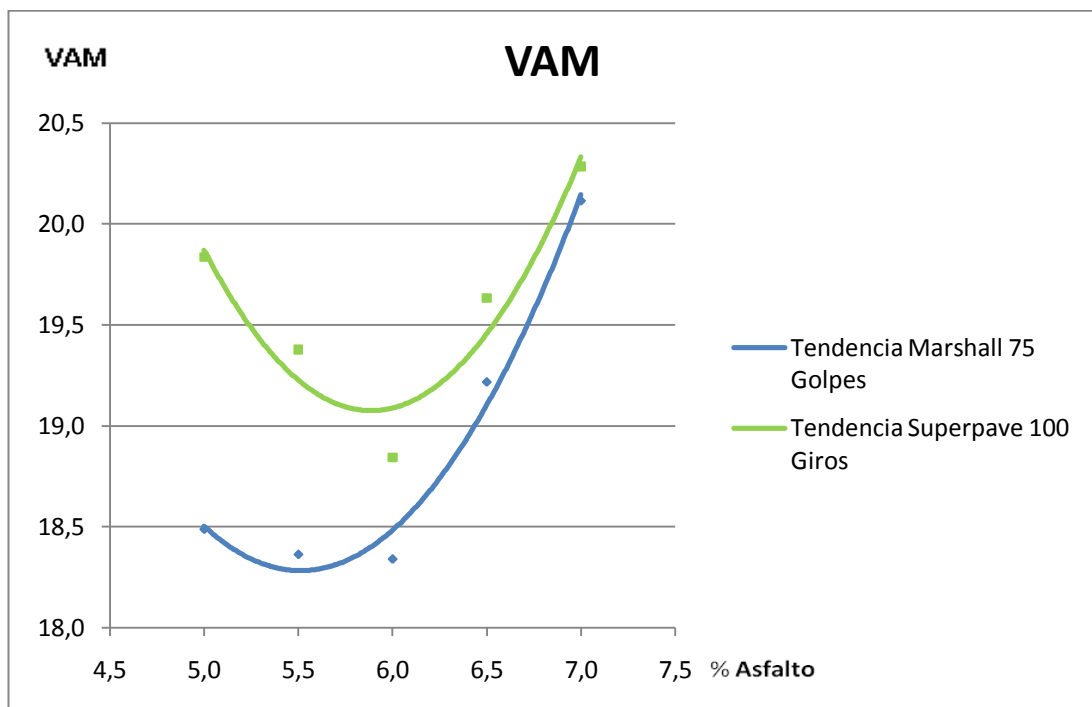


Fig. 5.10 Comparación VAM

5.1.11. Volumen de vacios en el agregado mineral (VAM) Marshall 75 Golpes vs. Superpave 120 Giros

Tabla 5.9 Comparación VAM

Bitumen %	VAM	
	Marshall 75 Golpes	Superpave (120 Giros)
5,0	18,5	19,43
5,5	18,4	19,47
6,0	18,3	19,21
6,5	19,2	20,24
7,0	20,1	20,96

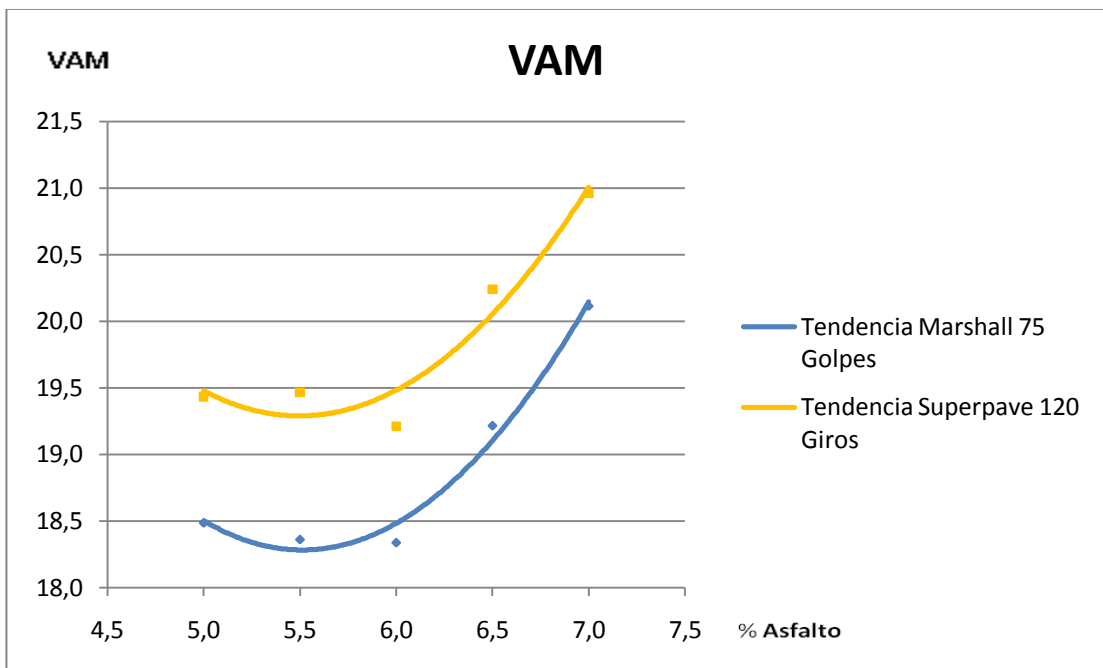


Fig. 5.11 Comparación VAM

5.1.12. Análisis de volumen de vacíos en el agregado mineral de las mezclas (VAM)

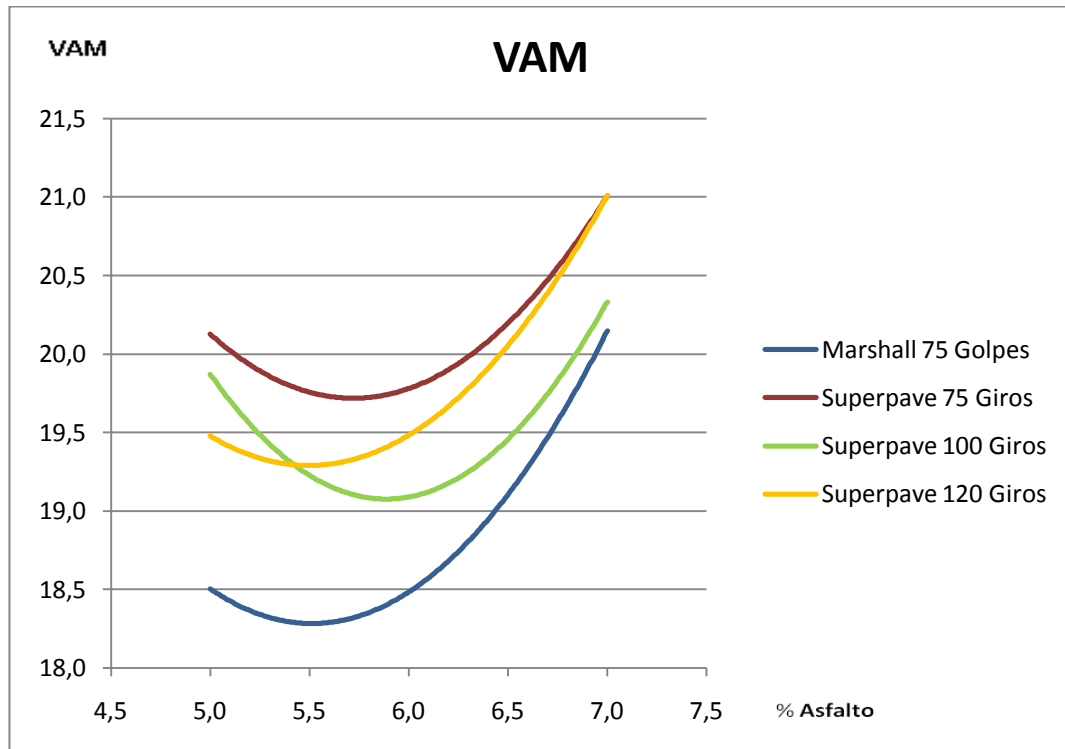


Fig. 5.12 Comparación VAM

Se puede apreciar en la gráfica, que el valor de VAM de Marshall es siempre menor a los VAM de Superpave, aunque la tendencia nos dice que ese rango disminuye considerablemente a medida que aumenta el porcentaje de asfalto de la mezcla, en especial en el VAM de Superpave correspondiente a 100 giros.

5.2.Comparación de Módulos de Rigidez entre briquetas Marshall y Superpave

5.2.1.Módulos de Rigidez Marshall 75 Golpes vs. Superpave 75 Giros

Tabla 5.10 Comparación Módulos de rigidez

Bitumen %	Módulo de Rigidez	
	Marshall 75 Golpes	Superpave 75 Giros
5	1836	2192
5,5	2114	2550
6	2184	2684
6,5	2020	2630
7	1854	2528

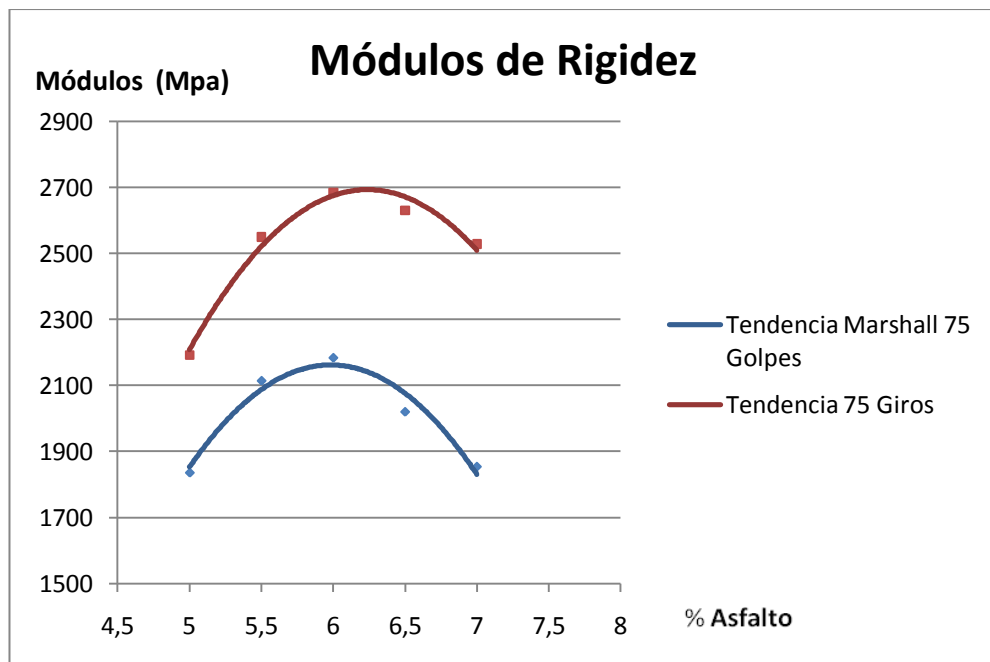


Fig. 5.13 Comparación Módulos de rigidez

5.2.2. Módulos de Rigidez Marshall 75 Golpes vs. Superpave 100 Giros

Tabla 5.11 Comparación Módulos de Rigidez

Bitumen	Módulo de Rigidez	
	Marshall 75 Golpes	Superpave 100 Giros
5	1836	2331
5,5	2114	2756
6	2184	2880
6,5	2020	2811
7	1854	2712

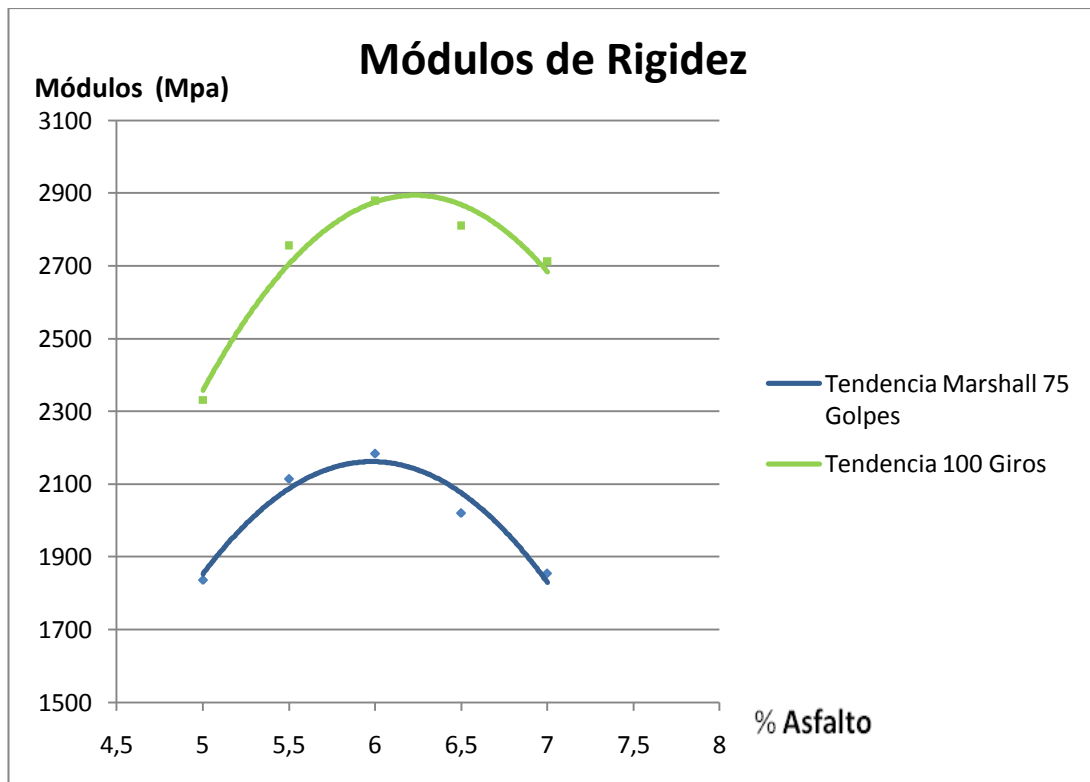


Fig. 5.14 Comparación Módulos de Rigidez

5.2.3. Módulos de Rigidez Marshall 75 Golpes vs. Superpave 120 Giros

Tabla 5.12 Comparación Módulos de Rigidez

Bitumen %	Módulo de Rigidez	
	Marshall 75 Golpes	Superpave 120 Giros
5	1836	2450
5,5	2114	2850
6	2184	3020
6,5	2020	2987
7	1854	2780

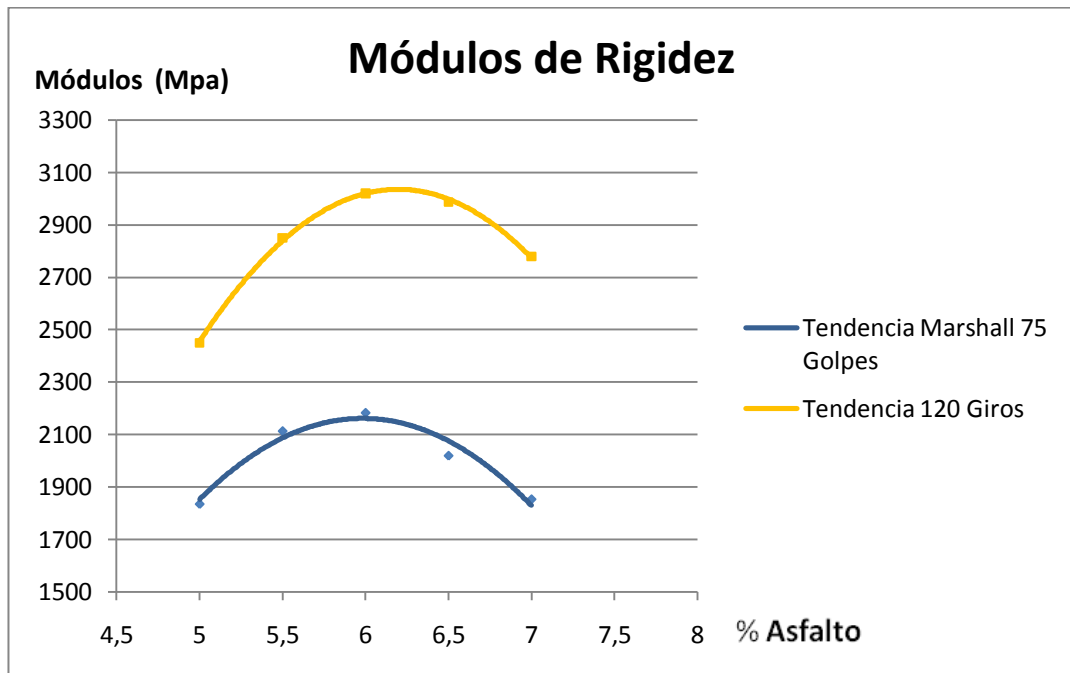


Fig. 5.15 Comparación Módulos de Rigidez

5.2.4. Análisis de los Módulos de Rigidez entre briquetas Marshall y Superpave

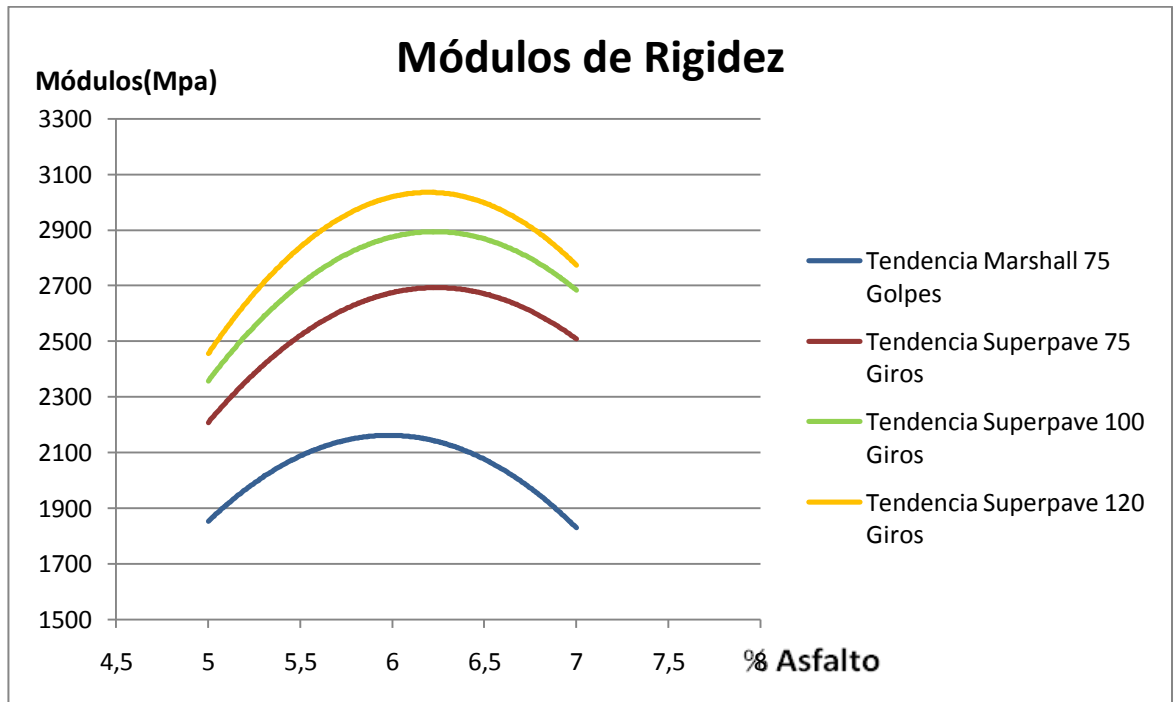


Fig. 5.16 Comparación Módulos de Rigidez

En la gráfica se puede observar, que los módulos de rigidez del Marshall son siempre inferiores a los del Superpave. Además, que los módulos de rigidez de Superpave van en aumento a medida que aumenta el número de giros.

5.3. Factor de Corrección

El factor de corrección, es útil para realizar una correlación entre los resultados de los módulos de rigidez obtenidos en cada método de diseño Marshall y Superpave, para que en caso de requerir realizar un ensayo de tracción indirecta, nuestra investigación ayude a escoger un método de diseño, que esté de acuerdo a las circunstancias requeridas, y establecer posibles resultados que se pueden obtener si se hubiere utilizado otro método de diseño, manteniendo las características de los agregados y asfalto utilizados.

Los módulos de rigidez comparados, son el de las briquetas Marshall compactadas a 75 Golpes y las briquetas Superpave compactadas a 100 Giros; por cuanto, esta es la energía de compactación de diseño para cada mezcla.

Tabla 5.13 Factor de corrección

Bitumen %	Módulo de Rigidez		Factor de corrección
	Marshall 75 Golpes	Superpave 100 Giros	Factor Parcial
5	1836	2331	1,3
5,5	2114	2756	1,3
6	2184	2880	1,3
6,5	2020	2811	1,4
7	1854	2712	1,5
PROMEDIO			1,35

CAPITULO VI

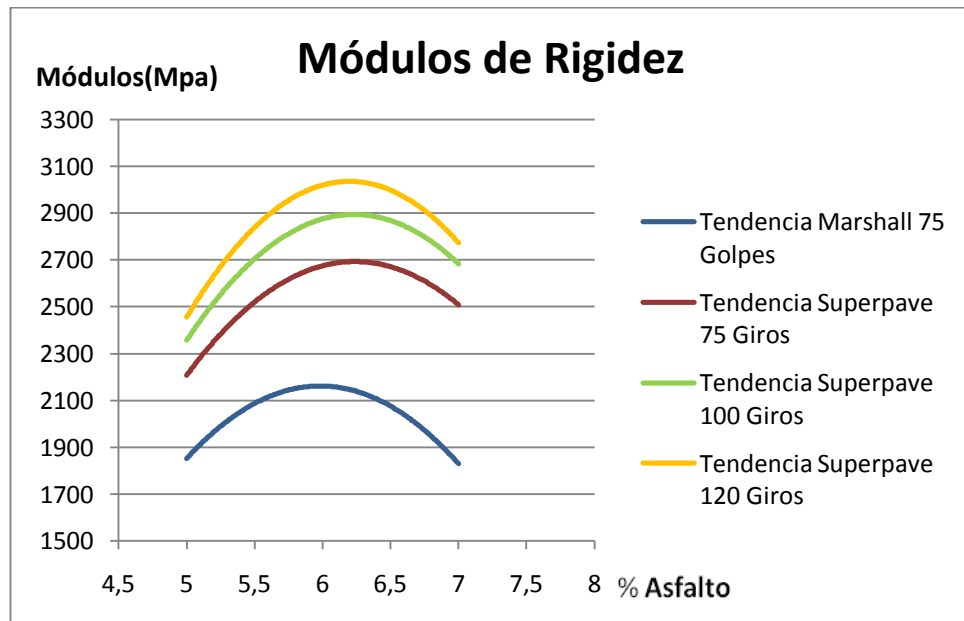
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de analizar los resultados en los ensayos a los diferentes diseños de mezclas asfálticas, fue posible establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones. La nueva alternativa de compactación para mezclas asfálticas, fue evaluada mediante ensayos prácticos en el laboratorio. Se hará referencia especialmente al estado de todos los ensayos y aquellos datos relevantes que merezcan ser comentados.

6.1.Conclusión General

- Los valores de módulo de rigidez obtenidos de las muestras elaboradas por el método Superpave, superan en gran medida a los obtenidos de las probetas Marshall.

Bitumen	Módulo de Rigidez (Mpa.)			
	Marshall 75 Golpes	Superpave 75 Giros	Superpave 100 Giros	Superpave 120 Giros
5	1836	2192	2331	2450
5,5	2114	2550	2756	2850
6	2184	2684	2880	3020
6,5	2020	2630	2811	2987
7	1854	2528	2712	2780



En la gráfica anterior, se puede apreciar en las líneas de tendencia, que a medida que se aumenta el número de giros en Superpave, los módulos aumentan aproximadamente 1%, también se ve claramente que los módulos tienden a ser más altos cerca del porcentaje óptimo de asfalto. Esto quiere decir, que si las mezclas tienen poco o demasiado asfalto pierden resistencia a la tracción. Era de esperarse que las mezclas asfálticas de los dos métodos trabajen mejor con su porcentaje óptimo de asfalto.

- El ensayo de tracción indirecta, representa los esfuerzos de tracción que se producen en una mezcla en servicio, y estos esfuerzos son los responsables de los agrietamientos. Por lo tanto, es evidente que una mezcla elaborada con la metodología Superpave presenta mayor resistencia al agrietamiento por esfuerzos de tracción que las elaboradas por la metodología tradicional Marshall.
- El factor de corrección, puede llegar a ser una herramienta muy útil a la hora de escoger un método de diseño de mezcla asfáltica. Si se

escoge trabajar con el método de diseño Marshall, con el factor de corrección podremos darnos cuenta en que rangos de módulos de rigidez se estaría trabajando aproximadamente si se hubiere escogido el método Superpave y viceversa.

6.2.Conclusiones Específicas

- Mediante los ensayos para el control de calidad realizados al agregado fino y grueso, se pudo concluir que la mina de Guayllabamba cumple con casi todas las especificaciones técnicas, para las normas Ecuatorianas (MOP-001-F-2002) y para las normas internacionales (ASPHALT INSTITUTE, ASTM). Los ensayos para el agregado grueso: granulometría, gravedad específica, abrasión, determinación de deletéreos, partículas alargadas aplanadas y angularidad del agregado, mantienen los rangos determinados por las normas, excepto el ensayo de partículas alargadas y aplanadas. De igual manera los ensayo del agregado fino: granulometría, gravedad específica, equivalente de arena y determinación de deletéreos cumplen satisfactoriamente con los rangos especificados en cada norma. (Ver Capitulo 4, Tabla 4.13).
- Los ensayos al cemento asfáltico: gravedad específica, penetración, ductilidad, viscosidad, punto de reblandecimiento, punto de inflamación y combustión, cumple con todas las especificaciones técnicas, para las normas Ecuatorianas (MOP-001-F-2002) y para las normas internacionales (ASPHALT INSTITUTE, ASTM). (Ver Capitulo 4, Tabla 4.20).
- En el diseño de mezclas asfálticas Marshall y Superpave se tuvieron problemas al momento de escoger el porcentaje óptimo de asfalto, ya

que no se cumplió con la norma de volumen de vacíos (%Va). Para el método Superpave el volumen de vacíos es el parámetro más importante a la hora de escoger el porcentaje óptimo de asfalto, porque se parte de este para poder analizar los demás parámetros. Este problema se dio porque en la granulometría del material hay escasos de agregado fino, y esto produjo menores densidades a las mezclas asfálticas compactadas. Esto quiere decir que no importa cuál sea el método de compactación, la mezcla asfáltica está íntimamente relacionada con la granulometría del material.

- En el método Marshall a comparación del Superpave, el tipo de ligante asfáltico influye determinantemente en la selección del contenido óptimo, al intervenir otros parámetros en el criterio de selección a parte de los volumétricos, como son la estabilidad y el flujo, pruebas que se realizan a 60°C independientemente del tipo de ligante que se utilice.
- Al ensayarse en el laboratorio las briquetas Marshall y Superpave, se verificó que el material de Guayllabamba cuando es mezclado con cemento asfáltico se produce una mezcla muy adherente, debido a que el material posee una forma irregular que mejora la adherencia ya que el material de Guayllabamba proviene de la trituración del mantos rocosos. Esto se lo pudo comprobar con el ensayo de angularidad del agregado.
- En el análisis volumétrico de las mezclas asfálticas, se observa que la compactación manual con el martillo de impacto del método Marshall produce mayores densidades que las compactadas con el compactador giratorio del método Superpave. Los vacíos de aire en la mezclas Superpave a 75 Giros son mayores en un 0,7 % aproximadamente de las mezclas Marshall, y las mezclas a 120 Giros son mayores en un 0.3%, pero el porcentaje de vacíos de las

briquetas compactadas a 100 Giros (Ndiseño) con más de 6% de asfalto son menores que las del Marshall. Esto quiere decir que las muestras Superpave compactadas con el número de giros de diseño, son más densas que las del Marshall a medida que aumenta el porcentaje de asfalto. (Ver Capítulo 5, Tablas 5.8)

- Al haber más espacio intergranular en las mezclas elaboradas con el método Superpave, era de esperarse obtener valores más altos de VAM para estas probetas, ya que existe más espacio disponible para acomodar asfalto y aire en la mezcla. (Ver Capítulo 5, Tablas 5.12).
- Se podría pensar que las probetas elaboradas por el método de compactación Marshall demuestran un mejor desempeño a nivel volumétrico. Sin embargo, la validez de esta comparación es bastante cuestionable debido principalmente a un aspecto propio de los métodos de diseño, como es el diámetro de las probetas. (Ver Capítulo 2, Fig. 2.1).
- Como la compactación giratoria se asemeja más a lo que pasa en campo, se puede concluir que los resultados que se obtienen a nivel volumétrico de un diseño de mezcla asfáltica Marshall son elevados.
- El compactador giratorio, tiene mayor versatilidad que el martillo Marshall para elaborar probetas asfálticas con diferentes relaciones de altura-diámetro, lo que permite realizar más pruebas mecánicas.
- La metodología Superpave ha demostrado tener importantes avances en lo que se refiere a la selección del ligante asfáltico, las mezcla de agregados, y la compactación de la mezcla asfáltica. Por otro lado, una ventaja que puede mencionarse al método Marshall, es que el equipamiento requerido no es costoso y es muy portable, y así se presta a operaciones de control de calidad en campo.

6.1. Recomendaciones

- Investigaciones en nuestro entorno, demuestran que el material de Guayllabamba posee buenas propiedades mecánicas para la elaboración de pavimentos en Quito y sus alrededores, pero también se utiliza material proveniente de minas como Pomasqui, Pintag, Lloa y Pifo, por lo que se necesita realizar un estudio más exhaustivo con respecto a los materiales pétreos anteriormente descritos para determinar sus características y así compararlos con los resultados de esta investigación.
- Se tiene que tomar muy en cuenta la temperatura de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica, debido a que una ligera variación de la temperatura cambia las condiciones de mezclado y por lo tanto cambian las propiedades de la mezcla. El método Superpave, en este tema es muy estricto y por eso existe el ensayo del viscosímetro rotacional donde se puede visualizar la temperatura de mezclado y de compactación.
- Si en el Ecuador ya se empieza a trabajar con la nueva alternativa de diseño de mezclas asfálticas Superpave, se recomienda llevar una evaluación y seguimiento cuidadoso sobre el comportamiento de las obras de pavimentación. De esta manera se puede tener más experiencia que permita tomar decisiones acertadas en la ejecución de la obra.
- Para obtener los resultados que brinda esta investigación, se deben utilizar materiales que posean las mismas características físico-químicas y reológicas, que las utilizadas en esta investigación. Se debe tomar muy en cuenta que si se cambian las propiedades de los materiales utilizados, o se introducen materiales de otras minas, los resultados varían.

- Es muy importante que las universidades Ecuatorianas inicien un trabajo de investigación fuerte sobre la metodología Superpave, y estudien con cuidado la necesidad de extraer lo más significativo de ella, promoviendo el uso de toda o alguna de las partes de la normativa propuesta por el programa SHRP (Strategic Highway Research Program).

BIBLIOGRAFÍA

- Ing. Gustavo Yáñez C., Manual Visualizado de ensayos para laboratorio de pavimentos.
- Ing. Lauro Armando Lara C., Manual Visualizado de ensayos para materiales de construcción,
- Norma MOP-001-f-2002. Tomo I y II, Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes.
- Norma Superpave Asphalt Institute, Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave.
- Norma Superpave Asphalt Institute, Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave.
- Normas ASTM (American Society for Testing and Materials)
- Normativa Británica, BS EN12697-26:2004 (BRITISH STANDARD- Bituminous mixtures- Test methods for hot mix asphalt- Part 26- Annex C).
- http://www.asphaltinstitute.org/upload/Superpave_Future_HMA_Pavements.pdf
- http://pavementinteractive.org/index.php?title=Superpave_Mix_Design
- <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt271.pdf>
- <http://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/disen0-asfalto.pdf>
- <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/750/75061105.pdf>

ANEXOS

ANEXO I

REPORTE DEL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA EN BRIQUETAS COMPACTADAS POR EL METODO MARSHALL

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: T1

Date of print-out: 31:05:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 1
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 102.12 mm
 Specimen thickness: 69.92 mm
 Bulk density: 2102 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

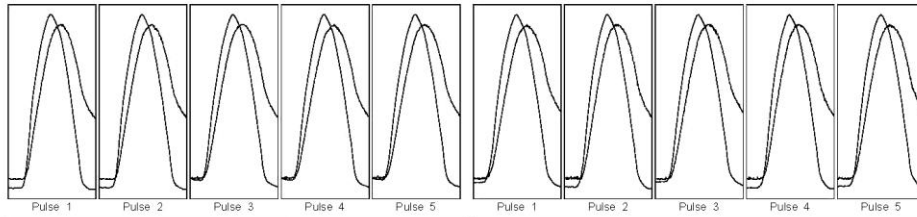
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	31:May:2010 18:18	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA núcleo
Method of manufacture of the bituminous mixture	Laboratorio
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.18	1.23	1.21	
Horizontal stress (kPa)	0.60	0.60	0.63	0.61
Load-area factor	0.60	0.60	0.63	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.8	5.4	5.2
Load (rise) time (ms)	124	124.0	135.0	128.6
Measured stiffness modulus (MPa)	2009	2169	2076	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2008	2194	2089	

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	127.5
Horizontal deformation (µm) :	5.2
Horizontal deformation (%) :	0.0051
Measured stiffness modulus (MPa) :	2070
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2080

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (0.9)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	31:05:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: T2

Date of print-out: 31:05:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 2
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 102.18 mm
 Specimen thickness: 69.3 mm
 Bulk density: 2102 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

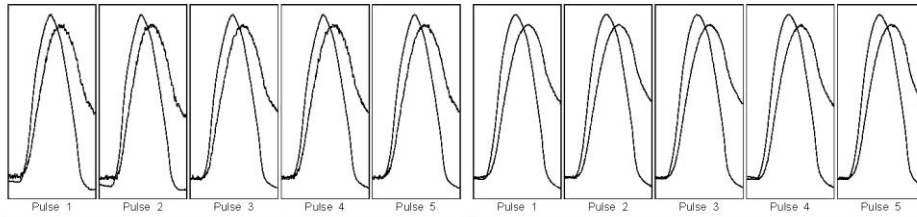
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	31:May:2010 18:28	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA núcleo
Method of manufacture of the bituminous mixture	Laboratorio
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	0.86	0.90	0.89	
Horizontal stress (kPa)	77.4	81.3	79.7	
Load-area factor	0.60	0.58	0.62	0.60
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.4	5.1	4.9
Load (rise) time (ms)	124	121.0	128.0	124.4
Measured stiffness modulus (MPa)	1587	1734	1634	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	1590	1724	1631	

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	124.9
Horizontal deformation (µm) :	5.2
Horizontal deformation (%) :	0.0051
Measured stiffness modulus (MPa) :	1556
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	1554

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (10)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	31:05:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t3

Date of print-out: 31:05:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 3
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 102.15 mm
 Specimen thickness: 69.15 mm
 Bulk density: 2102 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

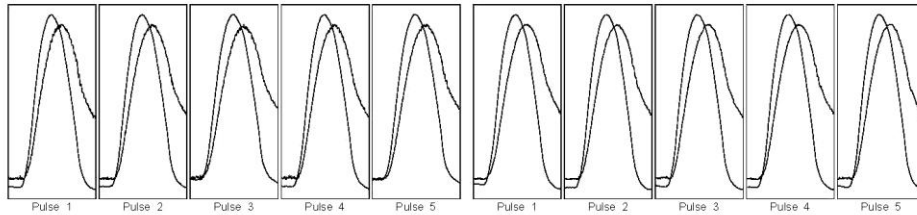
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	31:May:2010 18:37	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA núcleo
Method of manufacture of the bituminous mixture	Laboratorio
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		0.99	1.06	1.03
Horizontal stress (kPa)		89.1	95.6	92.5
Load-area factor	0.60	0.58	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.7	5.4	5.1
Load (rise) time (ms)	124	121.0	127.0	123.8
Measured stiffness modulus (MPa)		1748	1872	1819
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1760	1863	1823

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	123.5
Horizontal deformation (µm) :	5.1
Horizontal deformation (%) :	0.0050
Measured stiffness modulus (MPa) :	1866
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	1873

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (5)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	31:05:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t4

Date of print-out: 31:05:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 4
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 101.72 mm
 Specimen thickness: 69.08 mm
 Bulk density: 2117 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

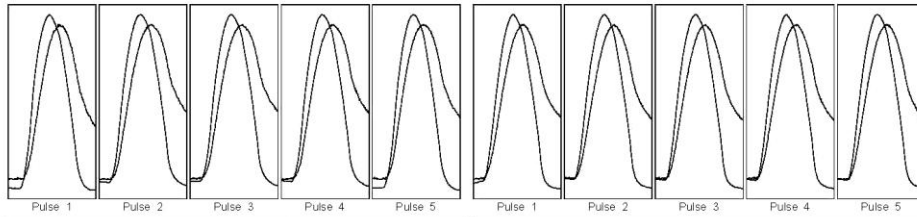
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	31:May:2010 18:45	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA núcleo
Method of manufacture of the bituminous mixture	Laboratorio
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.36	1.41	1.39	
Horizontal stress (kPa)	123.0	128.0	125.8	
Load-area factor	0.60	0.61	0.63	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.1	5.2	4.9
Load (rise) time (ms)	124	117.0	123.0	120.2
Measured stiffness modulus (MPa)	2423	2960	2582	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2435	2978	2599	

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.18	1.22	1.19	
Horizontal stress (kPa)	106.8	110.5	108.2	
Load-area factor	0.60	0.60	0.61	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	5.1	5.1	5.1
Load (rise) time (ms)	124	122.0	128.0	124.6
Measured stiffness modulus (MPa)	2082	2154	2107	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2084	2155	2113	

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	122.4
Horizontal deformation (µm) :	5.0
Horizontal deformation (%) :	0.0049
Measured stiffness modulus (MPa) :	2345
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2356

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (21)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	31:05:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t5

Date of print-out: 31:05:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 5
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 102.01 mm
 Specimen thickness: 68.43 mm
 Bulk density: 2117 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

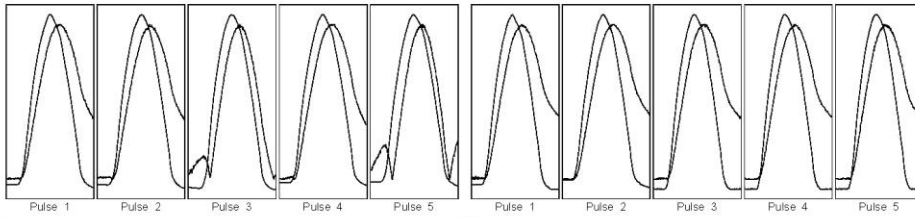
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	31:May:2010 18:56	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA núcleo
Method of manufacture of the bituminous mixture	Laboratorio
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.23	1.31	1.28	
Horizontal stress (kPa)	112.4	119.1	115.3	
Load-area factor	0.60	0.61	0.63	0.62
Horizontal deformation (µm)	5.0	3.4	5.2	4.5
Load (rise) time (ms)	124	124.0	128.0	126.6
Measured stiffness modulus (MPa)	2225	3462	2641	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2261	3493	2667	

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.19	1.22	1.21	
Horizontal stress (kPa)	108.3	111.5	110.3	
Load-area factor	0.60	0.60	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	5.2	5.6	5.3
Load (rise) time (ms)	124	120.0	129.0	125.2
Measured stiffness modulus (MPa)	1972	2105	2051	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	1973	2127	2064	

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	125.9
Horizontal deformation (µm) :	4.9
Horizontal deformation (%) :	0.0048
Measured stiffness modulus (MPa) :	2346
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2366

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (25)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	31:05:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t6

Date of print-out: 31:05:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 6
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 102.6 mm
 Specimen thickness: 68.66 mm
 Bulk density: 2117 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

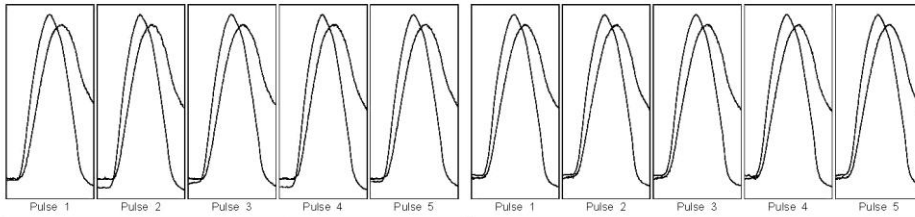
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	31:May:2010 19:05	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA núcleo
Method of manufacture of the bituminous mixture	Laboratorio
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.01	1.05	1.03	
Horizontal stress (kPa)	91.6	95.2	93.0	
Load-area factor	0.60	0.60	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	5.0	5.4	5.3
Load (rise) time (ms)	124	124.0	135.0	128.4
Measured stiffness modulus (MPa)		1706	1834	1767
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1706	1842	1772

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	0.81	0.84	0.83	
Horizontal stress (kPa)	73.4	75.7	74.8	
Load-area factor	0.60	0.61	0.63	0.62
Horizontal deformation (µm)	5.0	5.1	5.2	5.1
Load (rise) time (ms)	124	123.0	128.0	125.2
Measured stiffness modulus (MPa)		1442	1466	1457
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1460	1475	1467

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	126.8
Horizontal deformation (µm) :	5.2
Horizontal deformation (%) :	0.0051
Measured stiffness modulus (MPa) :	1612
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	1620

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (19)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	31:05:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t2-1

Date of print-out: 02:06:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 1
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 101.56 mm
 Specimen thickness: 68.39 mm
 Bulk density: 2128 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

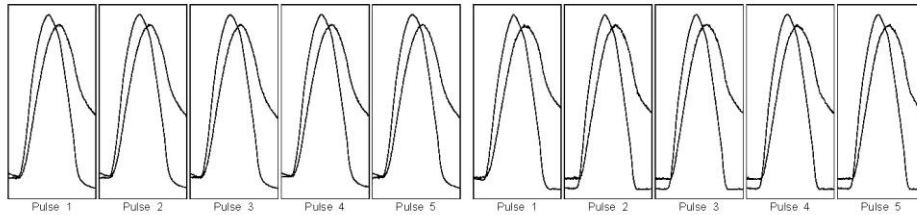
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	02:Jun:2010 11:42	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.05	1.06	1.05	
Horizontal stress (kPa)	0.60	0.61	0.62	0.62
Load-area factor	0.60	0.61	0.62	0.62
Horizontal deformation (µm)	5.0	5.2	5.3	5.2
Load (rise) time (ms)	124	125.0	128.0	126.2
Measured stiffness modulus (MPa)		1807	1842	1826
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1816	1860	1839

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	0.89	0.93	0.90	
Horizontal stress (kPa)	0.60	0.61	0.63	0.62
Load-area factor	0.60	0.61	0.63	0.62
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.5	5.0	4.6
Load (rise) time (ms)	124	120.0	124.0	121.4
Measured stiffness modulus (MPa)		1688	1806	1770
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1693	1821	1784

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	123.8
Horizontal deformation (µm) :	4.9
Horizontal deformation (%) :	0.0049
Measured stiffness modulus (MPa) :	1798
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	1812

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (3)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	02:06:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t2-2

Date of print-out: 02:06:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 2
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 101.72 mm
 Specimen thickness: 68.99 mm
 Bulk density: 2128 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

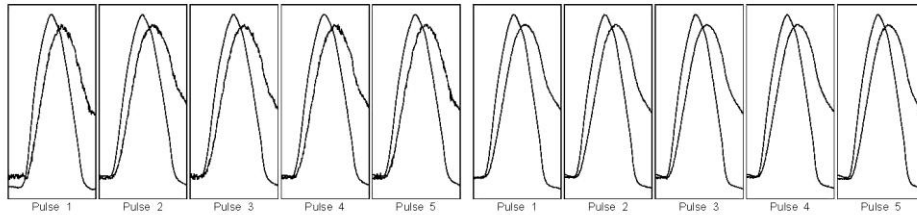
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	02:Jun:2010 11:51	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	0.98	1.04	1.01	
Horizontal stress (kPa)	88.6	94.1	92.1	
Load-area factor	0.60	0.59	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.4	5.0	4.9
Load (rise) time (ms)	124	126.0	136.0	130.8
Measured stiffness modulus (MPa)		1815	2004	1867
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1817	2018	1871

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	0.99	1.03	1.01	
Horizontal stress (kPa)	89.9	93.7	91.3	
Load-area factor	0.60	0.59	0.60	0.60
Horizontal deformation (µm)	5.0	5.2	5.5	5.4
Load (rise) time (ms)	124	122.0	127.0	124.4
Measured stiffness modulus (MPa)		1640	1782	1690
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1635	1780	1687

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	127.6
Horizontal deformation (µm) :	5.1
Horizontal deformation (%) :	0.0050
Measured stiffness modulus (MPa) :	1779
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	1779

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (10)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	02:06:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t2-3

Address of testing laboratory

Date of print-out: 02:06:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 3
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 101.72 mm
 Specimen thickness: 67.57 mm
 Bulk density: 2128 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

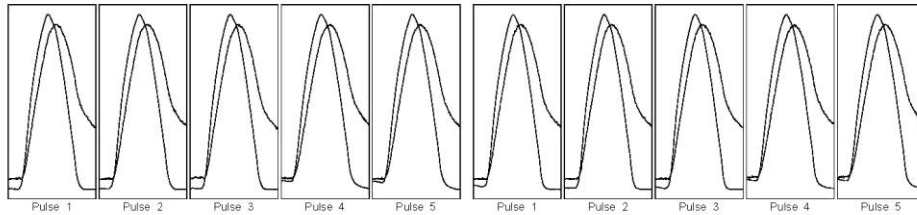
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	02:Jun:2010 11:58	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.45	1.49	1.47	1.39
Horizontal stress (kPa)	134.1	138.1	136.1	129.0
Load-area factor	0.60	0.60	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.6	5.0	4.8
Load (rise) time (ms)	124	119.0	124.0	121.4
Measured stiffness modulus (MPa)	2727	2862	2806	2608
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2744	2881	2820	2620

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	121.5
Horizontal deformation (µm) :	4.9
Horizontal deformation (%) :	0.0048
Measured stiffness modulus (MPa) :	2707
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2720

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (7)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	02:06:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t2-4

Date of print-out: 02:06:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 4
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 102.14 mm
 Specimen thickness: 67.54 mm
 Bulk density: 2125 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

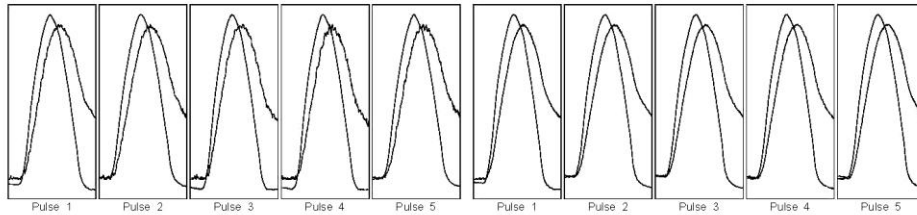
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	02:Jun:2010 12:07	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		1.16	1.22	1.19
Horizontal stress (kPa)		107.3	112.7	110.1
Load-area factor	0.60	0.59	0.61	0.60
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.7	5.4	5.1
Load (rise) time (ms)	124	120.0	128.0	125.0
Measured stiffness modulus (MPa)		2067	2262	2160
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2072	2269	2160

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		1.00	1.03	1.01
Horizontal stress (kPa)		92.6	94.7	93.6
Load-area factor	0.60	0.59	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.9	5.2	5.0
Load (rise) time (ms)	124	123.0	127.0	125.6
Measured stiffness modulus (MPa)		1814	1894	1850
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1827	1894	1855

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	125.3
Horizontal deformation (µm) :	5.1
Horizontal deformation (%) :	0.0050
Measured stiffness modulus (MPa) :	2005
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2008

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (15)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	02:06:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t2-5

Address of testing laboratory

Date of print-out: 02:06:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 5
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 101.63 mm
 Specimen thickness: 69.04 mm
 Bulk density: 2125 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

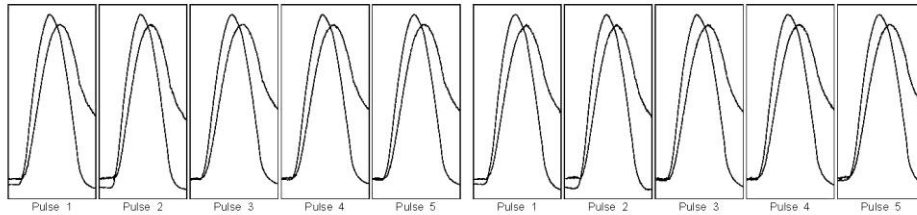
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	02:Jun:2010 12:14	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.23	1.31	1.28	
Horizontal stress (kPa)	111.8	118.6	115.9	
Load-area factor	0.60	0.58	0.60	0.59
Horizontal deformation (µm)	5.0	5.1	5.8	5.5
Load (rise) time (ms)	124	121.0	127.0	123.8
Measured stiffness modulus (MPa)		2034	2184	2087
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2030	2170	2081

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.04	1.10	1.07	
Horizontal stress (kPa)	94.0	99.8	97.0	
Load-area factor	0.60	0.59	0.62	0.60
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.8	5.4	5.2
Load (rise) time (ms)	124	118.0	126.0	122.8
Measured stiffness modulus (MPa)		1795	1918	1834
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1801	1912	1837

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	123.3
Horizontal deformation (µm) :	5.4
Horizontal deformation (%) :	0.0053
Measured stiffness modulus (MPa) :	1961
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	1959

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (12)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	02:06:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t2-6

Address of testing laboratory

Date of print-out: 02:06:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 6
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 101.8 mm
 Specimen thickness: 68.62 mm
 Bulk density: 2125 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

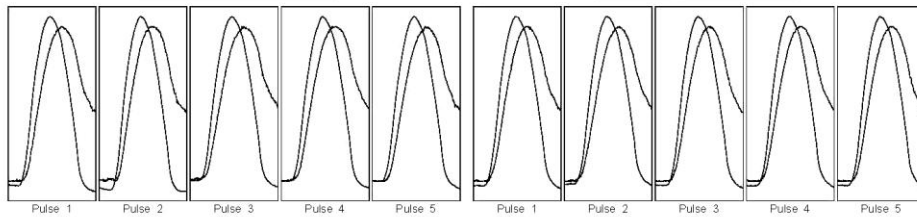
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	02:Jun:2010 12:21	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	0.93	1.01	0.98	
Horizontal stress (kPa)	85.1	91.6	89.3	
Load-area factor	0.60	0.60	0.63	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.6	5.5	5.2
Load (rise) time (ms)	124	119.0	127.0	123.6
Measured stiffness modulus (MPa)		1647	1826	1720
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1666	1823	1725

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	0.94	0.99	0.96	
Horizontal stress (kPa)	86.0	90.1	87.7	
Load-area factor	0.60	0.59	0.60	0.59
Horizontal deformation (µm)	5.0	5.0	5.3	5.1
Load (rise) time (ms)	124	119.0	124.0	121.6
Measured stiffness modulus (MPa)		1672	1711	1696
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1671	1708	1692

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	122.6
Horizontal deformation (µm) :	5.1
Horizontal deformation (%) :	0.0051
Measured stiffness modulus (MPa) :	1708
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	1709

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (2)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	02:06:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t3-1

Address of testing laboratory

Date of print-out: 04:06:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 1
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 101.75 mm
 Specimen thickness: 68.66 mm
 Bulk density: 2147 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

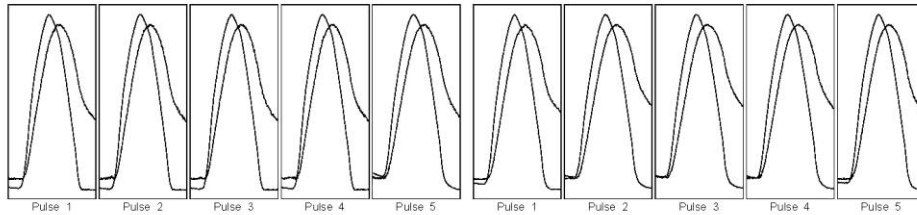
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	04:Jun:2010 15:31	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.00	1.02	1.00	1.05
Horizontal stress (kPa)	90.8	93.0	91.5	95.6
Load-area factor	0.60	0.60	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.8	5.5	5.0
Load (rise) time (ms)	124	118.0	126.0	121.2
Measured stiffness modulus (MPa)		1679	1869	1824
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1693	1871	1831

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	124.4
Horizontal deformation (µm) :	5.3
Horizontal deformation (%) :	0.0052
Measured stiffness modulus (MPa) :	1761
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	1765

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (7)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	04:06:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t3-2

Address of testing laboratory

Date of print-out: 04:06:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 2
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 102.17 mm
 Specimen thickness: 68.03 mm
 Bulk density: 2147 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

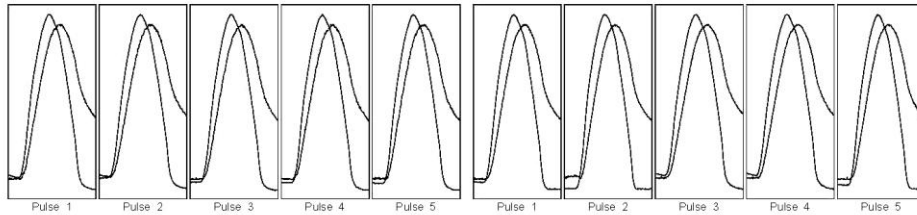
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	04:Jun:2010 15:39	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	0.93	0.95	0.94	
Horizontal stress (kPa)	84.9	87.2	86.3	
Load-area factor	0.60	0.60	0.61	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	5.1	5.4	5.2
Load (rise) time (ms)	124	123.0	129.0	127.0
Measured stiffness modulus (MPa)		1602	1699	1653
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1610	1702	1659

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	0.86	0.90	0.88	
Horizontal stress (kPa)	79.1	82.1	80.8	
Load-area factor	0.60	0.60	0.63	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.9	5.8	5.3
Load (rise) time (ms)	124	120.0	125.0	123.0
Measured stiffness modulus (MPa)		1413	1619	1510
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1418	1638	1518

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	125.0
Horizontal deformation (µm) :	5.3
Horizontal deformation (%) :	0.0052
Measured stiffness modulus (MPa) :	1582
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	1589

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (9)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	04:06:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: t3-3

Address of testing laboratory

Date of print-out: 04:06:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 3
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 101.64 mm
 Specimen thickness: 68.1 mm
 Bulk density: 2147 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 5 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

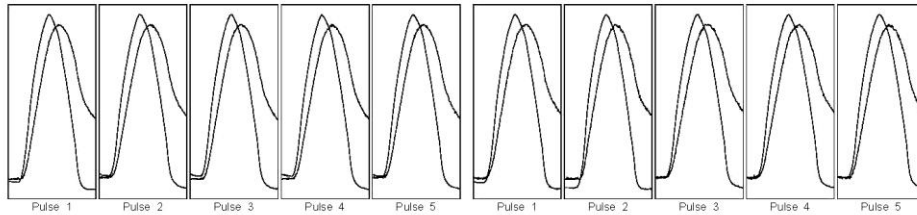
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	04:Jun:2010 15:46	Client name :	Tesis Montesinos / Reyes
-----------------------	-------------------	---------------	--------------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	Marshall
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	T 166

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	0.97	0.99	0.97	
Horizontal stress (kPa)	89.0	90.6	89.6	
Load-area factor	0.60	0.60	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	5.0	4.7	5.1	5.0
Load (rise) time (ms)	124	122.0	127.0	125.0
Measured stiffness modulus (MPa)		1757	1880	1790
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1756	1878	1795

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	125.0
Horizontal deformation (µm) :	5.2
Horizontal deformation (%) :	0.0051
Measured stiffness modulus (MPa) :	1707
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	1712

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (10)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	04:06:2010

ANEXOS II

REPORTE DEL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA EN BRIQUETAS COMPACTADAS POR EL METODO SUPERPAVE

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: SGC-1

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 1
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 149.9 mm
 Specimen thickness: 67 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

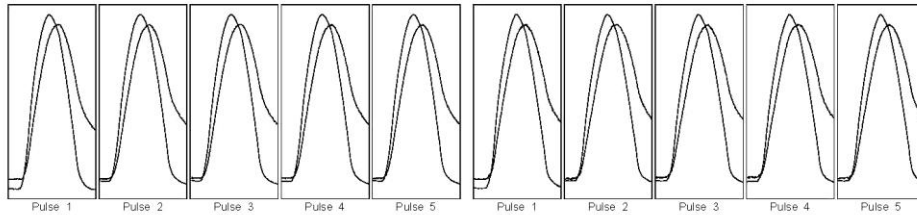
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	13:Jul:2010 11:30	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.70	1.75	1.74	
Horizontal stress (kPa)	107.5	111.2	110.2	
Load-area factor	0.60	0.61	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.8	7.4	7.2
Load (rise) time (ms)	124	122.0	125.0	124.2
Measured stiffness modulus (MPa)		2186	2322	2223
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2197	2347	2238

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.67	1.72	1.70	
Horizontal stress (kPa)	105.7	109.0	107.9	
Load-area factor	0.60	0.61	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	7.0	7.5	7.4
Load (rise) time (ms)	124	123.0	127.0	125.0
Measured stiffness modulus (MPa)		2104	2202	2134
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2115	2207	2146

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	124.6
Horizontal deformation (µm) :	7.3
Horizontal deformation (%) :	0.0049
Measured stiffness modulus (MPa) :	2179
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2192

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (4)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.

(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)

Serial No. of this test report: SGC-2

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 2
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 150.34 mm
 Specimen thickness: 66.86 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

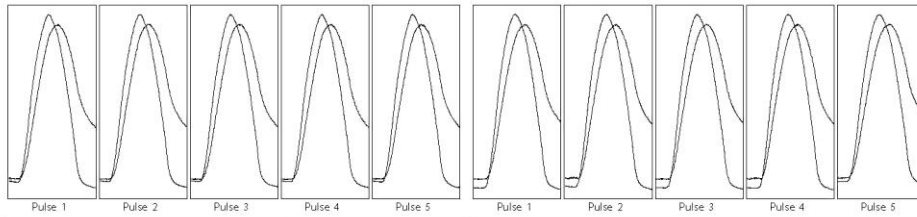
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador
 .
 .
 .

Date & time of test :	13:Jul:2010 12:39	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		1.44	1.46	1.45
Horizontal stress (kPa)		91.2	92.4	91.7
Load-area factor	0.60	0.59	0.61	0.60
Horizontal deformation (µm)	7.0	7.0	7.1	7.1
Load (rise) time (ms)	124	124.0	128.0	125.6
Measured stiffness modulus (MPa)		2483	2517	2504
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2481	2510	2501

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		1.34	1.40	1.36
Horizontal stress (kPa)		84.7	88.9	85.9
Load-area factor	0.60	0.60	0.61	0.60
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.9	7.7	7.2
Load (rise) time (ms)	124	121.0	128.0	125.0
Measured stiffness modulus (MPa)		2299	2385	2360
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2296	2388	2362

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	125.3
Horizontal deformation (µm) :	7.1
Horizontal deformation (%) :	0.0047
Measured stiffness modulus (MPa) :	2432
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2450

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (8)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: SGC-3

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 3
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 150.22 mm
 Specimen thickness: 66.62 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

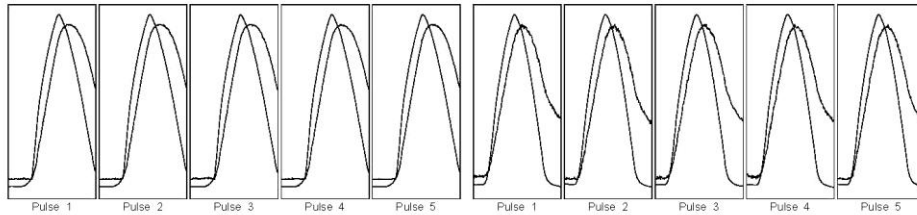
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	13:Jul:2010 12:45	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	2.24	2.26	2.25	
Horizontal stress (kPa)	142.7	144.0	143.4	
Load-area factor	0.60	0.63	0.63	0.63
Horizontal deformation (µm)	7.0	7.2	7.5	7.3
Load (rise) time (ms)	124	120.0	124.0	121.8
Measured stiffness modulus (MPa)		2787	2915	2866
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2823	2962	2912

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	2.24	2.27	2.26	
Horizontal stress (kPa)	142.2	144.5	143.5	
Load-area factor	0.60	0.58	0.59	0.59
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.9	7.2	7.1
Load (rise) time (ms)	124	122.0	127.0	124.4
Measured stiffness modulus (MPa)		2915	3021	2968
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2904	2996	2952

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	123.1
Horizontal deformation (µm) :	7.2
Horizontal deformation (%) :	0.0048
Measured stiffness modulus (MPa) :	2917
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2932

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (1)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.

(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)

Serial No. of this test report: SGC-4

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 4
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 150.12 mm
 Specimen thickness: 66.64 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

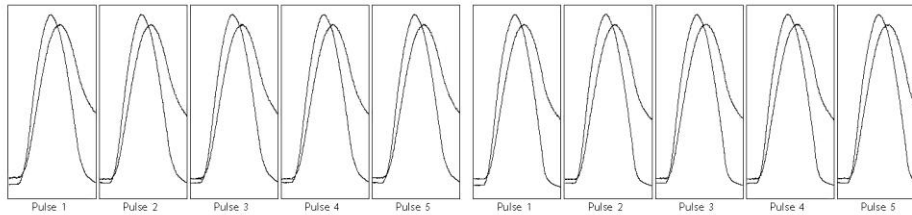
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador
 .
 .
 .

Date & time of test :	13:Jul:2010 12:51	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		1.71	1.74	1.73
Horizontal stress (kPa)		108.6	110.5	109.8
Load-area factor	0.60	0.59	0.60	0.59
Horizontal deformation (µm)	7.0	7.1	7.3	7.2
Load (rise) time (ms)	124	125.0	128.0	126.2
Measured stiffness modulus (MPa)		3107	3142	3225
Adjusted stiffness modulus (MPa)		3197	3141	3218

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		1.72	1.74	1.73
Horizontal stress (kPa)		109.2	110.5	109.9
Load-area factor	0.60	0.61	0.61	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	7.2	7.4	7.4
Load (rise) time (ms)	124	122.0	127.0	124.2
Measured stiffness modulus (MPa)		3063	3112	3185
Adjusted stiffness modulus (MPa)		3070	3120	3194

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	125.2
Horizontal deformation (µm) :	7.3
Horizontal deformation (%) :	0.0049
Measured stiffness modulus (MPa) :	3119
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	3120

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (1)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.

(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)

Serial No. of this test report: SGC-5

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 5
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 149.84 mm
 Specimen thickness: 65.73 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

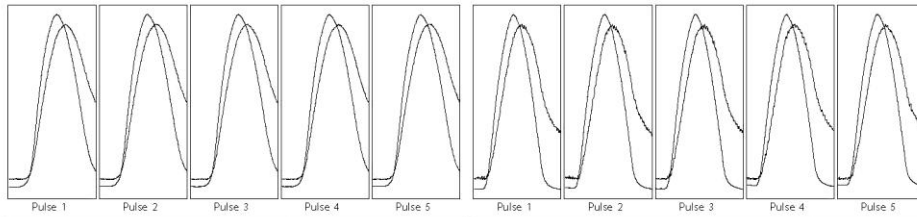
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	13:Jul:2010 12:57	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	2.25	2.28	2.28	2.28
Horizontal stress (kPa)	0.60	145.6	147.6	147.1
Load-area factor	0.60	0.61	0.62	0.62
Horizontal deformation (µm)	7.0	7.0	7.2	7.1
Load (rise) time (ms)	124	121.0	127.0	124.2
Measured stiffness modulus (MPa)	2994	3027	3015	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3016	3063	3043	

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	2.63	2.65	2.64	
Horizontal stress (kPa)	0.60	169.8	171.6	170.7
Load-area factor	0.60	0.60	0.61	0.60
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.8	7.2	7.0
Load (rise) time (ms)	124	123.0	126.0	124.0
Measured stiffness modulus (MPa)	3063	3071	3072	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	3269	3261	3272	

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	124.1
Horizontal deformation (µm) :	7.0
Horizontal deformation (%) :	0.0047
Measured stiffness modulus (MPa) :	3004
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	3016

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (16)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: SGC-6

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 6
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 150.25 mm
 Specimen thickness: 66.81 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

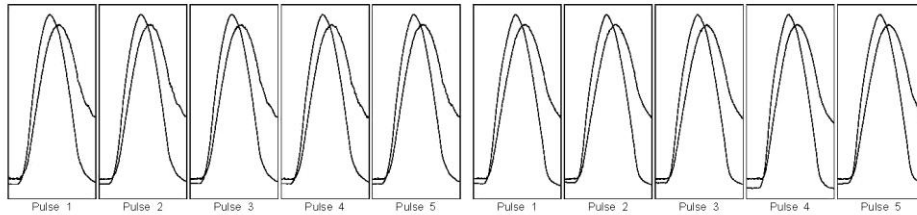
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	13:Jul:2010 13:03	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.95	1.96	1.98	
Horizontal stress (kPa)	123.5	124.5	124.0	
Load-area factor	0.60	0.59	0.60	0.60
Horizontal deformation (µm)	7.0	7.5	7.6	7.5
Load (rise) time (ms)	124	120.0	124.0	122.4
Measured stiffness modulus (MPa)	2398	2416	2408	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2398	2410	2404	

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.63	1.70	1.67	
Horizontal stress (kPa)	103.1	108.0	105.7	
Load-area factor	0.60	0.60	0.63	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.5	7.1	6.9
Load (rise) time (ms)	124	116.0	124.0	122.0
Measured stiffness modulus (MPa)	2212	2328	2243	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2229	2361	2258	

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	122.2
Horizontal deformation (µm) :	7.2
Horizontal deformation (%) :	0.0048
Measured stiffness modulus (MPa) :	2326
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2331

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (6)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: SGC-7

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 7
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 149.67 mm
 Specimen thickness: 66.56 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

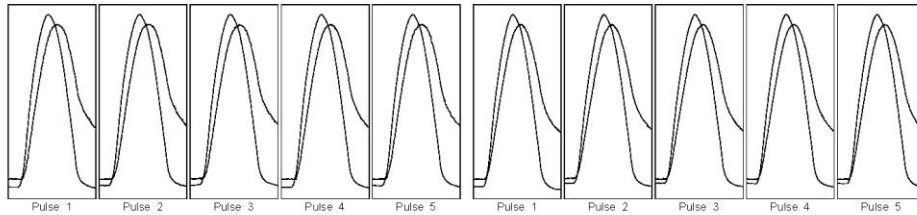
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	13:Jul:2010 12:15	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	2.17	2.22	2.19	
Horizontal stress (kPa)	0.60	0.61	0.62	0.62
Load-area factor	7.0	7.0	7.3	7.1
Horizontal deformation (µm)	124	119.0	123.0	121.4
Load (rise) time (ms)	2814	2894	2859	
Measured stiffness modulus (MPa)	2836	2920	2884	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	1.97	2.00	1.99	
Horizontal stress (kPa)	0.60	0.60	0.62	0.61
Load-area factor	7.0	6.9	7.2	7.1
Horizontal deformation (µm)	124	119.0	126.0	122.4
Load (rise) time (ms)	2594	2671	2616	
Measured stiffness modulus (MPa)	2599	2681	2628	
Adjusted stiffness modulus (MPa)				

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	121.9
Horizontal deformation (µm) :	7.1
Horizontal deformation (%) :	0.0047
Measured stiffness modulus (MPa) :	2738
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2756

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (9)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.

(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)

Serial No. of this test report: SGC-8

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 8
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 150.26 mm
 Specimen thickness: 67.53 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

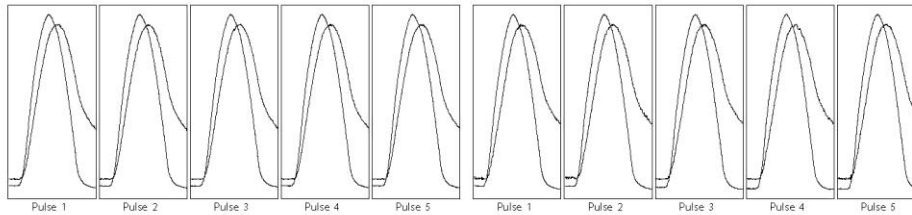
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador
 .
 .
 .

Date & time of test :	13:Jul:2010 12:21	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		1.68	1.71	1.69
Horizontal stress (kPa)		105.6	107.0	106.1
Load-area factor	0.60	0.60	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.6	7.0	6.8
Load (rise) time (ms)	124	119.0	127.0	121.6
Measured stiffness modulus (MPa)		2632	2728	2772
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2638	2733	2780

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		2.06	2.08	2.07
Horizontal stress (kPa)		129.3	130.4	129.8
Load-area factor	0.60	0.61	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.7	6.9	6.8
Load (rise) time (ms)	124	122.0	124.0	122.8
Measured stiffness modulus (MPa)		2978	2622	2697
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2982	2632	2708

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	122.2
Horizontal deformation (µm) :	6.8
Horizontal deformation (%) :	0.0045
Measured stiffness modulus (MPa) :	2875
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2880

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (21)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: SGC-9

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 9
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 149.98 mm
 Specimen thickness: 65.9 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

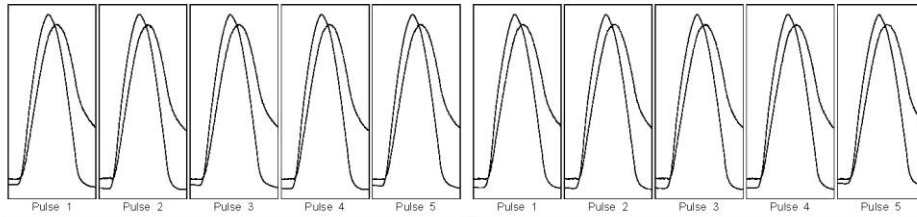
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	13:Jul:2010 12:27	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	2.19	2.23	2.21	
Horizontal stress (kPa)	140.9	143.6	142.3	
Load-area factor	0.60	0.59	0.61	0.60
Horizontal deformation (µm)	7.0	7.1	7.4	7.3
Load (rise) time (ms)	124	122.0	126.0	123.8
Measured stiffness modulus (MPa)		2819	2916	2861
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2827	2929	2868

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	2.04	2.08	2.06	
Horizontal stress (kPa)	131.3	133.9	132.7	
Load-area factor	0.60	0.60	0.61	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	7.0	7.3	7.1
Load (rise) time (ms)	124	123.0	129.0	126.0
Measured stiffness modulus (MPa)		2676	2778	2745
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2675	2790	2754

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	124.9
Horizontal deformation (µm) :	7.2
Horizontal deformation (%) :	0.0048
Measured stiffness modulus (MPa) :	2803
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2811

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (4)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: SGC-10

Address of testing laboratory

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 10
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 149.71 mm
 Specimen thickness: 66.7 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

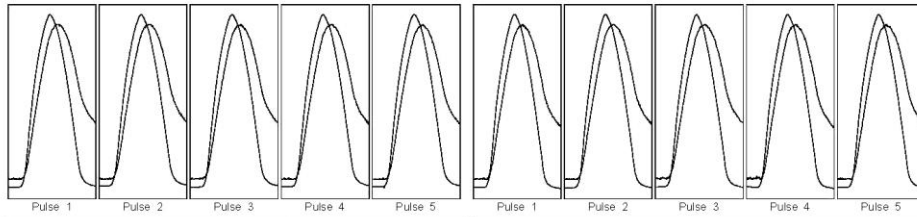
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	13:Jul:2010 12:34	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	2.06	2.08	2.07	
Horizontal stress (kPa)	131.5	132.7	132.2	
Load-area factor	0.60	0.61	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.9	7.1	7.0
Load (rise) time (ms)	124	120.0	125.0	122.4
Measured stiffness modulus (MPa)		2703	2761	2736
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2729	2772	2754

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.88	1.93	1.90	
Horizontal stress (kPa)	119.6	123.1	121.4	
Load-area factor	0.60	0.61	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.5	6.8	6.7
Load (rise) time (ms)	124	114.0	123.0	118.2
Measured stiffness modulus (MPa)		2637	2683	2651
Adjusted stiffness modulus (MPa)		2657	2700	2669

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	120.3
Horizontal deformation (µm) :	6.9
Horizontal deformation (%) :	0.0046
Measured stiffness modulus (MPa) :	2694
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2712

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (3)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: SGC-12

Address of testing laboratory

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 12
 Test temperature: 20 °C
 Specimen diameter: 150.4 mm
 Specimen thickness: 62.2 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

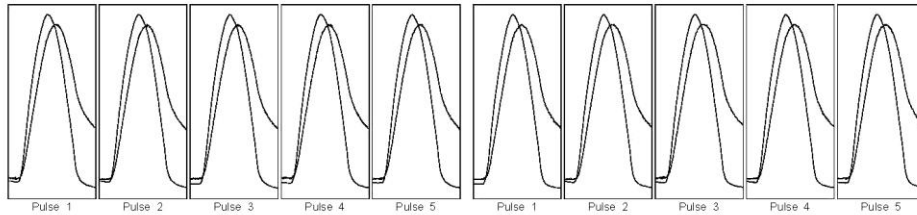
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	13:Jul:2010 11:45	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.80	1.85	1.82	
Horizontal stress (kPa)	122.7	125.6	123.9	
Load-area factor	0.60	0.60	0.61	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.9	7.1	7.0
Load (rise) time (ms)	124	122.0	125.0	124.0
Measured stiffness modulus (MPa)	2574	2610	2590	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2588	2620	2605	

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.81	1.83	1.82	
Horizontal stress (kPa)	123.2	124.7	124.0	
Load-area factor	0.60	0.60	0.61	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.9	7.1	7.0
Load (rise) time (ms)	124	124.0	126.0	124.4
Measured stiffness modulus (MPa)	2563	2651	2600	
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2574	2651	2607	

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	124.2
Horizontal deformation (µm) :	7.0
Horizontal deformation (%) :	0.0047
Measured stiffness modulus (MPa) :	2595
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2606

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (0.08)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: SGC-13

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 13
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 150.14 mm
 Specimen thickness: 65.32 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

Address of testing laboratory

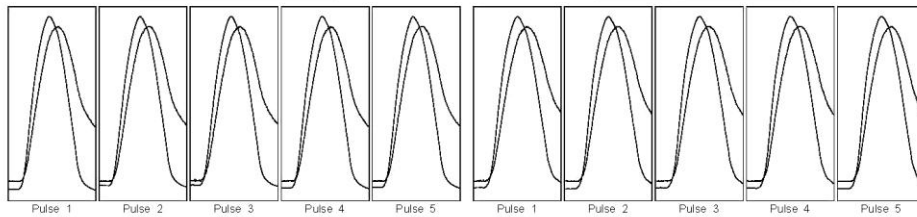
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	13:Jul:2010 11:52	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)	1.94	1.98	1.98	1.95
Horizontal stress (kPa)	125.7	128.3	127.3	126.6
Load-area factor	0.60	0.60	0.61	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.8	7.1	6.9
Load (rise) time (ms)	124	122.0	123.0	122.6
Measured stiffness modulus (MPa)	2655	2716	2689	2663
Adjusted stiffness modulus (MPa)	2652	2728	2695	2671

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	123.1
Horizontal deformation (µm) :	7.0
Horizontal deformation (%) :	0.0046
Measured stiffness modulus (MPa) :	2661
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	2671

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (2)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

Indirect tensile stiffness modulus test report.
(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipment - CRT-HYD25)
Serial No. of this test report: SGC-15

Address of testing laboratory

Date of print-out: 13:07:2010
 Test carried out by: José Segovia
 Specimen reference: 15
 Test temperature: 20°C
 Specimen diameter: 150.66 mm
 Specimen thickness: 66.66 mm
 Bulk density: 2300 (kg/m³)
 Poisson's ratio: 0.35
 Target rise-time: 124 ms
 Target horizontal deformation: 7 µm
 Number of conditioning pulses: 10
 Transducer scan rate: 1000 Hz

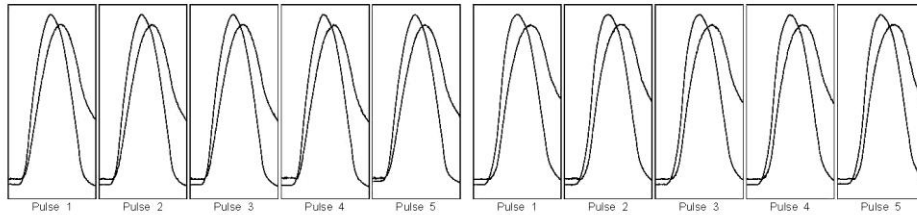
PUCE
 Laboratorio de Materiales de Construcción
 Av. Doce de Octubre y Mena Caamaño
 Quito, Ecuador

Date & time of test :	13:Jul:2010 12:07	Client name :	Tesis Montesinos
-----------------------	-------------------	---------------	------------------

Type and origin of the bituminous mixture	HMA
Method of manufacture of the bituminous mixture	Marshall
Method of compaction	SGC
Specimen storage details	Almacenado en laboratorio a temperatura ambiente.
Bulk density determination method:	estimada

Test along 1st diameter

Test along 2nd diameter



Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		1.19	1.24	1.21
Horizontal stress (kPa)		75.5	78.5	76.5
Load-area factor	0.60	0.61	0.62	0.61
Horizontal deformation (µm)	7.0	7.0	7.7	7.2
Load (rise) time (ms)	124	120.0	125.0	122.4
Measured stiffness modulus (MPa)		1505	1579	1558
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1514	1588	1568

Results	Target	Minimum	Maximum	Mean
Vertical force (kN)		1.13	1.14	1.13
Horizontal stress (kPa)		71.5	72.3	71.9
Load-area factor	0.60	0.59	0.60	0.59
Horizontal deformation (µm)	7.0	6.9	7.1	7.0
Load (rise) time (ms)	124	116.0	121.0	118.8
Measured stiffness modulus (MPa)		1476	1523	1510
Adjusted stiffness modulus (MPa)		1474	1523	1506

Mean results of the two tests

Load (rise) time (ms) :	120.6
Horizontal deformation (µm) :	7.1
Horizontal deformation (%) :	0.0047
Measured stiffness modulus (MPa) :	1534
Adjusted stiffness modulus (MPa) :	1537

Percentage difference between 1st and 2nd mean adjusted stiffness moduli = (4)

<u>Person responsible for this test report</u>	<u>Signed</u>
José Segovia	
	<u>Date of issue of report</u>
	13:07:2010

ANEXOS III

ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES

(MOP-001-F2002 TOMO II)

SECCION 811 AGREGADOS PARA HORMIGON ASFALTICO

811.1. Generalidades.-

811-1.01. Objetivos.- Esta especificación tiene por objeto fijar las características que deben cumplir los agregados que se emplean en la construcción de hormigón asfáltico.

811-1.02. Alcance y Limitaciones.- Esta especificación no se aplica a ningún otro material pétreo que se requiera en las obras viales, y debe acudirse a las especificaciones correspondientes.

811-1.03. Definiciones Específicas.- Relleno mineral: Porción de material que pasa el tamiz INEN 75 micrones (Nº 200).

Densidad: Es la masa de la unidad de volumen de las partículas del árido a una temperatura especificada. El volumen no incluye los poros saturables de las partículas ni los huecos entre éstas.

Agregado fino: Porción de material que pasa el tamiz INEN 4.75 mm. (Nº 4) y es retenida en el tamiz INEN 75 micrones (Nº 200).

Agregado grueso: Agregado cuyas partículas son retenidas por el tamiz INEN 4.75 mm. (Nº 4).

811-2. Agregados para Mezcla en Planta.-

811-2.01. Descripción.- Son agregados que se utilizan para la fabricación de hormigón asfáltico empleando una planta de asfaltos o equipo semejante para su mezcla con el asfalto.

811-2.02. Requisitos.- Los agregados estarán compuestos de partículas de piedra triturada, grava triturada, grava o piedra natural, arena, etc., de tal manera que cumplan los requisitos de graduación que se establecen en la Tabla 404-5.1 ó 405-5.1 de estas especificaciones

VIII-373

según corresponda, y se clasifican en "A", "B" y "C", de acuerdo a lo establecido a continuación:

- a) **Agregados tipo A:** Son aquellos en los cuales todas las partículas que forman el agregado grueso se obtienen por trituración. El agregado fino puede ser arena natural o material triturado y, de requerirse, se puede añadir relleno mineral para cumplir las exigencias de graduación antes mencionadas. Este relleno mineral puede ser inclusive cemento Portland, si así se establece para la obra.
- b) **Agregados tipo B:** Son aquellos en los cuales por lo menos el 50% de las partículas que forman el agregado grueso se obtienen por trituración. El agregado fino y el relleno mineral pueden ser triturados o provenientes de depósitos naturales, según la disponibilidad de dichos materiales en la zona del proyecto.
- c) **Agregados tipo C:** Los agregados tipo C para hormigón asfáltico son aquellos provenientes de depósitos naturales o de trituración, según las disponibilidades propias de la región, siempre que se haya verificado que la estabilidad, medida en el ensayo de Marshall, se encuentre dentro de los límites fijados en la Tabla 405-5.2 de estas especificaciones.

Los agregados serán fragmentos limpios, resistentes y duros, libres de materia vegetal y de exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, así como de material mineral cubierto de arcilla u otro material inconveniente. Se utilizarán agregados completamente secos y de no poder cumplirse esto, se instalarán dos secadores en serie, de tal forma que cuando se termine la operación de mezclado, la humedad de los agregados no exceda de 1%.

Además de los requisitos granulométricos y los referentes a su producción, que se indicaron anteriormente, los agregados deben cumplir con las siguientes exigencias:

VIII-374

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

La porción de los agregados que pasa el tamiz INEN 0.425 mm. (Nº 40), deberá tener un índice de plasticidad menor a 4, según lo establecido en las Normas INEN 691 y 692.

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

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

El relleno mineral deberá cumplir con los requisitos especificados en la Norma AASHTO M 17.

811.2.02 Requisitos.- Los agregados gruesos retenidos en el tamiz INEN 4.75 mm. deben tener cierta angularidad. El 85% de agregado grueso deberá tener por lo menos una cara fracturada y el 80% del agregado grueso deberá tener por lo menos dos caras fracturadas, según la Norma ASTM D5821.

La angularidad de los agregados finos es determinada como el porcentaje de vacíos de aire presente en los agregados pasantes el tamiz INEN 2.36 mm. El valor mínimo requerido es de 45% según la Norma ASTM C1252.

El equivalente de arena se realiza en los agregados pasantes el tamiz INEN 4.75 mm. Norma AASHTO T 176 (ASTM D2419). Los valores mínimos recomendados son los siguientes:

	EQUIVALENTE DE ARENA	
	TRÁFICO LIVIANO Y MEDIANO	TRÁFICO PESADO
Base	35	40
Capa de Rodadura	45	50

El máximo porcentaje en peso de partículas alargadas y achatadas retenidas en el tamiz INEN 4.75mm cuya relación entre las dimensiones máximas y mínimas mayor que 5, no deberá ser mayor de un 10% según la Norma ASTM D4791.

El máximo porcentaje de materiales deletéreos en los agregados es de 1% en peso según la Norma ASTM C142.

811-2.03. Ensayos y Tolerancias.- Los ensayos de control y verificación que se deben realizar para aceptar o rechazar un agregado, seguirán lo indicado en las normas mencionadas en los diferentes párrafos del numeral anterior. Las exigencias de graduación serán comprobadas mediante ensayos granulométricos, según lo establecido en las Normas INEN 696 y 697.

El peso específico de los agregados se determinará de acuerdo al método de ensayo INEN 856 y 857, según corresponda, y el peso unitario de los agregados se determinará de acuerdo a la Norma INEN 854.

811-3. Agregados para Mezcla en Sitio.-

811-3.01. Descripción.- Son agregados que se utilizan en la fabricación del hormigón asfáltico, cuando éste se lo construye en el lugar de trabajo, empleando equipo especial para mezcla en sitio.

811-3.02. Requisitos.- Los agregados para mezcla en sitio deben cumplir las mismas exigencias establecidas en la subsección 811-2., salvo la granulometría, que será la establecida para este tipo de trabajos en las Tablas 404-4.1 y 405-4.1 de estas especificaciones, según corresponda.

Tabla 404-4.1

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	A	B	C
2" (50.8 mm.)	100	--	--
1 1/2" (38.1 mm.)	70 - 100	100	--
1" (25.4 mm.)	55 - 85	70 - 100	100
3/4" (19.0 mm.)	50 - 80	60 - 90	70 - 100
3/8" (9.5 mm.)	40 - 70	45 - 75	50 - 80
Nº 4 (4.75 mm.)	30 - 60	30 - 60	35 - 65
Nº 10 (2.00 mm.)	20 - 50	20 -	25 - 50
Nº 40 (0.425 mm.)	5 - 30	5 - 30	10 - 30
Nº 200 (0.075 mm.)	0 - 5	0 - 5	0 - 5

Tabla 404-5.1.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través los tamices de malla cuadrada		
	A	B	C
2" (50.8 mm.)	100	--	--
1 1/2" (38.1 mm.)	90 - 100	100	--
1" (25.4 mm.)	--	90 - 100	100
3/4" (19.0 mm.)	56 - 80	--	90 - 100
1/2" (12.5 mm.)	--	56 - 80	--
3/8" (9.5 mm.)	--	--	56 - 80
Nº 4 (4.75 mm.)	23 - 53	29 - 59	35 - 65
Nº 8 (2.36 mm.)	15 - 41	19 - 45	23 - 49
Nº 50 (0.30 mm.)	4 - 16	5 - 17	5 - 19
Nº 200 (0.075 mm.)	0 - 6	1 - 7	2 - 8

Tabla 405-5.2.

Ensayos de acuerdo al método Marshall	T R A F I C O					
	PESADO		MEDIO		LIVIANO	
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Nº de golpes	75		50		35	
Estabilidad (libras)	1.800	--	1.200	--	750	--
Flujo (pulgada/100)	8	16	8	18	8	20
% vacíos con aire:						
Carpeta	3	5	3	5	3	5
Base	3	8	3	8	3	8

Nota: % de Vacíos en el agregado mineral (VMA) de acuerdo con el gráfico actualizado del Instituto del Asfalto.

TABLA 810.2.1.

ENSAYOS	60-70		85-100	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
Betún original				
Penetración (25 °C, 100 gr, 5 s), mm/10.	60	70	85	100
Punto de ablandamiento A y B, °C.	48	57	45	53
Índice de penetración (*).	-1,5	+1,5	-1,5	+1,5
Ductilidad (25 °C, 5 cm/minuto), cm.	100	--	100	--
Contenido de agua (en volumen), %	--	0,2	--	0,2
Solubilidad en Tricloroetileno, %.	99	--	99	--
Punto de inflamación, Copa Cleveland, °C.	232	--	232	--
Densidad relativa, 25 °C/ 25 °C	1,00	--	1,00	--
Ensayo de la mancha (**)	NEGATIVO		NEGATIVO	
Contenido de parafinas, %.	--	2.2	--	2.2
Ensayos al residuo del TFOT:				
Variación de masa, %.	--	0,8	--	1,0
Penetración, % de penetración original.	54	--	50	--
Ductilidad, cm	50	--	75	--
Resistencia al endurecimiento (***)	--	5,0	--	5,0