



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO DE MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT) PARA SUPERFICIES DE  
RODADURA, UTILIZANDO ASFALTOS MODIFICADOS, EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**

**Marco Vinicio Escalante Lara**

Asesorado por el Ing. Selvin Arístides Quevedo Revolorio

Coasesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, enero de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT) PARA SUPERFICIES DE  
RODADURA, UTILIZANDO ASFALTOS MODIFICADOS, EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**MARCO VINICIO ESCALANTE LARA**

ASESORADO POR EL ING. SELVIN ARÍSTIDES QUEVEDO REVOLORIO  
COASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Alejandro Castañón López
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT) PARA SUPERFICIES DE RODADURA, UTILIZANDO ASFALTOS MODIFICADOS, EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha abril de 2013.



**Marco Vinicio Escalante Lara**

Guatemala, 08 de octubre de 2014

Ingeniero  
Guillermo Francisco Melini Salguero  
Coordinador del Área de Materiales y  
Construcciones Civiles  
Escuela de Ingeniería Civil  
Guatemala

Respetado Ingeniero:

Por medio de la presente informo a usted que he asesorado y revisado el trabajo de graduación titulado **DISEÑO DE MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT) PARA SUPERFICIES DE RODADURA, UTILIZANDO ASFALTOS MODIFICADOS, EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**, desarrollado por el estudiante universitario Marco Vinicio Escalante Lara, manifestando que el mismo cumple satisfactoriamente con los propósitos planteados en el programa del mismo y por la importancia en la rama del diseño de carreteras, la doy por aprobada.

Sin otro particular, me suscribo de usted atentamente.



Ing. Selvin Aristides Quevedo Revolorio

*Selvin Aristides Quevedo*  
Asesor  
*Ingeniero Civil*  
Colegiado: 5249

Guatemala, 14 de octubre de 2014

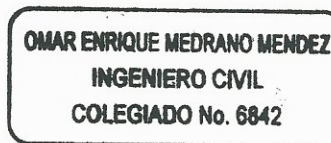
Ingeniero

Guillermo Francisco Melini Salguero  
Coordinador del Área de Materiales y  
Construcciones Civiles  
Escuela de Ingeniería Civil  
Guatemala

Respetado Ingeniero:

Por medio de la presente informo a usted que he asesorado y revisado el trabajo de graduación titulado **DISEÑO DE MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT) PARA SUPERFICIES DE RODADURA, UTILIZANDO ASFALTOS MODIFICADOS, EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**, desarrollado por el estudiante universitario Marco Vinicio Escalante Lara, manifestando que el mismo cumple satisfactoriamente con los propósitos planteados en el programa del mismo y por la importancia en la rama del diseño de carreteras, la doy por aprobada.

Sin otro particular, me suscribo de usted atentamente.



  
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Co-asesor



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>



Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil

Guatemala,  
11 de noviembre de 2014

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación DISEÑO DE MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT) PARA SUPERFICIES DE RODADURA, UTILIZANDO ASFALTOS MODIFICADOS, EN PAVIMENTOS FLEXIBLES, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Marco Vinicio Escalante Lara quien contó con la asesoría del Ing. Selvin Arístides Quevedo Revolorio e Ing. Omar Enrique Medrano Méndez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

*Guillermo Francisco Melina Salguero*

Ing. Civil Guillermo Francisco Melina Salguero  
Coordinador del Área de Materiales y  
Construcciones Civiles

FACULTAD DE INGENIERIA  
AREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES  
USAC

/bbdeb  
Mas de 154 años de Trabajo Académico y Mejora Continua







**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Selvin Arístides Quevedo Revolorio, del Co-asesor Ing. Omar Enrique Medrano Méndez y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Marco Vinicio Escalante Lara, titulado **DISEÑO DE MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT) PARA SUPERFICIES DE RODADURA, UTILIZANDO ASFALTOS MODIFICADOS, EN PAVIMENTOS FLEXIBLES,** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, enero 2015.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua







El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE MEZCLAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT) PARA SUPERFICIES DE RODADURA, UTILIZANDO ASFALTOS MODIFICADOS, EN PAVIMENTOS FLEXIBLES**, presentado por el estudiante universitario: **Marco Vinicio Escalante Lara**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, enero 2015



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por brindarme la fortaleza y convicción de luchar por lo que deseo, y sentir su presencia en los momentos que lo necesito.
- Mis padres** Juan Vinicio Escalante Lima y Lilian Lizeth Lara Revolorio de Escalante, por ser mi guía, el ejemplo a seguir en cada etapa de mi vida, por ser esas personas que en todo momento están junto a mí y brindarme todo su amor.
- Mis hermanos** José Noé y Juan Pablo Escalante Lara, por soportarme durante la carrera, por su apoyo y cariño durante toda mi vida.
- Mis abuelos** José Escalante (q.e.p.d), Felipa Lima (q.e.p.d), Noé Augusto Lara, Juventina Revolorio, por apoyarme y ser fuentes de sabiduría y amor durante mi vida.
- Mi familia** Tíos, primos y sobrinos, por confiar en mí, mostrarme su afecto durante toda mi vida y darme una motivación especial para poder alcanzar uno de mis sueños.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por permitirme formarme como profesional en esta casa de estudios
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser el lugar en el cual los límites que una vez tuve se expandieron, permitiéndome alcanzar muchos objetivos personales.
<b>Ing. Selvin Quevedo</b>	Por asesorarme en este trabajo de graduación y por su apoyo a lo largo de mi carrera.
<b>Ing. Omar Medrano</b>	Por sus cátedras y apoyo en este trabajo de graduación.
<b>Ing. Irvin Martínez</b>	Por ser esa persona que sabe expresar la palabra justa en el momento que se necesita.
<b>CONCAL</b>	A todo su personal que compartió conmigo y me ayudó a crecer como persona.
<b>Mis amigos</b>	Por apoyarme en todo momento, creer que podía superarme y compartir muchas experiencias.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
1. ASFALTO.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Producción del asfalto .....	2
1.3. Clasificación y grados del asfalto .....	3
1.3.1. Cemento asfáltico .....	4
1.3.2. Asfalto diluido .....	5
1.3.3. Asfalto emulsionado .....	5
1.4. Propiedades químicas del asfalto.....	6
1.5. Propiedades físicas del asfalto .....	7
1.5.1. Durabilidad.....	7
1.5.2. Adhesión y cohesión.....	8
1.5.3. Susceptibilidad a la temperatura.....	8
1.5.4. Endurecimiento y envejecimiento .....	9
1.6. Pruebas para determinar las propiedades del cemento asfáltico .....	9
2. ASFALTOS MODIFICADOS .....	11
2.1. Generalidades .....	11

2.2.	Polímeros .....	12
2.3.	Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos .....	12
2.3.1.	Elastómeros .....	13
2.3.2.	Plastómeros .....	13
2.4.	Fundamentos de la modificación de asfaltos .....	14
2.5.	Compatibilidad de los polímeros .....	15
2.6.	Asfaltos modificados con elastómeros .....	17
2.7.	Asfaltos modificados con plastómeros .....	18
2.8.	Especificaciones sobre asfaltos modificados .....	20
2.8.1.	Ensayos.....	20
3.	MEZCLAS ASFÁLTICAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT) .....	21
3.1.	Antecedentes .....	21
3.2.	Generalidades .....	21
3.2.1.	Desempeño de la mezcla SMA .....	24
3.2.2.	Reducción de ruido .....	24
3.2.3.	Resistencia a la fricción.....	25
3.2.4.	Visibilidad .....	25
3.3.	Cemento asfáltico.....	25
3.4.	Aditivo estabilizador .....	26
3.5.	Relleno mineral .....	28
4.	ANÁLISIS DE LA MEZCLA STONE MASTIC ASPHALT .....	29
4.1.	Requisitos de los materiales .....	29
4.1.1.	Características del agregado grueso.....	30
4.1.1.1.	Abrasión .....	30
4.1.1.2.	Partículas planas y alargadas .....	33
4.1.1.3.	Absorción .....	35
4.1.1.4.	Gravedad específica .....	37

	4.1.1.5.	Peso unitario y vacío .....	39
	4.1.1.6.	Partículas trituradas.....	42
	4.1.2.	Características del agregado fino .....	44
	4.1.2.1.	Angularidad.....	44
	4.1.2.2.	Límite líquido .....	46
	4.1.2.3.	Límite plástico.....	48
5.		DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA SMA.....	51
5.1.		Selección de material .....	51
5.2.		Características de la mezcla asfáltica .....	51
	5.2.1.	Granulometría.....	52
	5.2.2.	Vacíos en la mezcla.....	54
5.3.		Preparación de muestras y diseño de mezcla asfáltica. ....	55
	5.3.1.	Compactación de mezcla en laboratorio.....	56
	5.3.2.	Selección de granulometría .....	56
5.4.		Selección del contenido de cemento asfáltico óptimo .....	59
5.5.		Ensayos que se realizan a la mezcla asfáltica .....	61
	5.5.1.	Preparación de las muestras .....	61
	5.5.2.	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla .....	62
	5.5.3.	Gravedad específica aparente de la mezcla.....	65
	5.5.3.1.	Estabilidad y fluencia. ....	67
	5.5.4.	Sensibilidad al escurrimiento .....	70
5.6.		Ensayos de laboratorio .....	72
	5.6.1.	Agregados .....	72
	5.6.2.	Cemento asfáltico .....	73
	5.6.3.	Elaboración de mezcla asfáltica Stone Mastic Asphalt.....	74
	5.6.4.	Interpretación de resultados .....	91



6.	CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD .....	93
6.1.	Control de calidad .....	93
6.2.	Producción de la mezcla .....	94
6.2.1.	Calibración de la planta .....	94
6.2.2.	Temperatura de producción .....	95
6.2.3.	Tiempo de mezclado .....	96
6.2.4.	Muestreo de la mezcla .....	96
6.2.5.	Almacenaje de la mezcla.....	97
6.3.	Colocación .....	97
6.3.1.	Transporte de la mezcla.....	98
6.3.2.	Preparación de la superficie del pavimento existente .....	100
6.3.3.	Colocación y terminado .....	101
6.4.	Compactación .....	101
6.4.1.	Densidad en sitio.....	103
6.5.	Calidad del producto final.....	103
6.5.1.	Compactación .....	104
6.5.2.	Espesor .....	104
7.	CASO PRÁCTICO .....	105
7.1.	Generalidades.....	105
7.1.1.	Requisitos de los materiales.....	108
7.1.2.	Interpretación de resultados .....	110
	CONCLUSIONES.....	111
	RECOMENDACIONES .....	113
	BIBLIOGRAFÍA.....	115
	ANEXOS.....	117

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Productos y temperaturas típicas de destilación .....	2
2.	Microfotografías de cemento asfáltico modificado con polímeros .....	16
3.	Comparación de estabilidad de mezclas SMA y convencional .....	22
4.	Composición detallada de la mezcla asfáltica SMA .....	23
5.	Aditivos estabilizadores.....	26
6.	Mezcla asfáltica sin agente estabilizador .....	27
7.	Obtención del límite líquido de gráfica semilogarítmica .....	48
8.	Granulometría de mezcla asfáltica con TMN 9,5 mm.....	54
9.	Equipo para contenedor de vacíos.....	63
10.	Dimensiones del cesto de alambre .....	70
11.	Cemento asfáltico utilizado en la mezcla .....	74
12.	Granulometría seleccionada .....	76
13.	Elaboración de granulometría .....	76
14.	Mezclado de agregado y cemento asfáltico .....	77
15.	Mezcla asfáltica a temperatura de trabajo.....	78
16.	Elaboración de briquetas.....	78
17.	Secado de muestra a temperatura ambiente .....	79
18.	Realizando ensayo para determinar gravedad específica aparente de la mezcla .....	81
19.	Elaboración ensayo para determinar estabilidad y fluencia .....	83
20.	Porcentaje de vacíos.....	85
21.	Vacíos en el agregado grueso de la mezcla .....	86
22.	Vacíos de agregado mineral .....	86

23.	Estabilidad de Marshall.....	87
24.	Fluencia de Marshall.....	87
25.	Gravedad específica aparente de la mezcla asfáltica.....	88
26.	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica.....	88
27.	Porcentaje de escurrimiento de la mezcla .....	89
28.	Análisis granulométrico.....	107
29.	Estado de la superficie de rodadura en la autopista .....	110

## TABLAS

I.	Elastómeros típicos utilizados para modificar asfaltos .....	18
II.	Plastómeros típicos utilizados para modificar asfaltos .....	19
III.	Tipos de abrasión .....	31
IV.	Pesos de granulometría para ensayo de abrasión .....	31
V.	Masa mínima de muestra .....	33
VI.	Dimensiones del calibrador .....	34
VII.	Cantidad de material a ensayar de acuerdo a tamaño máximo nominal del agregado .....	36
VIII.	Definición de agregado grueso de acuerdo a malla de corte .....	40
IX.	Capacidad del recipiente medidor .....	41
X.	Peso de material para ensayo de partículas trituradas.....	43
XI.	Fracción de tamaño de agregado, según tamices.....	45
XII.	Especificaciones para granulometría con distinto TMN.....	52
XIII.	Especificaciones para diseños compactados con Marshall.....	60
XIV.	Especificaciones para diseños compactados con equipo giratorio Superpave .....	61
XV.	Tamaño de muestra para determinar gravedad específica teórica máxima .....	64
XVI.	Factor de corrección para estabilidad Marshall .....	68

XVII.	Resumen de ensayos realizados en el agregado .....	72
XVIII.	Granulometría seleccionada .....	75
XIX.	Gravedad específica teórica máxima.....	80
XX.	Gravedad específica aparente de la mezcla.....	80
XXI.	Porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado grueso y vacíos en el agregado mineral de la mezcla .....	82
XXII.	Estabilidad y fluencia Marshall.....	82
XXIII.	Resultados para diseño de mezcla asfáltica.....	83
XXIV.	Valores óptimos de mezcla asfáltica.....	89
XXV.	Especificaciones del asfalto modificado.....	106
XXVI.	Análisis granulométrico.....	107
XXVII.	Requisitos de los materiales .....	108
XXVIII.	Resultados obtenidos a muestra óptima.....	109



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>AC</b>	Cemento asfáltico
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>PG</b>	Grado de desempeño
<b>gr</b>	Gramos
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>lb</b>	Libra
<b>mm</b>	Milímetros
<b>No</b>	Número
<b><math>Y_s</math></b>	Peso unitario del agregado
<b><math>Y_w</math></b>	Peso unitario del agua
<b>%</b>	Porcentaje
<b>RN</b>	Ruta Nacional
<b>TMN</b>	Tamaño máximo nominal
<b>VAG</b>	Vacíos de agregado grueso
<b>VAM</b>	Vacíos de agregado mineral en la mezcla





## GLOSARIO

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials.
<b>Agregado</b>	Material granular, duro, de composición mineralógica como la arena, grava, escoria o roca triturada, empleado para ser mezclado en diferentes tamaños.
<b>Agrietamiento</b>	Formación de grietas, surcos o hendiduras en la superficie de rodadura.
<b>Asfalteno</b>	Fracciones de hidrocarburos de alto peso molecular que se precipita por medio de solventes parafínicos de nafta, se emplea en proporciones específicas de solvente–asfalto.
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales).
<b>Bitumen</b>	Sustancia cementante de color negro, puede ser natural o elaborada, compuesta esencialmente de hidrocarburos de alto peso molecular, siendo representativos los asfaltos, breas, betunes y asfaltitas.

<b>Briqueta</b>	Modelo elaborado para la realización de ensayos de mezclas asfálticas.
<b>Cemento asfáltico</b>	Asfalto con o sin flujo que se elabora, en cuanto a calidad y consistencia, para ser usado en la producción de pavimentos.
<b>COGUANOR</b>	Comisión Guatemalteca de Normas
<b>Consistencia</b>	Grado de fluidez o plasticidad de un cemento asfáltico a determinada temperatura.
<b>Decibel</b>	Unidad que se emplea para medir la intensidad del sonido y otras magnitudes físicas.
<b>Destilación</b>	Proceso por el que la sustancia volátil de una mezcla se separa de otra, que no lo es, mediante evaporación y posterior condensación de la misma, por lo cual se obtienen dos sustancias.
<b>Deterioro</b>	Degeneración o empeoramiento gradual que se genera por el uso.
<b>Elastómeros</b>	Polímero que presenta propiedades elásticas
<b>Gasóleo</b>	Hidrocarburo en estado líquido, compuesto de parafinas, proveniente del petróleo por destilación, que se emplea como combustible.

<b>Impermeabilizar</b>	Dar capacidad a un cuerpo de evitar el paso de humedad, agua u otro líquido.
<b>Maltenos</b>	Hidrocarburos solubles que se encuentran en grandes cantidades en los asfaltos, proporcionan las propiedades químicas del asfalto.
<b>Matraz</b>	Recipiente de vidrio de forma esférica con cuello recto y estrecho, que se usa en los laboratorios para contener y medir sustancias.
<b>Mezclas asfálticas</b>	Mezcla de cemento asfáltico y agregados que se extiende en capas y se compacta.
<b>Mezclas discontinuas</b>	Mezclas asfálticas en la que el agregado presenta discontinuidad granulométrica muy acentuada entre el agregado grueso y el fino.
<b>Pavimentos flexibles</b>	Estructuras flexibles que tienden a deformarse y recuperarse después de sufrir deformación, transmitiendo la carga de forma lateral al suelo a través de sus capas.
<b>Penetración</b>	Distancia que una aguja patrón penetra verticalmente una muestra de cemento asfáltico en condiciones específicas.

<b>Planta tipo batch</b>	Planta dosificadora de producción para mezclas asfálticas en caliente que permite controlar los elementos de la mezcla de manera efectiva.
<b>Plastómeros</b>	Polímero que presenta propiedades resistentes a la flexión y deformación.
<b>Poise</b>	Unidad de medida de la viscosidad dinámica
<b>Polímero</b>	Sustancia química que contiene grandes moléculas, resultado de un proceso de unión de pequeñas unidades que se repiten.
<b>Refinado de petróleo</b>	Utilización de diversos procesos de tratamiento y transformación en el petróleo crudo para la obtención de diversos productos de valor comercial.
<b>Reología</b>	Parte de la física que estudia la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y el derrame de la materia.
<b>Roderas</b>	Huella o surco que al pasar deja una rueda sobre la superficie del pavimento.
<b>Stoke</b>	Unidad de medida de la viscosidad cinemática
<b>Superficie de rodadura</b>	Capa superficial de la estructura del pavimento destinada a la circulación de vehículos, donde se aplica directamente la carga de tránsito.

<b>Superpave</b>	Superior Performing Asphalt Pavement
<b>Tamiz</b>	Aparato que se emplea para separar agregado de acuerdo a un tamaño estandarizado.
<b>Termoplástico</b>	Sustancia que se ablanda por la acción del calor y se endurece al enfriarse de forma reversible.
<b>Viscosidad</b>	Medida que se emplea para determinar la resistencia a fluir de una sustancia.





## RESUMEN

La superficie de rodadura es parte importante de la estructura de un pavimento, en ocasiones no se le da la debida importancia; y es una de las principales causas del fallo en las carreteras, actualmente, con el desarrollo y la globalización, es necesario estar en constante avance para poder aumentar el índice de desarrollo humano, por lo que es necesario contar con carreteras adecuadas para el progreso buscado, es por esto que se deben implementar las mejores mezclas asfálticas, entre las cuales se encuentra la Stone Mastic Asphalt.

El presente trabajo de graduación se realizó con la finalidad de tener una guía práctica para la elaboración y desarrollo de mezclas asfálticas de tipo Stone Mastic Asphalt, basado en recopilaciones bibliográficas, datos prácticos y desarrollo experimental, a través de ensayos de laboratorio con sus respectivos resultados, basados en procedimientos descritos en el documento. El desarrollo y correcta implementación de este tipo de mezclas garantizaría mejores carreteras por sus propiedades físicas y mecánicas.

Para el diseño de la mezcla asfáltica Stone Mastic Asphalt se tiene como principal característica el contacto piedra sobre piedra, por lo que se debe tener un control estricto sobre los agregados para formar un esqueleto adecuado, al igual que los vacíos dentro de la mezcla y el alto contenido de cemento asfáltico que obliga la utilización de fibras estabilizadoras, necesarias para evitar el escurrimiento del asfalto. Estas son algunas de las propiedades más relevantes que se deben cumplir para obtener una mezcla asfáltica uniforme y que cumpla con los estándares de calidad deseada.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar una guía práctica a utilizar para la realización de un diseño de mezcla tipo Stone Mastic Asphalt para superficies de rodadura en pavimentos flexibles.

### **Específicos**

1. Determinar las características que debe presentar una mezcla asfáltica tipo Stone Mastic Asphalt, para ser aplicada como superficie de rodadura.
2. Analizar las ventajas que se tiene al emplear mezclas asfálticas tipo Stone Mastic Asphalt.
3. Describir los resultados que se obtuvieron en el proyecto analizado, determinando sus principales características.



## INTRODUCCIÓN

La red vial en el país constituye uno de los sectores más importantes de la infraestructura, ya que permite el desarrollo comercial, industrial y social de la sociedad, es por eso que se debe tener mucha consideración en su construcción, supervisión y mantenimiento para garantizar, que una parte tan importante del desarrollo, se mantenga y evolucione para obtener mejores resultados. Es en esta evolución donde se ha visto la necesidad de implementar nuevas mezclas asfálticas para utilizarlas como superficies de rodadura, garantizando mejor calidad al conductor.

La implementación de nuevos tipos de mezclas asfálticas es necesario, para poder utilizarlas en proyectos que benefician a la población, las nuevas mezclas asfálticas presentan mejoras en el desempeño de su trabajo, en la facilidad de trabajarlas y en reducir costos, razón por la cual se han implementado normas para llevar a cabo procedimientos estandarizados que permitan elaborar mezclas asfálticas con calidad controlada. En Guatemala, la elaboración de mezclas asfálticas convencionales está regida por las *Especificaciones Generales para la construcción de carreteras y puentes, de la Dirección General de Caminos, edición 2001.*

Para la utilización de un tipo de mezcla asfáltica diferente se debe utilizar la Norma Internacional que corresponda, realizando especificaciones técnicas especiales para utilizarlas en proyectos específicos dentro del país.

Para la elaboración del presente trabajo de investigación se planteó el estudio de la mezcla asfáltica tipo Stone Mastic Asphalt, para el cual se contó

con resultados de la colocación de la misma en un proyecto ubicado en territorio guatemalteco, se realizaron los ensayos correspondientes en el laboratorio, como también se planteó un diseño de mezcla partiendo desde el análisis de agregados, hasta la elaboración de briquetas, el cual puede emplearse de guía para trabajos posteriores en que se implemente este tipo de mezclas asfálticas.

# 1. ASFALTO

## 1.1. Antecedentes

A mediados del siglo XVIII se comienza a emplear petróleo que se encuentra en yacimientos montañosos de Suiza, para aplicarlo como revestimiento de senderos en Francia, esta aplicación del petróleo se puede considerar como la primera aplicación que se tuvo en la rama de la ingeniería vial. A mediados del siglo XIX se emplean mezclas de petróleo con agregados, grava y arena, en caminos, esto porque el petróleo tiene como propiedad ser adhesivo y viscoso permitiendo unir los agregados y poder cubrir grandes extensiones, luego de estudios se concluyó que emplear mezclas asfálticas en caliente facilita la adherencia entre los agregados y el asfalto, por lo que se empezó a emplear este tipo de mezclas.

Por el alto costo de la extracción del asfalto de yacimientos naturales y por el desarrollo de las refinerías modernas de petróleo del cual se obtienen subproductos como es el asfalto, permitió de manera práctica obtener este elemento fundamental de la mezcla asfáltica, por lo que se empezó a emplear el mismo, el cual se obtiene por destilación química, pero por el desarrollo que ha tenido y por ser un subproducto del petróleo se ha perdido muchas características inherentes del cemento asfáltico, se ha tenido la necesidad de emplear modificadores en el asfalto, como los polímeros, que mejoran las propiedades de los asfaltos. Si los asfaltos modificados no son bien utilizados o son sobrecalentados, se queman los polímeros y pierden sus propiedades y características.

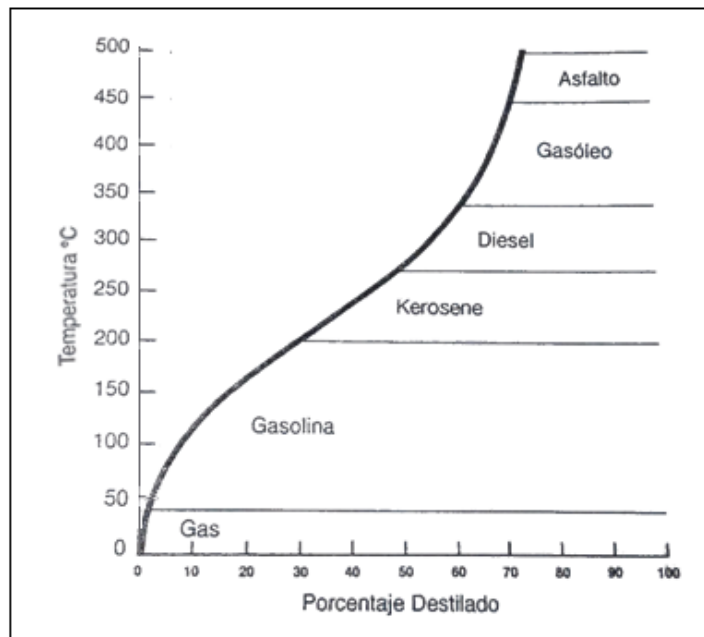


## 1.2. Producción del asfalto

El crudo de petróleo es refinado por destilación. Este es un procedimiento químico por medio del cual diferentes productos son separados del petróleo crudo, a través de aumentos de temperatura, y de etapas.

Los productos livianos se separan por destilación simple. Mientras que los destilados más pesados, llamados gasóleos, pueden ser separados mediante una combinación de calor y vacío.

Figura 1. **Productos y temperaturas típicas de destilación**



Fuente: National Asphalt Pavement Association (NAPA). A Guide for Hot Mix Asphalt Pavement. p. 12.

Como se puede apreciar en la figura 1, el asfalto puede producirse a la temperatura aproximada de 480 grados Celsius, es aproximada, ya que varía

de acuerdo al crudo de petróleo que se está refinando o del grado de asfalto que se desea obtener.

Al refinarse el petróleo, los refinadores deben tener maneras de controlar las propiedades del asfalto que se está produciendo para que cumplan los requisitos indispensables, para lograr esto, en ocasiones, es necesario mezclar varios tipos de crudos de petróleo antes de procesarlo, esto permite combinar crudos que contienen asfaltos de características variables, para que el producto final obtenga las características pedidas por el usuario.

En la actualidad se han desarrollado dos procesos por los cuales se puede producir un asfalto, luego de combinar los crudos de petróleo, estos son:

- Destilación por vacío
- Extracción con solventes

La destilación por vacío emplea la aplicación de calor y vacío. La extracción con solvente, remueve más gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual. Es trascendental indicar que una vez han sido producidos los asfaltos estos se pueden combinar, mezclando entre sí distintas proporciones de asfaltos, en condiciones controladas para evitar daños ambientales.

### **1.3. Clasificación y grados del asfalto**

Los asfaltos empleados en pavimentación se pueden clasificar de manera general en tres tipos, los cuales son:

- Cemento asfáltico
- Asfalto diluido

- Asfalto emulsificado

### **1.3.1. Cemento asfáltico**

Los cementos asfálticos se clasifican por tres parámetros, los cuales son:

- Viscosidad
- Viscosidad después de envejecimiento
- Penetración

En esta clasificación se abarcan diversos grados, con distintos niveles de consistencia. El sistema con mayor aceptación a nivel global es el basado en la viscosidad presente en el asfalto.

En el sistema de viscosidad se emplea el poise como unidad de medida en relación a la viscosidad absoluta. Es importante hacer notar que mientras el número de poise es más alto, el asfalto es más viscoso. El cemento asfáltico con una viscosidad de 250 poises a 60 grados Celsius es conocido como un asfalto blando. El cemento asfáltico con una viscosidad de 4000 poises a 60 grados Celsius es conocido como un asfalto duro, en esta comparación de cementos asfálticos se aprecia lo que ocurre con la viscosidad a diferentes poises medidos.

En ocasiones es necesario clasificar el asfalto de acuerdo a su viscosidad después de envejecido. Esto se emplea para poder determinar que viscosidad tendrá luego de colocar el asfalto en el pavimento. Para poder simular el envejecimiento que tendrá el asfalto en la planta durante el proceso de mezclado, el asfalto deberá ser envejecido en el laboratorio con un ensayo

patrón de envejecimiento, donde el residuo asfáltico que queda luego del envejecimiento es clasificado de acuerdo a su viscosidad.

El método para clasificar asfaltos de penetración era muy empleado hasta que se estandarizó el método de viscosidad. Para la clasificación de asfaltos empleado este método se realiza una prueba no destructiva sobre una muestra, en la que una aguja, con una carga, penetra la misma en un tiempo determinado en condiciones controladas, de acuerdo a la profundidad de penetración se determina si el asfalto es blando o duro.

### **1.3.2. Asfalto diluido**

Es un tipo de cemento asfáltico que ha sido mezclado con solventes derivados del petróleo, los solventes derivados del petróleo son conocidos como diluyentes. También permite tener un control sobre el tiempo de curado que se le quiera aplicar al cemento asfáltico una vez aplicados en condiciones atmosféricas.

Entre los asfaltos diluidos se tiene:

- Asfaltos de curado rápido (RC)
- Asfaltos de curado medio (MC)
- Asfaltos de curado lento (SC)

### **1.3.3. Asfalto emulsionado**

También se le denomina emulsión asfáltica, este es una mezcla de cemento asfáltico y agua, la cual contiene un agente emulsionante en cantidades muy pequeñas. Este sistema contiene dos etapas heterogéneas

entre sí, entre el asfalto y agua, donde el agua tiene como función trabajar la etapa continua de la emulsión y las partes del asfalto, en forma de glóbulos, la etapa discontinua.

Los asfaltos emulsionados se emplean para el riego de liga en las superficies bituminosas existente para obtener mejor adherencia entre superficies y prevenir de esta manera deslizamiento de capas asfálticas.

#### **1.4. Propiedades químicas del asfalto**

Las propiedades químicas presentes en el asfalto lo hacen un material de construcción de carreteras muy útil y versátil. En la práctica no se cuentan con datos que permitan comparar la composición química con un criterio específico, normado por instituciones internacionales, ya que las pruebas químicas que se pueden implementar requieren equipos sofisticados y el empleo de personal muy capacitado, lo que dificulta que se pueda implementar en todos los laboratorios que realizan pruebas de asfaltos.

Es necesario reconocer que el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos con algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto, cuando es disuelto en solventes como el heptano, se separa en dos partes, las cuales son:

- Asfaltenos
- Maltenos

Los asfaltenos no se disuelven en el heptano, estos proporcionan color y dureza al asfalto. Los maltenos se disuelven en el heptano, esto forma líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites, las resinas proveen las propiedades

adhesivas en el asfalto y los aceites intervienen como forma de transporte de los asfaltenos y las resinas.

La proporción de los asfaltenos y los maltenos varía de acuerdo a muchos factores, entre los que se encuentran las altas temperaturas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla del pavimento y el espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado.

## **1.5. Propiedades físicas del asfalto**

Entre las propiedades más importantes se encuentran:

- La durabilidad
- La adhesión
- Susceptibilidad a temperatura
- Envejecimiento
- Endurecimiento

### **1.5.1. Durabilidad**

Esta propiedad indica qué tanto puede retener el asfalto las características originales para el cual fue diseñado, cuando este se encuentra expuesto a procesos de degradación y envejecimiento.

Para determinar esta propiedad no se puede juzgar únicamente el asfalto como algo individual, se debe analizar el comportamiento del pavimento, el cual es afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, mano de obra y otras variables, por lo tanto se dificulta definir la durabilidad del pavimento a través del asfalto.

### **1.5.2. Adhesión y cohesión**

La adhesión es la propiedad que permite al asfalto adherirse al agregado en la mezcla asfáltica. La cohesión es la propiedad que permite unir firmemente las partículas de agregado en la mezcla asfáltica terminada.

### **1.5.3. Susceptibilidad a la temperatura**

Una propiedad muy importante y valiosa en los asfaltos es la susceptibilidad térmica, ya que es un material termoplástico, esto indica que se vuelve más duro, es decir más viscoso, conforme su temperatura va disminuyendo, y se vuelve más blando, es decir menos viscoso, conforme su temperatura va en aumento. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de acuerdo al petróleo que se esté usando. Esto indica que, aunque se tenga el mismo grado de viscosidad o de penetración al emplearse asfaltos de distintos orígenes, la susceptibilidad a la temperatura va a variar y, por lo tanto, el comportamiento del asfalto variará en su viscosidad o penetración a distintas temperaturas.

Tiene mucha importancia tener conocimiento de la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que se utilizará pues esta indica a qué temperatura es correcta la mezcla de asfalto con agregado y también indica cual debe ser la temperatura a la cual se debe compactar.

La susceptibilidad a la temperatura del asfalto a emplear debe tener la suficiente fluidez a altas temperaturas para que puedan cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, para que puedan desplazarse unas respecto a otras durante la compactación. Deberá ser lo suficiente viscoso, a temperatura

ambiente, para mantener unidas las partículas de agregado cuando finaliza su construcción.

#### **1.5.4. Endurecimiento y envejecimiento**

Los asfaltos tienen como propiedad inherente la tendencia a endurecerse en la mezcla asfáltica cuando se está elaborando y en el pavimento terminado. El endurecimiento se debe al proceso de oxidación, esto ocurre con más facilidad a temperaturas altas, en la construcción, y en películas delgadas de asfalto. Durante la construcción el asfalto se encuentra sometido a altas temperaturas y en películas delgadas mientras se están revistiendo las partículas de agregado durante la mezcla, por lo que en esta etapa la oxidación y el endurecimiento se puede dar de manera severa.

El endurecimiento del asfalto continúa en el pavimento cuando ha finalizado la construcción, este proceso puede ser retrasado si se mantiene una cantidad pequeña de vacíos interconectados con una gran capa de asfalto sobre el agregado en el pavimento terminado.

#### **1.6. Pruebas para determinar las propiedades del cemento asfáltico**

Para la determinación de las propiedades del cemento asfáltico se deben realizar los ensayos que se muestran a continuación, los cuales deben realizarse en laboratorios debidamente certificados para obtener datos certeros y garantizados.

- Viscosidad
- Penetración
- Punto de inflamación



- Prueba de película delgada en horno (TFO)
- Prueba de película delgada en horno rotatorio (RTFO)
- Ductilidad
- Solubilidad
- Peso específico

Al momento de adquirir asfalto es necesario que este cuente con registro de sus propiedades analizadas en laboratorios certificados y verificar si se cumple con las especificaciones nacionales presentes en el libro de *Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes, de la Dirección General de Caminos, edición 2001.*

## 2. ASFALTOS MODIFICADOS

### 2.1. Generalidades

En un inicio se planteó que los asfaltos modificados se emplearan únicamente como emulsiones impermeabilizantes, luego de realizar ensayos a los asfaltos modificados se logró determinar que estos presentaban mejores propiedades visco-elásticas que los asfaltos convencionales, por lo tanto ya no solo se empleó para impermeabilizar sino también en pavimentación.

Los asfaltos modificados deben presentar compatibilidad entre sus componentes para poder formar una mezcla uniforme y homogénea, para evitar de esta manera la separación de sus partes al momento de realizar la mezcla asfáltica. La compatibilidad de los asfaltos con el agente modificador debe ser comprobada por el proveedor, garantizándola con sus respectivos resultados de laboratorio. Para la modificación de asfaltos se emplea un asfalto base, un agente modificador y un catalizador para garantizar la unión de todos los elementos. El tipo de asfalto modificado empleado dependerá de las características del proyecto.

Para clasificar los asfaltos modificados se emplea el grado de desempeño (PG, por sus siglas en inglés "*Performance Grading*"), por medio de este grado se puede determinar el comportamiento del cemento asfáltico en los pavimentos. Está definido por las temperaturas a las cuales puede trabajar, teniendo una máxima y una mínima, dentro de las cuales el asfalto puede trabajar de manera satisfactoria al ser colocado. Esto quiere decir que, para un cemento asfáltico con clasificación PG 76 – 22, el grado de desempeño permite

trabajar con temperaturas entre 76 y -22 grados Celsius, obteniendo resultados satisfactorios.

## **2.2. Polímeros**

Son elementos que contienen un alto peso molecular, se forman por la unión de varias moléculas pequeñas llamadas monómeros, los cuales están compuestos de moléculas simples. De la unión de varios monómeros se crean cadenas repetitivas de polímeros, los monómeros se encuentran unidos de manera covalente, por lo tanto se trata de un material orgánico.

Cuando se emplea polímeros se pueden modificar varias propiedades del cemento asfáltico, entre las cuales se encuentran:

- Susceptibilidad a la temperatura
- Adhesión de los agregados
- Resistencia a la deformación permanente
- Resistencia al agrietamiento por fatiga
- Ductilidad
- Elasticidad

## **2.3. Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos**

Los polímeros tienen una gran cadena de hidrocarbano en comparación al asfalto, es por eso que la adición del polímero incrementa la rigidez o viscosidad del cemento asfáltico a altas temperaturas, de acuerdo al porcentaje de polímero que se adhiera, este proveerá rigidez y refuerzo general al cemento asfáltico.

La adición de polímeros mejora principalmente las propiedades del asfalto a altas temperaturas, las propiedades del asfalto a bajas temperaturas es proporcionado por el grado de asfalto base.

Las características mecánicas del asfalto pueden ser mejoradas en el rango de temperatura de operación por medio de la mezcla con el polímero adecuado, el grado y tipo adecuado de asfalto base. De forma general se puede clasificar a los polímeros en:

- Elastómeros
- Plastómeros

### **2.3.1. Elastómeros**

Son materiales poliméricos termoestables o termoplásticos con propiedades viscoelásticas, es decir, permiten mayor deformación en el asfalto, los elastómeros pueden alargarse entre un cinco y un setecientos por ciento de su forma inicial, dependiendo del material cementante, incrementan la temperatura de desempeño, permitiendo un obtener grados de desempeño del orden de PG 76 – 22.

### **2.3.2. Plastómeros**

Son materiales poliméricos con propiedades específicas que permiten resistencia a la flexión y deformación del pavimento, es decir, rigidizan el asfalto, extienden la temperatura de desempeño, ya que fue diseñado para usarse como modificador de altas temperaturas, permitiendo obtener grados de desempeño del orden de PG 82 – 22. Al modificar asfaltos con este tipo de polímero, es más eficiente su trabajo en climas cálidos que en climas fríos, su

resistencia al envejecimiento es excelente. Tienen baja viscosidad y permite trabajar con alto contenido de asfalto, para mezclarlo con un asfalto base es necesario alcanzar una temperatura que oscile entre 180 a 190 grados Celsius para obtener una mezcla homogénea.

## **2.4. Fundamentos de la modificación de asfaltos**

Las mezclas asfálticas, a lo largo de su vida útil, sufren deterioro, entre los principales factores que influyen en el deterioro, se encuentran:

- Clima
- Deformación por tránsito
- Tiempo

En clima, es la temperatura promedio a la cual está expuesto el pavimento, tomando en cuenta las variaciones de humedad provocadas por las lluvias y el lugar geográfico en que se encuentre el pavimento, se debe tomar en cuenta que los fenómenos climáticos han tenido efectos devastadores sobre los pavimentos, debido a cambios climáticos.

La deformación por tránsito significa que las mezclas asfálticas son diseñadas para una carga promedio que genera una deformación causada por la circulación de vehículos. Debido al desarrollo social-humano estas cargas de diseño son cumplidas en menos tiempo al que se especificó.

El tiempo se refiere al envejecimiento térmico de la mezcla asfáltica, ya que, el mismo se va degradando posteriormente a su colocación.

Estas son las causas del deterioro de las mezclas asfálticas, es por eso que aunque los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas, como de adhesión, aplicación en distintos climas y tránsitos, no pueden llegar a cumplir la vida útil. Al analizar este problema estimado en el diseño, aun si se aplican asfaltos convencionales con grados muy duros, no se puede evitar el problema de deformación y se corre el riesgo de agrietamiento.

Para evitar estos problemas se desarrollaron soluciones para mejorar las características de los asfaltos convencionales aplicados en pavimentos, esto dio origen a los asfaltos modificados con polímeros que se aplican en la actualidad, que han obtenido resultados satisfactorios.

## **2.5. Compatibilidad de los polímeros**

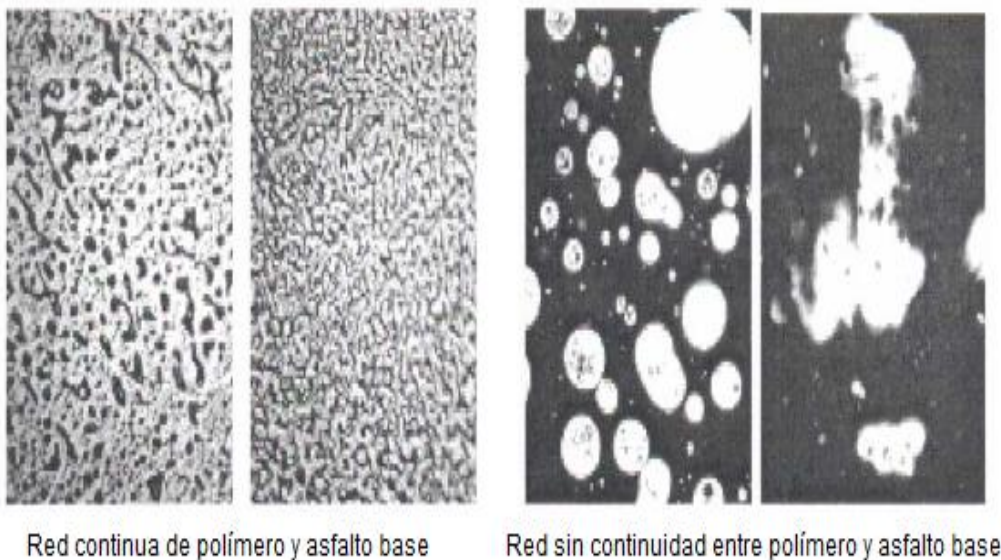
Para que los asfaltos modificados trabajen de la mejor manera es necesario seleccionar detenidamente el asfalto base a utilizar, el tipo de polímero, la dosificación, la forma de elaboración y el almacenaje.

Los polímeros tienen un tamaño de partícula de dispersión óptima el cual varía dependiendo de los monómeros que lo componen, el cual se emplea para mejorar las condiciones del asfalto base, si el tamaño del polímero es más pequeño que el óptimo, este solo trabajaría como un relleno mineral, material que puede pasar el tamiz número 200, y si el tamaño es mayor al del óptimo, solo se aumentaría la viscosidad del cemento asfáltico, sin mejorar la elasticidad y resistencia.

Los polímeros actúan de manera diferente si son aplicados a distintos asfaltos base, no importando si tiene el mismo grado de viscosidad, pudiendo obtener resultados muy diversos. Los polímeros compatibles con el asfalto base

producen una mezcla estable rápidamente, la compatibilidad se puede apreciar en las microfotografías mostradas en la figura 2, donde se muestra una mezcla estable y otra inestable, para la muestra estable se presenta una homogenización en toda la estructura que se aprecia a simple vista como una pasta uniforme, mientras en la muestra inestable se presentan acumulaciones de material que tiende a formar grumos en la superficie, teniendo una estructura heterogénea.

Figura 2. **Microfotografías de cemento asfáltico modificado con polímeros**



Fuente: HECKMANN, Walter. *Formación de red polimérica en el residuo de emulsión recuperado por medio de secado con aire forzado*. p. 5.

El polímero se puede presentar de diversas maneras, como polvo, pequeñas bolitas o grandes panes. La temperatura de mezclado depende del

polímero, la mezcla debe quedar muy uniforme, formando una red continua de polímero en el asfalto base, de manera estable sin que se separen.

## **2.6. Asfaltos modificados con elastómeros**

Para poder obtener asfaltos modificados, es necesario mezclar tres componentes, los cuales son: asfalto base, resina base y endurecedor, teniendo una compatibilidad entre los tres para que se forme una red de estos componentes. Este tipo de asfalto modificado tiene una resistencia mecánica alta y gran adhesión a los agregados. Su vida útil está condicionada por el agregado, no por el asfalto si se elabora correctamente.

Por lo general, se emplea este tipo de asfalto modificado para los siguientes casos específicos:

- Zonas de frenado intenso: donde se requiere alto grado de fricción para evitar derrapes.
- Zonas que requieren resistir a agentes químicos que puedan derramarse sobre su superficie.
- Zonas que requieran mantener superficies rugosas durante largos periodos de tiempo.

Los tipos básicos de elastómeros utilizados para la modificación de asfaltos empleando polímeros son:

- Hules sintéticos compuestos de estireno-butadieno (SB)
- Hule de estireno-butadieno (SBR)
- Hule termoplástico de estireno-butadieno-estireno (SBS)



En la tabla I se muestra un listado de los elastómeros utilizados para la modificación del cemento asfáltico, se indican los tipos de polímeros que lo forman, la presentación que tienen físicamente y la composición química que posee.

Tabla I. **Elastómeros típicos utilizados para modificar asfaltos**

<b>Tipo</b>	<b>Presentación</b>	<b>Composición química</b>
Copolímero de bloque	Látex	Estireno-butadieno (SB)
Copolímeros aleatorios	Látex	Estireno-butadieno-hule (SBR)
Copolímero de bloque	Granulado o en polvo	Estireno-butadieno-estireno (SBS)
Copolímero de bloque	Grumos	Estireno-butadieno (SB)
Copolímero de bloque	Granulado o en polvo	Estireno-butadieno-estireno (SBS)
Homopolímero	Látex	Policloropreno
Copolímeros aleatorios	Látex	Estireno-butadieno-hule (SBR)
Copolímero de bloque	Pre-mezclado	Estireno-butadieno (SB)
Copolímeros aleatorios	Látex	Estireno-butadieno-hule (SBR)
Copolímero de bloque	Granulado o en polvo	Estireno-butadieno-estireno (SBS)

Fuente: MICIVI. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Camino*. p. 411-2.

## **2.7. Asfaltos modificados con plastómeros**

En los asfaltos, estos polímeros aumentan su viscosidad, incluso a bajas concentraciones, si se aumenta la proporción de los plastómeros, se producen cambios físicos en el asfalto de tal forma que las propiedades físicas de la mezcla entre asfalto y polímero, se acercan más a las propiedades de los plastómeros. Esto ocurre en intervalos de entre ocho y diez por ciento de contenido de plastómero sobre el asfalto, las consecuencias de emplear este

contenido de plastómero es el aumento del intervalo de plasticidad, aumento de la resistencia a la ruptura y disminución de la sensibilidad térmica, variando el intervalo de temperatura de aplicación.

Los tipos básicos de plastómeros utilizados para la modificación de asfaltos empleando polímeros son:

- Polietileno de baja densidad (LDPE)
- Etileno-vinilo-acetato (EVA)
- Etileno-metilacrilato (EMA)

En la tabla II se muestra un listado de los plastómeros utilizados para la modificación de asfaltos, se indica la forma de cómo se encuentra físicamente y la composición química.

Tabla II. **Plastómeros típicos utilizados para modificar asfaltos**

<b>Tipo</b>	<b>Presentación</b>	<b>Composición química</b>
Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Vinilo Acetato (EVA)
Homopolímero	Premezclado con el cemento asfáltico	Polietileno de Baja Densidad (LDPE)
Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Vinilo Acetato (EVA)
Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Metilacrilato (EMA)
Copolímero	Pelotitas	Etileno Vinilo Acetato (EVA)

Fuente: MICIVI. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Camino*. p. 411-2.

## **2.8. Especificaciones sobre asfaltos modificados**

El empleo de asfaltos modificados con polímeros, en Guatemala, se rige por la Dirección General de Caminos, en las *Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes del 2001*, en la división 400, Pavimentos Asfálticos, en la sección 411, asfaltos modificados, en esta sección se establecen las características y propiedades que debe presentar este tipo de asfalto. Las normas que se presentan en las *Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes* son basadas en Normas AASHTO y ASTM.

### **2.8.1. Ensayos**

Los ensayos que se realizan a los asfaltos sin modificar se deben aplicar de igual manera a los asfaltos modificados, aplicando además otros ensayos como lo son:

- Recuperación elástica por torsión
- Resiliencia
- Recuperación elástica por ductilometro

### **3. MEZCLAS ASFÁLTICAS SMA (STONE MASTIC ASPHALT)**

#### **3.1. Antecedentes**

La mezcla asfáltica SMA fue desarrollada en Alemania en los años sesenta, la finalidad de emplear este tipo de mezcla fue orientada a obtener mayor resistencia al desgaste y al deterioro que producían los neumáticos de los vehículos en rutas con nieve, debido a los clavos que tenían los neumáticos. Después de la prohibición del uso de clavos en neumáticos, se comprobó que las mezclas asfálticas SMA aseguraban pavimentos durables que presentaban características de alta resistencia al desgaste en rutas de alto tránsito.

Debido a este desarrollo se normalizó este tipo de mezcla en Alemania en los años ochenta, por el buen desempeño que presenta este tipo de mezcla se generalizó su uso en otros países de Europa, Estados Unidos y Asia, por sus características está ganando rápida aceptación en las autoridades viales y la industria del asfalto.

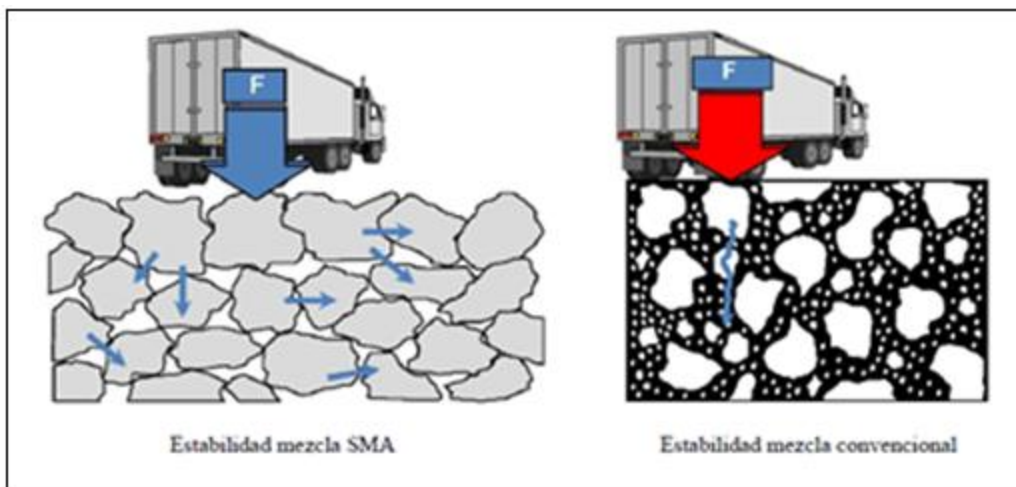
#### **3.2. Generalidades**

La mezcla asfáltica SMA es estable, de tipo discontinua, resistente a las roderas, tiene su fundamento en el contacto piedra sobre piedra, el cual provee de resistencia y un mortero rico en ligante que provee mayor durabilidad.

Para poder tener el contacto piedra sobre piedra, las mezclas presentan un contenido de agregado grueso mayor de 70 por ciento respecto al contenido total de la mezcla. Debido a este esqueleto pétreo autorresistente las cargas

que producen los vehículos se distribuyen de manera estable sobre el agregado grueso, lo que no ocurre con las mezclas convencionales; esto se puede apreciar en la figura 3.

Figura 3. **Comparación de estabilidad de mezclas SMA y convencional**

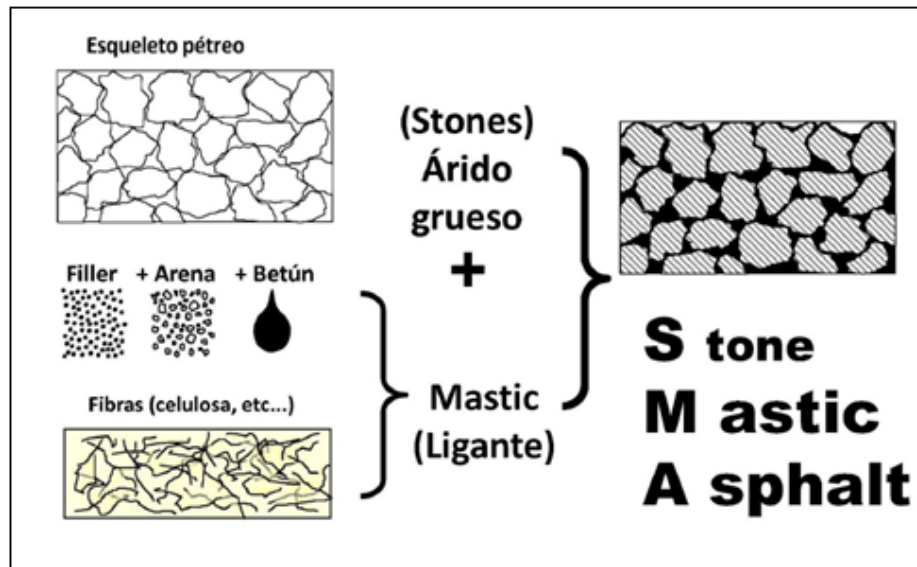


Fuente: GALLART VILLAMOR, Francisco. *Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA*. p. 11.

Otra característica que presenta la mezcla asfáltica es su alto contenido de cemento asfáltico, para evitar que este escurra de los agregados se añade un porcentaje de fibras celulósicas que no modifican químicamente el asfalto solo mejoran sus propiedades físicas, de esta manera se impide el escurrimiento durante el transporte, extendido y colocación.

Para entender de mejor manera la composición de las mezclas tipo SMA, se puede analizar la figura 4.

Figura 4. Composición detallada de la mezcla asfáltica SMA



Fuente: GALLART VILLAMOR, Francisco. *Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA*. p. 11.

Esta mezcla asfáltica tiene como principal ventaja, respecto otras mezclas asfálticas, su extensión de vida útil con mejores desempeños en los pavimentos, otras ventajas que tiene son la reducción de ruido, mejora la resistencia a fricción y mejora la visibilidad.

Actualmente, este tipo de mezclas es muy empleado en carreteras de elevado tránsito vehicular y en zonas industriales, como superficies de rodadura, algunas de las aplicaciones en las que, por lo general, se pueden encontrar aplicaciones de este tipo de mezclas asfálticas son las siguientes:

- Zonas de tránsito elevado de transporte pesado
- Autopistas
- Zonas de carga y descarga

- Aeropuertos
- Puentes
- Carriles especiales para autobuses
- Distribuidores viales
- Intersecciones
- Estacionamientos

### **3.2.1. Desempeño de la mezcla SMA**

El desarrollo de roderas a lo largo del pavimento es menor a mezclas asfálticas convencionales, en pruebas de campo que se han realizado las roderas no se pudieron medir debido a que no se pudo apreciar marcas de las mismas.

Las mezclas SMA son más resistentes a los agrietamientos que las mezclas convencionales debido a su contenido de asfalto y al contacto piedra sobre piedra que permite la granulometría. La vida útil de estas mezclas asfálticas, tomando como referencia la experiencia de Alemania, tiene mayor periodo de vida útil que una mezcla convencional, aportándole su debido mantenimiento a lo largo del período de servicio.

### **3.2.2. Reducción de ruido**

La reducción de ruido es significativa, estudios alemanes indicaron que puede llegar a disminuirse en 2,5 decibeles cuando se emplea una capa de mezcla SMA como superficie de rodadura, dependiendo el tamaño máximo nominal del agregado el ruido variará, disminuyendo los decibeles conforme se disminuye el tamaño máximo del agregado nominal.

### **3.2.3. Resistencia a la fricción**

No es una mezcla drenante, sin embargo, presenta características similares en cuanto a textura de capas de fricción de granulometría abierta, esto significa que provee mayor seguridad a los vehículos cuando estos transitan sobre pavimento mojado y se genera menos salpicadura al comparar con los resultados de mezclas asfálticas con granulometría densa.

### **3.2.4. Visibilidad**

Debido a la textura rugosa que posee por la granulometría que dispone la mezcla asfáltica SMA, el agua de las precipitaciones escurre rápidamente hacia los drenajes, evitando acumulaciones de agua, reduciendo así el deslumbramiento, en las noches que hay precipitación, ocasionado por la luz de otros vehículos y permite un incremento en la visibilidad de las señales sobre el camino.

## **3.3. Cemento asfáltico**

La Norma AASHTO M 226 que comprende todas las especificaciones sobre el asfalto a utilizar.

Se pueden emplear cementos asfálticos convencionales con grados de viscosidad AC-10, AC-20, AC-30 o equivalentes a estos grados. En la actualidad se tiene como tendencia generalizada el empleo de asfaltos modificados, para estos asfaltos es necesario que el grado de desempeño (PG) sea uno o dos grados más alto de lo recomendado, el grado de desempeño está definido de acuerdo al tipo de modificante que tenga el asfalto.

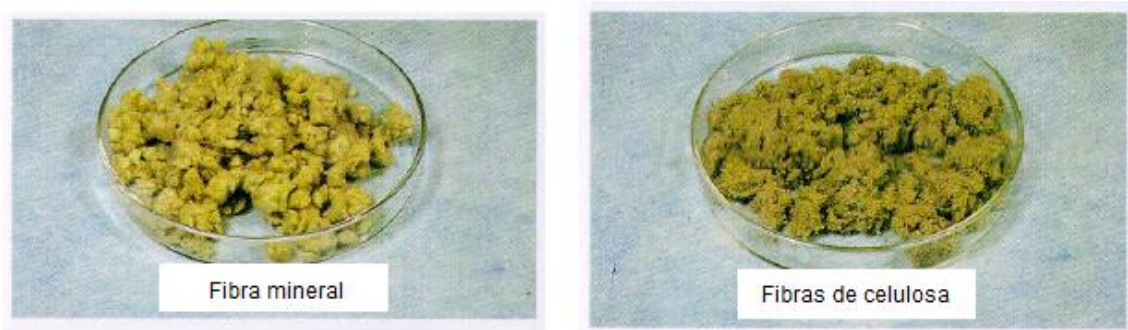


El cemento asfáltico deberá de ser mezclado a una temperatura en la cual se pueda alcanzar una viscosidad mínima de  $170 \pm 20$  centistokes, se debe tener mucho cuidado de no sobrepasar el punto de inflamación, ya que puede ocurrir escurrimiento del asfalto en el agregado.

### 3.4. Aditivo estabilizador

Los aditivos estabilizadores se encuentra de dos formas de fibras: de celulosa o minerales, como se aprecia en la figura 5, su función primordial dentro de la mezcla asfáltica es estabilizar la unión entre el cemento asfáltico y el agregado, esto se debe a que el contenido de cemento asfáltico es alto en comparación a una mezcla convencional y la granulometría que presenta la mezcla Stone Mastic Asphalt tiene mucho contenido de agregado grueso.

Figura 5. Aditivos estabilizadores



Fuente: GALLART VILLAMOR, Francisco. *Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA*. p. 15.

La cantidad que se debe dosificar dentro de la mezcla asfáltica de fibra de celulosa es de 0,3 por ciento respecto el peso total de la mezcla, y para la fibra

mineral es de 0,4 por ciento respecto el peso total de la mezcla. El aditivo más empleado en las mezcla es la proveniente de fibras celulosas.

El empleo de fibras celulosas o minerales no modifica químicamente la estructura interna del cemento asfáltico, solo interviene en las propiedades físicas del mismo. Las fibras tienden a espesar el cemento asfáltico evitando de esta manera que se escurra al momento de ser almacenado, transportado o colocado, impidiendo el problema que se observa en la figura 6.

Figura 6. **Mezcla asfáltica sin agente estabilizador**



Fuente: GALLART VILLAMOR, Francisco. *Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA*. p. 16.

Debido a estudios que se realizaron sobre las fibras de celulosa en los años noventa se observó una limitación en la planta de producción que era la dosificación que tenía el material, esto producía demoras en la fabricación, por lo que se ideó una alternativa, la cual consistía en fabricar gránulos de celulosa envueltos en una pequeña capa de betún, la cual proporcionaba protección ambiental y permitía su almacenaje en la planta.

La presentación que tienen las fibras varía de acuerdo a los proveedores, ya que se puede encontrar en forma de pelotitas, líquida o de fibras. Al emplear las fibras se debe tomar en cuenta el tipo de planta de mezclado que se disponga.

### **3.5. Relleno mineral**

Son elementos finamente divididos, los cuales son insolubles en asfalto que se esparcen en él, como medio que permita modificar sus propiedades mecánicas y consistencia. Generalmente como relleno mineral se emplea, cal, cemento, polvo de tiza, ceniza de combustible pulverizado, talco sílice o puzolanas. Su efecto que tiene sobre el asfalto es endurecerlo, es decir que ocurrirá una disminución en la deformación o fluencia producida por una carga, se reducirá su penetración y se obtendrá un incremento de rigidez.

Durante el uso que tenga el relleno este debe estar seco para poder fluir libre en la mezcla y sobre todo libre de aglomeraciones, es decir formando grumos. Al igual que los agregados no debe contar con impurezas orgánicas y tener baja plasticidad.

## **4. ANÁLISIS DE LA MEZCLA STONE MASTIC ASPHALT**

### **4.1. Requisitos de los materiales**

El fundamento que se emplea para el diseño de la mezcla Stone Mastic Asphalt, consiste en desplegar un esqueleto de agregado, que permita un contacto entre el agregado grueso, cumpliendo de esta manera con el contacto de piedra sobre piedra. El agregado grueso está definido por la relación del tamaño máximo nominal del agregado usado y de la porción del agregado retenido en el tamiz de abertura 4,75 milímetros, es decir el tamiz número 4.

La mezcla también debe contener mortero en cantidades suficientes para obtener la estabilidad esperada, para obtener la consistencia y un buen funcionamiento de la mezcla, es necesario un contenido de cemento asfáltico alto.

Para obtener una mezcla asfáltica SMA satisfactoria es necesario cumplir con los siguientes requisitos:

- Los agregados deben elegirse adecuadamente cumpliendo con sus requerimientos.
- La granulometría del agregado que provea contacto de piedra sobre piedra.
- La granulometría debe cumplir con requerimientos mínimos de vacíos en agregado mineral.
- Tener un contenido asfáltico que permita contar con un nivel de vacíos esperado.

- La acción del agua y su sensibilidad al drenado sobre la mezcla asfáltica.

#### **4.1.1. Características del agregado grueso**

El agregado grueso que se emplea en la elaboración de la mezcla asfáltica tipo Stone Mastic Asphalt debe de cumplir con los requisitos que presentan los siguientes ensayos, los cuales se encuentra normados para garantizar uniformidad al realizar la mezcla:

##### **4.1.1.1. Abrasión**

La Norma que comprende este ensayo es la AASHTO T 96. Con este ensayo se puede obtener el desgaste mecánico que sufre el agregado, es efectuado por medio de la máquina de los Ángeles.

Este ensayo se lleva a cabo para agregado que tenga partículas que no sobrepasen 37,5 milímetros (1 ½ pulgadas) en su tamaño máximo nominal, la máquina de los Ángeles por medio de rotación en el tambor genera un desgaste sobre el agregado a través del impacto de esferas de acero que fracturan las partículas hasta que reducen de tamaño.

Las esferas de acero que generan la cargas abrasivas tiene un peso comprendido entre 390 y 445 gramos y un diámetro entre 46,38 y 4,63 milímetros, estos parámetros se emplean de acuerdo al tipo de granulometría a utilizar, como se observa en la tabla III.

Tabla III. Tipos de abrasión

Tipo	Tamaño de material retenido	No. de esferas	Revoluciones	Tiempo (minutos)
A	1" - 3/4" - 1/2" - 3/8"	12	500	17
B	1/2" - 3/8"	11	500	17
C	1/4" - No. 4	8	500	17
D	No. 8	6	500	17

Fuente: MORALES RAMÍREZ, Evelyn. *Manual de apoyo docente para desarrollar ensayos de laboratorio, relacionados con materiales de construcción.* p. 92.

Para llevar a cabo este ensayo se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Tomar una muestra representativa del material a utilizar.
- De la muestra obtenida se separan las partículas del agregado según el tipo de abrasión, como se muestra en la tabla IV.

Tabla IV. Pesos de granulometría para ensayo de abrasión

Tamaño de material retenido		Pesos de acuerdo a tipo de abrasión			
pulg.	mm.	A	B	C	D
1"	25,00	1 250 ± 25			
3/4"	19,00	1 250 ± 25			
1/2"	12,50	1 250 ± 10	2 500 ± 10		
3/8"	9,50	1 250 ± 10	2 500 ± 10		
1/4"	6,30			2 500 ± 10	

Continuación de la tabla IV.

No. 4	4,75			2 500 ± 10	
No. 8	2.36				5 000 ± 10
<b>Total</b>		<b>5 000 ± 10</b>	<b>5 000 ± 10</b>	<b>5 000 ± 10</b>	<b>5 000 ± 10</b>

Fuente: normas colombianas del Instituto Nacional de Vías. p. 32.

- Colocar en la máquina de los Ángeles la muestra y las esferas de acuerdo al tipo de abrasión, calibrar la máquina de los Ángeles para que gire a una velocidad comprendida entre 30 y 33 revoluciones por minuto.
- Girar el cilindro de la máquina de los Ángeles hasta alcanzar 500 revoluciones.
- Cuando ha llegado a las 500 revoluciones se detiene la máquina, se extrae la carga abrasiva y se coloca sobre una bandeja el material ensayado.
- Tamizar el material ensayado, utilizando el tamiz número 12.
- Se determina el porcentaje de desgaste empleando la siguiente ecuación:  $\% \text{ Desgaste} = \left( \frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) * 100$

Donde

$P_1$  = peso de la muestra seca antes del ensayo

$P_2$  = peso de la muestra seca después del ensayo

#### 4.1.1.2. Partículas planas y alargadas

La Norma que comprende este ensayo es la ASTM D 4791. Con este ensayo se obtiene el porcentaje de partículas que tienen un determinado largo con respecto su ancho.

Para determinar las partículas planas se toma como referencia su espesor, dimensión mínima, la cual debe ser inferior a  $3/5$  de la dimensión media de la muestra y para las partículas alargadas se toma su longitud, dimensión máxima, la cual debe ser superior a  $9/5$  de la dimensión media de la muestra. Este ensayo solo se puede aplicar para agregado mayor a  $1/4$  de pulgada, con las masas que muestra la tabla V.

Tabla V. Masa mínima de muestra

Tamaño máximo nominal		Masa mínima de muestra	
mm	pulgadas	kg	lb
9,5	3/8	1	2
12,5	1/2	2	4
19,0	3/4	5	11
25,0	1	10	22
37,5	1 1/2	15	33
50,0	2	20	44
63,0	2 1/2	35	77

Fuente: Norma COGUANOR NGT-41010 h12, Método de ensayo. *Determinación de partículas planas, partículas alargadas o partículas planas y alargadas en el agregado grueso.* p. 9.

Para realizar el ensayo se debe contar con un calibrador graduado de manera que cumpla con las especificaciones que se muestran en la tabla VI.



Tabla VI. Dimensiones del calibrador

Tamices				Dimensiones del calibrador	
Pasa		Retiene		Partículas planas (abertura de la ranura)	Partículas alargadas (separación de las barras)
mm.	Pulg.	mm.	Pulg.		
63	2 ½	50	2	33,9	---
50	2	37,5	1 ½	26,3	78,8
37,5	1 ½	25	1	18,8	56,3
25	1	19	¾	13,2	39,6
19	¾	12,5	½	9,5	28,4
12,5	½	9,5	3/8	6,6	19,8
9,5	3/8	6,3	¼	4,7	14,2

Fuente: normas colombianas del Instituto Nacional de Vías. p. 44.

Para llevar a cabo este ensayo se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Tomar una muestra del material de acuerdo a la tabla V.
- Dividir el material para realizar granulometría.
- Realizar granulometría.
- Separar el material según tamices, como se muestra en tabla VI.
- De cada porción del agregado que tenga un 5 a 15 por ciento de material retenido, se tomarán 100 partículas, a las cuales se les determinará su peso.
- De porción que tenga más de 15 por ciento de material retenido, se tomarán 200 partículas, a las cuales se les determinará su peso.
- De porciones que tenga menos de 5 por ciento de material retenido no se toma en cuenta al realizar el ensayo.

- Separar las partículas que pasan el calibrador de aplanamiento en la abertura correspondiente a la fracción que se ensaya, para las partículas que pasan se procede a pesarlas.
- Separar las partículas que pasan el calibrador de alargamiento por la separación de barras correspondiente a la fracción que se ensaya, para las partículas que pasan se procede a pesarlas.
- Se determina el índice de aplanamiento el cual está definido por la siguiente ecuación: Índice de aplanamiento =  $(a/c) * 100$

Donde

a = peso total de partículas que pasa calibrador de aplanamiento

c = peso de las 100 o 200 partículas

- Se determinar el índice de alargamiento el cual está definido por la siguiente ecuación: Índice de alargamiento =  $(b/c) * 100$

Donde

b = peso total de partículas que pasa calibrador de alargamiento

c = peso de las 100 o 200 partículas

#### **4.1.1.3. Absorción**

La Norma que comprende este ensayo es la ASTM C 127. Con este ensayo se obtiene la capacidad de absorción, internamente, que llega a tener el agregado.

Para llevar a cabo este ensayo se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Tamizar el material, desechando el agregado que pase el tamiz número 4.
- Lavar el material tamizado para remover polvo u otro agregado adherido.
- Secar el material al horno hasta llevar a su condición seca.
- Retirar material del horno y dejarlo en ambiente fresco durante 1 a 3 horas, hasta que muestra pueda palpase.
- Para determinar la cantidad de masa de material a ensayar, esto dependerá del tamaño máximo nominal del agregado, para lo cual se tiene la siguiente información, tabulada en la tabla VII.

Tabla VII. **Cantidad de material a ensayar de acuerdo a tamaño máximo nominal del agregado**

Tamaño máximo nominal		Masa mínima de la muestra	
mm	pulgadas	kg	lb
50	2	8	18
37,5	1 1/2	5	11
25	1	4	8.8
19	3/4	3	6.6
12,5	1/2	2	4.4
12,5 o menos	1/2 o menos	2	4.4

Fuente: Norma COGUANOR NGT-41010 h8, Método de ensayo. *Determinación de la densidad, gravedad específica y absorción de agua del agregado grueso.* p. 10.

- Colocar la muestra en un recipiente y sumergirlo en agua durante un día.

- Extraer la muestra del agua y colocarla en un paño absorbente frotando individualmente las partículas largas para extraer el agua superficial, evitando la evaporación del agua en los poros internos del agregado.
- Determinar la masa del agregado en la condición de superficie seca saturada ( $m_{ss}$ ).
- Calcular el porcentaje de absorción, empleando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ abs.} = \left[ (m_{ss} - m_n) / m_n \right] * 100$$

Donde:

%abs. = porcentaje de absorción

$m_n$  = masa natural en kg, determinada por el TMN

$m_{ss}$  = masa superficie seca saturada al aire en kg

#### 4.1.1.4. Gravedad específica

La Norma que comprende este ensayo es la ASTM C 127. Se emplea para determinar el volumen ocupado por el agregado en mezclas que estén proporcionales o analizadas sobre un volumen básico, también es muy usado para determinar el cantidad de vacíos en el agregado.

Para llevar a cabo este ensayo se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Tamizar el material, desechando el agregado que pase el tamiz número 4.
- Lavar el material tamizado para remover polvo u otro agregado adherido.
- Secar el material al horno hasta llevar a su condición seca.

- Retirar material del horno y dejarlo en ambiente fresco durante 1 a 3 horas, hasta que muestra pueda palpase.
- Para determinar la cantidad de masa de material a ensayar, esto dependerá del tamaño máximo nominal del agregado, para lo cual se tiene la información, tabulada en la tabla VII.
- Colocar la muestra en un recipiente y sumergirlo en agua durante un día.
- Extraer la muestra del agua y colocarla en un paño absorbente frotando individualmente las partículas largas para extraer el agua superficial, evitando la evaporación del agua en los poros internos del agregado.
- Determinar la masa del agregado en la condición de superficie seca saturada ( $m_{ss}$ ).
- Colocar el agregado en una canasta y sumergirla en agua, agitando el recipiente de tal manera que permita expulsar todo el aire atrapado.
- Determinar la masa seca saturada sumergida ( $m_{sss}$ ) con el recipiente aun en el agua.
- Secar la muestra al horno hasta llegar a condición seca, dejar la muestra en un ambiente fresco durante 1 a 3 horas hasta que sea palpable.
- Tomar la masa seca de la muestra ( $m_s$ )
- Calcular la gravedad específica, empleando la siguiente ecuación:

$$g = \left[ \frac{m_n}{(m_{ss} - m_{sss})} \right]$$

Donde

$g$  = gravedad específica

$m_n$  = masa natural en kg determinada por el TMN

$m_{ss}$  = masa superficie seca saturada al aire en kg

$m_{sss}$  = masa seca saturada sumergida en kg

- Calcular la gravedad específica, en superficie seca saturada, empleando la siguiente ecuación:

$$g_{ss} = m_{ss} / (m_{ss} - m_{sss})$$

Donde

$g_{ss}$  = gravedad específica, superficie seca saturada

$m_{ss}$  = masa superficie seca saturada al aire en kg

$m_{sss}$  = masa seca saturada sumergida en kg

- Calcular la gravedad específica aparente, empleando la siguiente ecuación:

$$g_A = [m_n / (m_n - m_{sss})]$$

Donde

$g_A$  = gravedad específica aparente

$m_n$  = masa natural en kg determinada por el TMN

$m_{sss}$  = masa seca saturada sumergida en kg

#### 4.1.1.5. **Peso unitario y vacío**

La Norma que comprende este ensayo es la ASTM C 29. Este ensayo es aplicable a partículas que tengan un tamaño menor a 125 milímetros (5 pulgadas), en condiciones de material compactado o suelto.

El peso unitario es una relación entre la masa del material y el volumen que este ocupa, expresado en kilogramo sobre metro cúbico. Empleando este

ensayo se puede determinar el peso unitario suelto o compactado, para las mezclas asfálticas es necesario determinar el peso unitario compactado ya que a través de esta se puede determinar el contenido de vacíos que tendrá el agregado grueso.

El agregado grueso está definido como el total del agregado que es retenido por una malla, denominada malla de corte, la cual es especificada de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado usado. En la tabla VIII se determinan los distintos tamaños máximos nominales y sus respectivas mallas de corte.

Tabla VIII. **Definición de agregado grueso de acuerdo a malla de corte**

Tamaño máximo nominal del agregado		Malla de corte	
mm	pulgadas	mm	pulgadas
25,00	1	4,75	# 4
19,00	3/4	4,75	# 4
12,50	1/2	4,75	# 4
9,50	3/8	2,36	# 8
4,75	# 4	1,18	# 16

Fuente: National Asphalt Pavement Association (NAPA). *Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice*. p. 9.

Para llevar a cabo este ensayo se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Tomar una muestra del material grueso de acuerdo a tabla IX, tomando entre 125 a 200 por ciento de la cantidad de la muestra.

Tabla IX. **Capacidad del recipiente medidor**

Tamaño máximo nominal		Volumen del medidor		
mm	pulgadas	Pie <sup>3</sup>	Litro	metro <sup>3</sup>
12,50	1/2	1/10	2,8	0,0028
25,00	1	1/3	9,3	0,0093
37,50	1 1/2	1/2	14	0,0140
75,00	3	1,0	28	0,0280
100,00	4	2,5	70	0,0700
125,00	5	3,5	100	0,1000

Fuente: Norma COGUANOR NGT-41010 h2, Método de ensayo. *Determinación de la masa unitaria e índice de vacíos en los agregados.* p. 11.

- Secar en horno a  $110 \pm 5$  grados Celsius, hasta llegar a condición seca.
- Tomar el peso del recipiente medidor cuando se encuentre vacío.
- Llenar el recipiente medidor hasta un tercio con la mano.
- Golpear con el apisonador de punta redondeada 25 veces dentro del recipiente de forma distribuida sobre el agregado, la fuerza que se emplea con el apisonador no debe dañar el agregado solo acomodarlo.
- Llenar nuevamente el recipiente hasta llegar a 2/3 del recipiente y dar otros 25 golpes con el apisonador de manera distribuida.
- Llenar por completo el recipiente y dar 25 golpes sobre el agregado con el apisonador.
- Completar el llenado con las manos y rasar la superficie.
- Pesar el contenido del recipiente y agregado.
- Realizar dos veces el procedimiento descrito y promediar resultados.
- Para determinar el peso unitario se debe emplear la siguiente fórmula:

$$\gamma_s = M.M./V.R$$



Donde

$Y_s$ . = peso unitario del agregado en  $\text{kg/m}^3$

M.M. = masa del material en kg

V.R. = volumen del recipiente en  $\text{m}^3$

- Para determinar el porcentaje de vacíos se debe emplear la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de vacios} = \left[ \frac{(G * \gamma_w) - \gamma_s}{(G * \gamma_w)} \right] * 100$$

Donde

$Y_s$ . = peso unitario del agregado en  $\text{kg/m}^3$

$Y_w$ . = peso unitario del agua en  $\text{kg/m}^3$

G = gravedad especifica del agregado grueso

El peso unitario del agua se determina de acuerdo a la temperatura, en este caso se puede emplear 998 kilogramos sobre metro cúbico, que representa el peso unitario del agua a 20 grados Celsius.

#### **4.1.1.6. Partículas trituradas**

La Norma que comprende este ensayo es la ASTM D 5821. Con este ensayo se obtiene el porcentaje que determina cuantas caras trituradas tiene el agregado.

Para poder realizar este ensayo se debe tomar en cuenta que la muestra debe ser representativa de todo el material a usar y que el peso dependerá del tamaño del agregado, como se muestra en la tabla X.

Tabla X. **Peso de material para ensayo de partículas trituradas**

Tamaño máximo nominal		Peso de muestra	
mm	pulgadas	gramos	libras
9,5	3/8	200	0,5
12,5	1/2	500	1,0
19	3/4	1 500	3,0
25	1	3 000	6,5
37,5	1 1/2	7 500	16,5
50	2	15 000	33,0

Fuente: Norma ASTM D 5821. p. 2.

Para llevar a cabo este ensayo se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Tomar muestras del material en diferentes sitios para tener una muestra que represente a todo el material.
- Del material muestreado se toma la cantidad necesaria para realizar el ensayo.
- Llevar a cabo una granulometría del material tomado.
- Separar material según muestra tabla X.
- Esparcir la muestra para facilitar la inspección en una superficie plana y limpia.
- Separar todas las partículas que tengan una, dos o más caras fracturadas, para considerar una partícula triturada la fractura debe estar en un 25 por ciento del agregado y que la fractura sea mecánica.
- Pesar las partículas separadas según el tamaño del agregado.

- Determinar el porcentaje de partículas con caras fracturadas en cada porción de la muestra, empleando la siguiente ecuación.

$$\% \text{ Caras Fracturadas} = P_{\text{triturado}} / P_{\text{total}}$$

Donde

$P_{\text{triturado}}$  = peso de partículas trituradas

$P_{\text{total}}$  = peso total de la muestra

#### **4.1.2. Características del agregado fino**

El agregado fino que se emplea en la elaboración de la mezcla asfáltica Stone Mastic Asphalt debe de cumplir con los ensayos que se describen a continuación, para poder obtener resultados óptimos y cumplir así con la uniformidad esperada en la mezcla.

##### **4.1.2.1. Angularidad**

La Norma que comprende este ensayo es la AASHTO TP 33. Para realizar los ensayos se emplea el método A, este método es el más útil como prueba indicativa de las propiedades de la forma de las partículas:

Cuando el agregado contiene un alto contenido de vacíos esto indica que presenta alta angularidad, mientras una reducción en el contenido de vacíos indica agregado fino más redondeado. Para trabajar en este ensayo se debe contar con un medidor cilíndrico de 100 mililitros de capacidad, sobre el cual se depositará el agregado y un embudo con su respectivo soporte.

Para llevar a cabo este ensayo se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Tomar una muestra de material, de tal manera que cumpla con las especificaciones de la tabla XI. Por lo general se obtiene de las fracciones de tamaño sobrantes después de realizar granulometría.

Tabla XI. **Fracción de tamaño de agregado, según tamices**

<b>Tamaño del agregado</b>	<b>Masa (gramos)</b>
Tamiz No 8 a tamiz No 16	44
Tamiz No 16 a tamiz No 30	57
Tamiz No 30 a tamiz No 50	72
Tamiz No 50 a tamiz No 100	17
<b>Total</b>	<b>190</b>

Fuente: Normas colombianas del Instituto Nacional de Vías. p. 21.

- Mezclar la muestra de cada tamiz, de tal manera que quede una mezcla homogénea.
- Colocar el embudo con su soporte sobre el medidor cilíndrico a una distancia de 85 milímetros.
- Verter sobre el embudo la mezcla de agregado, bloqueando salida del embudo.
- Liberar salida del embudo permitiendo que la muestra caiga sobre el medidor cilíndrico.
- Quitar el exceso de material que tiene el medidor cilíndrico, teniendo cuidado de no crear vibraciones que pudieran causar compactación del agregado.
- Se pesa el medidor cilíndrico con el agregado.

- Calcular el porcentaje de vacíos del agregado sin compactar, empleando la siguiente ecuación:

$$\%U = \left[ \frac{(V - (F/G))}{V} \right] * 100$$

Donde

%U = porcentaje de agregado fino sin compactar

V = volumen del medidor cilíndrico, en mililitros

F = masa neta del agregado fino en el medidor, en gramos

G = gravedad específica del agregado fino

#### **4.1.2.2. Límite líquido**

La Norma que comprende este ensayo es la AASHTO T 89. Con este ensayo se determina el contenido de humedad en la cual está comprendida una masa de suelo para pasar de estado plástico a estado líquido o semilíquido.

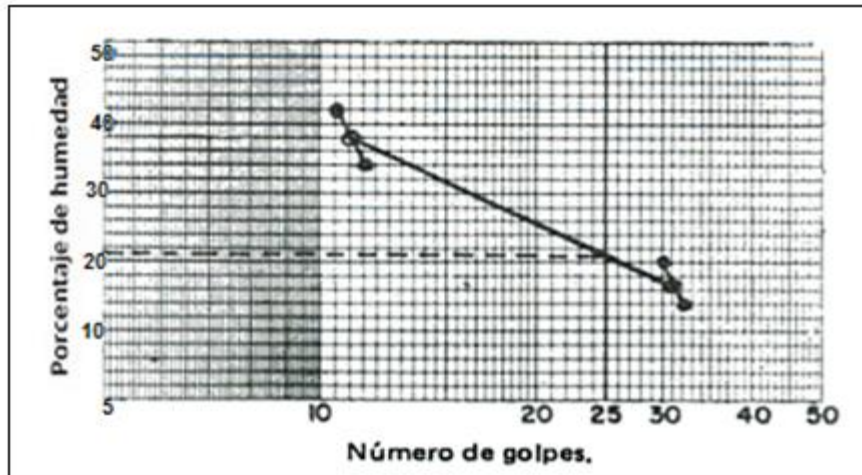
Para poder determinar el porcentaje de humedad se ha ideado un método mecánico, diseñado por Arthur Casagrande, este método es también conocido como Copa de Casagrande.

Para llevar a cabo este ensayo se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Colocar en un soporte firme y horizontal la Copa de Casagrande, calibrando la base y el punto de percusión a un centímetro.

- Tomar una muestra de 200 gramos del material que pase por el tamiz número 40.
- Extraer una muestra representativa de 160 gramos para ensayar.
- Agregar agua hasta obtener una pasta semilíquida homogénea.
- Esperar un tiempo de curado hasta que fase sólida y líquida sea una mezcla homogénea. Esto depende de la plasticidad del suelo.
- Para obtener el límite líquido se toma la consideración que el suelo con humedad presenta resistencia al corte de 0,02 kilogramos sobre centímetro cúbico aproximadamente, por lo que para determinar el límite se necesitan 25 golpes para cerrar dos secciones de suelo espaciadas de acuerdo a lo que prescribe la norma.
- Colocar 50 gramos de pasta de suelo en la copa, extendiéndola sobre la misma de manera que quede nivelada.
- Separar la pasta de suelo que hay en la copa en dos mitades, de manera que quede simétrico,
- Hacer caer la copa a un ritmo de dos golpes por segundo hasta que paredes de la pasta cedan, si ceden de manera irregular, no tomar en cuenta el ensayo.
- Pesar 10 gramos de material que queda de las paredes de pasta de suelo y determinar su humedad
- Repetir en dos ocasiones el ensayo con otro porcentaje de humedad para trazar un gráfico semilogarítmico, en las abscisas, que son semilogarítmicas, se colocará el número de golpes y en las ordenadas, escala aritmética, el porcentaje de humedad.
- Obtener de la gráfica la humedad que queda a los 25 golpes, leyéndola directamente desde la misma, como se puede observar en la figura 7.

Figura 7. **Obtención del límite líquido de gráfica semilogarítmica**



Fuente: CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. p. 73.

#### 4.1.2.3. Límite plástico

La Norma que comprende este ensayo es la AASHTO T 90. Este ensayo se define como el contenido de humedad en el cual un suelo está comprendido entre el estado semisólido y el estado plástico. Este ensayo presenta mucha subjetividad por parte del operario que esté realizándola ya que el agrietamiento que presenta el cilindro de suelo se basa en la interpretación visual que él posea.

Para llevar a cabo este ensayo se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Tomar una muestra que tenga una masa de 20 gramos y pase por el tamiz número 40.

- Homogenizar la muestra agregando agua sobre un plato de evaporización hasta que la pasta se vuelva lo suficiente plástica para moldear en forma de esfera.
- Tomar de la muestra aproximadamente un centímetro cúbico de material.
- Frotar la muestra entre las manos, para posteriormente hacerla rodar con la mano sobre una placa de vidrio hasta formar un cilindro de tres milímetros de diámetro.
- Volverlo a hacer bola y formar otra vez el cilindro de tres milímetros, hacer eso hasta que se formen grietas al llegar al cilindro de tres milímetros y no se puedan unir.
- Reunir los pedazos del cilindro, colocarlos en un recipiente para poder pesarlo, luego colocarlo en el horno hasta que pierda toda la humedad.
- Pesar el suelo seco para poder determinar el límite plástico.
- Si el suelo no puede cilindrarse con ningún contenido de humedad se considera como un suelo no plástico.





## **5. DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA SMA**

### **5.1. Selección de material**

Para la selección de los agregados gruesos y finos se deben de cumplir con las especificaciones que se plantean en el capítulo sobre las características de estos agregados. Tomando en cuenta que el contacto piedra sobre piedra es base fundamental de la mezcla asfáltica analizada.

En lo que respecta a la selección del cemento asfáltico se debe tener en consideración la procedencia del mismo, es necesario conocer si el polímero modificador es un elastómero o plastómero.

En la selección de las fibras, al aplicarlo en la mezcla es importante conocer el peso total de la muestra para tener el porcentaje correcto a colocar de la fibra ya que su aplicación evita un escurrimiento excesivo. Al determinar la fibra que se usará es necesario colocar si es celulosa o mineral y las características como espesor y longitud.

### **5.2. Características de la mezcla asfáltica**

En el diseño de la mezcla las características que presenta como: la granulometría y el contenido de vacíos en la mezcla, son fundamentales para obtener los resultados óptimos al elaborarlas, debido a que son base fundamental de las mezclas Stone Mastic Asphalt.

### 5.2.1. Granulometría

La granulometría de los agregados debe de cumplir con los límites inferior y superior que se especifican en el documento, para poder proporcionar un soporte de agregado que permita el contacto de piedra con piedra y cumpla con los requisitos mínimos de vacíos en el agregado mineral.

Para las superficies de rodadura es necesario colocar una mezcla con una granulometría que proporcione un adecuado espesor para evitar un desprendimiento de material al estar en uso el pavimento y también proveer una superficie drenante para evitar la acumulación de agua cuando esté lloviendo. Por estas razones no se recomienda emplear tamaños máximos nominales (TMN) de agregado de 25 milímetros o mayores y de un tamaño máximo nominal de 4,75 milímetros para superficies de rodadura en mezclas asfálticas.

En la tabla XII se aprecian tres especificaciones para granulometrías con distintos tamaños máximos nominales (TMN), estas granulometrías presentan un límite inferior y un superior entre los cuales debe estar el valor de la granulometría que se empleará en la mezcla asfáltica.

Tabla XII. **Especificaciones para granulometría con distinto TMN**

Tamiz		19 mm. TMN		12.5 mm. TMN		9.5 mm. TMN	
mm	pulgadas	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
25	1	100	100				
19	3/4	90	100	100	100		
12,5	1/2	44	70	85	100	100	100
9,5	3/8	25	40	50	75	80	100
4,75	No. 4	20	28	20	28	28	50

Continuación de la tabla XII.

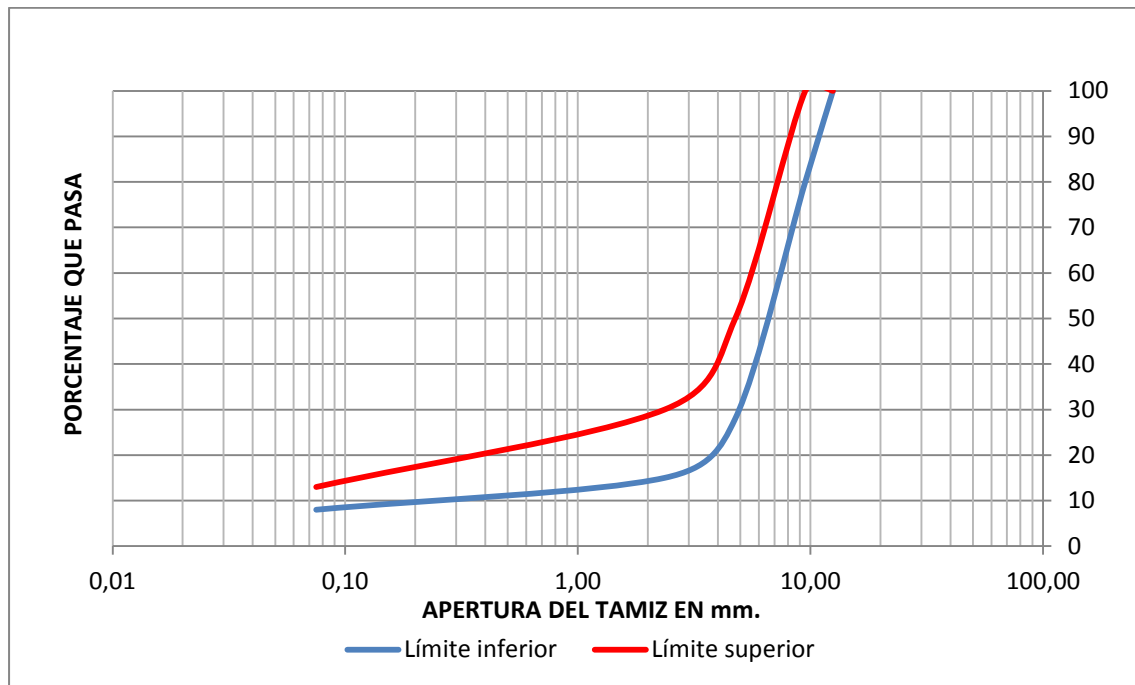
<b>2,36</b>	<b>No. 8</b>	15	22	16	24	15	30
<b>0,075</b>	<b>No. 200</b>	8	12	8	12	8	13

Fuente: National Asphalt Pavement Association (NAPA). *Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice*. p. 8.

Los valores de los límites inferior y superior representan un porcentaje de lo que pasa del volumen del agregado en determinado tamiz.

En la figura 8 se representan los límites superior e inferior que debe presentar la granulometría para el agregado con tamaño máximo nominal de 9,5 milímetros, al momento de realizar una granulometría a una muestra de material esta debe estar dentro de los límites propuestos para obtener una buena consistencia en la mezcla, el tamaño máximo nominal de 9,5 milímetros es adecuado para emplearlo de base de la superficie de rodadura o como superficie de rodadura.

Figura 8. **Granulometría de mezcla asfáltica con TMN 9,5 mm**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

Al realizar los análisis de las granulometrías la cantidad de material que pasa la malla número 200 es aproximadamente el 10 por ciento, esta cantidad es más alta que en las mezclas convencionales densas, debido a que los finos y las fibras son muy importantes para obtener adhesión del cemento asfáltico al agregado grueso, evitando así el escurrimiento.

### 5.2.2. Vacíos en la mezcla

Para obtener el contacto piedra sobre piedra es necesario que los vacíos del agregado grueso, obtenido a través del ensayo de peso unitario y vacíos, sean mayores o iguales a los vacíos del agregado de la mezcla compactada,

para obtener estos vacíos es necesario calcular la gravedad específica teórica y aparente de la mezcla, lo cual se explicará posteriormente.

En las mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt es muy importante tener control sobre la cantidad de agregado grueso que se tiene ya que una disminución en la cantidad del mismo repercutirá directamente sobre la mezcla, y ya que no se tendría el necesario contacto piedra sobre piedra.

### **5.3. Preparación de muestras y diseño de mezcla asfáltica.**

El contenido de cemento asfáltico para el diseño de mezclas SMA deberá estar comprendido en un valor próximo a 6 por ciento del peso total de la mezcla, con su respectiva tolerancia para la producción en planta. El cemento asfáltico tiene mucha relación con respecto al agregado grueso, es por eso que cuando el agregado presente una gravedad específica menor de 2,75, se puede aumentar en 0,1 por ciento de cemento asfáltico por cada 0,05 de decremento. En el caso de que la gravedad específica es superior a 2,75, se puede disminuir 0,1 por ciento de cemento asfáltico por cada 0,05 de incremento.

Para la realización del diseño de la mezcla asfáltica Stone Mastic Asphalt, lo único que se necesita es un asfalto modificado, los materiales pétreos gruesos, finos y las fibras celulósicas. Al realizar esta mezcla es necesario que el material esté a una temperatura de mezclado adecuada, la cual por lo general es proporcionada por el proveedor del asfalto modificado. Los asfaltos modificados son fluidos no newtonianos, por lo que no se usa la reología de los asfaltos para elaborar mezclas o compactación igual al de los asfaltos convencionales, si no se cuenta con datos proporcionados por el proveedor de asfalto modificado se pueden emplear temperaturas del orden de 150 a 170 grados Celsius.

### **5.3.1. Compactación de mezcla en laboratorio**

La temperatura a la cual se compacta la mezcla, será la que especifique el proveedor para evitar la exudación del asfalto. Para realizar las probetas a ensayar se tienen dos métodos, se puede emplear el compactador giratorio Superpave (SGC), por el cual se obtienen probetas con 150 milímetros (6 pulgadas) de diámetro. El otro método es emplear el martillo mecánico Marshall de cara plana y base estática para tener probetas de 100 milímetros (4 pulgadas) de diámetro.

Para el compactador Superpave se emplean 100 giros, en Guatemala en ningún laboratorio de mezclas asfálticas cuentan con el compactador giratorio, utilizando únicamente el martillo mecánico Marshall. Cuando se emplea el martillo Marshall se emplean 50 golpes del martillo por cara.

### **5.3.2. Selección de granulometría**

Se pueden realizar más de una granulometría para obtener datos óptimos sobre qué combinación de agregados usar, cumpliendo con las especificaciones del agregado, es decir, que la muestra esté dentro de los rangos propuestos de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado. Esto se realiza para obtener datos sobre los vacíos de acuerdo a la granulometría ensayada.

Para la selección de la granulometría es necesario contar con cuatro muestras por cada prueba. Cada muestra que se tiene es mezclada con el contenido de asfalto para este caso al 6 por ciento. De las cuatro probetas, tres son compactadas, la restante es empleada para determinar la gravedad teórica específica máxima, según la Norma AASHTO T 209.

Cuando las muestras ya han sido compactadas y se han enfriado, se determina la gravedad específica aparente de la mezcla, la estabilidad y fluencia de Marshall, siguiendo las debidas especificaciones.

Para seleccionar la granulometría óptima se deben cumplir con los siguientes parámetros de vacíos que debe presentar la mezcla asfáltica:

- Porcentaje de vacíos: estos son las bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregado revestidas de asfalto. Se determina por medio del peso específico total de cada probeta compactada y del peso específico teórico máximo de la mezcla. Se emplea la siguiente fórmula:

$$\%V_a = 100 * \left( 1 - G_{mb}/G_{mm} \right)$$

Donde

$\%V_a$  = porcentaje de vacíos de la mezcla

$G_{mb}$  = gravedad específica aparente de la mezcla

$G_{mm}$  = gravedad específica teórica máxima de la mezcla

- Porcentaje de vacíos en el agregado grueso presente en la mezcla, se calcula para incluir todos los componentes de la mezcla con excepción del agregado grueso, quiere decir, que involucra tanto el aire, asfalto y el agregado fino, este valor se utiliza como comparación con respecto a los vacíos que tiene el agregado grueso varillado en seco. Para calcular este porcentaje se emplea la siguiente fórmula:

$$\%VAG_{mezcla} = 100 - \left( G_{mb}/G_{ca} \right) * P_{CA}$$



Donde

$\%VAG_{mezcla}$  = porcentaje de vacíos en el agregado grueso de la mezcla

$G_{mb}$  = gravedad específica aparente de la mezcla

$G_{ca}$  = gravedad específica aparente del agregado grueso

$P_{CA}$  = porcentaje del agregado grueso en la mezcla respecto el peso total de la misma

Para determinar el porcentaje del agregado grueso en la mezcla respecto al peso total, se emplea la siguiente ecuación:

$$\%P_{CA} = (P_s)(PA_{CA}) * 100$$

Donde

$\%P_{CA}$  = porcentaje de agregado grueso en la mezcla, respecto el peso total

$\%P_s$  = porcentaje de agregado en la mezcla

$\%PA_{CA}$  = porcentaje de agregado grueso retenido en la malla de corte

Para determinar el porcentaje del agregado en la mezcla solo se debe restar el porcentaje de asfalto empleado al cien por ciento de la mezcla. Para determinar el porcentaje de agregado grueso retenido en la malla de corte, se debe determinar el porcentaje de agregado que pasa esta malla y restarle el cien por ciento de la mezcla.

- Porcentaje de vacíos en el agregado mineral, se define como el espacio intergranular de vacíos que se encuentra entre las partículas del agregado de la mezcla asfáltica compactada, en los cuales se incluye los vacíos de aire y el contenido efectivo de asfalto. Se calcula en base del

peso específico total del agregado. Para calcular este porcentaje se emplea la siguiente fórmula:

$$\%VAM = 100 - \left( G_{mb} / G_{sb} \right) * P_s$$

Donde

%VAM = porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla

$G_{mb}$  = gravedad específica aparente de la mezcla

$G_{sb}$  = gravedad específica aparente del agregado total

% $P_s$  = porcentaje de agregado en la mezcla

De las granulometrías que se evalúen se seleccionará la que presente los porcentajes más bajos del agregado grueso que lleguen a cumplir o sobrepasar los requisitos mínimos de los vacíos en el agregado mineral de la mezcla y tengan un porcentaje de vacíos en el agregado grueso de la mezcla menor al porcentaje de vacíos del agregado grueso varillado en seco.

#### **5.4. Selección del contenido de cemento asfáltico óptimo**

Al obtener la granulometría óptima, por lo general, va a ser necesario ajustar el contenido de cemento asfáltico, para poder obtener el porcentaje adecuado para el contenido de vacíos en la mezcla, por lo que es necesario preparar más briquetas, para estas muestras se usa una misma granulometría seleccionada haciendo variar el contenido de cemento asfáltico.

El porcentaje de vacíos óptimo que debe tener la mezcla es de 4 por ciento, para la producción de la mezcla asfáltica se tomará el valor del cemento asfáltico que provea un contenido de vacíos cercano al 4 por ciento, esto forma

una protección contra las manchas de grasa luego de la colocación de la mezcla y generará mayor resistencia a las roderas. Por condiciones del clima, en lugares muy fríos se puede tener el contenido de vacíos cercano a 3,5 por ciento y en lugares muy cálidos puede tener contenido de vacíos más altos.

Para tener datos certeros de las muestras que se están trabajando es necesario realizar, por lo menos, tres ensayos con distintas cantidades de cemento asfáltico, para lo cual es necesario que se elaboren tres muestras compactadas y una sin compactar por cada porcentaje de cemento asfáltico. Realizar estos ensayos a las probetas es necesario para poder determinar los porcentajes de vacíos que tendrá la mezcla y obtener de esta manera la cantidad óptima de cemento asfáltico.

La mezcla Stone Mastic Asphalt que se trabaje deberá cumplir con las especificaciones que se presentan en las tablas XIII y XIV, estos criterios son los requisitos mínimos que tiene que cumplir la mezcla, si no se alcanzan estos criterios será necesario modificar la cantidad de material de trabajo hasta que alcance estos parámetros.

Tabla XIII. **Especificaciones para diseños compactados con Marshall**

<b>Propiedad</b>	<b>Requerimiento</b>
% de contenido asfáltico	6 mínimo.
% de vacíos	4
% de VAM	17 mínimo.
% de VAG	Menos que VAG varillado seco.
Estabilidad	6200 N (1400 lb) mínimo.
% de escurrimiento a la temperatura de producción	0,30 máximo.

Fuente: National Asphalt Pavement Association (NAPA). *Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice*. p. 13.

Tabla XIV. **Especificaciones para diseños compactados con equipo giratorio Superpave**

<b>Propiedad</b>	<b>Requerimiento</b>
% de contenido asfáltico	6 mínimo.
% de vacíos	4
% de VAM	17 mínimo.
% de VAG	Menos que VAG varillado seco.
% de escurrimiento a la temperatura de producción	0.30 máximo.

Fuente: National Asphalt Pavement Association (NAPA). Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice. p. 13.

## **5.5. Ensayos que se realizan a la mezcla asfáltica**

Para la obtención de resultados y así poder realizar la mezcla asfáltica, se debe tomar en consideración el procedimiento para elaborar las muestras que serán ensayadas, cumpliendo con los procedimientos normados, para posteriormente realizar los ensayos que se proponen a las muestras.

### **5.5.1. Preparación de las muestras**

Para la obtención de datos se empleará el método de compactación Marshall, ya que se cuenta con ese insumo en el laboratorio en que se realizarán las probetas, las cuales tendrán 100 milímetros o 4 pulgadas de diámetro por 65 milímetros o 2,5 pulgadas de espesor.

El método de compactación Marshall se encuentra normalizado por la Norma AASHTO T 245. Para la obtención de las muestras se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Tomar una muestra de aproximadamente 600 gramos de agregado y colocarlo en un horno a la temperatura en la cual estará en la planta de producción.
- Pesar las cantidades de cada porción de agregado que se requieren para la muestra y la cantidad de cemento asfáltico de acuerdo a la prueba a realizar.
- El cemento asfáltico y el agregado es calentado y mezclado hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas.
- Pre calentar los moldes Marshall donde se colocará la mezcla asfáltica.
- Calentar la superficie del martillo Marshall de compactación.
- Compactar las briquetas mediante el golpe que genera el martillo Marshall de compactación, en el caso de la mezcla Stone Mastic Asphalt son necesarios 50 golpes por cara.
- Al completar la compactación, enfriar las probetas y extraerlas del molde.

#### **5.5.2. Gravedad específica teórica máxima de la mezcla**

Este ensayo se encuentra normado por AASHTO T 209. Para llevar a cabo este ensayo se toma una muestra de la mezcla asfáltica que se va a emplear sin compactar, la cual debe realizarse en laboratorio.

La gravedad específica teórica máxima es una característica mecánica de la mezcla, está influenciada por la composición que presenta, de acuerdo a los tipos y cantidades de agregados finos y materiales aglutinantes que disponga la mezcla. Esta propiedad es empleada para determinar la cantidad de vacíos de aire que presente la mezcla asfáltica.

Para llevar a cabo el ensayo es necesario contar con el equipo adecuado que especifica la Norma, como los contenedores de vacíos, que deberán resistir la presión y una capacidad entre 2 000 y 10 000 mililitros, una balanza calibrada y una bomba para crear vacío. El equipo de vacío puede ser como el mostrado en la figura 9.

Figura 9. **Equipo para contenedor de vacíos**



Fuente: laboratorio de empresa CONCAL

Para llevar a cabo este ensayo se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Tomar una muestra de acuerdo al agregado empleado, según la tabla XV.

Tabla XV. **Tamaño de muestra para determinar gravedad específica teórica máxima**

Tamaño máximo nominal del agregado		Tamaño mínimo de la muestra	
mm	pulgadas	Gramos	Libras
37.5 o más	1.5 o más	4 000	8
De 19 a 25	De 3/4 a 1	2 500	5
12.5 o menos	1/2 o menos	1 500	3

Fuente: elaboración propia, con base en documentos basado en la Norma AASHTO T 209.

- Separar las partículas de la muestra a mano, teniendo el cuidado de no fracturar el agregado, con la finalidad que las partículas de la porción del agregado fino no sean más grandes de 6,3 milímetros o ¼ de pulgada, esto se hace para evitar aglomeraciones de agregado fino y tener una buena mezcla de los agregados.
- Esperar a que la muestra se enfríe a temperatura ambiente, es necesario que se realice este procedimiento para poder obtener resultados óptimos al colocar la mezcla en los matraces. Pesar la muestra a usar.
- Tarar los matraces con las placas de vidrio que se emplearán en los ensayos.
- Pesar el matraz lleno de agua destilada a  $25 \pm 0,5$  grados Celsius, colocando una placa de vidrio en la parte superior, evitando la entrada de aire y secando el exterior para que no quede agua residual. Designar a este peso con la letra "D".
- Colocar la muestra dentro del matraz y pesar, luego de registrar el dato. Designar a este peso con la letra "A".
- Agregar agua destilada a  $25 \pm 0,5$  grados Celsius hasta cubrir completamente la muestra.

- Eliminar el aire atrapado en la muestra aplicando gradualmente un vacío en el matraz hasta que manómetro marque menos de 30 milímetros de mercurio o 4,0 Kilopascuales. Mantener esta presión durante  $15 \pm 2$  minutos agitando el matraz durante el periodo de vacío.
- Al agitar el matraz se puede emplear un dispositivo mecánico, o agitando a mano vigorosamente en intervalos de dos minutos aproximadamente.
- Al finalizar el periodo de vacío es necesario liberar este vacío en un periodo comprendido entre 10 a 15 segundos e iniciar inmediatamente los siguientes procedimientos.
- Llenar completamente el matraz que contiene la muestra con agua destilada a  $25 \pm 0,5$  grados Celsius, con cuidado de no generar burbujas de aire.
- Pesarse el matraz completamente lleno de agua con la muestra, tapado con la placa de vidrio. Designar a este peso con la letra "E".  
Para calcular la gravedad específica teórica máxima de la mezcla se emplea siguiente ecuación:  $G_{mm} = A / (A + D - E)$

Donde

$G_{mm}$  = gravedad específica teórica máxima de la mezcla

A = peso en gramos de la muestra seca al aire

D = peso en gramos del contenido del matraz lleno de agua

E = peso en gramos del contenido del matraz lleno de agua y la muestra

### **5.5.3. Gravedad específica aparente de la mezcla.**

Este ensayo se encuentra normado por AASHTO T 166. Para llevar a cabo este ensayo la muestra debe ser elaborada a partir del método Marshall. Las briquetas elaboradas deben estar a temperatura ambiente al realizar el



ensayo. Es necesario contar con una balanza calibrada, se usará para determinar el peso de la muestra, un baño de agua, para sumergir probeta y un aparato de suspensión, para poder pesar la probeta al estar sumergida en el agua.

Para llevar a cabo este ensayo se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Secar las muestras obtenidas a temperatura constante, para las muestras que han sido elaboradas en laboratorio y no han sido expuestas a humedad no requieren secado.
- Enfriar las muestras hasta que lleguen a una temperatura de  $25 \pm 5$  grados Celsius y pesar cada muestra. Este peso será tomado como la muestra peso en el aire (A).
- Sumergir cada briqueta en agua a  $25 \pm 1$  grados Celsius, suspendidas en equilibrio por el aparato de suspensión durante un período de 4 a 4 ½ minutos. Este peso será tomado como la muestra sumergida en agua (B).

Para calcular la gravedad específica aparente de la mezcla se emplea la siguiente ecuación:  $G_{mb} = A / (A - B)$

Donde

$G_{mb}$  = gravedad específica aparente de la mezcla

A = peso en gramos de probeta al aire

B = peso en gramos de probeta sumergida en agua

### **5.5.3.1. Estabilidad y fluencia.**

Los ensayos de estabilidad y fluencia se encuentran normados por AASHTO T 245. Estos ensayos se orientan a determinar la resistencia a la deformación que tendrá la mezcla asfáltica analizando las probetas bajo una carga aplicada. Estos ensayos se realizan luego de haber obtenido la gravedad específica aparente de la mezcla.

La estabilidad Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación. El valor de la estabilidad Marshall se emplea como un indicador de la carga a la cual la probeta cede o falla totalmente y la fluencia indica la deformación por la disminución en el diámetro vertical de la probeta al momento de fallar.

Las mezclas que presenten valores bajos de fluencia y altos de estabilidad, indican que se tiene una mezcla frágil y muy rígida. Los valores altos de fluencia se consideran plásticos y presentan tendencias a deformarse bajo las cargas de tránsito.

Para la obtención de la estabilidad se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Tener las briquetas a ensayar secas a una temperatura de  $24 \pm 5$  grados Celsius.
- Calentar un baño de agua a  $60 \pm 1$  Celsius.
- Colocar las briquetas dentro del baño de agua, esta temperatura representa la temperatura más caliente que llegará a soportar el pavimento al estar en servicio, durante un tiempo de entre 30 a 40 minutos.

- Preparar el equipo para la realización de la prueba antes de sacar las briquetas del agua.
- Calibrar el micrómetro de fluencia de acuerdo a la altura de la briqueeta que se va a ensayar, colocando el valor inicial en cero.
- Secar superficialmente la briqueeta y colocarla rápidamente en el aparato que aplicará la carga sobre la misma, la briqueeta debe quedar centrada y ajustada por unas mordazas.
- La carga utilizada en el ensayo se aplica sobre la probeta a una velocidad constante de 51 milímetros o 2 pulgadas por minuto hasta que la briqueeta falle.
- Tomar el dato obtenido de la lectura del micrómetro cuando la briqueeta falla, tanto el de estabilidad como el de fluencia.
- El valor obtenido por el micrómetro de fluencia es un dato directo.
- Emplear la fórmula del anillo de calibración del aparato de Marshall para poder obtener la carga de falla, se puede expresar en newton o libras de acuerdo al fabricante.
- Si la altura de la probeta es diferente a 63,5 mm (2 ½ ") emplear el factor de corrección a la carga.
- Aplicar el factor de la tabla XVI: se puede usar la altura de la probeta o la diferencia entre la probeta pesada al aire menos la probeta pesada sumergida en agua, este valor se denomina como volumen de agua desplazado por la briqueeta.

Tabla XVI. **Factor de corrección para estabilidad Marshall**

Volumen de probeta (cm <sup>3</sup> )	Altura de probeta		Factor de corrección	Volumen de probeta (cm <sup>3</sup> )	Altura de probeta		Factor de corrección
	mm	pulg			mm	pulg	
200 a 213	25,4	1	5,56	406 a 420	50,8	2	1,47

Continuación de la tabla XVI.

214 a 225	27,0	1 1/16	5,00	421 a 431	52,4	2 1/16	1,39
226 a 237	28,6	1 1/8	4,55	432 a 443	54,0	2 1/8	1,32
238 a 250	30,2	1 3/16	4,17	444 a 456	55,6	2 3/16	1,25
251 a 264	31,8	1 1/4	3,85	457 a 470	57,2	2 1/4	1,19
265 a 276	33,3	1 5/16	3,57	471 a 482	58,7	2 5/16	1,14
277 a 289	34,9	1 3/8	3,33	483 a 495	60,3	2 3/8	1,09
290 a 301	36,5	1 7/16	3,03	496 a 508	61,9	2 7/16	1,04
302 a 316	38,1	1 1/2	2,78	509 a 522	63,5	2 1/2	1,00
317 a 328	39,7	1 9/16	2,50	523 a 535	65,1	2 9/16	0,96
329 a 340	41,3	1 5/8	2,27	536 a 546	66,7	2 5/8	0,93
341 a 353	42,9	1 11/16	2,08	547 a 559	68,3	2 11/16	0,89
354 a 367	44,4	1 3/4	1,92	560 a 573	69,9	2 3/4	0,86
368 a 379	46,0	1 13/16	1,79	574 a 585	71,4	2 13/16	0,83
380 a 392	47,6	1 7/8	1,67	586 a 598	73,0	2 7/8	0,81
393 a 405	49,2	1 15/16	1,56	599 a 610	74,6	2 15/16	0,78
				611 a 625	76,2	3	0,76

Fuente: basado en tablas de Norma AASHTO T 245.

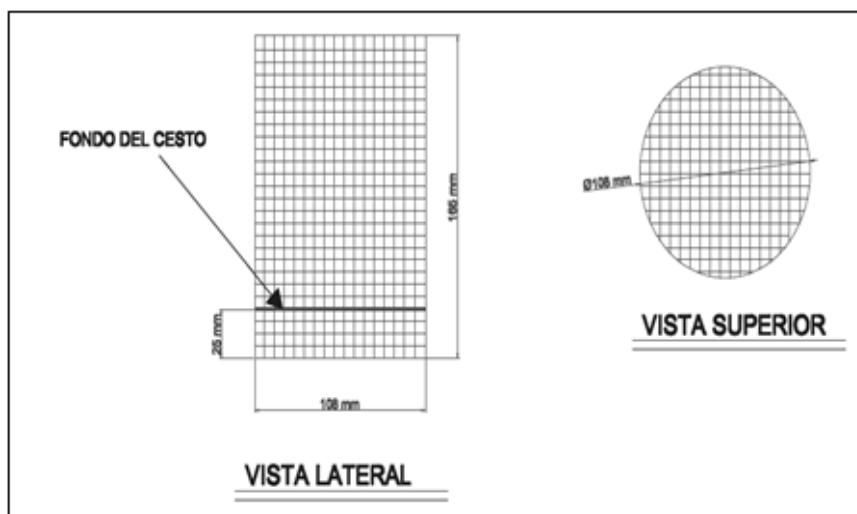
- Multiplicar la carga obtenida por medio de la ecuación del aparato de Marshall y el factor de corrección para obtener la carga corregida.

#### 5.5.4. Sensibilidad al escurrimiento

La Norma AASHTO T 305 ha sido adaptada para determinar la sensibilidad del escurrimiento de una mezcla asfáltica sin compactar. El escurrimiento es una propiedad muy importante en las mezclas SMA por el alto contenido de cemento asfáltico. Esta prueba simula condiciones a las cuales la mezcla será sometida, como lo es al estar en producción, almacenada, transportada y colocada.

Cuando una mezcla presenta escurrimiento, lo que ocurre es que el cemento asfáltico y el agregado fino escurren o fluyen de la mezcla. Para desarrollar la prueba es necesario contar con un cesto fabricado con tela metálica de un tamiz estándar de 6,3 milímetros o 0,25 pulgadas, con 108 milímetros de diámetro por 165 milímetros de alto, separada del fondo por misma tela a 25 milímetros, como se puede apreciar en la figura 10.

Figura 10. Dimensiones del cesto de alambre



Fuente: elaboración propia, empleando programa AutoCAD.

Para llevar a cabo el ensayo es necesario contar con el cesto, un horno que permita tener un rango de temperaturas de 120 a 175 grados Celsius, platos de cartón resistentes a la temperatura con que trabaja el horno, espátulas y tazones para colocar el material.

Para la obtención del escurrimiento se debe seguir el siguiente procedimiento:

- Obtener la muestra de aproximadamente 1 200 gramos, ya sea obtenida directamente de la planta o preparada en laboratorio a la temperatura con que se trabajará en la planta.
- Colocar la muestra de la mezcla no compactada en el cesto de malla que se elabora para este ensayo y pesarlo.
- Evitar consolidar la muestra cuando esté en el cesto, ya que afectaría los resultados del ensayo.
- Pesarse el plato de cartón que se usará.
- Colocar el cesto sobre el plato de cartón, para trasladarlos a un horno donde ambos estarán sometidos a la temperatura de producción durante un tiempo de 1 hora  $\pm$  1 minuto.
- Cuando ha terminado el tiempo, remover el cesto y el plato del horno.
- Pesarse el plato de cartón con los residuos del escurrimiento.

Determinar el porcentaje drenado de la mezcla, empleando la siguiente

$$\text{fórmula: Porcentaje de escurrimiento} = \left( \frac{\text{Masa escurrida en plato}}{\text{Masa total de la muestra}} \right) * 100$$

- El porcentaje que se obtiene debe ser menor al que se propone para el diseño de mezclas asfálticas SMA.

## 5.6. Ensayos de laboratorio

Para la elaboración de la mezcla asfáltica SMA se debe proceder en a realizar los ensayos en los agregados que se van a utilizar, a continuación se mostraran los resultados, tomando como base el procedimiento que se describió con anterioridad. Para el agregado ensayado se tomó uno que cumpliera con un tamaño máximo nominal de 9,5 mm, procedente de la planta trituradora ubicada en el kilómetro 91 de la carretera Interamericana.

### 5.6.1. Agregados

De conformidad con los procedimientos especificados, se realizaron los ensayos a los agregados que se van a utilizar en la mezcla asfáltica, para los cuales se obtuvieron los datos tabulados en la tabla XVII, en la que se resumen los valores obtenidos y las especificaciones que debe cumplir para cada ensayo, ver anexos para mayor información sobre los ensayos a los agregados.

Tabla XVII. **Resumen de ensayos realizados en el agregado**

Ensayo	Especificación	Resultado
Abrasión tipo C	30% Máx.	16,34
Partículas planas y alargadas relación 3 a 1	20% Máx.	6,13
Partículas planas y alargadas relación 5 a 1	5% Máx.	3,45
Absorción	2% Máx.	0,92
Gravedad específica	-----	2,72
Peso unitario varillado	-----	1682,14 kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje de vacíos de agregado grueso	-----	38,03
Partículas trituradas en una cara	100% Mín.	100

Continuación de la tabla XVII.

Partículas trituradas en dos caras	90% Mín.	100
Angularidad	45% Mín.	48
Límite líquido	25% Máx.	13.4
Límite plástico	No aplica.	No aplica.

Fuente: elaboración propia.

### **5.6.2. Cemento asfáltico**

Para la elaboración de las briquetas se empleó un cemento asfáltico modificado por una empresa guatemalteca, la cual utilizó como agente modificador el Elvaloy y como catalizador el ácido polifosfórico, utilizando como asfalto base el AC-20, procedente de la refinería petrolera Acajutla sociedad anónima. Se empleó también fibra celulosa Viatop para estabilizar el cemento asfáltico y evitar escurrimientos en la mezcla. El cemento asfáltico utilizado se puede apreciar en la figura 11.



Figura 11. **Cemento asfáltico utilizado en la mezcla**



Fuente: elaboración propia, tomada en laboratorio de empresa CONCAL.

### **5.6.3. Elaboración de mezcla asfáltica Stone Mastic Asphalt**

Para la elaboración de la mezcla asfáltica se deben realizar el procedimiento que se describe, al realizar los ensayos se debe contar con el equipo adecuado que cumple con las especificaciones de las normas, así como el material adecuado.

- Granulometría del agregado

Cumpliendo con los parámetros que se especificaron para el agregado se procede a seleccionar una granulometría que cumpla con las especificaciones de diseño para el agregado con tamaño máximo nominal de 9,5 milímetros, esta

granulometría debe estar entre los valores inferiores y superiores que se especifican, esto se muestra en la tabla XVIII.

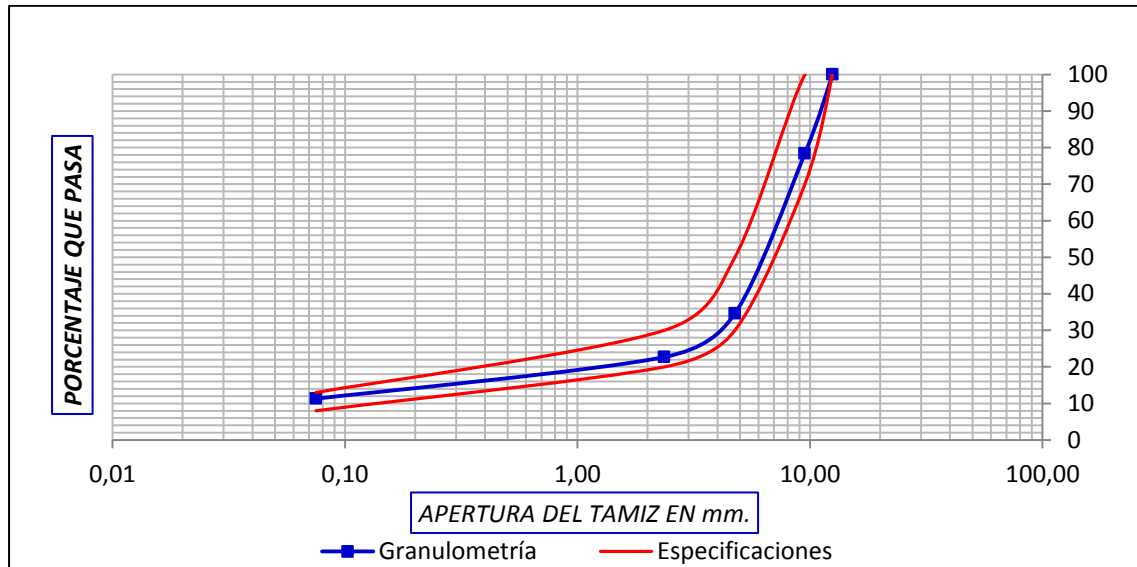
Tabla XVIII. **Granulometría seleccionada**

Tamiz		9.5 mm TMN		Granulometría seleccionada
mm	Pulgada	Inferior	Superior	
25,00	1			
19,00	3/4			
12,50	1/2	100	100	100,0
9,50	3/8	80	100	78,4
4,75	No. 4	28	50	34,6
2,36	No. 8	15	30	22,7
0,075	No. 200	8	13	11,3

Fuente: elaboración propia.

En la figura 12 se muestra la granulometría seleccionada y los valores límites que se permiten, demostrando que el material seleccionado cumple con las especificaciones de manera gráfica.

Figura 12. Granulometría seleccionada



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

En la figura 13 se aprecia el momento en que se está realizando la granulometría de la muestra que se va a trabajar.

Figura 13. Elaboración de granulometría



Fuente: laboratorio de empresa CONCAL.

- Elaboración de briquetas

Cumpliendo con los parámetros que se colocaron en el trabajo, se empleó el método de martillo de Marshall, que tiene como característica 50 golpes por cara en cada briqueta elaborada.

En la figura 14 se puede observar el momento de mezclado entre el agregado y el cemento asfáltico. Para realizar de la mejor manera la mezcla es necesario pesar en un recipiente el agregado a usar y calcular el porcentaje del peso que tendrá el cemento asfáltico.

Figura 14. **Mezclado de agregado y cemento asfáltico**



Fuente: laboratorio de empresa CONCAL.

El mezclado del agregado con el cemento asfáltico con la fibra celulosa se debe realizar a la temperatura que tendrá en la planta de trabajo, en este caso se empleó una temperatura de 150 grados Celsius. Para calentarlo se utilizó una estufa y el termómetro para determinar la temperatura, para su posterior compactación, como se muestra en la figura 15.

Figura 15. **Mezcla asfáltica a temperatura de trabajo**



Fuente: laboratorio de empresa CONCAL.

Posterior a que se ha calentado la mezcla asfáltica se procede a colocar en los moldes donde se realizara la compactación empleando en este caso el martillo, posterior a tener las briquetas con distintos porcentajes de asfalto se enfrían a temperatura ambiente. En la figura 16 se muestra el procedimiento de elaboración de briquetas.

Figura 16. **Elaboración de briquetas**



Fuente: laboratorio de empresa CONCAL.

Para la elaboración del diseño de la mezcla asfáltica SMA se plantearon los siguientes porcentajes de cemento asfáltico por briqueta, los cuales son 5,5, 6,0, 6,5 y 7,0 por ciento de la mezcla, basándose en las especificaciones que permiten un mínimo de 6,0 por ciento del total, esto se emplea para determinar las características óptimas de la muestra seleccionada.

Luego de elaborar las briquetas con sus respectivos porcentajes de cemento asfáltico se procede a realizar los ensayos a las mismas, cumpliendo con su debido procedimiento para garantizar buenos resultados.

- Gravedad específica teórica máxima de la mezcla

Para llevar a cabo este ensayo no se emplean las probetas elaboradas con el martillo Marshall, sino que se emplea la mezcla sin compactar, este ensayo también es conocido como RICE. Elaborando el ensayo se obtuvieron los resultados tabulados en la tabla XIX, ver anexos para mayor información sobre el ensayo. En la figura 17 se aprecia el secado de la muestra a ensayar.

Figura 17. **Secado de muestra a temperatura ambiente**



Fuente: laboratorio de empresa CONCAL.

Tabla XIX. **Gravedad específica teórica máxima**

<b>Porcentaje de asfalto</b>	<b>Gravedad específica teórica máxima</b>
5,5	2,45
6,0	2,43
6,5	2,42
7,0	2,39

Fuente: elaboración propia.

- Gravedad específica aparente de la mezcla

Para realizar el ensayo se tomaron las briquetas elaboradas de acuerdo al porcentaje de cemento asfáltico, realizando el procedimiento previamente descrito, en la figura 18 se aprecian los momentos en que se pesan las briquetas. En la tabla XX se muestran los valores obtenidos en los ensayos, ver anexos para mayor información sobre el ensayo.

Tabla XX. **Gravedad específica aparente de la mezcla**

<b>Porcentaje de asfalto</b>	<b>Gravedad específica aparente</b>
5,5	2,31
6,0	2,32
6,5	2,33
7,0	2,34

Fuente: elaboración propia.



Figura 18. **Realizando ensayo para determinar gravedad específica aparente de la mezcla**



Fuente: laboratorio de empresa CONCAL.

- Porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado grueso y vacíos en el agregado mineral de la mezcla

Con base a los datos obtenidos de la gravedad específica teórica máxima y la gravedad específica aparente, se calcularon los porcentajes de vacíos en la mezcla, como se especificó previamente, según las fórmulas para cada porcentaje de vacíos, descritas previamente, las cuales deben ser aplicadas para cada porcentaje de asfalto que se está ensayando, se muestran los resultados para cada porcentaje en la tabla XXI.



Tabla XXI. **Porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado grueso y vacíos en el agregado mineral de la mezcla**

<b>Porcentaje de asfalto</b>	<b>Porcentaje de vacíos</b>	<b>Porcentaje de vacíos en el agregado grueso de la mezcla</b>	<b>Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla</b>
5,5	5,7	38,0	19,8
6,0	4,5	37,9	19,7
6,5	3,5	38,0	19,8
7,0	2,4	38,2	20,1

Fuente: elaboración propia.

- **Estabilidad y fluencia**

Posterior a determinar la gravedad específica aparente de la mezcla se procede a determinar la estabilidad y fluencia utilizando las mismas briquetas, cumpliendo con el procedimiento que se especifica según la Norma, en la figura 19 se puede apreciar la elaboración de los ensayos, luego de los ensayos los resultados son los tabulados en la tabla XXII, ver anexos para consultar sobre resultados detallados.

Tabla XXII. **Estabilidad y fluencia Marshall**

<b>Porcentaje de asfalto</b>	<b>Estabilidad de Marshall (lb)</b>	<b>Fluencia de Marshall</b>
5,5	1 962,37	12,67
6,0	1 979,82	14,00
6,5	1 985,62	15,33
7,0	1 975,68	17,00

Fuente: elaboración propias.

Figura 19. **Elaboración ensayo para determinar estabilidad y fluencia**



Fuente: laboratorio de empresa CONCAL.

En la tabla XXIII se encuentra el resumen de los ensayos y cálculos que se realizaron para la elaboración de la mezcla asfáltica para los respectivos porcentajes de asfalto.

Tabla XXIII. **Resultados para diseño de mezcla asfáltica**

Propiedad	Porcentaje de asfalto			
	5,5	6,0	6,5	7,0
Porcentaje de vacíos en la mezcla	5,7	4,5	3,5	2,4
Porcentaje de vacíos en el agregado grueso de la mezcla	38,0	37,9	38,0	38,2

Continuación de la tabla XXIII

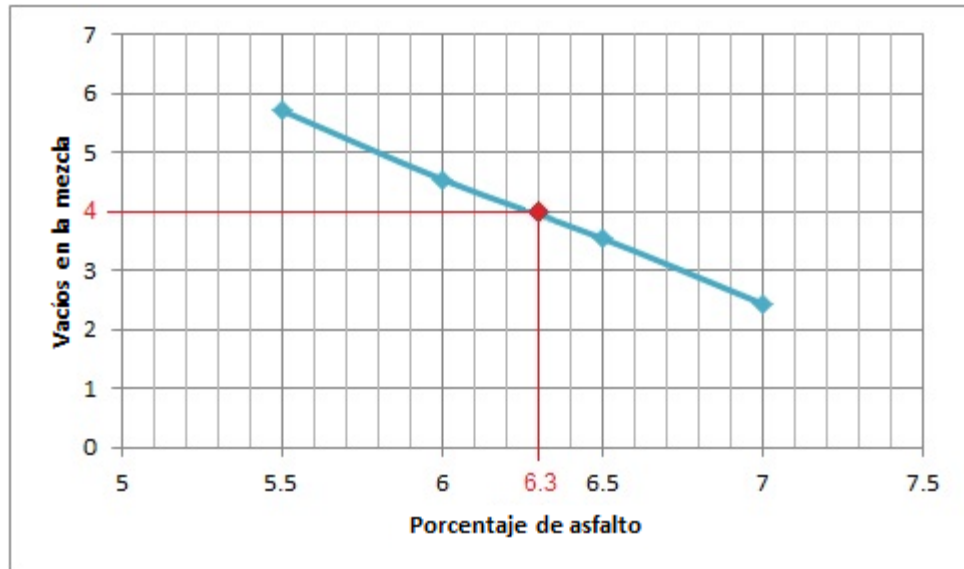
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla	19,8	19,7	19,8	20,1
Porcentaje de escurrimiento	0,038	0,028	0,038	0,055
Promedio de estabilidad de Marshall	1 962,37	1 979,82	1 985,62	1 975,68
Promedio de fluencia de Marshall	12,67	14,00	15,33	17,00
Gravedad específica aparente de la mezcla	2,31	2,32	2,33	2,34
Gravedad específica teórica máxima de la mezcla	2,45	2,43	2,42	2,39

Fuente: elaboración propia.

- Selección del contenido óptimo de cemento asfáltico

Para la mezcla asfáltica Stone Mastic Asphalt se deben cumplir con todos los parámetros propuestos, cumpliendo con los ensayos al elaborarlos. Para encontrar los valores óptimos se deben realizar las siguientes gráficas, cumpliendo con la especificación de que el contenido de vacíos de la mezcla asfáltica debe ser lo más cercana al 4 por ciento de vacíos en el total. El porcentaje de cemento asfáltico que cumpla con este porcentaje de vacíos, es el valor óptimo de cemento asfáltico.

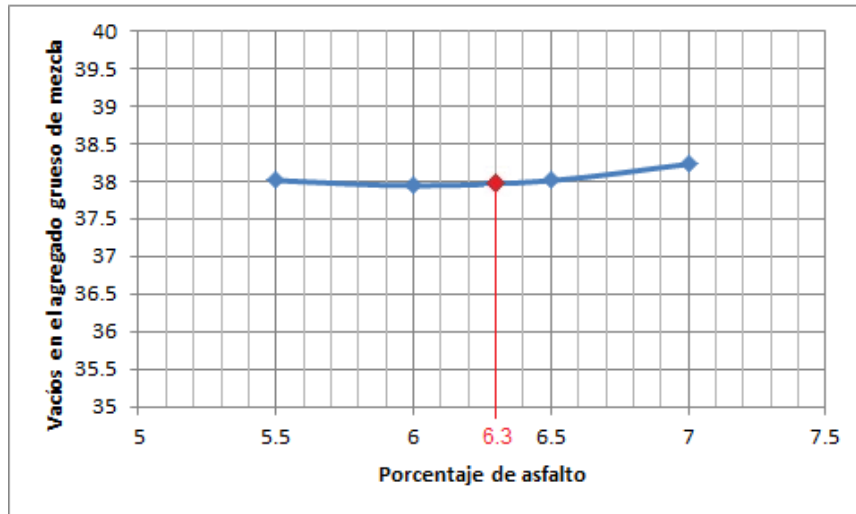
Figura 20. **Porcentaje de vacíos**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

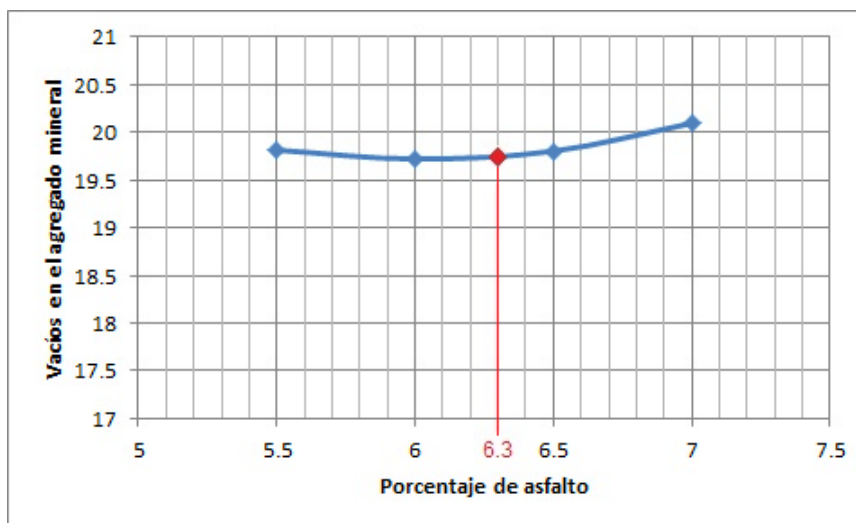
Al analizar la figura 20, se aprecia que, para el contenido de vacíos de la mezcla en 4 por ciento, se tiene un contenido de asfalto de 6,30 por ciento, por lo que se toma este contenido de asfalto como el óptimo para la mezcla elaborada. Para garantizar que la mezcla asfáltica cumpla con los parámetros propuestos por las especificaciones se procede a realizar las siguientes gráficas, resaltando el porcentaje de cemento asfáltico óptimo.

Figura 21. **Vacíos en el agregado grueso de la mezcla**



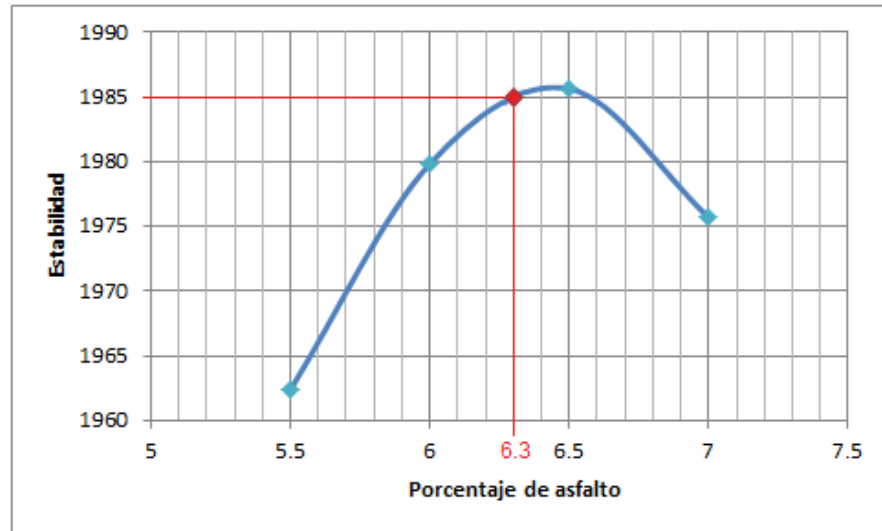
Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

Figura 22. **Vacíos de agregado mineral**



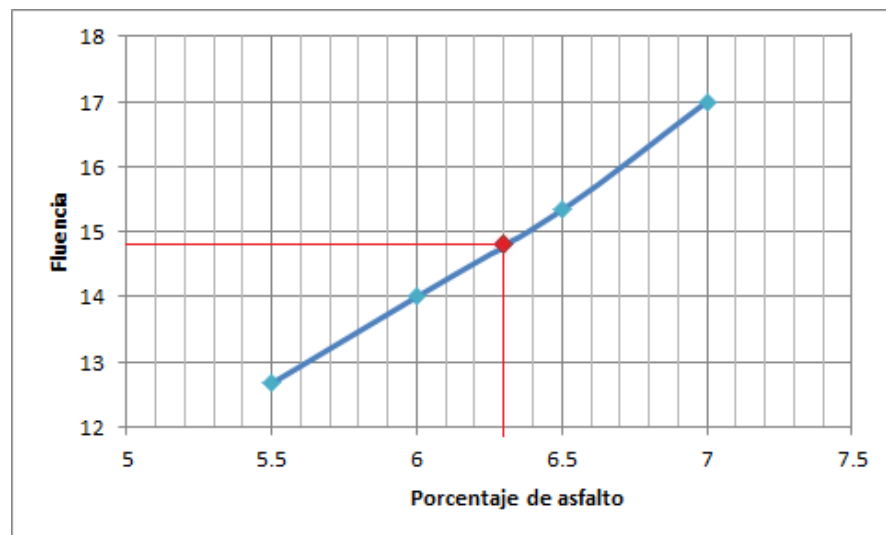
Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

Figura 23. Estabilidad de Marshall



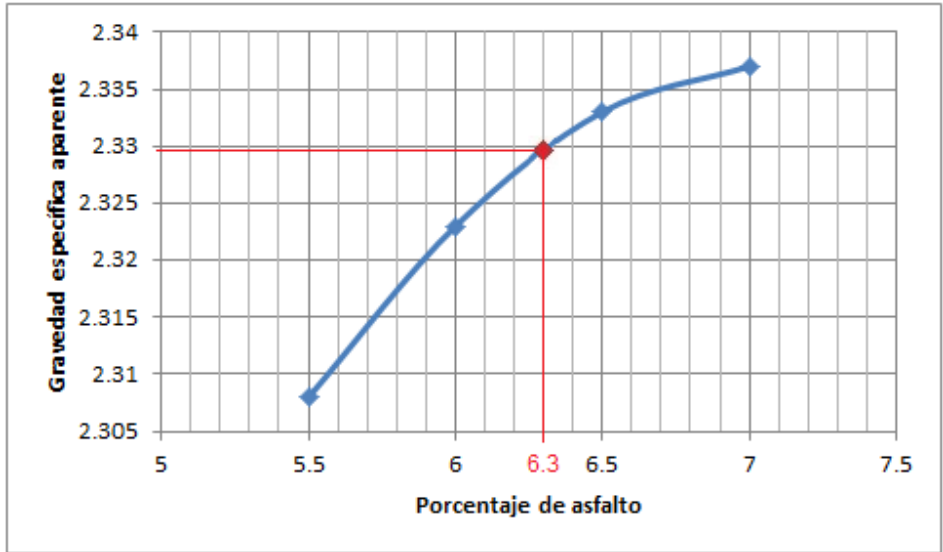
Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

Figura 24. Fluencia de Marshall



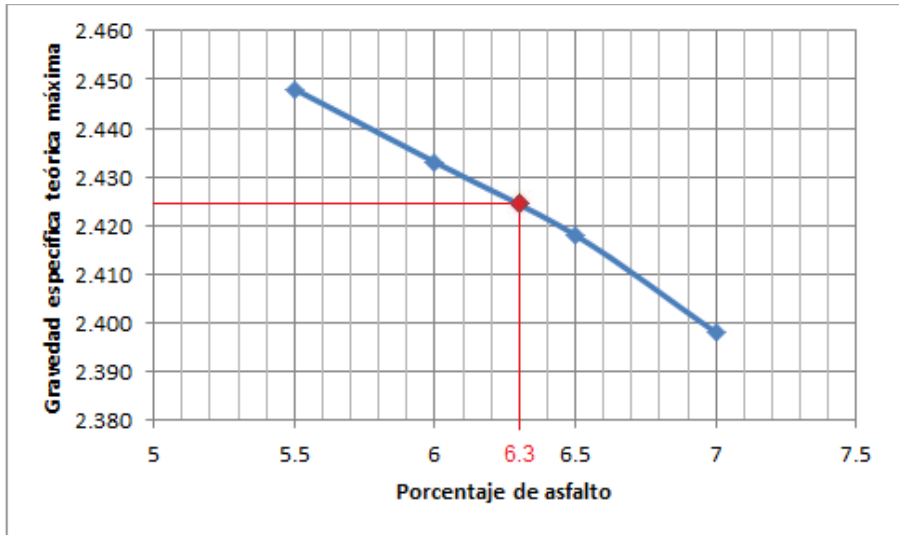
Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

Figura 25. **Gravedad específica aparente de la mezcla asfáltica**



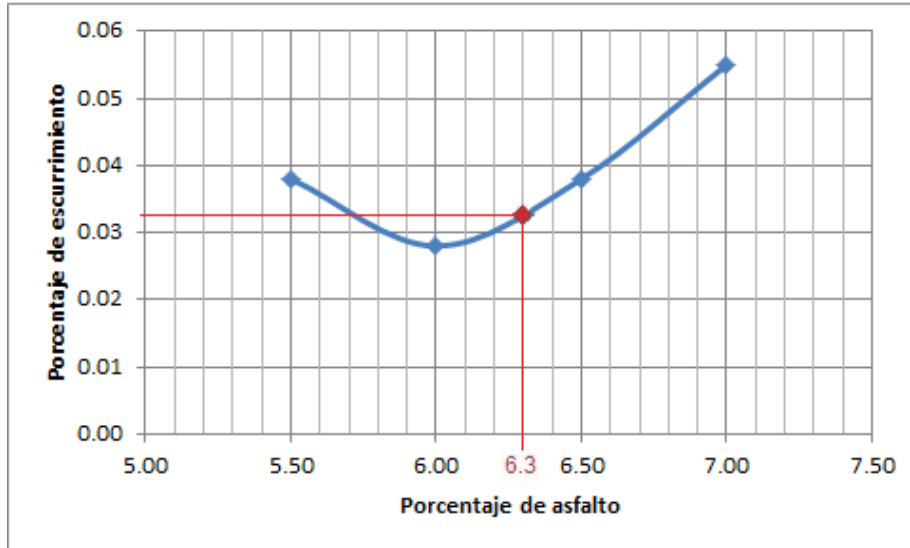
Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

Figura 26. **Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica**



Fuente: Elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

Figura 27. **Porcentaje de escurrimiento de la mezcla**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

En la tabla XXIV se muestran los resultados de la mezcla asfáltica empleando el cemento asfáltico óptimo para cumplir con el porcentaje de vacíos que exige la mezcla, también se describen los rangos que puede tener según las especificaciones de la Norma AASHTO M 325.

Tabla XXIV. **Valores óptimos de mezcla asfáltica**

Propiedad	Requerimiento	Valor obtenido
Número de golpes por cara de martillo Marshall	50	50
Temperatura de mezclado (°C)	150 - 170	150



Continuación de la tabla XXIV

Porcentaje de vacíos en la mezcla	4,00	4,00
Porcentaje de fibras celulósicas	0,30	0,30
Porcentaje de cemento asfáltico	6,00 mínimo	6,30
Porcentaje de escurrimiento	0,30 máximo	0,032
Porcentaje de vacíos en el agregado grueso de la mezcla	38,03 máximo	37,97
Porcentaje de vacíos en el agregado mineral de la mezcla	17,00 mínimo	19,74
Promedio de estabilidad de Marshall (lb)	1 400,00 mínimo	1 985,00
Promedio de fluencia de Marshall	---	14,80
Gravedad específica aparente de la mezcla	---	2,33
Gravedad específica teórica máxima de la mezcla	---	2,42

Fuente: elaboración propia.

#### **5.6.4. Interpretación de resultados**

Los vacíos son la base del diseño de la mezcla asfáltica Stone Mastic Asphalt, por lo que se toma el contenido de cemento asfáltico de acuerdo al valor más próximo del cuatro por ciento de vacíos, como se aprecia en la figura 20, el resto de figuras son necesarias para verificar el cumplimiento de las especificaciones.

Con base en los resultados se puede afirmar que la mezcla asfáltica diseñada cumple con las especificaciones planteadas por la Norma, ya que la mezcla asfáltica Stone Mastic Asphalt presenta alto contenido de asfalto y vacíos, por lo que es necesario tener control de los porcentajes que se presentan en la mezcla, para tener uniformidad al realizar el trabajo en campo.

De acuerdo a los ensayos planteados en laboratorio se procede a realizar la dosificación de material en la planta, para lo cual es necesario que se base en los resultados obtenidos y para la primera mezcla obtenida realizar los ensayos que se plantean para verificar que se cumpla a cabalidad con los requisitos propuestos en el diseño de mezcla, si no se tienen los valores aceptados será necesario volver a calibrar la planta hasta obtener los valores óptimos del diseño de mezcla propuesto, manteniendo un estricto control de calidad.



## **6. CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD**

### **6.1. Control de calidad**

Es necesario contar con programas que garanticen la calidad de las mezclas que se producen y colocan, para que cumplan con las especificaciones que se tengan en los proyectos, y obtener de esta manera mezclas asfálticas que sean adecuadas al uso proyectado.

El control debe ser extensivo, desde los materiales empleados hasta la colocación, para los agregados es necesario realizar inspecciones periódicas al lugar donde se almacena el mismo, teniendo las debidas consideraciones cuando se adiciona material a las pilas donde se encuentra almacenado el agregado. El cemento asfáltico debe cumplir con los requisitos de la mezcla, contando con sus respectivos ensayos.

Antes de la producción y colocación a gran escala de la mezcla asfáltica se deberá fabricar y colocar un tramo de prueba, en el sitio de la construcción. El tamaño del tramo es con base en la capacidad de producción de la planta y equipo para colocación en el campo, por medio de este tramo se verifica el ritmo de producción y se pueden determinar problemas en las proporciones al final de la mezcla en su colocación, si surgen problemas se ajustan en la planta y se coloca un segundo tramo de prueba. Los requerimientos para la colocación de este tramo pueden variar de un día a una semana antes de la producción.

## **6.2. Producción de la mezcla**

La producción es parecida a la empleada en las mezclas asfálticas en caliente de granulometría densa en las cuales se emplean plantas asfálticas dosificadoras de tipo batch, desde el punto de vista de las consideraciones sobre el cuidado que se debe tener para garantizar la mezcla que se elabora. Para la elaboración de la mezcla se recomienda utilizar solo las plantas dosificadoras de tipo batch por el control que se tiene en la producción.

### **6.2.1. Calibración de la planta**

Para las mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt es muy importante que las plantas de mezclado estén calibradas, en este tipo de mezclas asfálticas se emplean plantas dosificadoras tipo batch por la exactitud de sus procesos y garantía de mezclado. Las plantas dosificadoras tipo batch, no ocasionan ningún cambio en la mezcla, ya que son alimentadas por tolvas calientes, en las cuales los materiales van pesados con exactitud, incluyendo el cemento asfáltico y el polvo mineral, en las plantas tipo batch, no se producen mezclas con alimentadores en frío.

Para los aditivos estabilizadores se tendrá una inspección continua, ya que una pequeña variación afecta de manera directa a la mezcla. Los fabricantes de los aditivos estabilizadores por lo general auxilian al productor de la mezcla al momento de iniciar la mezcla, calibración y monitoreo del sistema de dosificación.

En el caso del sistema de alimentación de finos este debe ser dosificado en las cantidades apropiadas y mezclado de tal manera que no interfiera en el sistema de recolección de polvo, ya que los finos pueden ser atrapados por el

sistema por el tamaño de las partículas, por lo que deben estar en lugares sin aire y cuando son colocados evitar que caigan de grandes alturas.

El sistema de recolección de polvo se puede tapar por los finos, esto puede causar cantidades inapropiadas de finos, parte importante en la mezcla. Es por eso que hay que calibrar los sistemas de recolección y alimentación, ya que el primero puede remover los finos y el segundo puede equilibrar las pérdidas que están ocurriendo. Estos datos se obtienen al realizar los ensayos de la mezcla en la planta.

### **6.2.2. Temperatura de producción**

La temperatura de producción se seleccionará para asegurar que esta sea uniforme en toda la mezcla y que admita transcurrir el tiempo suficiente para elaborarla, transportarla, colocarla y compactarla en lugar donde se está realizando el proyecto. Es necesario precalentar la planta antes de agregar el asfalto para llegar a tener una temperatura uniforme, no se toma en cuenta la primera mezcla de material que proporciona la planta.

La temperatura puede variar debido al contenido de humedad del agregado, condiciones climatológicas, el tipo de cemento asfáltico y el estabilizador que se emplee. Los asfaltos modificados no deben calentarse más allá de los 170 grados Celsius, ya que corren el riesgo de quemarse los polímeros y oxidar prematuramente el cemento asfáltico. Para los asfaltos convencionales sin modificar no deben llegarse a calentar a una temperatura de 170 grados Celsius, ya que se estaría quemando, es decir oxidando el asfalto, perdiendo así todas sus propiedades mecánicas.

Conforme incrementa la temperatura de la mezcla, aumenta la posibilidad de escurrimiento del cemento asfáltico del agregado grueso.

### **6.2.3. Tiempo de mezclado**

Para las mezclas asfálticas SMA, este tiempo lo definen los aditivos estabilizadores que se colocan en la mezcla; comparado con una mezcla convencional, el tiempo de mezclado es mayor. Este tiempo adicional admite que los aditivos estabilizadores se puedan distribuir de manera uniforme sobre toda la mezcla.

El tiempo de mezclado apropiado puede evaluarse por medio de una inspección visual de la mezcla, si se observa que hay acumulación de fibras o pelotitas en la mezcla, dependiendo del aditivo estabilizador, al momento de salir la mezcla de la planta o si las partículas del agregado no se cubren de manera adecuada, el tiempo de mezcla tendrá que ser aumentado.

### **6.2.4. Muestreo de la mezcla**

Para obtener datos de la mezcla se efectuarán los ensayos de las características volumétricas, granulometría de la mezcla y estabilidad, incluyendo porcentajes de asfalto, por cada 500 toneladas de mezcla producida. Para los agregados las muestras se toman de acuerdo a las especificaciones presentes en el libro de *Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos, edición 2001*, en la sección 401.18, "Control de calidad, tolerancias y aceptación".

Se deben extraer núcleos de la mezcla ya compactada para efectuar los ensayos volumétricos. También se debe verificar la temperatura, proporciones

del agregado en la mezcla y contenido de cemento asfáltico de forma constante, por medio de dispositivos de control en la planta de producción.

Cuando la cantidad de toneladas de mezcla producida no llega a las 500 por día se deben tomar, por lo menos dos series de pruebas, aunque se aconseja mayor frecuencia en la obtención de pruebas por día, para tener buen control de calidad. El tiempo al cual se toman las pruebas deberá ser al azar para no influir en los resultados.

#### **6.2.5. Almacenaje de la mezcla**

Las plantas de producción que empleen silos de almacenamiento deberán contar con mecanismos que eviten la segregación de la mezcla y sobre todo deben estar equipadas para mantener la temperatura de la mezcla durante el periodo de almacenaje.

La mezcla asfáltica Stone Mastic Asphalt no debe almacenarse por períodos largos de tiempo, debido a la elevada temperatura, esto podría ocasionar escurrimientos innecesarios. A través de ensayos se ha podido determinar que la mezcla puede ser almacenada durante periodos de 2 a 3 horas sin daño.

#### **6.3. Colocación**

La mezcla asfáltica debe colocarse empleando una máquina pavimentadora autopropulsada, que permita ajustar el ancho y espesor, asegurando su esparcimiento de manera uniforme en una sola operación, esto es necesario para cubrir un ancho de, al menos, 3 metros.



Por medio de ensayos que se han llevado a cabo en el extranjero se determinó que para las superficies de rodadura es necesario colocar un espesor de por lo menos 40 milímetros con una tolerancia de 6 milímetros.

No se aconseja colocar mezclas asfálticas provenientes de distintas plantas, al menos de que se aprueben los parámetros por medio de ensayos de laboratorio, en los cuales se garantice que sí cumple con la fórmula de trabajo y que se emplea el mismo agregado y cemento asfáltico.

Las juntas longitudinales entre una capa inferior y una superior sucesivas no deben coincidir en toda su extensión, como zona de traslape se debe dejar un poco de material, aproximadamente 12 milímetros, ya que un traslape excesivo causará que el agregado del material nuevo se aplaste al momento de compactar y se provoque una desintegración en el agregado.

Al momento de realizar la colocación de la mezcla no se deberá colocar cuando el clima se encuentre muy frío o lluvioso, se recomienda como temperatura mínima en el pavimento de 10 grados Celsius para colocar la mezcla. Otras condiciones que afectan la colocación son el viento, la humedad, el espesor de la carpeta a colocar y la temperatura del pavimento existente.

### **6.3.1. Transporte de la mezcla**

La mezcla debe ser transportada de la planta al lugar de su colocación en el menor tiempo posible, empleando camiones de volteo con palanganas metálicas limpias y lisas, se puede colocar lonas u otro material que preserve la mezcla del polvo y la lluvia, evitando así pérdida de temperatura durante el trayecto. Es importante que la mezcla asfáltica no se eleve de temperatura arbitrariamente en la planta para tener mayor tiempo de acarreo, ya que esto

podría provocar escurrimiento del mortero y el agregado en la mezcla por la combinación de vibraciones y temperatura. La mezcla debe llegar al sitio de colocación y compactación a una temperatura aproximada de 140 a 150 grados Celsius, en el caso de que se empleen asfaltos modificados se necesitan temperaturas ligeramente más elevadas. Estas temperaturas permiten asegurar que se obtenga una compactación adecuada.

En las mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt por el contenido de cemento asfáltico, se obtiene un mortero muy espeso que tiende a adherirse en la palangana de los camiones, más que una mezcla convencional. Por esta razón es prudente emplear un agente antiadherente y limpiar la palangana del camión frecuentemente. Los agentes antiadherentes deben utilizarse de manera cuidadosa, ya que pueden ocasionar problemas en la mezcla, por su composición química. Si se coloca en gran cantidad se pueden generar acumulaciones en el fondo de la palangana del camión y esto puede provocar que el cemento asfáltico fluya, ocurriendo escurrimiento no deseado, es por eso que cualquier exceso de agente tiene que ser removido antes de cargar la mezcla, un procedimiento recomendado es levantar la palangana luego de que el agente ha sido rociado.

Como agentes antiadherentes no se pueden emplear aceites, petróleo o sus derivados en cualquier forma, porque pueden contaminar la mezcla.

La segregación o separación del agregado no es un problema en la mayoría de mezcla, lo que se puede generar es que, debido a las vibraciones que se presenten en el transporte, el agregado grueso tienda a aglomerarse dejando secciones con alto contenido de mortero, lo cual puede provocar manchas de grasa y roderas en la carpeta de rodadura, este fenómeno no se

presenta generalmente, si ocurre hay que tomar medidas para evitar la vibración en el traslado del material.

### **6.3.2. Preparación de la superficie del pavimento existente**

La preparación depende del tipo de superficie a cubrir, por lo general para las mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt se emplea la misma preparación que para una mezcla convencional, normalmente se aplica en las siguientes situaciones:

- Sobre un pavimento viejo de mezcla asfáltica en caliente
- Sobre un pavimento viejo de concreto hidráulico
- Sobre una capa intermedia de concreto asfáltico nuevo
- Sobre una base

Si se emplea sobre una superficie vieja de pavimento, en primer lugar es necesario realizar reparaciones apropiadas, para estos trabajos de recapeo, cuando se necesite capas de nivelación, es necesario contar con la aprobación de la fórmula de trabajo, es decir la mezcla que se va a emplear. El espesor de cada capa de nivelación no debe exceder de 75 milímetros, cualquier área dañada deberá ser reparada apropiadamente, estos trabajos deben completarse antes de iniciar las operaciones normales de colocación y compactación.

Para que todas las superficies se cubran es necesario usar un riego de liga, que consisten en la aplicación de una emulsión asfáltica diluida por medio de riego a presión sobre una superficie bituminosa existente, la cual será cubierto con la capa de material asfáltico. El riego de liga se emplea para

mejorar las condiciones de adherencia entre dos superficies y prevenir deslizamientos.

### **6.3.3. Colocación y terminado**

La mezcla es depositada a la pavimentadora de la forma habitual, por medio de camiones. En la pavimentadora hay que tener control sobre el ajuste de las cadenas y todos los elementos mecánicos que puedan fallar, para lo cual hay que elaborar planes de mantenimiento para tenerla en óptimas condiciones. En lo que concierne a la velocidad de colocación, esta depende de la velocidad con la que se compacta la superficie, se recomienda no emplear altas velocidades, porque se puede provocar una separación entre el agregado grueso y el mortero, lo que provocaría manchas de grasa en el pavimento. Es necesario trabajar continuamente con la pavimentadora para tener una superficie uniforme.

Luego que la pavimentadora ha colocado la mezcla asfáltica queda una superficie áspera y muy pegajosa, es por esta razón que se deben efectuar correcciones con un mínimo de mano de obra, esto se efectuará solo si es absolutamente necesario y se ejecutará con mucho cuidado.

### **6.4. Compactación**

Se debe efectuar lo más rápido posible luego de su colocación, ya que las mezclas asfálticas SMA tienen dificultades para compactarse, una vez empieza a enfriarse, es debido a esto que los compactadores operen inmediatamente después de la pavimentadora. Para las mezclas que empleen asfaltos modificados con polímeros se deberán compactar completamente antes de que

se enfríe por debajo de 138 grados Celsius. Estas mezclas deben presentar una densidad mínima colocada de 94 por ciento de la densidad teórica máxima.

En las mezclas SMA la compactación es aproximadamente la mitad de la que se consigue en mezclas convencionales, eso quiere decir que la compactación en las mezclas convencionales hace disminuir aproximadamente del 20 al 25 por ciento del nivel de carpeta, para las mezclas Stone Mastic Asphalt la disminución del nivel de carpeta es del 10 al 15 por ciento.

Los compactadores deben estar atrás de la pavimentadora todo el tiempo, si la compactación se retrasa, la pavimentadora debe disminuir la velocidad hasta que compactadoras alcancen a la pavimentadora. Por lo general, se emplean entre dos o tres compactadoras, las cuales deben ser de doble rodo liso tipo tándem, para el tendido de la mezcla, si la densidad no puede alcanzarse rápidamente, se puede agregar una compactadora para obtener la densidad y aumentar velocidad de trabajo.

Para el empleo de compactadores se deberán usar los de rodillos que pesan al menos 9 toneladas métricas. La velocidad no deberá ser mayor a 5 kilómetros por hora y la dirección se mantendrá hacia la pavimentadora. Para los momentos en los que se pare el trabajo de la pavimentadora será necesario colocar los compactadores fuera de la carpeta para no dañar la superficie terminada.

En los cilindros del compactador es práctica normal emplear una cantidad mínima de agente antiadherente mezclado con el agua del cilindro de la compactadora para prevenir de esta manera que el cemento asfáltico se pegue con el rodillo compactador.

Se pueden emplear compactadores vibratorios en mezclas asfálticas con el vibrador encendido con resultados satisfactorios, solo que hay que tener precaución al emplear la vibración, ya que esta puede romper el agregado o empujar el mortero hacia la superficie de la carpeta, al emplear compactadores vibratorios es necesario usarlos a alta frecuencia y con una amplitud baja. Su funcionamiento debe ser inspeccionado muy de cerca durante la compactación para evitar algún daño sobre la superficie y su uso sea perjudicial.

Los compactadores con llantas neumáticas no se recomiendan para usarse en mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt porque las llantas de hule levantan el mortero de la mezcla causando de esta manera defectos en la superficie compactada.

#### **6.4.1. Densidad en sitio**

La densidad de la mezcla se debe verificar continuamente a lo largo de la construcción del pavimento, para asegurar la calidad del mismo. Las especificaciones actuales exigen por lo menos una densidad del 94 por ciento, respecto la densidad teórica máxima, es decir la gravedad teórica específica máxima. Para determinar la densidad en el campo es usado un densímetro nuclear; por las propiedades rugosas de la mezclas es necesario emplear arena para mejorar los valores y también es necesario obtener núcleos de muestra para ensayarlos y determinar las densidades que se tengan y de esta manera verificar que si se cumple con las especificaciones.

#### **6.5. Calidad del producto final**

Para obtener buenos resultados con la mezcla asfáltica es necesario contar con una superficie uniforme y que se ajuste a la rasante y pendientes

establecidas por el diseño geométrico, cumpliendo con las siguientes verificaciones.

#### **6.5.1. Compactación**

La verificación dependerá de la cantidad de mezcla colocada, pero como mínimo será necesario contar con cinco briquetas por día de producción, en las cuales los valores obtenidos de tres probetas no difieran en más de cuatro puntos porcentuales a los establecidos por el diseño, las briquetas se deberán tomar aleatorias de manera que los datos sean lo más realistas posible.

#### **6.5.2. Espesor**

Esta verificación se obtiene de los espesores de los núcleos extraídos para la comprobación de compactación, para las briquetas es necesario que el espesor medio de la capa compactada no sea inferior a la de diseño para que se asemeje a las condiciones de uso.

## 7. CASO PRÁCTICO

### 7.1. Generalidades

Proyecto: mantenimiento mayor a la autopista Palín–Escuintla: fabricación y colocación de mezcla asfáltica en caliente tipo Stone Mastic asphalt en carriles de rodadura, fabricación y colocación de sello asfáltico tipo III en hombros y distribuidores CA – 09 sur, RN – 14 y CA – 02.

Tramo: autopista Palín–Escuintla del kilómetro 38+000 al kilómetro 61+000 ambos cuerpos.

El diseño de mezcla asfáltica analizado se basó en la Norma AASHTO M 325, este diseño se planteó para realizar ajustes a la mezcla con la finalidad de obtener un aumento en los vacíos de aire y vacíos del agregado mineral, debido a condiciones climáticas del lugar. La arena y grava son trituradas, procedentes de la planta trituradora de Agregados de Guatemala. El asfalto modificado con elastómeros de viscosidad AC – 20, tipo I – C, modificado con copolímeros de bloque de estireno, cumpliendo con las especificaciones de los semibloques de butadienos, procedente de Unopetrol de Guatemala.

En la tabla XXV se muestran las especificaciones del asfalto modificado procedentes del diseño de la mezcla colocada en el proyecto, cumpliendo con los requisitos que se plantean en las *Especificaciones Generales para construcción de carreteras y puentes de la dirección general de caminos de la Dirección General de Caminos, edición 2001*, en el apartado 411.02 tipo de cementos asfálticos modificados.



Tabla XXV. **Especificaciones del asfalto modificado**

Tipo de prueba	Especificaciones		Asfalto modificado	Norma
	Mínimo	Máximo		
Gravedad específica, 60 °F	---	---	1,01995	ASTM D 3289
Peso lb/galón	---	---	8,494	---
Penetración a 25 °C, 100 gramos y 5 segundos	50 mm	75 mm	52	AASHTO T 49
Punto de ablandamiento	54,4 °C	---	69	AASHTO T 53
Recuperación elástica por torsión a 25°C	25 %	---	48	AASHTO T 139
Separación	---	2,2 °C	0	AASHTO T 44
Índice de susceptibilidad térmica	1,0	---	2,77	---

Fuente: elaboración propia con base a resultados de laboratorio de asfalto modificado tipo I-C, empleados en la construcción de autopista Palín-Escuintla.

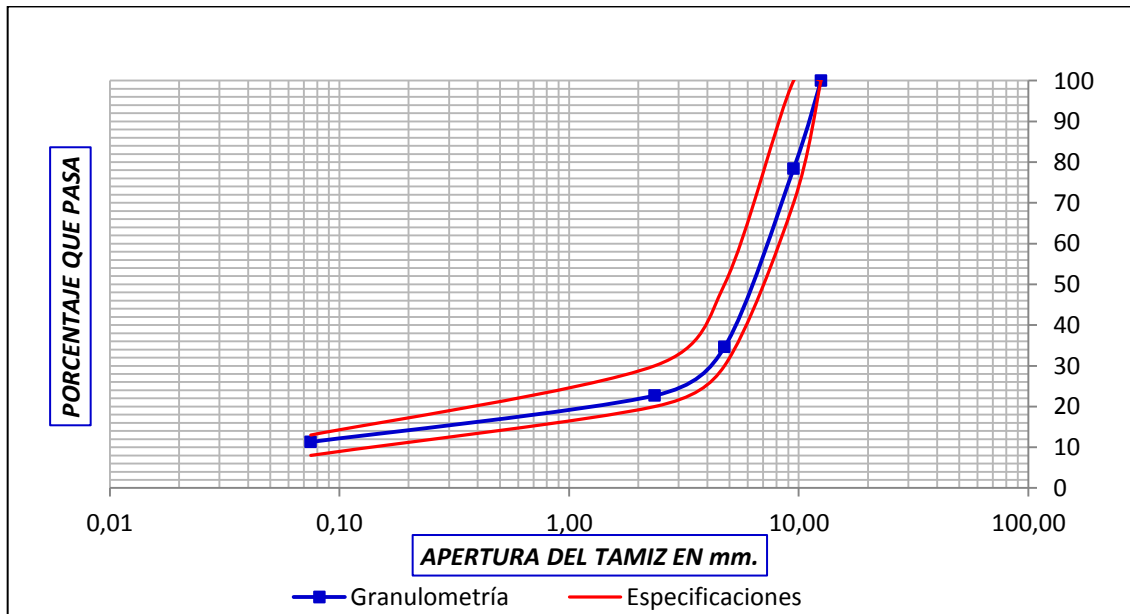
En la selección de la granulometría se tomó, para la elaboración del proyecto, un tamaño máximo nominal del agregado de 9,50 milímetros. Por tratarse de una superficie de rodadura el espesor seleccionado fue de 40 milímetros. El agregado seleccionado debía cumplir con las especificaciones normadas para el tamaño máximo nominal. En la tabla XXVI se muestran los resultados de la granulometría realizada al agregado seleccionado, así como en la figura 28 se muestra gráficamente los respectivos valores, con los límites propios del tamaño máximo nominal, que permiten apreciar que la granulometría seleccionada se encuentra dentro de los límites permisibles. En los anexos se encontrará el resultado del análisis granulométrico de la muestra empleada en el proyecto.

Tabla XXVI. **Análisis granulométrico**

Tamiz		9.5 mm TMN		Granulometría seleccionada
mm	pulgada	Inferior	Superior	
25,00	1	--	--	100,00
19,00	3/4	--	--	100,00
12,50	1/2	100	100	100,00
9,50	3/8	80	100	90,43
4,75	No. 4	28	50	36,10
2,36	No. 8	15	30	23,49
0,075	No. 200	8	13	9,54

Fuente: elaboración propia con base a resultados de laboratorio para granulometría seleccionada, empleada en la construcción de autopista Palín-Escuintla.

Figura 28. **Análisis granulométrico**



Fuente: elaboración propia con datos del análisis granulométrico efectuado en laboratorio.

### 7.1.1. Requisitos de los materiales

Para cumplir con las especificaciones que se establecen en las normas, se procedió a realizar los ensayos al agregado que cumplió con el tamaño máximo nominal de 9,50 milímetros, en la tabla XXVII se encuentran los resultados de los ensayos realizados al agregado.

Tabla XXVII. Requisitos de los materiales

Ensayo	Especificación	Resultado
Vacíos de agregado grueso en condición seco varillado	---	39,63
Gravedad específica bruta del agregado	---	2,67
Gravedad específica efectiva del agregado	---	2,70
Porcentaje de absorción de agua	2 % máximo	0,99
Equivalente de arena (%)	---	77,50
Límite líquido	25 % máximo	No límite
Índice plástico	No plástico	No aplica.
Caras fracturadas	90 mínimo	99,16
Partículas planas y alargadas 3 a 1	20 % máximo	11,52
Partículas planas y alargadas 5 a 1	5 % máximo	0
Abrasión - Los Ángeles	30 % máximo	18,30
Angularidad del agregado fino	45 % mínimo	85,00
Peso unitario suelto (kg/m <sup>3</sup> )	---	1 274,00

Fuente: elaboración propia con base a resultados de laboratorio para agregados, empleados en la construcción de autopista Palín-Escuintla.

Cumpliendo con los requisitos que se plantearon para los materiales, se procedió a determinar el porcentaje óptimo de asfalto que cumpliera con las especificaciones que se plantearon, basándose en los ajustes que se realizaron

al diseño de la mezcla asfáltica. En la tabla XXVIII se muestran los resultados obtenidos empleados al obtener el contenido óptimo que posterior a realizar los ajustes fue de 6,50 por ciento de asfalto.

Tabla XXVIII. **Resultados obtenidos a muestra óptima**

<b>Ensayo</b>	<b>Especificación</b>	<b>Resultado</b>
Número de golpes por cara de martillo Marshall	50	50
Temperatura de mezclado	150 – 170 °C	166 °C
Temperatura de compactación	135 °C mínimo	149 °C
Contenido de cemento asfáltico	6 % mínimo	6,50
Fibra celulosa	0,30 %	0,30
Porcentaje de vacíos	4 %	5,07
Porcentaje de vacíos de agregado mineral	17 mínimo	19,76
Estabilidad Marshall	1 400 lb	1 410,58
Fluencia Marshall	---	11,85
Porcentaje de escurrimiento	0,30 % máximo	0,03
Gravedad específica aparente de la mezcla	---	2,2899
Gravedad específica teórica máxima de la mezcla	---	2,4378
Porcentaje de vacíos en el agregado grueso de la mezcla	39,63 % máximo	38,62

Fuente: elaboración propia con base a resultados de laboratorio para mezcla asfáltica, empleada en la construcción de autopista Palín–Escuintla.

### 7.1.2. Interpretación de resultados

En el diseño que se planteó se obtuvo un valor de 5,07 por ciento de vacíos en la mezcla, el cual es superior al 4,00 por ciento que presenta la especificación, esto se debe a que la mezcla analizada es un ajuste que se realizó para tener una superficie de rodadura que se adaptara a las condiciones donde se aplicaba, la cual presenta altas temperaturas que ocasionan que ocurra un escurrimiento en la superficie de la misma, ocasionando manchas, es por eso que se acepta realizar este tipo de cambios que favorezcan la calidad en la superficie de rodadura, este valor se encuentra dentro de la tolerancia, sin embargo, es aconsejable tener mucho control en la producción, ya que los vacíos son esenciales en la elaboración de la mezcla.

En la figura 29 se muestra el estado de la superficie de rodadura luego de la colocación, se puede apreciar el alto contenido de agregado grueso que caracteriza a la mezcla, así como el espesor apreciable en un corte que se realizó en el arriate central de la carretera.

Figura 29. Estado de la superficie de rodadura en la autopista



Fuente: autopista Palín–Escuintla.

## CONCLUSIONES

1. Los datos que se obtuvieron en el desarrollo experimental de la mezcla propuesta establece, que estos cumplieron con las especificaciones de las normas utilizadas.
2. Por el alto contenido de cemento asfáltico, de seis punto treinta por ciento, se emplean aditivos estabilizadores que eviten el escurrimiento que podría tener la mezcla, en las gráficas del diseño de la mezcla se puede observar que el escurrimiento es muy bajo, casi imperceptible.
3. En el desarrollo de la mezcla asfáltica, el agregado grueso es un elemento primordial e importante, por lo que el análisis que se realizó tenía que cumplir con las especificaciones planteadas, ya que la transmisión de cargas se realiza por contacto piedra sobre piedra, unidas por el cemento asfáltico.
4. Para la elaboración de la mezcla asfáltica es necesario emplear asfalto modificado con polímeros para garantizar un buen grado de desempeño.
5. El desarrollo experimental que se plantea puede ser empleado como guía para el diseño de una mezcla asfáltica Stone Mastic Asphalt, cumpliendo con lo que se especifica para garantizar buenos resultados.

6. Las mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt presentan mejores propiedades con relación a las mezclas convencionales, ya que tienen mayor resistencia a la fricción, evitan el deslumbramiento, el acuaplaneo y mayor comodidad para el conductor.
7. El caso práctico propuesto de la elaboración de la mezcla asfáltica, muestra el procedimiento y la factibilidad de realizar este tipo de obras en nuestro país.
8. Este tipo de mezclas evita el ingreso de agua al resto de capas, ya que es una mezcla impermeabilizante, también permite que el agua fluya en la superficie rápidamente.
9. Para el diseño de la mezcla propuesta se toma el contenido de vacíos al cuatro por ciento, por lo que especifican en las normas, pero por la experiencia que se tienen en campo este contenido puede variar como se muestra en el caso práctico, para obtener resultados óptimos.
10. Al analizar el caso práctico y realizar una inspección en el proyecto se puede constatar la buena calidad de la construcción y, por lo tanto la necesidad de implementar más proyectos de este tipo a lo largo de la red vial del país.

## RECOMENDACIONES

1. En la implementación de proyectos, al elaborar el diseño de la mezcla asfáltica, el ingeniero supervisor deberá realizar un seguimiento en la planta de elaboración para garantizar los resultados obtenidos.
2. Para la selección del agregado es necesario contar con personal de la empresa constructora y supervisora que realice visitas a la planta trituradora, para tomar muestras aleatorias y tener garantía de que se trabaja con buena calidad de agregado.
3. Al realizar los ensayos, los laboratoristas deberán elaborarlos de manera cuidadosa, a una temperatura adecuada, con el debido equipo, para garantizar que se estén obteniendo buenos resultados. Hacer todos los procedimientos que se describen siempre amparados por las normas, si no se tiene norma nacional realizar especificación técnica especial para el proyecto a elaborar.
4. Para la construcción de carreteras y desarrollo del país, emplear este tipo de mezcla asfáltica como superficie de rodadura en tramos carreteros con alta intensidad de tránsito, debido a sus características que garantizan un desplazamiento seguro sobre su superficie, permitiendo mayor confort al usuario.



5. Para el personal que trabaje en la planta dosificadora, cuando se realice la mezcla asfáltica tener cuidado de no exceder la temperatura del cemento asfáltico modificado porque se puede llegar a quemar los polímeros y se perderían las propiedades que se necesitan.
6. Para los ingenieros residentes: realizar controles de calidad sobre las carpetas colocadas, analizando sus propiedades. Al colocar la superficie de rodadura verificar que la compactación sea la adecuada y que no ocurra separación en los agregados y el cemento asfáltico.
7. Para los ingenieros supervisores: si se desean tener en las mejores condiciones al pavimento se sugiere plantear un mantenimiento preventivo sobre la superficie de rodadura para garantizar su impermeabilización, así como cualquier falla que pudiera ocurrir en función al uso que se le dé.
8. Para los constructores: se debe dar seguimiento a nuevas mezclas asfálticas, analizando su comportamiento dentro del país y realizando estudios técnico-financieros para determinar la factibilidad de su utilización.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAYS AND TRANSPORTATION OFFICIAL. *Standard Specifications for Transportation material and methods of sampling and testing, part 1*. 60 ed. United States of America: American Association of State Highways and Transportation official, 1992.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Concrete and aggregates, Volume 04.02*. United States of America: American Society for Testing and Materials, 2004.
3. \_\_\_\_\_. *Road and Paving Materials, Vehicle-Pavement System, Volume 04.03*. United States of America: American Society for Testing and Materials, 2004.
4. ASPHALT INSTITUTE. *Principles of construction of hot-mix Asphalt Pavements*. United States of America: Asphalt Institute, 1997. 251 p.
5. COMISIÓN GUATEMALTECA DE NORMAS. *Especificaciones de industria de la construcción NTG 41010*. Guatemala: COGUANOR, 2005.
6. DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS. *Especificaciones Generales para la construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: MICIVI, 2001.

7. GALLART VILLAMOR, Francisco. *Evaluación en laboratorio de la durabilidad de mezclas bituminosas tipo SMA*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad Politécnica de Cataluña, Facultad de Ingeniería, 2011. 77 p.
8. MORALES RAMÍREZ, Evelyn Maribel. *Manual de apoyo docente para desarrollar ensayos de laboratorio, relacionados con materiales de construcción*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 118 p.
9. NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Designing and Constructing SMA Mixtures: State-of-the-Practice*. United States of America: National Asphalt Pavement Association, 1999. 58 p.

## **ANEXOS**

ABSORCIÓN Y GRAVEDAD ESPECÍFICA – ASTM C 127

**Fecha de realización:** Agosto de 2014

**Proyecto:** Tesis

**Material:** Agregado grueso triturado

**Tamaño Máximo Nominal:** 9.50 mm.

Peso inicial de muestra seca	494.20 gr
Peso de muestra seca saturada al aire	497.80 gr
Peso de muestra saturada en agua	316.10 gr

**Porcentaje de absorción:** 0.92

**Gravedad específica:** 2.72

**Gravedad específica aparente:** 2.77

**Observaciones:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**PESO UNITARIO VARILLADO Y PORCENTAJE DE VACÍOS – ASTM C 29**

**Fecha de realización:** Agosto de 2014

**Proyecto:** Tesis

**Material:** Agregado grueso triturado

**Tamaño Máximo Nominal:** 9.50 mm.

**Peso unitario varillado**

Peso material varillado (1)	4712 gr
Peso material varillado (2)	4725 gr
Peso material varillado (3)	4693 gr
Promedio de peso varillado	4710 gr
Volumen del recipiente	0.0028 m <sup>3</sup>

**Peso Unitario varillado del agregado:** 1682.14 kg/m<sup>3</sup>

**Porcentaje de vacíos**

Gravedad específica del agregado grueso	2.72
Peso unitario del agregado grueso	1682.14 kg/m <sup>3</sup>
Peso unitario del agua	998 kg/m <sup>3</sup>

**Porcentaje de vacíos del agregado grueso:** 38.03

**Observaciones:** \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**PARTICULAS TRITURADAS – ASTM D 5821**

**Fecha de realización:** Agosto de 2014

**Proyecto:** Tesis

**Material:** Agregado grueso triturado

**Tamaño Máximo Nominal:** 9.50 mm.

**Partículas trituradas en una cara**

Peso inicial de muestra	200.30 gr
Peso de partículas trituradas, una cara	200.30 gr

**Partículas trituradas en una cara:** 100 %

**Partículas trituradas en dos caras**

Peso inicial de muestra	200.30 gr
Peso de partículas trituradas, dos caras	200.30 gr

**Partículas trituradas en dos caras:** 100 %

**Observaciones:** \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

## LÍMITE LÍQUIDO – ASTM D 4318

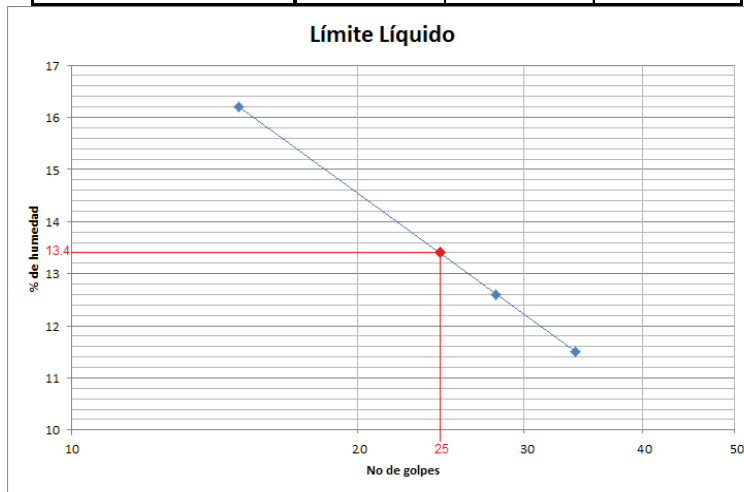
**Fecha de realización:** Agosto de 2014

**Proyecto:** Tesis

**Material:** Agregado grueso triturado

**Tamaño Máximo Nominal:** 9.50 mm.

Descripción	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
<b>Peso neto húmedo</b>	24.2	24.6	26.7
<b>Peso neto seco</b>	21.4	21.5	22.4
<b>Diferencia</b>	2.8	3.1	4.3
<b>% de humedad</b>	11.5	12.6	16.2
<b>No. De golpes</b>	34	28	15



**Porcentaje de humedad a los 25 golpes:** 13.4

**Observaciones:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_



GRAVEDAD ESPECÍFICA TEÓRICA MÁXIMA DE LA MEZCLA RICE  
AASHTO T 209

**Fecha de realización:** Agosto de 2014

**Proyecto:** Tesis

**Material:** Mezcla asfáltica SMA

**Tamaño máximo nominal:** 9.50 mm

Característica	Porcentaje de asfalto			
	5.5	6.0	6.5	7.0
<b>Peso de matraz</b>	795.20	795.40	794.90	795.10
<b>Peso de matraz y muestra</b>	1535.70	1538.10	1540.80	1545.30
<b>Peso de muestra (A)</b>	740.50	742.70	745.90	750.20
<b>Peso de matraz lleno de agua (D)</b>	1994.70	1994.50	1994.50	1994.80
<b>Peso de matraz, muestra y agua (E)</b>	2432.70	2432.00	2431.90	2431.60
<b>Gravedad específica teórica máxima</b>	2.448	2.433	2.418	2.394

**Observaciones:** Cemento asfáltico modificado PG 76-22

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE DE LA MEZCLA – AASHTO T 188

**Fecha de realización:** Agosto de 2014

**Proyecto:** Tesis

**Material:** Mezcla asfáltica SMA

**Tamaño máximo nominal:** 9.50 mm

Porcentaje de asfalto	Briqueta No.	Peso de probeta seca	Peso de probeta sumergida en agua	Volumen de probeta	Gravedad específica aparente	Promedio de gravedad específica aparente
5.5	1	1125.6	638.7	486.9	2.312	2.308
	2	1090.3	617.6	472.7	2.307	
	3	1104.6	625.4	479.2	2.305	
6.0	4	1112.1	633.2	478.9	2.322	2.323
	5	1128.2	641.5	486.7	2.318	
	6	1094.5	624.3	470.2	2.328	
6.5	7	1118.9	639.7	479.2	2.335	2.333
	8	1122.4	640.1	482.3	2.327	
	9	1129.8	646.4	483.4	2.337	
7.0	10	1125.2	644.1	481.1	2.339	2.337
	11	1121.5	640.9	480.6	2.334	
	12	1130.4	646.7	483.7	2.337	

**Observaciones:** Cemento asfáltico modificado PG 76-22

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

ESTABILIDAD Y FLUENCIA DE MARSHALL – AASHTO T 245

**Fecha de realización:** Agosto de 2014

**Proyecto:** Tesis

**Material:** Mezcla asfáltica SMA

**Tamaño máximo nominal:** 9.50 mm

Porcentaje de asfalto	Briqueta No.	Lectura Marshall	Estabilidad Marshall	Volumen de probeta	Factor de corrección	Estabilidad Marshall corregida (lb)	Lectura Fluencia Marshall	Promedio fluencia Marshall	Promedio estabilidad corregida (lb)
5.5	1	111	1681.97	486.9	1.09	1833.347	13	12.67	1962.373
	2	121	1809.97	472.7	1.14	2063.366	12		
	3	116	1745.97	479.2	1.14	1990.406	13		
6.0	4	122	1822.77	478.9	1.14	2077.958	15	14.00	1979.824
	5	114	1720.37	486.7	1.09	1875.203	13		
	6	110	1669.17	470.2	1.19	1986.312	14		
6.5	7	128	1899.57	479.2	1.14	2165.510	15	15.33	1985.626
	8	109	1656.37	482.3	1.14	1888.262	15		
	9	116	1745.97	483.4	1.09	1903.107	16		
7.0	10	122	1822.77	481.1	1.14	2077.958	17	17.00	1975.685
	11	112	1694.77	480.6	1.14	1932.038	16		
	12	117	1758.77	483.7	1.09	1917.059	18		

**Observaciones:** Cemento asfáltico modificado PG 76-22

# **CASO PRÁCTICO**

**DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA TIPO SMA**  
**TMN 9.5 mm**

PRUEBAS EFECTUADAS	SIMBOLO	RESULTADO	ESPECIFICACIONES
<b>MEZCLA ASFALTICA</b>			
Numero de golpes por cara	****	50.00	50
Temperatura de mezclado °C	****	166.00	170 aprox
Temperatura de compactacion °C	****	149.00	138 min
Contenido de asfalto (%)	Pb	6.50	6 min
Fibra celulosa (%)	****	0.30	0.3 - 0.5
Vacios de aire (%)	Va	5.07	3.0 - 6.0
Vacios de agregado mineral (%)	Vma	19.76	17 min
Estabilidad Marshall (Lbs/plg <sup>2</sup> )		1,410.58	1,200 min
Fluencia Marshall (0.01 ")	****	11.85	NA
Relacion estabilidad-fluencia (Lbs/0.01")		119.04	NA
Resistencia a traccion indirecta (kPa)	RTI		
Susceptibilidad a la humedad (%)		100.00	70 min
Escorrimento Schellenberg (%)		0.03	0.30 max
Gravedad especifica bruta de la mezcla	Gmb	2.2899	****
Gravedad especifica teorica maxima de la mezcla AASHTO T209	Gmm	2.4378	****
Vacios en el agregado grueso de la mezcla	VCA <sub>Mix</sub>	38.62	VCA <sub>DRC</sub> > VCA <sub>Mix</sub>
<b>AGREGADO</b>			
Vacios del agregado grueso en condicion seco varillado	VCA <sub>DRC</sub>	39.63	
Gravedad especifica bruta del agregado	Gsb	2.67	****
Gravedad especifica efectiva del agregado	Gse	2.70	****
Porcentaje de absorción de agua	Pwa	0.99	****
Vestimiento del agregado (%)	****	98.00	> 95
Equivalente de arena (%)	****	77.50	> 35
Limite liquido (%)	LL	N. L.	< 20
Indice plastico	****	No plastico	No plastico
Caras fracturadas (%)	****	99.16	90 min
Particulas planas y alargadas (%)	PPA	11.52	20 max
3 a 1			
5 a 1			5 max
Abrasion -Los Angeles (%)		18.30	30 max
Desintegracion al sulfato de sodio (%)	****	10.00	15 max
Angularidad del agregado fino (%)	****	85.00	45 min
Peso unitario suelto	PUS	1,274.00	NA
<b>LIGANTE ASFALTICO</b>			
Gravedad especifica del asfalto	Gb	1.02	****

Asfalto modificado con polimero (RET)

Para las temperaturas de mezclado y compactacion es recomendable ver la carta reologica del cemento asfaltico.

## RESULTADOS ENSAYOS ASFALTO MODIFICADO TIPO 1-C

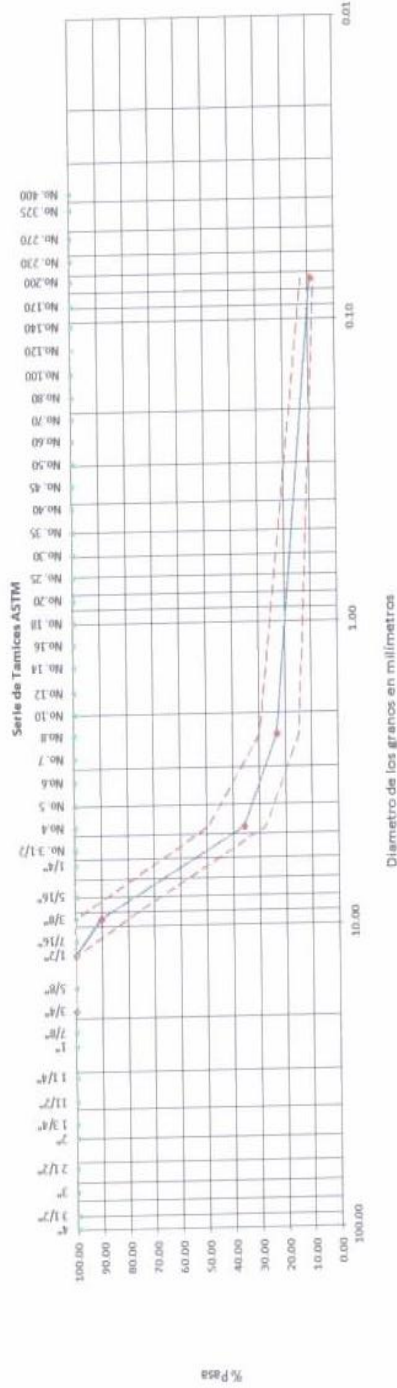
TIPO DE PRUEBA	ESPECIFICACIONES		ASFALTO MODIFICADO	NORMA
Gravedad específica, 60°F			1.01995	<b>ASTM D 3289</b>
Peso Lbs/Galon			8.494	
Penetración a 25°C, 100gms.,5 seg. (0.1 dmm)	Min Max	50 75	52	AASHTO T 49
Penetración a 4°C, 200gms.,60seg. (0.1 dmm)	Min	25	*****	AASHTO T 49
Punto de Ablandamiento,R&B, 5°C/min.(°C)	Min	54.4	69	AASHTO T 53
Recuperación Elástica por torsión a 25°C (%)	Min	25	48	M-MM-4-05-024/02 SCT
Separación, Diferencia R&B, °C	Max	2.2	0	AASHTO T 44
Indice de Susceptibilidad Térmica (IP)	Min	1.0	2.77	

Produccion en planta

Ac-20 Unopetrol

## ANALISIS GRANULOMETRICO

TAMIZ	DIAMETRO (mm)	PESO BRUTO RETENIDO	PESO NETO RETENIDO	% PASA	ESPECIFICACIONES
1	25.00			100.00	100
3/4"	19.00			100.00	100
1/2"	12.50		0.00	100.00	100
3/8"	9.50		9.57	90.43	80
No. 4	4.75		63.90	36.10	28
No. 8	2.36		76.51	23.49	15
No. 200	0.07366		90.46	9.54	8



75% Agregado 3/8 a No.8 AGREGUA PPO

18.5% Agregado 1/2 a 0" AGREGUA PPO

6.5% Cafill

**GRAVEDADES ESPECIFICAS Y PORCENTAJES DE ABSORCIÓN INTEGRADAS PARA DISEÑO**

**SMA 9.5 mm**

75% AGREGADO 3/8" A No. 8 PPO
18.5 % AGREGADO 1/2" A 0 PPO
6.5% CAFILL

<b>GRAVEDAD ESPECIFICA BRUTA DE LOS AGREGADOS Gsb</b>	
	2.66840
<b>GRAVEDAD ESPECIFICA BRUTA SUPERFICIE SECO SATURADA Gsb(sss)</b>	
	2.69090
<b>GRAVEDAD ESPECIFICA EFECTIVA DE LOS AGREGADOS Gse</b>	
Factor K:	0.5
	2.69895
<b>GRAVEDAD ESPECIFICA APARENTE DE LOS AGREGADOS Gsa</b>	
	2.72950
<b>PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DE AGUA DE LOS AGREGADOS Pwa</b>	
	0.99470



PROPIEDADES VOLUMETRICAS DE LA MEZCLA ASFALTICA

ESTABILIDAD MARSHALL										
No.	ASFALTO (%)	LECTURA	CARGA (Lbs)	F. C	CARGA CORREGIDA	PROMEDIO CARGA	FLUENCIA	PROMEDIO FLUENCIA	RELACION ESTABILIDAD FLUENCIA	
1	6.50	148.00	1,420.19	1.00	1,420.19	1,410.58	12.20	11.85	119.04	
2	6.50	145.00	1,400.96		1,400.96		11.50			
RESISTENCIA A TENSION INDIRECTA ( ENSAYO LOTTMAN)										
No.	ASFALTO (%)	ALTURA (cms)	LECTURA MICROMETRO	CARGA (Lbf)	CARGA (Kgf)	RTI (Kgf/cm <sup>2</sup> )	RTI (Psi)	RTI (kPa)	PROMEDIO RTI (kPa)	
GRAVEDAD ESPECIFICA BRUTA DE LA MEZCLA										
TEMPERATURA DEL AGUA: <u>23</u> °C				FACTOR DE CORRECCION: <u>1.000728</u>						
No.	ASFALTO (%)	PESO NETO MUESTRA	PESO NETO MUESTRA SATURADA	PESO NETO EN AGUA	VOLUMEN SIN CORREGIR	VOLUMEN CORREGIDO	GRAVEDAD ESPECIFICA DE LA MUESTRA	PROMEDIO GRAVEDAD ESPECIFICA		
1	6.50	1,212.20	1,215.00	686.30	528.70	529.08	2.2911	2.2899		
2	6.50	1,200.60	1,203.10	678.90	524.20	524.58	2.2887			
ANALISIS VOLUMETRICO DE LA MEZCLA ASFALTICA										
GRAVEDAD ESPECIFICA BRUTA DEL AGREGADO	Gsb	2.6684					Vb total	0.1460		
GRAVEDAD ESPECIFICA EFECTIVA DEL AGREGADO	Gse	2.6990					Vsb	0.8024		
GRAVEDAD ESPECIFICA DEL ASFALTO	Gb	1.0190					Vse	0.7933		
GRAVEDAD ESPECIFICA BRUTA DE LA MEZCLA	Gmb	2.2899					Vba	0.0091		
							Vbe	0.1369		
CONTENIDO DE ASFALTO	Pb	6.5000					Pba	0.4300		
PESO DEL ASFALTO	Pb	0.1488					Pbe	6.1000		
PESO DEL AGREGADO	Ps	2.1411					VCA <sub>SEC</sub>	39.63		
							P <sub>sp</sub>	71.53		
VACIOS DE AIRE (%)	Va	6.0665					VCA <sub>MAX</sub>	38.62		
VACIOS DE AGREGADO MINERAL (%)	VMA	19.7609								
CONTENIDO DE ASFALTO EFECTIVO	Pbe	6.0940					Escorrimento (%)	0.03		
CONTENIDO DE ASFALTO ABSORBIDO	Pba	0.4041								
VACIOS LLENOS DE ASFALTO	Vfa	69.3005								
GRAVEDAD ESPECIFICA TEORICA DE LA MEZCLA AASHTO T 209	Gmm	2.4378								
RELACION POLVO ASFALTO		1.5651								