



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

**REHABILITACIÓN DE CARRETERAS PAVIMENTADAS UTILIZANDO
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA CON POLÍMEROS**

Josué Ariel Velásquez Mayén

Asesorado por el Ing. Civil Hugo Alexander Rodríguez Guzmán

Guatemala, septiembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REHABILITACIÓN DE CARRETERAS PAVIMENTADAS UTILIZANDO
MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA CON POLÍMEROS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JOSUE ARIEL VELASQUEZ MAYEN

ASESORADO POR EL ING. HUGO ALEXANDER RODRIGUEZ GUZMAN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. José Fernando Samayoa Roldán
SECRETARIA	Inga. Mayra Grisela Corado García. a.i.

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:

REHABILITACIÓN DE CARRETERAS PAVIMENTADAS UTILIZANDO MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA CON POLÍMEROS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería, con fecha 12 de agosto de 2014.

Josué Ariel Velásquez Mayén

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la roca sobre la cual está mi hogar, y su infinita misericordia.
- Mis padres** Ariel Velásquez y Magda Mayén de Velásquez.
Por el esfuerzo puesto en sus hijos.
- Mi esposa** Arleny Decaro de Velásquez, por su amor y el apoyo incondicional en mi vida.
- Mis tías** Alma y Blanca Velásquez, por su apoyo y amor comparables al de una madre.
- Mis hermanos** Cristina y Diego, con mucho amor.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por recibirme en tan honorable casa de estudios y ser un lugar de oportunidades.
Facultad de Ingeniería	Por abrir sus puertas al conocimiento y ser una plataforma para mi vida profesional.
Mis amigos de la Facultad	Guillermo Agueda, Edher Morales y Carlos del Cid, Martho Luna, por su apoyo, amistad e influencia para lograr mis metas.
Ing. Hugo Alexander Rodriguez	Por el apoyo incondicional en mi carrera profesional.
Pavimentos de Guatemala, S.A.	Por la oportunidad de desarrollarme como profesional y apoyarme en el logro de mis metas, en especial al Lic. Allen Krebs e Ing. Pedro Luis Rocco, por abrirme las puertas en tan prestigiosa empresa.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. GENERALIDADES DEL ASFALTO.....	1
1.1. Definición.....	1
1.2. Origen e historia del asfalto	2
1.3. Materiales bituminosos	3
1.3.1. Alquitranes.....	3
1.3.2. Brea	4
1.4. Cemento asfáltico.....	4
1.4.1. Clasificación por su contenido de asfalto.....	5
1.4.2. Clasificación de acuerdo a su naturaleza	6
1.5. Composición del cemento asfáltico	7
1.5.1. Asfaltenos.....	11
1.5.2. Maltenos	11
1.5.3. Equilibrio en la constitución química y física.....	12
1.6. Propiedades físico químicas del cemento asfáltico	13
1.6.1. Propiedades másicas	15
1.6.1.1. Densidad	16
1.6.1.2. Viscosidad:	17
1.6.1.3. Consistencia:	20

	1.6.1.4.	Susceptibilidad térmica	21
	1.6.2.	Índice de penetración	23
	1.6.2.1.	Penetración	23
	1.6.2.2.	Punto de reblandecimiento.....	24
1.7.		Propiedades mecánicas de los cementos asfálticos	29
	1.7.1.	Ductilidad.....	31
	1.7.2.	Fragilidad.....	33
	1.7.3.	Cohesión	34
	1.7.4.	Rigidez	38
	1.7.5.	Adhesividad.....	39
2.		PRINCIPALES MODIFICADORES PARA ASFALTO	43
2.1.		Modificación de un asfalto.....	44
	2.1.1.	Justificación.....	45
2.2.		Tipos de modificadores	47
	2.2.1.	Polímero.....	48
	2.2.2.	Homo-polímero.....	49
	2.2.3.	Co polímeros	49
	2.2.4.	Elastómeros	50
	2.2.5.	Polímero tipo II	52
	2.2.6.	Plastómeros	52
	2.2.7.	Hule molido de neumáticos	53
2.3.		Fundamentos de la modificación.....	54
2.4.		Estructura de los asfaltos modificados.	59
	2.4.1.	Compatibilidad de los polímeros.	60
2.5.		Elección del tipo de modificador a utilizar	62
	2.5.1.	Elastómeros de estireno – butadieno.	65
	2.5.2.	Elección del elastómero SBS	68
2.6.		Proceso de Modificación de un cemento asfáltico	75

3.	MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA	81
3.1.	Definición.....	81
3.2.	Selección del modificador.....	83
3.3.	Selección de materiales.....	84
3.4.	Agregados	84
3.4.1.	Agregados finos.....	85
3.4.2.	Agregados gruesos.....	85
3.5.	Cemento asfáltico.....	86
3.6.	Tipos de MAC.....	87
3.7.	Introducción al diseño de una MACM.....	89
3.7.1.	Método Marshall	90
3.7.2.	Método <i>Superpave</i>	90
3.8.	Proceso de fabricación de una MACM	92
3.9.	Importancia de la temperatura.....	98
3.10.	Transporte	100
4.	REHABILITACIÓN DE UN TRAMO DE CARRETERA CON MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA	103
4.1.	Antecedentes.....	103
4.2.	Descripción geográfica del tramo a rehabilitar.....	104
4.2.1.	Características climatológicas	104
4.2.2.	Zona de influencia	105
4.3.	Evaluación circunstancial del tramo y medidas preliminares.....	107
4.4.	Propuesta de trabajos a realizar.....	110
4.5.	Proceso de rehabilitación del tramo	111
4.5.1.	Maquinaria y equipo	111
4.5.2.	Perfilado del asfalto existente.....	117
4.5.3.	Bacheo menor	118

4.5.4.	Preparación de la superficie	119
4.5.5.	Aplicación de la capa ligante	119
4.5.5.1.	Consideraciones.....	120
4.5.5.2.	Cálculo del punto de riego.....	120
4.5.5.3.	Tiempo de ruptura y fraguado	121
4.5.6.	Colocación de la MACM.....	122
4.5.7.	Compactación de la mezcla asfáltica en caliente.....	128
5.	ENSAYOS Y CONTROL DE CALIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE	135
5.1.	Especificaciones para asfaltos modificados con polímeros	135
5.2.	Cemento asfáltico.....	136
5.2.1.	Viscosidad por viscosímetro rotacional (RV) ASTM D-2170.....	137
5.2.2.	Penetración ASTM D-5	137
5.2.3.	Punto de inflamación ASTM D-92	138
5.2.4.	Prueba de asfalto envejecido en horno rotativo de película delgada (RTFO)	138
5.2.5.	Punto de ablandamiento ASTM D-3695 (anillo y bola)	139
5.3.	Agregados pétreos.....	140
5.3.1.	Granulometría de los agregados sin asfalto ...	141
5.3.2.	Prueba de abrasión por máquina de los Ángeles	143
5.3.3.	Desintegración al sulfato de sodio.....	143
5.3.4.	Gravedad específica ASTM C-127, C-128	144

5.3.5.	Inspección de partículas planas y alargadas ASTM D-4791	144
5.3.6.	Equivalente de arena, AASHTO T-176.....	145
5.3.7.	Índice plástico AASHTO T-90	146
5.4.	Mezcla Asfáltica.....	146
5.4.1.	Contenido de cemento asfáltico en la mezcla.	146
5.4.2.	Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (AASHTO T-166-05).....	148
5.4.3.	Gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico en caliente, ASTM D-2041 y AASHTO T-209	149
5.4.4.	Determinación del porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica en caliente	151
5.4.4.1.	Vacíos del agregado mineral VAM.....	152
5.4.4.2.	Vacíos de relleno asfáltico VRA.....	152
5.4.5.	Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall (AASHTO T-245, ASTM D -6927).....	155
CONCLUSIONES		159
RECOMENDACIONES		161
BIBLIOGRAFÍA.....		163
APÉNDICES.....		165
ANEXOS.....		167

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Asfalto	2
2.	Proceso de refinación del petróleo	5
3.	Tipos de moléculas asfálticas	9
4.	Composición del cemento asfáltico	10
5.	Diagrama reológico	19
6.	Representación de un “asfalto ideal” desde el punto de vista de la viscosidad y la susceptibilidad térmica.....	21
7.	Diagramas de viscosidad- temperatura de diferentes cementos asfálticos	26
8.	Índice de penetración del asfalto.....	28
9.	Diferentes tipos de cargas y su tiempo de aplicación	30
10.	Aparato de ensayo de ductilómetro.....	33
11.	Mecanismo de péndulo de Vialit	35
12.	Curva modelo de cohesividad de un asfalto.....	37
13.	Rigidez de un asfalto.....	38
14.	Temperaturas de servicio de los cementos asfálticos	46
15.	Diferentes polímeros modificadores y su efecto en el pavimento ..	48
16.	Módulo de corte reológico (viscosidad vs. elasticidad).....	58
17.	Efecto de un polímero sobre la rigidez y la temperatura del asfalto.....	58
18.	Microfotografías de asfalto	61
19.	Elastómeros SBS	64
20.	Co polímeros de estireno- butadieno	67

21.	Temperatura de ablandamiento de cemento asfáltico	71
22.	Penetración con diferentes co polímeros de estireno-butadieno. ..	72
23.	Viscosidad rotacional a 135°C de cemento asfáltico modificado con diferentes co polímeros de estireno-butadieno.	72
24.	Temperatura máxima de falla reológica, análisis DSR	73
25.	Relación de $G'/\text{sen } \delta$ vs la temperatura de las pruebas	74
26.	Esquema de modificación de un cemento asfáltico	75
27.	Sistema de dosificación del polímero al tanque con molinos de mezclado	78
28.	Dosificación del co polímero SBS al tanque de molienda.....	79
29.	Tolva de recepción del co polímero con malla incluida.....	79
30.	Diagrama de tanque de molienda cemento asfáltico – co polímero SBS.....	80
31.	Protocolo <i>Superpave</i> , valores de comparación.	80
32.	Composición física de una MAC.....	82
33.	Vista general de una planta mezcladora de tambor.....	95
34.	Tolvas del sistema dosificador de agregados	96
35.	Vista lateral, sistema dosificador.....	96
36.	Vista lateral de una tambor mezclador.....	97
37.	Conjunto de transportador escalonado y silo de almacenamiento.....	97
38.	Viscosidad cPs vs. temperatura. Manejo de asfalto en planta	99
39.	Gráfica viscosidad vs. temperatura MAC modificada con elastómero SBS radial.....	99
40.	Vehículo de transporte de mezcla, descarga superior	101
41.	Vehículo de transporte de mezcla, descarga inferior	102
42.	Volúmenes de tránsito en la ciudad de Guatemala	104
43.	Tramo a rehabilitar Bulevar Los Próceres.....	105
44.	Volúmenes de transito de las áreas de influencia.....	106

45.	Tasa de tráfico en tramo a rehabilitar.....	107
46.	Perfiladora de asfalto y vehículo de transporte	112
47.	Mini cargador con aditamento de perfiladora	113
48.	Barredora mecánica.....	114
49.	Compresor de aire para limpieza	114
50.	Terminadora de asfalto	115
51.	Tanque distribuidor de ligante	116
52.	Compactadora de rodo liso	117
53.	Superficie con ligante	122
54.	Operación de descarga en la terminadora de asfalto.....	124
55.	Esquema de la terminadora de asfalto.....	125
56.	Compactación	129
57.	Patrones de compactación.....	130
58.	Colocación de asfalto y trabajo del rastrillero en la junta	131
59.	Compactación en junta longitudinal	132
60.	Compactación en junta transversal	134
61.	Juntas transversales	134
62.	Propiedades de desempeño de los ensayos.....	140
63.	Composición típica de una MAC	155

TABLAS

I.	Resumen histórico del uso del asfalto.....	2
II.	Clasificación de los Petróleos por su densidad API	6
III.	Propiedades físico-químicas del asfalto y ensayos para valorarlas.....	14
IV.	Polímeros utilizados en asfaltos	50
V.	Propiedades de un asfalto modificado que califica para un PG vs asfalto sin modificar.....	59

VI.	Familias principales de co polímeros de estireno- butadieno para modificación de cemento asfáltico	65
VII.	Polímero derivado de los co polímeros de estireno- butadieno a través de proceso de hidrogenación	66
VIII.	Especificaciones para cementos asfálticos por su grado de viscosidad a 60°C	87
IX.	Graduación de agregados para MAC (ASTM D-3515)	89
X.	Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico	91
XI.	Evaluación del pavimento existente.....	108
XII.	Especificaciones de los asfaltos modificados tipo I	136
XIII.	Especificaciones para agregados gruesos	141
XIV.	Especificaciones para agregados finos.....	141
XV.	Distribución granulométrica agregado grueso	142

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC-20	Asfalto convencional
AC	Cemento asfáltico
cm ³	Centímetro cúbico
dmm	décimas de milímetro
DTM	Densidad teórica máxima
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramos
Gb	Gravedad específica del asfalto
Gmb	Gravedad específica de la mezcla compactada en (g/cm ³)
GSE	Gravedad específica efectiva del agregado integrado
Gmm	Gravedad específica máxima de la mezcla.
g/ml	gramos por mililitro
kg/mol	densidad molar, kilogramo por mol
Lbs	Libras
MAC	Mezcla asfáltica en caliente
MACM	Mezcla asfáltica en caliente modificada
PB	Peso bruto de la muestra de mezcla
PBE	Peso bruto de material de la mezcla seca sin asfalto
Pb	Peso bruto de material de la mezcla sin asfalto sin lavar

PBR

Peso bruto retenido acumulado de material lavado en
cada tamiz

GLOSARIO

AASHTO	La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes o por su siglas en inglés AASHTO de <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> .
Abrasión	Desgaste derivado de la acción mecánica por la fricción entre dos superficies, en este caso las esferas y el agregado.
Ahuellamiento	Surcos que se reflejan en la carpeta asfáltica, justo en la dirección de los neumáticos. Resultado de varios factores como una consolidación por movimiento lateral entre capas del pavimento bajo efectos del tráfico generado por un desplazamiento de la superficie misma del pavimento. Ocurren como resultado del movimiento plástico de una mezcla que tiene muy poca estabilidad para resistir el tráfico y las altas temperaturas.
Alquitrán	Material de color negro brillante, producto de la destilación destructiva del carbón bituminoso de piedra.

Asfalto	Material cementante, constituido predominantemente por bitúmenes de origen natural o de origen en el procesamiento del petróleo, esta contenido en proporciones variables en la mayoría de petróleos crudos.
Asfalto modificado	Producto resultante de la incorporación de un agente modificador en el asfalto, en este caso de un polímero o de hule molido.
ASTM	La Asociación Americana para el Ensayo de Material conocida por su siglas en inglés ASTM de <i>American Society for Testing Materials</i> .
Bacheo	Este trabajo consiste en la excavación de la superficie de la carpeta asfáltica (bacheo menor) y de las capas inferiores (bacheo mayor), si fuere necesario, en el área delimitada para el efecto; el relleno de las capas removidas con el material especificado; la aplicación de un riego de liga y/o de imprimación en el fondo y en las paredes de la excavación efectuada; el suministro, transporte tendido, conformación y compactación de la mezcla asfáltica utilizada para el relleno del bache; el barrido y limpieza de la superficie reparada.
Bitumen	Sustancia cementante de color negro, de consistencia sólida, semi-sólida o viscosa, de origen natural o fabricada, compuesta principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular, siendo típicos

los asfaltos, las breas, alquitranes, los betunes y las asfaltitas.

Briqueta

Mezcla asfáltica compactada en moldes cilíndricos normados en dimensiones, preparación, temperatura y compactación para el ensayo en laboratorio.

Carpeta asfáltica

Capa o conjunto de capas que se colocan sobre una base, constituida por una mezcla asfáltica en caliente, su función es proporcionar al tránsito una superficie estable, casi impermeable y de textura apropiada.

Cemento asfáltico

Un asfalto con flujo o sin flujo, especialmente preparado en cuanto a calidad y consistencia para ser usado como aglomerante en la producción de mezclas asfáltica en caliente.

Compactación

Acción de comprimir un volumen dado de material en un volumen más pequeño, esto se logra utilizando los rodos lisos o compactadores neumáticos y en laboratorio un martillo.

Consistencia

Describe el grado de fluidez o plasticidad de un cemento asfáltico a determinada temperatura. Esta propiedad varía con la temperatura, por lo tanto es necesario usar una temperatura patrón cuando se está comparando la consistencia de un cemento asfáltico con la de otro. Generalmente es a 25 grados Celsius y 60 grados Celsius.

Cracking térmico	El Craqueo térmico o <i>cracking</i> térmico es un proceso químico donde se quiebran las moléculas de carbono y se reduce su masa, por la acción del calor; el tiempo y la presión, en una carpeta asfáltica se observa mediante el aparecimiento de fisuras.
Deformación	Cualquier cambio que presente una mezcla asfáltica respecto a su forma original
Densidad	Grado de solidez y rigidez de una mezcla uniformemente compactada, distribuyendo su masa en todo su volumen.
Desintegración	Separación progresiva de las partículas del agregado en el pavimento desde la superficie hacia abajo, o desde los bordes hacia el interior. Causada por falta de compactación, construcción de una capa de rodadura muy delgada o en períodos fríos, agregado sucio, muy poco asfalto en la mezcla o sobrecalentamiento de la mezcla asfáltica. Esta separación también se puede hacer por medio de agregar un agente químico como el sulfato de sodio.
Ductilidad	Capacidad de un material para ser estirado o estrechado en forma delgada sin que su masa se separe.
Estabilidad	Capacidad de una mezcla asfáltica de resistir deformación bajo cargas aplicadas.

Flexibilidad	Capacidad del pavimento asfáltico de ajustarse a los asentamientos en la fundación.
Fluencia	Capacidad de una mezcla asfáltica de acomodarse a los asentamientos en presencia de una carga aplicada.
Grietas	Fracturas en la superficie de la carpeta asfáltica provocadas por la acción de la temperatura, poca capa ligante, corrimientos entre capas de asfalto, proceso de oxidación de la mezcla asfáltica o simplemente reflejo de las capas subyacentes (base y sub base) de la estructura de la carretera.
Impermeabilidad	Capacidad de una mezcla asfáltica de resistir el paso de aire y agua dentro o a través del mismo.
Mezcla asfáltica en caliente	Mezcla de agregado pétreos y aglomerante (cemento asfáltico) en proporciones adecuadas que debe ser colocada y compactada a temperaturas elevadas.
Mezcla asfáltica en caliente modificada	Mezcla de agregados pétreos y un aglomerante de cemento asfáltico previamente modificado con polímeros o hule molido de neumáticos que debe ser colocada y compactada a temperaturas elevadas, generalmente un poco más que una mezcla convencional.

Penetración	Consistencia de un material bituminoso, se expresa como la distancia, en décimas de milímetro (0.1 mm), que una aguja patrón penetra verticalmente una muestra del material bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura.
Perfilado de asfalto	Acción de obtener un nuevo perfil transversal y longitudinal, por medio de la remoción y/o recuperación de la capa superior de la superficie del pavimento, a la profundidad máxima indicada por disposiciones especiales.
Pétreo	Material que proviene de la roca, de una piedra o de un peñasco.
Poise	Unidad, centímetro-gramo-segundo, de viscosidad absoluta.
Polímero	Sustancia que consiste en grandes moléculas formadas por muchas unidades pequeñas que se repiten.
Resistencia a la fatiga	Capacidad de un pavimento asfáltico para resistir flexión repetida causada por cargas móviles. Entre más alto contenido de asfalto, mayor será la resistencia a la fatiga.
Resistencia al deslizamiento	Propiedad de la carpeta asfáltica de resistir el movimiento entre capas asfálticas.

Stoke	Unidad de viscosidad cinemática igual a la viscosidad de un fluido en poises dividida entre la densidad del fluido en gramos por centímetro cúbico.
Tamiz	Aparato de aberturas cuadradas, utilizado para separar tamaños de agregado pétreo en un ensayo de granulometría.
Tara	Recipiente o vehículo donde se transporta una muestra de determinado material.
Trabajabilidad	Facilidad con que las mezclas de pavimentación pueden ser colocadas y compactadas.
Vacíos	Espacios de aire en una mezcla compactada rodeados de partículas cubiertas de asfalto.
Viscosidad	Medida de la resistencia de un flujo a ser deformado. Método usado para medir la consistencia del asfalto.
Viscosidad absoluta	Método utilizado para medir viscosidad, usando el poise como la unidad de medida. Este método hace uso de un vacío parcial para inducir el flujo en el viscosímetro.
Viscosidad cinemática	Método utilizado para medir viscosidad, usando el poise como la unidad de medida.

RESUMEN

Se estudia los tipos de polímeros que se disponen en el mercado para la modificación de un cemento asfáltico, así como la elección del polímero tipo I de estireno-butadieno-estireno SBS; el problema del ahuellamiento y fisuras en los asfaltos existentes así como la evaluación y los procedimientos para la fabricación y colocación del asfalto modificado; el análisis de las ventajas y beneficios que implica la utilización de asfaltos modificados.

El primer punto de investigación, define los distintos modificadores de asfalto que existen y se justifica la elección del tipo de modificador, a través del marco teórico. En el segundo punto de este trabajo, se investigó los pasos en la fabricación, colocación y compactación de la mezcla modificada en caliente, para rehabilitar un tramo de carretera identificado; como tercer punto, se analizan las ventajas que tiene la utilización del asfalto modificado y los ensayos de control de calidad de la mezcla asfáltica modificada.

Todo el trabajo de investigación se realizó con el apoyo de la empresa: Pavimentos de Guatemala, S.A. en las instalaciones de su laboratorio de estudio de suelos y pavimentos y de su planta de producción, así también la instalación en carretera del pavimento modificado.

OBJETIVOS

General

Ser una guía que amplíe los conocimientos sobre la rehabilitación de una carretera, utilizando asfalto modificado con polímeros y que justifique el uso de un polímero de estireno butadieno en el asfalto.

Específicos

1. Establecer los pasos a seguir en la modificación de un asfalto con polímeros.
2. Determinar qué propiedades se mejoran al incluir modificadores polímeros en el asfalto.
3. Establecer los pasos y la maquinaria a utilizar en la colocación y compactación de una mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros.
4. Determinar los alcances que tiene una mezcla asfáltica modificada en la rehabilitación de una carretera.

INTRODUCCIÓN

A través de una investigación teórica de las generalidades del asfalto, así como de los principales modificadores del asfalto que existen actualmente, se plantean las características por las cuales se elige el polímero del tipo elastómero Estireno Butadieno Estireno, para modificar un asfalto y su uso en la preparación de una mezcla asfáltica en caliente.

La elección del modificador se realizó con base a una investigación de las propiedades termo-mecánicas del asfalto modificado comparándolo con otros modificadores.

Se realizó una descripción del procedimiento de fabricación, colocación y compactación de la mezcla asfáltica modificada; se realizaron visitas en campo y se documentaron los procedimientos correctos así como los criterios a aplicar en la rehabilitación de carreteras con dicho asfalto.

1. GENERALIDADES DEL ASFALTO

Es importante conocer el inicio de la investigación, las definiciones y elementos que constituyen una mezcla asfáltica en caliente, que ayudará a entender porqué es necesario modificar el asfalto. A continuación se definen los conceptos.

1.1. Definición

El asfalto está definido como una mezcla de hidrocarburos derivados de la destilación del petróleo y ampliamente utilizado en la construcción como por ejemplo: carreteras, impermeabilización, entre otros. Entre sus propiedades se cuentan:

- Producto semisólido
- Soluble en sulfuro y tetracloruro de carbono
- Buenas propiedades como aglomerante.

Esta última propiedad es de bastante interés en el presente trabajo, ya que en una mezcla asfáltica en caliente proporciona una íntima unión y cohesión entre agregados (finos y gruesos) capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por la cargas del tránsito; además de mejorar la capacidad portante de la estructura de una carretera; de allí surgen las mezclas asfálticas en caliente, que algunos libros la denominan hormigón asfáltico, esto se definirá más adelante.

Figura 1. **Asfalto**



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Asfalto>, Consulta: 10 de octubre de 2014.

1.2. **Origen e historia del asfalto**

El asfalto es uno de los materiales más antiguos empleados por el hombre, usado principalmente como cementante en construcción de caminos o como impermeabilizante. A continuación se detalla en la siguiente tabla un resumen histórico del uso del asfalto por la humanidad.

Tabla I. **Resumen histórico del uso del asfalto**

Año	Lugar	Descripción
3800 a.C.	Mesopotamia	Se descubre el uso del asfalto como impermeabilizante
Prehistoria	Los Ángeles, California, EE.UU.	Se descubren esqueletos de animales prehistóricos conservados intactos en depósitos superficiales de asfalto en lagunas de brea

Continúa tabla I.

540 a 200 a.C.	Mesopotamia	Excavaciones arqueológicas indican el uso del asfalto como aglomerante para edificaciones, construcción de caminos e impermeabilización de embarcaciones.
300 a.C.	Egipto	El asfalto se emplea para embalsamamiento
1,800 d.C.	Francia	Se emplea la roca asfáltica para pavimentación de suelos, puentes y aceras
1,838 d.C.	Filadelfia, EE.UU.	Se emplea la roca asfáltica importada para la construcción de aceras
1,870 d.C.	<i>Newark, New Jersey</i> , EE.UU.	Construcción del primer pavimento asfáltico
1,876 d.C.	Washington, EE.UU.	Construcción del primer pavimento asfáltico tipo "Sheet Asphalt" con asfalto de un lago
1,902 d.C.	EE.UU.	Se inicia a obtener asfalto por destilación del petróleo a razón de 20,000 toneladas anuales.

Fuente: elaboración propia, con datos de: SANCHEZ, Jorge. Curso: Mezclas especiales con Asfaltos Modificados, Cámara Guatemalteca de la Construcción, 21 octubre de 2008.

1.3. Materiales bituminosos

El betún es una mezcla de hidrocarburos de origen natural que se caracterizan por ser totalmente solubles en sulfuro de carbono. Los bitúmenes según su origen se pueden clasificar en:

1.3.1. Alquitranes

Son bitúmenes que se obtienen de la destilación de carbones fósiles, maderas u otras sustancias orgánicas.

1.3.2. Brea

Son bitúmenes sólidos o semisólidos obtenidos de la destilación del alquitrán que desarrollan propiedades del cemento asfáltico y cohesivo, cuya resistencia disminuye con la temperatura.

1.4. Cemento asfáltico

Muchos son los conceptos que en el medio de la construcción se le da al material utilizado para la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente y/o la construcción de un pavimento flexible. Por ejemplo, al betún, en Norte América se le conoce simplemente como Asfalto y en Europa el Asfalto es la mezcla entre betún y agregados minerales.

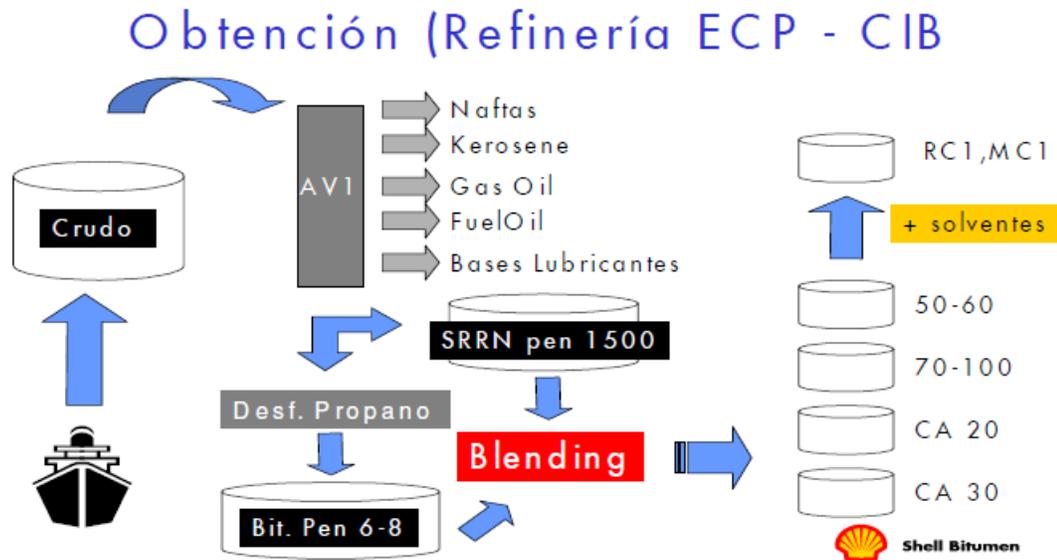
Para usos del presente trabajo y como se le conoce en el medio de la construcción en Guatemala se definirá como Cemento Asfáltico al asfalto empleado en la fabricación de Mezcla Asfáltica en Caliente para pavimentar.

Los cementos asfálticos provienen de:

- Petróleo
- Rocas
- Lagos

En el caso del petróleo, el cemento asfáltico se obtiene de la refinación del mismo, dicho proceso se puede observar en la figura 2.

Figura 2. **Proceso de refinación del petróleo**



Fuente: SANCHEZ, Jorge. Curso: Mezclas especiales con Asfaltos Modificados, Cámara Guatemalteca de la Construcción, 21 octubre de 2008.

1.4.1. **Clasificación por su contenido de asfalto**

Debido a que en su mayoría los cementos asfálticos provienen del petróleo, es necesario conocer que estos se clasifican con base a su densidad API del Instituto Americano del Petróleo por sus siglas en inglés *American Petroleum Institute*, que denota la cantidad de asfalto en relación a su densidad, este se calcula de la siguiente forma:

$$API = 141.5 / \text{peso específico}$$

De la anterior fórmula se puede ver lo siguiente:

- A un menor peso específico, el petróleo tendrá mayor contenido de asfalto.

- A un mayor peso específico el petróleo tendrá un menor contenido de asfalto.

A continuación se presenta la siguiente tabla conteniendo algunos ejemplos de los distintos petróleos encontrados alrededor del mundo y explotados por la empresa Shell Bitumen:

Tabla II. **Clasificación de los petróleos por su densidad API**

Petróleo	API	% Asfalto
Nigeria	38.1	10
Texas	32.3	12.2
California	21.5	41
Boscan	10.1	58

Fuente: elaboración propia, con datos de: SANCHEZ, Jorge. Curso: Mezclas especiales con asfaltos modificados, Cámara Guatemalteca de la Construcción, 21 Octubre de 2008.

1.4.2. Clasificación de acuerdo a su naturaleza

La mayoría de crudos de petróleo contienen algo de asfalto y a veces pueden ser enteramente asfalto, en base a la proporción de asfalto que contiene un crudo se clasifican en:

- Petróleo de base asfáltica
- Petróleo de base parafínica
- Petróleo de base mixta o semi asfáltica
- Petróleo de base no asfáltica o parafínica

Los petróleos de base asfáltica provienen de crudos que contienen gran proporción de materia asfáltica y poca parafina principalmente de naftenos y aceites lubricantes, cuyas viscosidades son más sensibles a los cambios de

temperatura que los obtenidos de base parafínica. Actualmente estos crudos son llamados crudos de base nafténica.

Son de aspecto negro, viscosos y de elevada densidad (0.95 g/ml). En el proceso de destilación primaria producen poca nafta y abundante *fuel-oil*, quedando asfalto como residuo. Estos petróleos son ricos en compuestos cíclicos como el ciclo-pentano y el ciclo-hexano y en hidrocarburos aromáticos como el benceno y sus derivados.

Los petróleos de base parafínica provienen de crudos que contienen gran cantidad de parafinas, pero muy poca materia asfáltica o bituminosa. Consisten principalmente de hidrocarburos parafínicos y usualmente se obtiene de ellos buenos rendimientos de parafinas y aceites lubricantes de alto grado. Los petróleos de base parafínica son de color claro, fluidos y de baja densidad (0.75-0.85 g/ml), rinden más nafta que los asfálticos. Cuando se refinan sus aceites lubricantes se separa la parafina. De estos petróleos se pueden extraer grandes cantidades de naftas, querosene y aceites lubricantes.

Los petróleos de base mixta o semi-asfáltica tienen características y rendimientos comprendidos entre las otras dos variedades principales. Después de destilar sus porciones más volátiles abandonan naftas y asfalto. Estos crudos contienen una proporción sustancial de materia parafínica y asfáltica, junto con cierta proporción de hidrocarburos aromáticos.

1.5. Composición del cemento asfáltico

Las mezclas complejas de hidrocarburos en el asfalto hacen variar en el caso de los cementos asfálticos semisólidos, los materiales de bajo peso molecular a materiales de alto peso molecular. Diferentes cementos asfálticos

clasificados dentro de un mismo tipo y que tengan la misma consistencia en temperatura pueden tener una composición química muy diferente lo que produce que tengan diferentes características de susceptibilidad a la temperatura, a carga de deformación, entre otras.

Para el presente trabajo es suficiente decir que cada material es bastante complejo en sí mismo y que varían considerablemente con respecto a otros en cuanto a su composición química.

En general la composición química del asfalto puede darse de muy distintas maneras, una de ellas es:

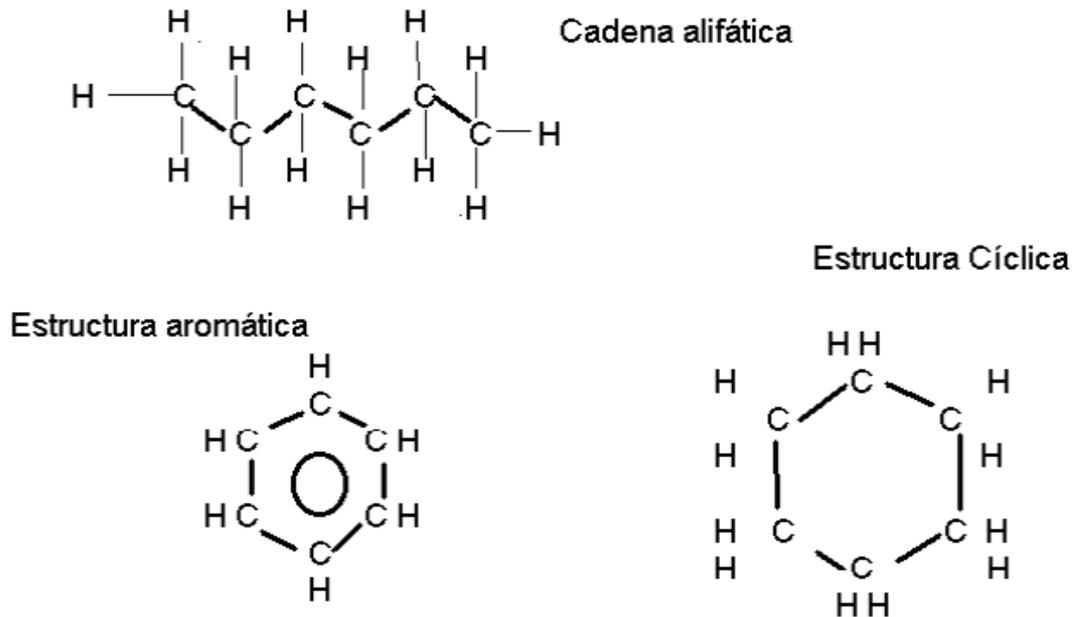
- Carbono 70 % - 85 %
- Hidrógeno 7 % - 12 %
- Nitrógeno 0 % - 1 %
- Azufre 1 % - 7 %
- Oxígeno 0 % - 5 %
- Y pequeñas cantidades de metales ya sea dispersos en forma de óxidos y sales o en compuestos orgánicos conteniendo metales.

Otra composición del asfalto es:

- Grupos alifáticos saturados o parafinas
- Grupos nafténicos o ciclo parafinas
- Grupos conteniendo anillos aromáticos

Dichas moléculas se pueden observar en la figura 3.

Figura 3. Tipos de moléculas asfálticas



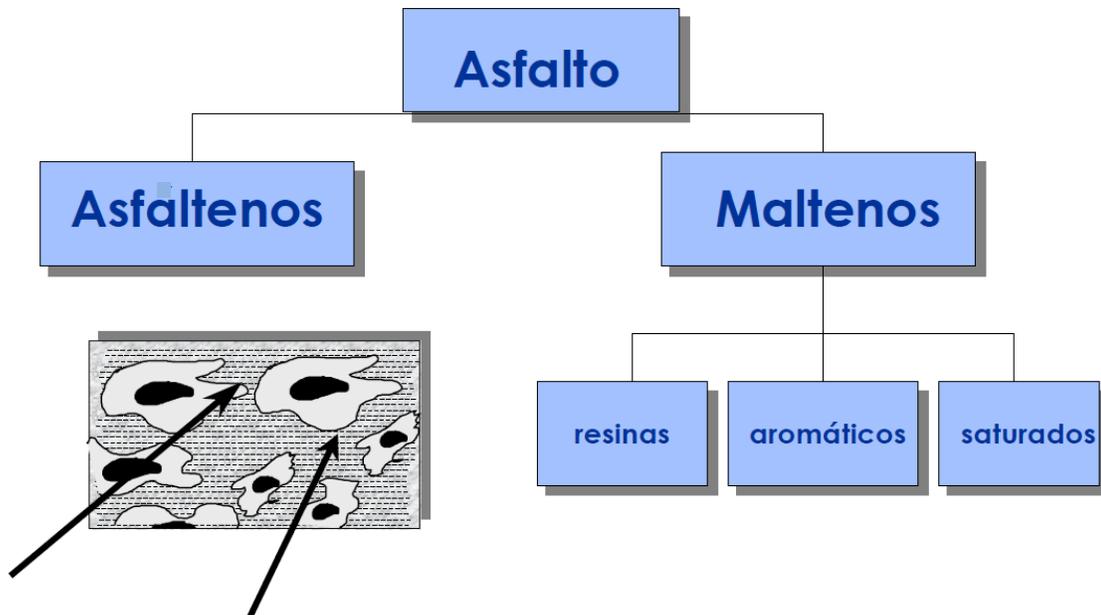
Fuente: SANCHEZ, Jorge. Curso: Mezclas especiales con asfaltos modificados, Cámara Guatemalteca de la Construcción, 21 octubre de 2008.

En ingeniería civil, la composición del asfalto es:

- Asfaltenos >0.8
 - Resinas >0.6
 - Aceites <0.6
 - En donde las resinas y aceites en su conjunto se denominan maltenos
- }
Maltenos

Dicha composición se observa en la figura 4.

Figura 4. **Composición del cemento asfáltico**



Fuente: SANCHEZ, Jorge. Curso: Mezclas especiales con asfaltos modificados, Cámara Guatemalteca de la Construcción, 21 octubre de 2008.

Los materiales de menor peso molecular contienen una cantidad considerable de carbonos en hidrógeno en forma de compuestos orgánicos del tipo de cadenas o alifáticos (ver figura 3). Al irse incrementando el peso molecular la tendencia hacia compuestos orgánicos del tipo de anillos (aromáticos o nafténicos) es más aparente con cadenas laterales o adheridos a los anillos.

Los compuestos de muy alto peso molecular consisten principalmente de materiales del tipo de anillos con muy pocas cadenas o alifáticos presentes. Es en los rangos de alto peso molecular en donde aparecen los otros elementos tales como nitrógeno, oxígeno, azufre, etc.

Se debe enfatizar que los asfaltenos, las resinas y los aceites no son tres compuestos diferentes sino que más bien hay un rango de pesos moleculares en

cada una de esas tres funciones. Más aun la composición de los materiales en cada una de esas fracciones y en cada asfalto varía dependiendo de la fuente del crudo y del método de producción.

1.5.1. Asfaltenos

Son compuestos de alto peso molecular con un rango de 1,000 a 50,000 kg/mol, que se encuentran en dispersión coloidal en algunos crudos, su alta polaridad y su incidencia en la composición del cemento asfáltico es la de afectar la reología, punto de ablandamiento y dureza del mismo. Los asfaltenos son partículas sólidas semi cristalinas de color café o negro que contienen anillos condensados de hidrocarburos aromáticos. No son una especie química sino una familia de compuestos que presentan un comportamiento global característico.

Se agrupan a los componentes que quedan como fracción insoluble luego de tratar una mezcla en determinadas condiciones (solventes, temperaturas, etc). La composición de esta fracción insoluble varía de petróleo en petróleo y la característica común que los hace importantes en el estudio de los yacimientos y en la producción de petróleo: es que suelen originar precipitados (sólidos) al agruparse por sufrir alteración en su ambiente, dañando el medio poroso o bloqueando las tuberías de producción, evitando así el flujo de hidrocarburos en pozos petroleros. La cantidad de asfaltenos en el petróleo varía dependiendo de la fuente, profundidad y grado API del crudo y contenido de azufre.

1.5.2. Maltenos

Los maltenos se caracterizan por su medio y/o bajo peso molecular , su función dentro de los crudos en general es la de agente dispersante de los asfaltenos y posee propiedades adhesivas. Estos están compuestos por:

- Resinas + aromáticos + parafínicos (compuestos saturados) = maltenos

Las resinas son compuestos similares en estructura a los asfaltenos (ambas presentan color negro brillante) aunque son de menor tamaño y tienen mayor relación parafina / aromático que los asfaltenos. A diferencia de los asfaltenos las resinas son solubles en parafinas. Junto a los compuestos aromáticos y parafínicos, las resinas constituyen los maltenos.

- Maltenos + asfaltenos = crudos

Cuando los núcleos de asfaltenos son recubiertos (rodeados) por las resinas, se constituye una interfase de transición entre el núcleo asfáltico y el resto de la matriz del crudo (fracción aromática y parafínica). De esta forma se constituye un agregado de tamaño coloidal (veremos luego que se denomina micela). La capa estabilizante de resinas rodea los asfaltenos y evita que los mismos, de dimensión coloidal, se precipiten. Este sistema coloidal de equilibrio se denomina micela, término que no solo es aplicado al petróleo sino a todos los sistemas que presentan estas características

1.5.3. Equilibrio en la constitución química y física

La naturaleza química del asfalto es importante para la elaboración de mezclas asfálticas y difícil de cuantificar la constitución volumétrica requerida de ceras parafinas, asfaltenos, maltenos, entre otros, pero es necesario asegurar que éstos sean equilibrados y en línea con el poder de solvencia de la fase nafténica y la aromática.

La calidad en un cemento asfáltico está basada en establecer un buen equilibrio de la reología del asfalto y las propiedades físicas para lograr buen desempeño, tanto a altas como a bajas temperaturas, en el esquema de pruebas de laboratorio permiten evaluar en el asfalto el grado de equilibrio e indican su desempeño probable en la práctica.

1.6. Propiedades físico químicas del cemento asfáltico

Es importante establecer que gran parte de los ensayos que se realizan a los asfaltos sirven para identificar el producto y para comprobar que satisface las especificaciones o normas establecidas para el diseño de pavimentos, también poder utilizarlos en la construcción de carreteras. Únicamente se determina su composición química en casos muy especiales o con fines de investigación.

Otros ensayos intentan dar una idea del comportamiento del asfalto bajo la acción de las cargas producidas por el tráfico y los agentes meteorológicos, no obstante, sólo logran determinar indirectamente alguna propiedad de interés, sin caracterizar lo suficiente o de manera acertada, su comportamiento real en la estructura del pavimento.

Las propiedades fundamentales de los cementos asfálticos para su empleo en el diseño de mezclas asfálticas en caliente y/o construcción de carreteras son:

- **Carácter termoplástico:** al incrementar la temperatura, la consistencia del cemento asfáltico debe disminuir de manera que sean capaces de “mojar” y envolver los agregados. Al enfriarse deben adquirir la consistencia primitiva y dar cohesión a la mezcla.
- **Buena adhesividad a los agregados pétreos:** para cumplir su poder aglomerante y evitar la desenvuelta y desprendimientos de agregados.

- Buen comportamiento mecánico y reológico: para resistir las tensiones y deformaciones impuestas conjuntamente por el tránsito y el clima, con el fin de diseñar y construir mezclas resistentes y durables.

Debido a que existe un gran número de ensayos para caracterizar a los cementos asfálticos, se pueden agrupar en función de la propiedad que se pretende evaluar:

- Propiedades másicas o propiedades relativas al estado del asfalto
- Propiedades mecánicas, relativas a su comportamiento frente a esfuerzos o deformaciones producidas por cargas (tráfico)
- Adhesividad, relativa a la adhesión del asfalto con el agregado pétreo en presencia de agua
- Durabilidad o resistencia al envejecimiento y a la fatiga
- Propiedades químicas, relativas a su composición y estructura coloidal

En la tabla III se pueden observar los distintos ensayos agrupados, según las propiedades que anteriormente se mencionaron:

Tabla III. **Propiedades físico-químicas del asfalto y ensayos para valorarlas**

PROPIEDADES		ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN
MÁSICAS	Densidad	Picnómetro
	Viscosidad	Viscosímetros
	Consistencia	Penetración
		Punto de reblandecimiento
	Susceptibilidad térmica	Índice de penetración
		Viscosidad
		Método UCL

Continúa tabla III.

MECÁNICAS	Ductilidad	Dutilómetro
	Fragilidad	Punto Fraass
	Tenacidad y resistencia	Recuperación elástica
		Tracción
	Rigidez	Módulo de rigidez
Cohesión	Péndulo de Vialit	
ADHESIVIDAD	Adhesividad al agregado pétreo	Desenvuelta
		Adhesividad mecánica
		Resistencia conservada tras inmersión
DURABILIDAD	Resistencia al envejecimiento (durabilidad)	Calentamiento
		Oxidación
		Rayos ultravioleta y/o infrarrojos
QUÍMICAS	Composición	Solubilidad
		Destilación
		Exudación
		Combustión
		Calcinación
		Fraccionamiento
		Análisis químico
	Estructura	Determinación de constantes físicas
		Espectroscopia ultravioleta e infrarroja
		Microscopia electrónica
		Magneto química

Fuente: SANCHEZ, Jorge. Curso: Mezclas especiales con asfaltos modificados, Cámara Guatemalteca de la Construcción, 21 octubre de 2008.

1.6.1. Propiedades másicas

Se consideran propiedades másicas aquellas que hacen referencia al estado del cemento asfáltico o a la variación del mismo por efecto, fundamentalmente, de la temperatura. Pueden distinguirse:

- Densidad

- Viscosidad
- Consistencia
- Susceptibilidad térmica

1.6.1.1. Densidad

La densidad relativa o gravedad específica es la relación entre la masa de un determinado volumen de asfalto y la masa de un volumen igual de agua, a una cierta temperatura. Por ejemplo, una sustancia con una densidad de 1.6 pesa 1.6 veces más que el agua, esto es útil para estimar transporte y cobro del cemento asfáltico.

La densidad de los asfaltos varía con la temperatura y también con su origen y proceso de destilación; suele ser muy próxima a la unidad variando dentro de pequeños límites de acuerdo con el grado de penetración y en el sentido de que a mayor penetración la densidad se va haciendo menor.

La determinación de la densidad relativa de los asfaltos, suele realizarse por medio de un picnómetro que se llena hasta la mitad con asfalto, calentado hasta fluidez, completando el llenado con agua, a fin de lograr un buen enrase. La densidad relativa viene dada por la expresión:

$$d = \frac{(P_e - P_a)}{[(P_b - P_a) - (P_d - P_e)]}$$

Siendo:

d: densidad relativa

Pa: peso del picnómetro vacío, a t °C, en g

Pb: peso del picnómetro lleno de agua destilada hasta el enrase, a temperatura °C, en gramos.

Pe: peso del picnómetro lleno hasta la mitad con el producto a ensayar, a temperatura °C, en gramos.

Pd: peso del picnómetro con el producto y lleno de agua destilada hasta el enrase, a temperatura °C, peso en gramos.

1.6.1.2. Viscosidad

Es la resistencia que presenta un material a ser deformado, en función de la velocidad de aplicación de una carga, y se debe al rozamiento o fricción interna de sus moléculas. Es una propiedad que frena la libre y rápida deformación de un material.

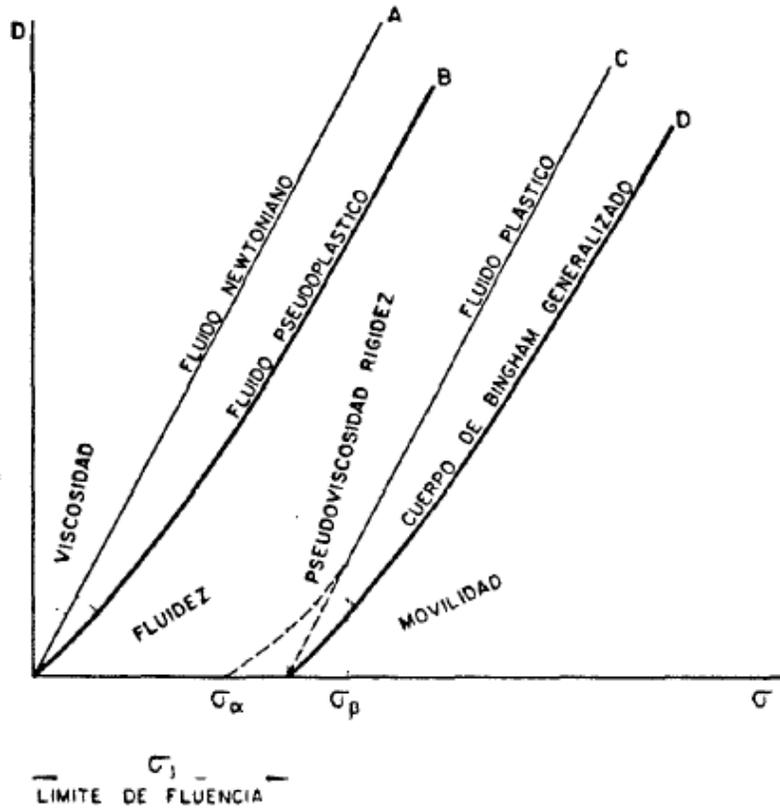
La viscosidad es una característica esencial del asfalto, desde el punto de vista de su comportamiento dentro de una mezcla asfáltica en caliente durante su aplicación, por sus efectos sobre la trabajabilidad, adhesividad y dosificación. La viscosidad de los asfaltos es función de su temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una buena idea de cuál es su susceptibilidad térmica.

Para los usos del presente trabajo, se definirá la viscosidad como la resistencia que opone un fluido a deformarse cuando está sometido a la acción de una fuerza que actúa durante un determinado tiempo y es consecuencia del rozamiento interno de las moléculas del mismo. Para el comportamiento de un fluido newtoniano. Es que tienen una marcada proporcionalidad entre la tensión cortante σ y el gradiente de velocidad D , siendo la constante de proporcionalidad, η , la viscosidad dinámica o viscosidad absoluta.

Como se puede observar en la figura 5, se representa en el diagrama Densidad (D) vs. Límite de fluencia(σ) es una recta que pasa por el origen de coordenadas, la velocidad de deformación es constante a lo largo del tiempo y si la carga deja de aplicarse, el material queda con la deformación que tuviese en ese instante, no produciéndose ninguna recuperación elástica. Algunos tipos de cemento asfálticos tienen este comportamiento, especialmente los btiúmen obtenidos por destilación de crudos de base asfáltica, muchos aromáticos y los que tienen un bajo contenido en asfáltenos debido a que las micelas se encuentran muy dispersas.

En general, no todos se comportan de esta forma, hay cemento asfálticos, quizás los más frecuentes, en los cuales el comportamiento difiere del newtoniano y en ellos la velocidad de deformación disminuye de una forma continua hasta alcanzar un determinado valor, a partir del cual permanece constante siendo proporcional a la tensión de cortante aplicada: si en un momento dado deja de actuar la tensión cortante, el material se recupera parte de la deformación con una velocidad decreciente hasta que se estabiliza su forma. A este grupo de cementos asfálticos pertenecen aquellos en los que la concentración de micelas es más elevada que en el grupo anterior, además éstas son deformables elásticamente, no existiendo entre ellas uniones estructurales.

Figura 5. Diagrama reológico



Fuente: MIRO, Jorge. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Pág. 46. Barcelona, marzo 1994.

En otros asfaltos (por ejemplos los modificados), la velocidad de deformación disminuye gradualmente hasta alcanzar un mínimo para volver a aumentar indefinidamente si la tensión aplicada tiene un valor suficiente: si en un momento dado se elimina la carga, se produce una recuperación de una parte de la deformación a velocidad decreciente. A este grupo pertenecen los que tienen alto contenido de asfaltenos y micelas formando entre si estructuras elásticas.

El comportamiento reológico de estos dos últimos tipos de asfalto hace que se les considere como: pseudo plásticos. La viscosidad de un asfalto o betún está muy relacionada con su temperatura en el sentido de que cuanto mayor sea ésta, menor será la viscosidad del material; esto exige que siempre deba indicarse la temperatura a la que se ha determinado la viscosidad. En los productos no newtonianos, la viscosidad varía no sólo con el valor de la temperatura sino también con la velocidad con que varía ésta, lo que obliga a tener que hacer los ensayos en unas condiciones muy específicas

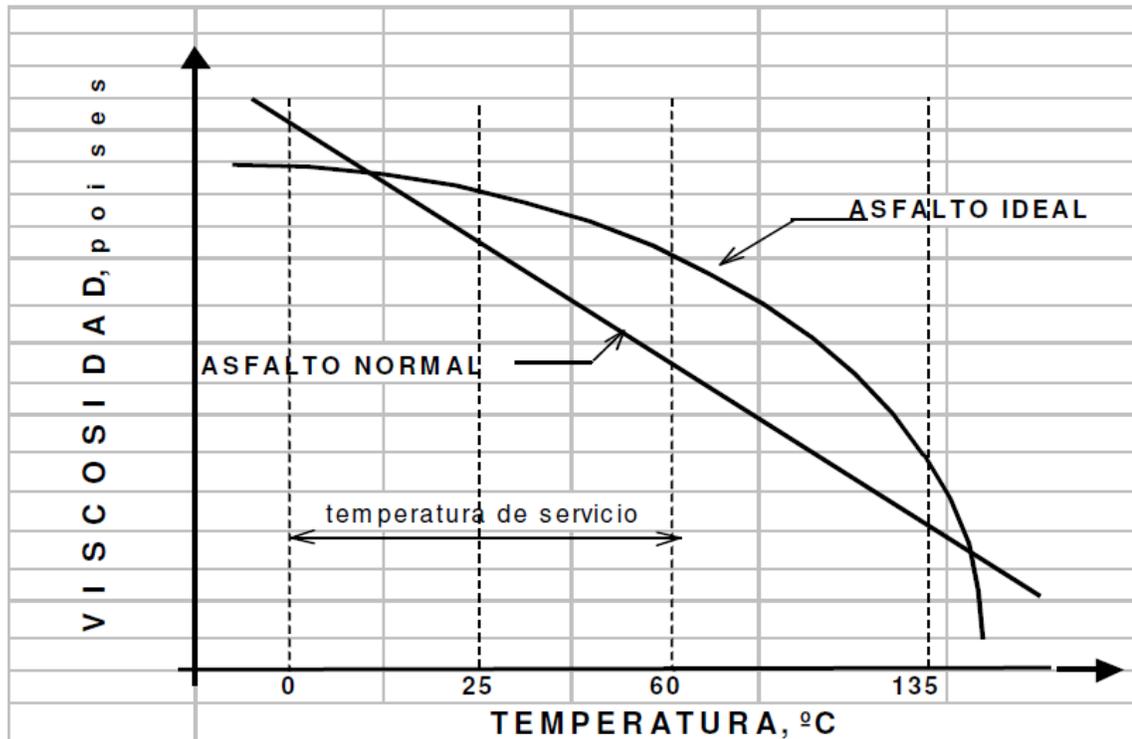
1.6.1.3. Consistencia

Es el estado físico que presenta en un momento dado el asfalto, con relación a los estados sólido, líquido y gaseoso de la materia. Los ensayos más habituales para la determinación de la consistencia de un asfalto son: el ensayo de penetración y la determinación del punto de reblandecimiento.

Esta propiedad está ligada a la susceptibilidad térmica, que indica la sensibilidad que presenta el asfalto a variar su viscosidad por aumento o disminución de la temperatura. Es un indicador de que tan buena adherencia, trabajabilidad, compactación y estabilidad posee un asfalto.

Como se puede observar en la figura 6, la susceptibilidad térmica es una característica muy importante en la elaboración de mezclas asfálticas, debido a que nos da un rango de trabajabilidad (temperatura de servicio) es por ello que se ahondará en el tema.

Figura 6. Representación de un “asfalto ideal” desde el punto de vista de la viscosidad y la susceptibilidad térmica



Fuente: SANCHEZ, Jorge. Curso: Mezclas especiales con asfaltos modificados, Cámara Guatemalteca de la Construcción, 21 octubre de 2008.

1.6.1.4. Susceptibilidad térmica

La viscosidad de un cemento asfáltico está muy relacionada con la temperatura, ya que al elevarse ésta última, su viscosidad disminuye. Esto es debido a que al aumentar la temperatura disminuye la viscosidad del líquido y las fuerzas de absorción que tienden a unir las moléculas se debilitan. El aumento de la temperatura de un cemento asfáltico produce transformaciones reológicas importantes en el mismo, que son de gran utilidad a la hora de ponerlo en obra.

La susceptibilidad de un producto asfáltico indica la sensibilidad que presenta el mismo a variar su viscosidad por elevación de la temperatura. Esta susceptibilidad debería ser lo más baja posible para la gama de temperaturas de servicio, sin que llegue a ser un sólido quebradizo a temperaturas frías o un líquido relativamente viscoso a temperaturas elevadas.

De esta forma se definiría lo que se podría denominar una susceptibilidad ideal, tal como se indica en la figura 6, en la que se representa en escala logarítmica los gráficos de un asfalto normal y de uno ideal.

Los cementos asfálticos son puestos en obra con viscosidades bajas, obtenidas generalmente por calentamiento del material, de forma que permitan la envuelta y mojado con los áridos. Una vez fríos adquieren de nuevo su consistencia primitiva, cohesionando el esqueleto mineral (agregados pétreos), al que dota en estas condiciones, de la resistencia adecuada para soportar la acción del tráfico.

No obstante, el producto bituminoso una vez puesto en obra, debe conservar su consistencia ante los cambios de temperatura del ambiente. De no ser así, si aquélla baja más de lo debido, al elevarse la temperatura el firme se deformará bajo las cargas del tráfico. Por otra parte, si el betún se endurece, se hace frágil y el firme puede agrietarse.

Con base en lo expuesto anteriormente, la determinación de la susceptibilidad térmica de un cemento asfáltico es de vital importancia; para la determinación de la misma, existen dos parámetros fundamentales: el índice de penetración y el coeficiente logarítmico de temperatura.

1.6.2. Índice de penetración

A partir de la penetración a 25 °C y del punto de reblandecimiento anillo y bola, Pfeiffer y Van Doormal han definido el llamado índice de penetración (IP), que proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad térmica y de la desviación del comportamiento newtoniano del cemento asfáltico.

A continuación se definirán estos dos ensayos y su interpretación:

1.6.2.1. Penetración

El ensayo más utilizado para evaluar de una manera práctica la consistencia de los cementos asfálticos es el denominado Ensayo de penetración, ASTM D-573 (1978), dando lugar a que estos asfaltos se clasifiquen por su penetración e incluso que se denominen asfaltos de penetración.

El resultado de este ensayo, tal como se aplica a los cementos asfálticos, se expresa por la profundidad, en décimas de milímetro, a que una aguja, de dimensiones dadas, penetra verticalmente en la muestra de material, fijadas las condiciones de peso, tiempo y temperatura (100 g, 5 s y 25 °C, respectivamente).

Si el material no es newtoniano, como en el caso de los asfaltos modificados la viscosidad aparente o consistencia del mismo es función de la tensión cortante empleada en la medida. Durante el ensayo de penetración, la viscosidad aparente cambia constantemente y el valor de la penetración hallado no tiene la misma significación física que en los materiales puramente viscosos.

Aunque este ensayo es importante, la penetración por sí sola no permite definir las características reológicas de un asfalto y aunque en algunos casos existen buenas correlaciones entre viscosidad absoluta y penetración, como:

$$D = 1.58 \times 10^{10} / \text{pen}^{2.16}$$

Donde:

D : viscosidad, en poises

pen: penetración (100 g, 5 s), en décimas de mm.

Las distintas procedencias de los asfaltos hacen variar estas correlaciones y los resultados obtenidos en el ensayo de penetración, pueden conducir a interpretaciones erróneas si no se conoce previamente el comportamiento reológico del material, ya que asfaltos de igual penetración pueden tener características muy diferentes.

1.6.2.2. Punto de reblandecimiento

Los asfaltos no son sólidos cristalinos con un punto de fusión bien definido, es decir, una temperatura determinada para pasar del estado sólido al líquido, sino que al elevarse la temperatura, van perdiendo consistencia, haciéndose fluidos poco a poco.

El punto de reblandecimiento trata de establecer la temperatura, donde el asfalto obtiene una fluidez determinada. En sí, la temperatura que mide el punto de reblandecimiento es sólo un dato con valor relativo o comparativo, ya que los asfaltos no son, en ningún momento, ni sólidos ni líquidos perfectos, sino que son cuerpos viscosos, muy sensibles a la duración y variación de la temperatura.

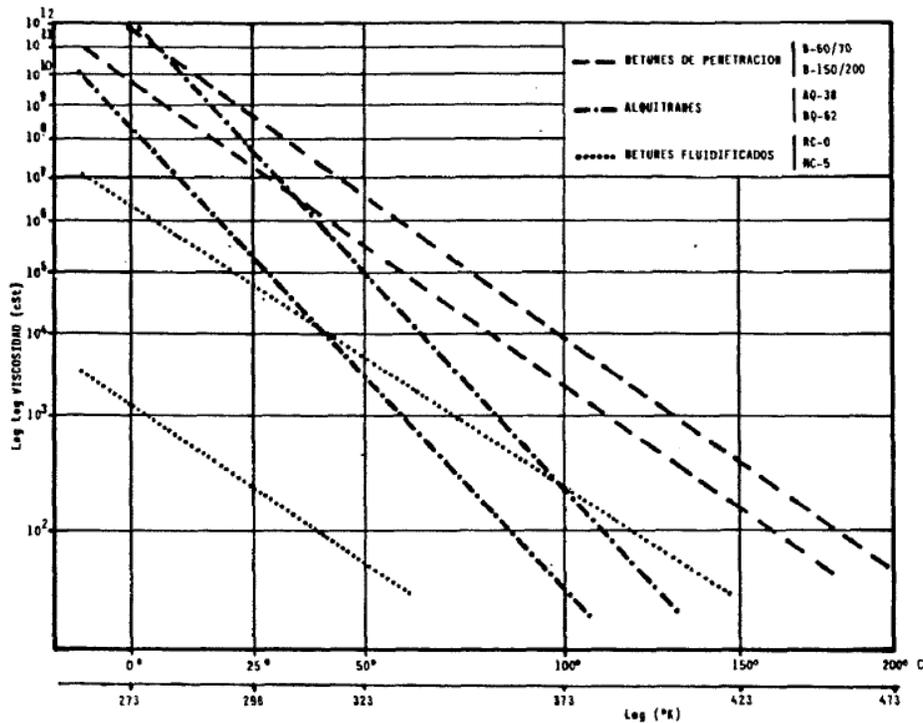
Su determinación es, por tanto, arbitraria y es preciso indicar las condiciones de ensayo para que un valor numérico pueda ser significativo. El punto de reblandecimiento se establece únicamente con fines de comparación del comportamiento de un cemento asfáltico con respecto a otros, no siendo un índice de un cambio definido de propiedades a una temperatura determinada. La forma lineal de la relación viscosidad-temperatura, de la que se puede observar en la figura 7, indica, en general, que el punto de reblandecimiento no representa una temperatura crítica en la que haya un cambio brusco en la viscosidad del material.

La determinación del punto de reblandecimiento puede hacerse por diferentes métodos; los principales son el de anillo y bola y el de Kraemer-Sarnov.

En el método de anillo y bola (AB), ASTM D-3695, el anillo se llena con material fluido, dejándolo enfriar hasta temperatura ambiente y enrasándolo después con una espátula caliente. Se coloca encima del disco de material una bola de acero y se sumerge el conjunto en un recipiente con agua que debe calentarse a una velocidad de 5 °C por minuto. El punto de reblandecimiento es la temperatura que marca el termómetro colocado en el agua, en las proximidades de la muestra, en el instante en que la bola, arrastrando el producto bituminoso llega a una placa de referencia situada a 25 mm por debajo de la probeta.

En el método de Kraemer-Sarnov (KS), el sistema es parecido al de anillo y bola. En el fondo de un tubo de vidrio se coloca un tapón de asfalto de 25 g de peso, echando posteriormente en el tubo 5 g de mercurio que gravitarán sobre el asfalto.

Figura 7. Diagramas de viscosidad- temperatura de diferentes cementos asfálticos



Fuente: MIRO, Jorge. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Pág. 57. Barcelona, marzo 1994.

El tubo se introduce en un baño de agua que se va calentando a una velocidad de 2 °C por minuto, hasta que el asfalto toca el fondo del baño o el mercurio atraviesa el producto.

En este caso, el punto de reblandecimiento viene definido como la temperatura del agua en las proximidades de la muestra, en el momento de que el asfalto toque el fondo o haya sido penetrado por el mercurio. Aproximadamente, la relación existente entre los resultados de los dos ensayos es: $KS = AB - 12$

Definidos anteriormente los ensayos de penetración y el punto de reblandecimiento podemos definir el Índice de penetración (IP) como el gradiente entre estos dos ensayos a una temperatura determinada. Si se representa el logaritmo de la penetración en función de la temperatura, T, a la que se realiza el ensayo, se obtienen una función lineal, lo cual sugirió que la pendiente de la recta pudiera ser usada como índice de la susceptibilidad.

Su determinación requería dos ensayos de penetración hechos a distintas temperaturas. Al extrapolar dicha recta hasta la temperatura del punto de reblandecimiento, la penetración correspondiente, para cualquier tipo de asfalto, resulta ser del orden de 800; de aquí que el IP pueda calcularse con una sola penetración y el punto de reblandecimiento. Pero el IP no es directamente proporcional a esa pendiente, sino que la relación viene dada por la fórmula:

$$(\log 800 - \log \text{pen})/(\text{PR} - T) = (20 - \text{IP})/(10 + \text{IP}) \times (1/50)$$

Donde:

IP = índice de penetración

pen = penetración (100 g, 5 s), en décimas de milímetro

PR = punto de reblandecimiento (anillo y bola), en °C

T = temperatura a que se hace el ensayo de penetración, en °C.

El cálculo del IP, se obtiene mediante la expresión:

$$\text{IP} = (20u - 300v)/(u + 30v)$$

Donde:

u = $\log 4 (t_{AB} - t_p)$

v = $\log 800 - \log P_t$

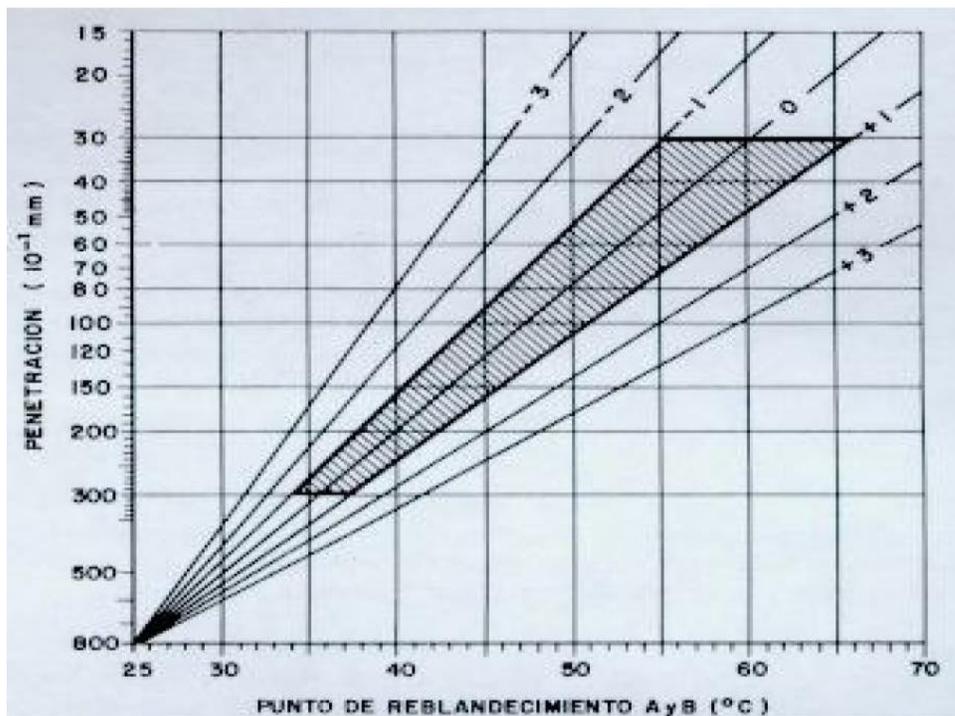
t_{AB} = temperatura del punto de reblandecimiento anillo y bola, en °C.

t_p = temperatura a la que se efectúa la penetración, en °C.

P_t = penetración a la temperatura t_p

Como se observa en la figura 8, interesantemente al IP es que se le atribuye una estrecha relación con el tipo reológico del cemento asfáltico. Los asfaltos generalmente utilizados en carreteras, tienen índices de penetración comprendidos entre -1 y +1, siendo inferiores a -1 para los materiales esencialmente newtonianos, frágiles a bajas temperaturas, y superiores a +1 en los bitúmenes oxidados y en los modificados con polímeros, menos sensibles a los cambios de temperatura.

Figura 8. Índice de penetración del asfalto



Fuente: SANCHEZ, Jorge. Curso: Mezclas especiales con asfaltos modificados, Cámara Guatemalteca de la Construcción, 21 octubre de 2008.

1.7. Propiedades mecánicas de los cementos asfálticos

Las propiedades mecánicas de los cementos asfálticos dependen de la temperatura a la que se encuentran y del tiempo durante el cual está sometido a una determinada carga, a esto se le denomina comportamiento reológico. Por ello, al variar la temperatura o el tiempo de sollicitación (carga), un mismo asfalto presenta características similares a las de un cuerpo elástico, visco-elástico o viscoso.

Cuando se habla sobre la reología, se trata de la parte de la física que estudia el comportamiento de la materia a través del tiempo de aplicación de una carga y está directamente relacionada a las propiedades de viscosidad, plasticidad y elasticidad, en general con el flujo de la materia.

El efecto del aumento de la temperatura en la variación de la rigidez, es análogo al tiempo de sollicitación, y ambos están íntimamente relacionados para un cemento asfáltico dado.

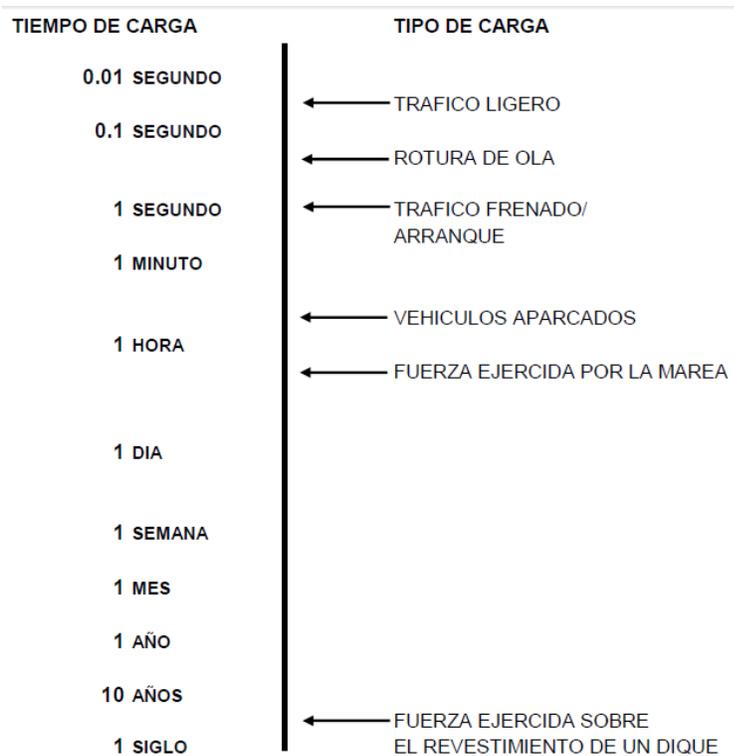
Esta variación paralela de las propiedades cuando se modifica la temperatura o el tiempo de aplicación de la carga, permite tener una idea muy completa del comportamiento reológico del cemento asfáltico haciendo variar uno sólo de los dos factores. Este es el fundamento de los métodos operativos usados en los ensayos habituales que sirven para determinar unos parámetros capaces de caracterizar las propiedades del cemento asfáltico.

De los párrafos anteriores, se puede deducir que las propiedades de respuesta mecánica de un cemento asfáltico en carreteras, a temperatura fija, depende de la duración de la sollicitación de las ruedas de los vehículos, o sea,

de la velocidad de los mismos. En la figura 9, se indican las relaciones entre diferentes tipos de aplicación y sus tiempos de sollicitación normal.

Así pues, de lo descrito anteriormente, uno de los factores importantes en el comportamiento de un cemento asfáltico es la temperatura, los ensayos en el laboratorio deberían reproducir tiempos de aplicación de carga análogos a los indicados en la figura 9, para determinar las características de los asfaltos en cada caso.

Figura 9. **Diferentes tipos de cargas y su tiempo de aplicación**



Fuente: MIRO, Jorge. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Pág. 59. Barcelona, marzo 1994.

Las pruebas que se efectúan a los cementos asfálticos, como en cualquier otro material, son un medio eficaz para conocer sus propiedades y tratar de predecir su comportamiento cuando se utilizan en un determinado trabajo. Los resultados de dichas pruebas permiten verificar el cumplimiento de normas o especificaciones de calidad que aseguren el buen uso de los distintos materiales

A continuación se explicará algunas pruebas y propiedades mecánicas de los cementos asfálticos.

1.7.1. Ductilidad

La ductilidad es la capacidad que posee un cemento asfáltico de deformarse por alargamiento sin que su masa se disgregue. Esta propiedad, junto con la adherencia, es de sumo interés para los asfaltos, debido a su forma de trabajar en las aplicaciones que con ellos se hacen y en las que generalmente van a estar sometidos a acciones alternadas de tracción y compresión, provocadas por el tráfico o variaciones térmicas, que deben resistir sin romper.

La ductilidad de un asfalto se mide por el alargamiento en centímetros hasta rotura que puede soportar una probeta sometida a un ensayo de tracción con velocidad de deformación y temperatura determinadas.

Para un mismo cemento asfáltico, la ductilidad es tanto mayor cuanto mayor es la temperatura a la que está sometido, y para materiales diferentes, la ductilidad crece con la penetración y disminuye con la viscosidad del producto.

Los resultados de la medida de la ductilidad han sido ampliamente discutidos, tal parece ser que la ductilidad mide una combinación de propiedades del asfalto, pero ninguna de un modo específico. Por ejemplo, asfalto de igual

penetración, pero distinto origen, pueden tener valores muy distintos de ductilidad. En cualquier caso, no es viable una diferenciación de los distintos tipos de asfalto basándose en su ductilidad.

Inicialmente se pensó que entre la ductilidad y la adhesividad de un cemento asfáltico existían buenas relaciones. Aunque el supuesto no se ha demostrado con suficiente claridad, lo que sí es cierto es la relación inversa entre la cantidad de parafina y la ductilidad; como para cementos asfálticos el aumento de parafina (grupos alifáticos o parafínicos) representa una disminución de poder aglomerante del cemento asfáltico, resultando en definitiva, que aunque la ley no sea sencilla, no parece ilógico el supuesto de una cierta correlación entre la adhesividad y la ductilidad.

Actualmente, solo parece claro que la ductilidad tiene estrecha relación con las propiedades reológicas del cemento asfáltico y que el ensayo del ductilómetro, más que de control, es un ensayo de investigación.

El ensayo de ductilidad, ASTM D-113, se lleva a cabo en un ductilómetro, sometiendo una probeta de forma normalizada a un esfuerzo de tracción realizado a velocidad de deformación y temperatura constante, 5 cm/min y 25 °C, respectivamente. El ensayo se realiza en una cubeta llena de agua a temperatura constante y el alargamiento, en cm, que experimenta la probeta antes de alcanzar la rotura mide la ductilidad del producto ensayado. El equipo permite ensayar cuatro probetas del mismo producto de forma simultánea, tomándose como resultado del ensayo la media de las cuatro determinaciones. El ensayo da, a veces, dispersiones elevadas.

Figura 10. **Aparato de ensayo de ductilómetro**



Fuente: SALINAS, Maxil Coyopotl. Ventajas y Desventajas del Uso de Polímeros en el Asfalto.
Tesis Licenciatura. Ingeniería Civil. Pág.56.

1.7.2. Fragilidad

Esta propiedad indica la facilidad de alcanzar la rotura de un material, en este caso cemento asfáltico, bajo impacto o pequeñas deformaciones. No puede hablarse de una fragilidad absoluta en un material bituminoso, debido a la propia reología del mismo; sin embargo, por debajo de determinadas temperaturas el asfalto puede presentar un comportamiento frágil, este comportamiento se puede agrupar en tres puntos:

- Fragilidad Frass
- Temperaturas de servicio
- Agrietamiento térmico

El punto de fragilidad, normalizado por el ensayo Frass DIN-52012, se define como la temperatura, debido a la rigidez adquirida por el material

bituminoso, se observa la primera fisura en la superficie de una película de cemento asfáltico, extendida sobre una placa metálica que se somete, en condiciones especificadas, a ciclos sucesivos de flexión y temperatura decreciente a razón de 1 °C por minuto.

El punto de fragilidad tiene un sentido parecido respecto a la fragilidad del cemento asfáltico como el punto de reblandecimiento respecto a la fluencia.

La temperatura de servicio, como se expuso en el tema de susceptibilidad térmica, esta indica la sensibilidad que presenta el asfalto al variar su viscosidad por elevación de la temperatura.

Esta susceptibilidad debería ser lo más baja posible para la gama de temperaturas de servicio, sin que llegue a ser un sólido quebradizo a temperaturas frías o un líquido relativamente viscoso a temperaturas elevadas, en pocas palabras la temperatura de servicio nos da un rango de trabajabilidad del asfalto.

1.7.3. Cohesión

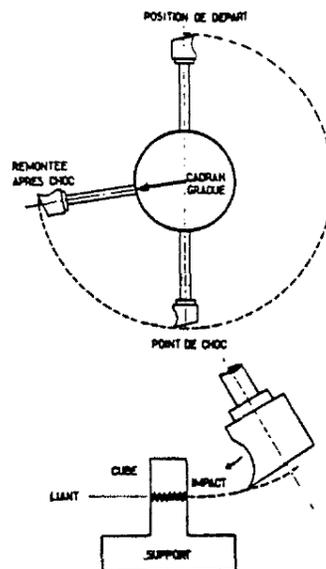
La resistencia a las cargas, como propiedad del cemento asfáltico, está ligada a una característica intrínseca: la cohesión.

La cohesión de un cemento asfáltico en función de la temperatura se evalúa mediante un ensayo desarrollado por Vialit (Viafrance a partir de 1971), basado en la medida de la energía absorbida por la rotura de una película de cemento asfáltico, a diferentes temperaturas, por efecto del impacto de un péndulo: *moutonpendule*

Un cubo de acero con una de sus caras estriada, de 10 mm de lado, representando un árido, está pegado por el cemento asfáltico a ensayar sobre un soporte de acero igualmente estriado. El espesor de la película de cemento asfáltico es de 1 mm, sobre 1 cm² de sección. El extremo del péndulo golpea al cubo en la vertical de su eje de rotación después de girar 180 °C, (figura 11).

Debido al choque y a la posición de punto de impacto, el cemento asfáltico se rompe por el plano medio de su espesor. Un cuadrante graduado provisto de una aguja permite medir, el ángulo suplementario de la oscilación del péndulo y determinar la energía absorbida durante el impacto para romper el cemento asfáltico y desprender el cubo.

Figura 11. **Mecanismo de péndulo de Vialit**



Fuente: MIRO, Jorge. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Pág. 62. Barcelona, marzo 1994.

Con objeto de medir únicamente la energía absorbida por el cemento asfáltico durante su rotura, el ensayo se efectúa dos veces: en la primera el cubo de acero está pegado al soporte por el cemento asfáltico; mientras que en la segunda, el cubo no está pegado al soporte.

Así, por diferencia de los dos resultados, se puede evaluar de forma precisa la cohesión interna del cemento asfáltico considerado, a una determinada temperatura de ensayo.

De hecho, la energía absorbida por el cemento asfáltico durante el choque, tiene dos componentes principales:

- la energía de rotura propiamente dicha;
- la energía absorbida por las deformaciones plásticas del producto.

Esta última debería ser pequeña si se desea una información precisa sobre su cohesión. Así pues, la precisión del resultado de medida dependerá del nivel de consistencia del cemento asfáltico, es decir, de la temperatura a la que se realice el ensayo.

Los resultados obtenidos pueden representarse en una curva cohesión temperatura de la figura 12, a partir de la cual puede determinarse, por una parte, la temperatura de cohesión máxima y, por otra, el intervalo de consistencia que indica las temperaturas de servicio para un nivel de cohesión dado.

La curva puede descomponerse en tres partes:

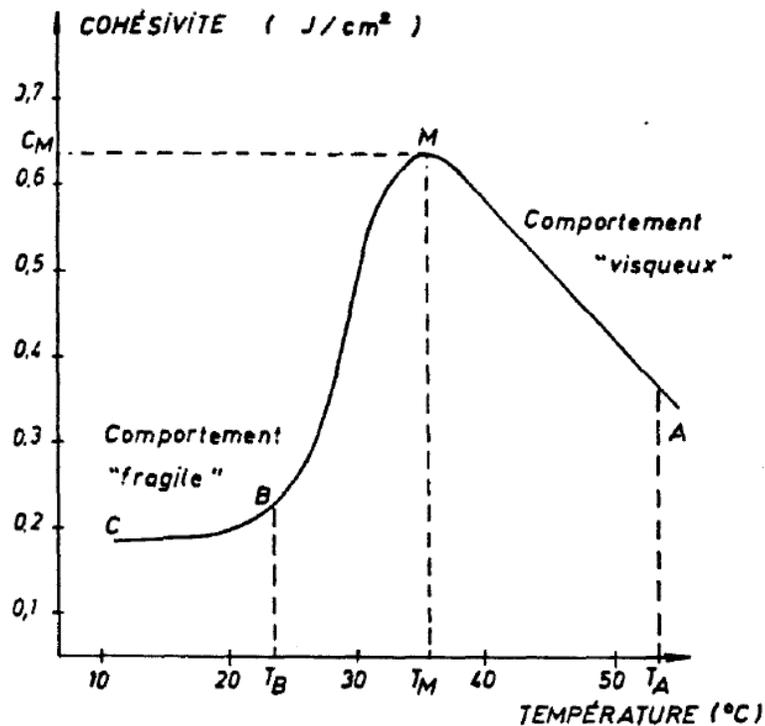
Parte AM: a medida que baja la temperatura, la cohesividad aumenta con la viscosidad, aunque no depende exclusivamente de ella. El comportamiento del

cemento asfáltico en el intervalo de temperaturas correspondiente a AM se califica de viscoso.

Parte BC: por debajo de la temperatura T_B , el cemento asfáltico tiene un comportamiento frágil; su baja cohesividad apenas varía con la temperatura.

Parte MB: corresponde a la zona de transición del estado viscoso al estado frágil (en las condiciones de ensayo), cuyo intervalo de temperaturas puede ser sensiblemente diferente según el cemento asfáltico.

Figura 12. Curva modelo de cohesividad de un asfalto

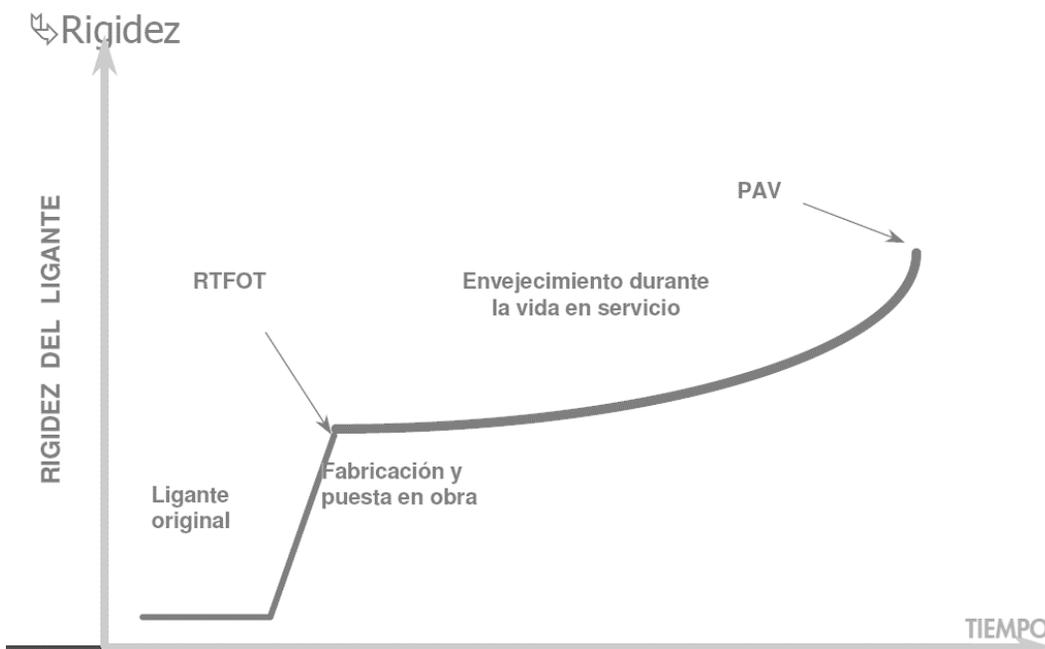


Fuente: MIRO, Jorge. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Pág. 64. Barcelona, marzo 1994.

1.7.4. Rigidez

Los cementos asfálticos son materiales visco elásticos cuyo comportamiento depende del tiempo de aplicación de una carga y de la temperatura. Así como un cuerpo elástico está caracterizado por un módulo de elasticidad, los materiales visco elásticos se caracterizan por su módulo de rigidez.

Figura 13. Rigidez de un asfalto



Fuente: SANCHEZ, Jorge. Curso: Mezclas especiales con asfaltos modificados, Cámara Guatemalteca de la Construcción, 21 octubre de 2008.

Aunque el comportamiento mecánico de los cementos asfálticos está influido por el estado de esfuerzos y la relación entre esfuerzos y deformaciones

es no lineal, su influencia es muy pequeña si se compara con el efecto producido por la temperatura o el tiempo de aplicación de carga.

Por lo tanto, se puede suponer un comportamiento lineal y que su respuesta sólo depende de la temperatura y del tiempo de aplicación de carga, y considerar los asfaltos como un material visco elástico lineal.

1.7.5. Adhesividad

Se denomina adhesividad a la acción de adhesión del asfalto al agregado pétreo en presencia de agua. La adhesión es la fuerza por unidad de superficie que une las moléculas del cemento asfáltico a las moléculas del agregado pétreo. En la práctica, este concepto científico se ha sustituido por otro de tipo pragmático denominado adhesión mecánica.

Para que se produzca la adhesión del asfalto a los agregados es necesario que éste lo moje adecuadamente; ello exige que el cemento asfáltico tenga una baja viscosidad en el momento de su empleo, obtenida bien por calentamiento del material, por incorporación de disolventes volátiles o por emulsificación en agua, en el caso del presente trabajo, el calentamiento del cemento asfáltico es el utilizado.

En el contorno de la superficie de contacto del asfalto con los agregados actúa un sistema de fuerzas: la tensión superficial del cemento asfáltico, la tensión superficial del sólido y la tensión superficial en la zona de contacto cuya resultante determina que el cemento asfáltico moje o no los agregados.

El contacto del asfalto y la piedra ha de ser lo más perfecto posible, sin interposición de materias extrañas, lo que implica que los agregados estén

limpios y secos. La presencia de polvo mineral aumenta la superficie a envolver por el asfalto, lo que disminuye el espesor de la película de asfalto alrededor del agregado una vez conseguida la envuelta, perjudicando su resistencia al desplazamiento por acción del agua.

La adhesión del asfalto al agregado en presencia de agua, no es una propiedad exclusiva del asfalto, sino que depende del conjunto asfalto- agregado: un mismo asfalto presentará buena o mala adhesividad, según el tipo o condiciones del agregado que se utilice. Por eso, para estudiar correctamente el fenómeno, hay que considerar los tres elementos que lo influyen: agregado, cemento asfáltico y agua, pues hay efectos importantísimos de tensión superficial y de absorción selectiva que dependen, tanto del asfalto como del agregado.

De todas formas, dentro del término adhesividad se agrupan dos propiedades distintas:

- La facilidad para que el cemento asfáltico moje al agregado: adhesividad activa.
- La resistencia que ofrece el cemento asfáltico, una vez adherido al agregado, a ser desplazado por el agua, adhesividad pasiva.

La envuelta y el mojado de los agregados se efectúa con el cemento asfáltico fluido, mientras que la desenvuelta concierne al cemento asfáltico viscoso. Por otra parte, para que se produzca la desenvuelta es necesario un trabajo suplementario, debido al prendimiento mecánico del cemento asfáltico al agregado. El cemento asfáltico al mojar al agregado se introduce dentro de sus vacíos y surcos superficiales aumentando su resistencia al desplazamiento.

Además de los factores físicos y fenómenos de superficie mencionados, aparecen también fuerzas y tensiones de tipo químico que influyen y modifican las condiciones de equilibrio.

Los agregados ácidos, con un alto contenido en sílice en su composición, tienen una gran afinidad por el agua, lo que dificulta su adhesividad a los cementos asfálticos bituminosos. Los agregados básicos, con altos contenidos de óxidos alcalinos y alcalino- térreos en su composición, son menos hidrófilos que los silíceos, presentando cierta atracción por los ácidos libres del asfalto y mejor adhesividad con los mismos.

Dado que los fenómenos de floculación y absorción tardan un cierto tiempo en producirse durante la producción de la mezcla asfáltica en caliente, si entrara en contacto el cemento asfáltico caliente con el agregado frío, bajaría rápidamente la temperatura de aquél y se originarían tensiones en la superficie de contacto que tenderían a separar el agregado y el asfalto. Para disminuir estas tensiones se calienta el agregado antes de mezclarlo con el asfalto. Al enfriarse éste, va adquiriendo la debida consistencia y, consecuencia de ello, el conjunto de los elemento ofrecen buena resistencia.

De forma general, sobre el tema de la adhesividad y de la resistencia al desplazamiento se pueden dar las siguientes conclusiones de importancia práctica:

- El mojado de un agregado seco por un cemento asfáltico se realiza sin dificultad.
- El mojado de un agregado húmedo por un cemento asfáltico no es posible. La película de cemento asfáltico que recubre el agregado es, en general, desplazada por el agua, pero la velocidad de desplazamiento de dicha

película puede ser muy débil, e incluso nula, por oponerse la viscosidad y el adherencia mecánica del cemento asfáltico, la densidad de la mezcla que impide la penetración del agua, y las fuerzas de atracción de tipo químico entre el agregado y el cemento asfáltico.

2. PRINCIPALES MODIFICADORES PARA ASFALTO

Históricamente, los modificadores de asfalto se utilizaron primero en emulsiones asfálticas para impermeabilizantes, riegos con tratamientos superficiales en frío y recientemente se empezó en pavimentaciones modificando el cemento asfáltico y utilizarse cuando se requería un asfalto de mejor calidad o mayor resistencia que la ofrecida por un cemento asfáltico normal.

Las características adhesivas que posee el cemento asfáltico normal hacen que sea un agente ligante, que permiten mantener a los agregados en su sitio, además de inferir un comportamiento reológico al pavimento. Mediante el uso de agentes modificadores como los polímeros, se pueden tener diferentes diseños de pavimentos para diferentes climas y el desempeño mecánico, adecuado para el rodamiento de vehículos que originan desgaste del pavimento, dichas propiedades se explicarán en el desarrollo del presente capítulo.

El cemento asfáltico es un material interesante que, dependiendo de su fuente de origen, tiene un intervalo definido de temperatura donde muestra su mejor desempeño (temperaturas de servicio). Este intervalo de forma práctica se define en temperaturas positivas sobre los 10 grados centígrados hasta los 60°C, ya que por arriba de este intervalo el asfalto comienza ablandarse, adquiriendo un comportamiento plástico y por debajo de este su comportamiento es frágil.

Si se aumenta la temperatura del cemento asfáltico, por encima de dichas temperaturas, este puede llegar a tener un comportamiento líquido que incluso puede llegar a comportarse como un líquido newtoniano. Este comportamiento se da normalmente por arriba de los 100 grados centígrados. Aún si siguiésemos

calentado dicho asfalto, este experimentaría una degradación acelerada cuando alcanza temperaturas superiores a los 200 grados centígrados.

Por otro lado, cuando el asfalto experimenta temperaturas menores a los 10 grados centígrados y particularmente temperaturas por debajo de los 0 grados centígrados, el asfalto se convierte en un sólido rígido, que puede ser tan dura que no resistiría deformaciones y puede sufrir fallas fracturándose cuando experimenta dichas temperaturas.

Aquí es donde se plantea la interrogante: ¿cómo mejorar el intervalo de temperatura de desempeño del asfalto con objeto de hacerlo más versátil a cambios climáticos y condiciones variadas de deformación? Dicha interrogante se explicará en el desarrollo del presente capítulo.

2.1. Modificación de un asfalto

La modificación de asfalto es una técnica moderna utilizada para el aprovechamiento efectivo de las mezclas asfálticas en caliente en la rehabilitación de carreteras. Esta técnica consiste en la adición de un agente modificador a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, tales como: su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos (cambios de temperatura) y de tránsito (peso vehicular), es decir, esfuerzos de tensión. Los objetivos que se persiguen: contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas, para reducir las deformaciones permanentes (ahuellamiento), de las mezclas que componen las capas de rodadura, aumentando la rigidez. Por otro lado, disminuir el agrietamiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad y, finalmente contar con un ligante de mejores características adhesivas.

2.1.1. Justificación

Los cementos asfálticos convencionales poseen propiedades satisfactorias, propiedades mecánicas y de adhesión en una gama amplia de aplicaciones y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito. Actualmente existen varios factores que afectan el desempeño de los mismos: los grandes volúmenes de tráfico sobre los criterios de diseño vehicular, el exceso de carga, el incremento en la presión de inflado de las llantas y las condiciones climáticas.

Dichos factores hacen que, utilizar asfaltos convencionales en la construcción de carreteras actualmente no satisfagan sus expectativas tal como cumplir un determinado período de servicio, menor resistencia al envejecimiento, la poca durabilidad de un camino reflejándose en deformaciones y agrietamientos dentro de una carpeta asfáltica, sin embargo, a estos problemas contribuye una inadecuada selección de materiales en los diseños, mal proceso constructivo, poco mantenimiento, baja calidad del ligante y la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que en algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes.

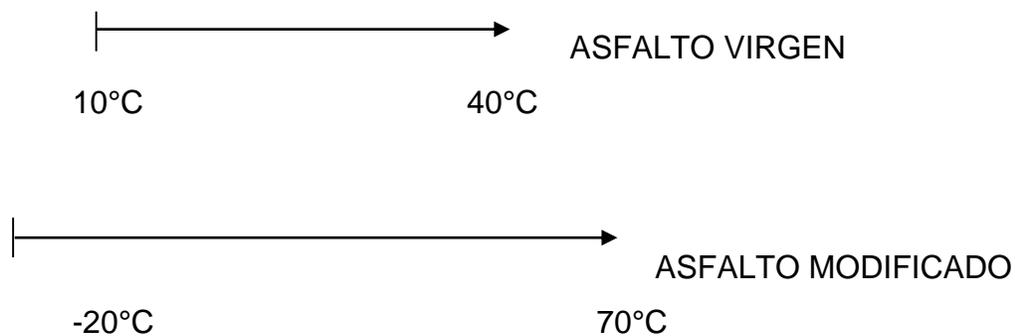
Por ejemplo: con cementos asfálticos convencionales, aún con los grados más duros no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito, especialmente cuando se afrontan condiciones de temperaturas altas. Además con cementos con mayor dureza se corre el riesgo de formaciones de agrietamientos; por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas.

Una solución evidente fue mejorar las características de las mezclas asfálticas en caliente para mejorar su comportamiento en servicio; ello dio origen a nuevos asfaltos que fueron denominados: Mezclas asfálticas en caliente modificadas.

Refiriéndonos al problema planteado al inicio del presente capítulo, donde el origen del cemento asfáltico define el intervalo de temperatura donde muestra mejor desempeño (temperatura de servicio) y si está por encima de dicho intervalo, su comportamiento se vuelve fluido y por debajo se comporta como un sólido rígido produciendo fallas como fracturas y ahuellamiento. Es por ello que surge la interrogante ¿cómo mejorar el intervalo de temperatura de desempeño del asfalto, con objeto de hacerlo más versátil a cambios climáticos y condiciones variadas de deformación?

La respuesta a la pregunta se resuelve con el uso de aditivos modificadores del asfalto. En el mercado existen diferentes agentes modificadores del cemento asfáltico, la mayoría de estos son de naturaleza polimérica y entre otras cosas, permiten extender la temperatura de efectividad el asfalto como agente ligante den el diseño de pavimentos. Más adelante explicaremos el porqué de la elección de un polímero, sabiendo que existen otro tipo de modificadores.

Figura 14. **Temperaturas de servicio de los cementos asfálticos**



Fuente: HERNÁNDEZ, Gabriel. Informe Técnico: “Beneficios de la modificación de asfalto usando co polímeros de Estireno-Butadieno”. Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Departamento de asistencia técnica y desarrollo, 2012. 20pp.

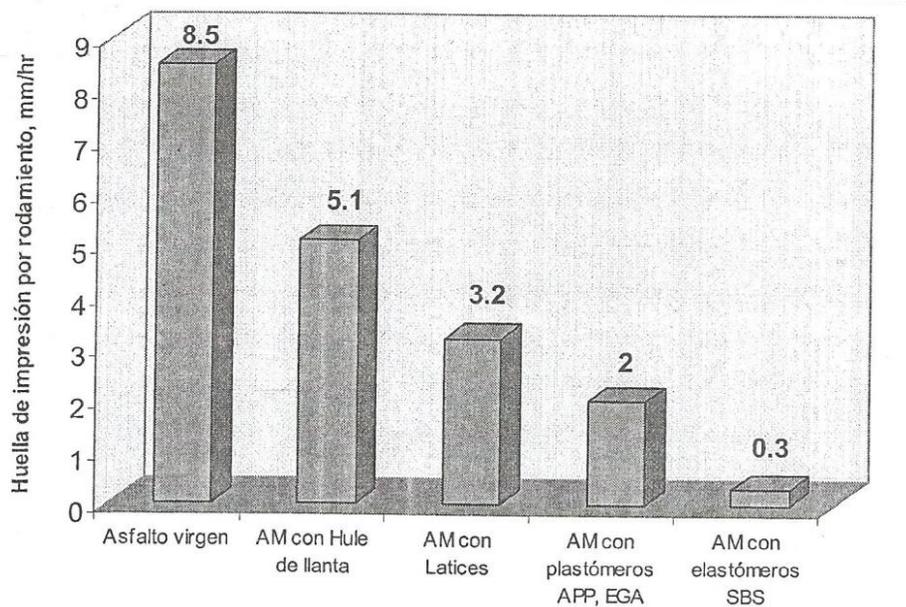
2.2. Tipos de modificadores

Desde hace mucho se emplea caucho como modificador, ya sea natural o sintético, con tasas no superior al cinco por ciento. Actualmente existen los polímeros sintéticos de formulación especial que resultan muy competitivos.

Los modificadores producen una actividad superficial iónica en una mezcla asfáltica en caliente, incrementa la adherencia en la interface entre el material pétreo y el cemento asfáltico, conservándola aún en presencia del agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y, por lo tanto, a la fatiga que reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura.

Estos modificadores generalmente se aplican directamente al cemento asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo. Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son los polímeros.

Figura 15. **Diferentes polímeros modificadores y su efecto en el pavimento**



Fuente: HERNANDEZ, Gabriel. Informe Técnico: “Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Co polímeros de Estireno-Butadieno”. Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Departamento de Asistencia Técnica y Desarrollo, 2012. 20pp.

2.2.1. **Polímero**

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formadas por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamadas monómeros, que son compuestos químicos con moléculas simples. La unión de dichos monómeros forman moléculas más grandes en distintos arreglos: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.

Por su parte, los asfaltos modificados con polímeros son asfaltos a los cuales se les ha adicionado algún polímero, con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas, más adelante ampliaremos este tema.

2.2.2. Homo-polímero

Son monómeros que tienen una sola unidad estructural, están formadas por la repetición de unidades monómeras idénticas, es decir no contiene hetero átomos. Dentro de este grupo de polímeros, se distinguen cinco familias principales: las Poliolefinas, los poliestirénicos, los insaturados (polienos), los polivinilos y los poliacrílicos. La celulosa y el caucho son homopolímeros naturales. El polietileno y el PVC son homopolímeros sintéticos.

2.2.3. Co polímeros

Es un conjunto de moléculas constituidas por dos o más unidades monómeras distintas. Por ejemplo, la seda es un co polímero natural y la baquelita, uno sintético. Los co polímeros más comunes están formados por dos monómeros diferentes que pueden formar cuatro combinaciones distintas, por ejemplo: EVA (etileno – acetato de vinilo), SBS (estireno-butadieno-estireno).

Si los monómeros se agrupan en forma aleatoria, el polímero se llama co polímero al azar, si se ubican de manera alternada, se obtiene un co polímero alternado, si se agrupan en bloque, por ejemplo, dos monómeros de un tipo y tres monómeros del otro, en forma alternada, se forma un co polímero en bloque. Si se parte de una cadena lineal formada por un monómero y se agregan ramificaciones de otro monómero, se obtiene un co polímero injertado.

Actualmente, durante la fabricación de un polímero se pueden añadir determinadas sustancias que mejoran las propiedades del polímero, por ejemplo: aumentando su flexibilidad y resistencia; por ello los polímeros sintéticos constituyen un continuo aporte de nuevos modificadores con los que se pueden obtener una gran gama de productos.

A partir de este concepto se pueden clasificar los modificadores que se describen en la siguiente tabla:

Tabla IV. **Polímeros utilizados en asfaltos**

Tipo de Modificador	Ejemplo
Elastómeros	Natural
	SBS
	SBR
	EPDM
	PBD
Plastómeros	EVA
	EMA
	PE
	PP
	Poliestireno

Fuente: TONDA, Mauricio. Asfaltos Modificados con Polímeros [en línea], Monografías.com, septiembre 2012 [ref. de 08 de junio de 2014]. Disponible Web: <www.monografias.com/trabajos15/asfaltos-modificados/asfaltos-modificados.shtml#PROPESPEC>.

2.2.4. Elastómeros

También conocidos como Polímeros tipo I, es un tipo de polímero con propiedades visco- elásticas, es decir que pueden recuperar su posición original

al sufrir esfuerzos de tensión. Se caracterizan por ser un modificador de asfalto que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto altas como a bajas temperaturas, incrementando la temperatura de desempeño en PG 76-24 (según clasificación *Superpave*). Es fabricado con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales de tipo bibloque o tribloque, mediante configuraciones como el Estireno- Butadieno- Estireno (SBS) o Estireno- Butadieno (SB), entre otras.

Los elastómeros se utilizan como modificadores de mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales (recapeos).

Dentro de este grupo se pueden mencionar:

- Natural: caucho natural, celulosa, glucosa, sacarosa, ceras y arcillas son ejemplos de polímeros orgánicos e inorgánicos naturales
- SBS:(estireno-butadieno-estireno) o caucho termoplástico. Este es el más utilizado de los polímeros para la modificación de los asfaltos, ya que es el que mejor comportamiento tiene durante la vida útil de la mezcla asfáltica
- SBR: Cauchos sintéticos del 25 % de Estireno y 75 % de butadieno; este tipo de modificador mejora la adhesividad si se le incorpora ácido acrílico
- EPDM: (polipropileno atáctico) es muy flexible y resistente al calor y a los agentes químicos.

2.2.5. Polímero tipo II

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastómericos lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

2.2.6. Plastómeros

Son materiales plásticos que imparten resistencia a esfuerzos a flexión y deformación en el pavimento, extiende la temperatura de desempeño a PG 70-5. Su funcionamiento mejora en climas cálidos a moderados, que en climas fríos. Son conocidos también como Polímeros tipo III, se caracterizan por mejorar la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas.

Es fabricado con base en un polímero de tipo plastómero, mediante configuraciones como Etil- Vinil- Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

Este tipo de polímeros se caracterizan ya que al ser tensionados se sobrepasa la tensión de fluencia no vuelven a su longitud original, denotando deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad.

Dentro de los plastómeros se pueden mencionar:

- EVA: etileno-acetato de vinilo
- EMA: etileno-acrilato de metilo
- PE: (polietileno) este tipo de plastómero posee buena resistencia a la tracción y buena resistencia térmica, como también buen comportamiento a bajas temperaturas.
- PP: polipropileno.
- Poliestireno: es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del estireno, no son casi usados debido a que suele ser rígido y quebradizo.

2.2.7. Hule molido de neumáticos

Este tipo de modificador de cemento asfáltico mejora la flexibilidad y la resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura.

Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos, se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta y como se puede deducir es amigable con el ambiente al provenir de materiales reciclados.

Los cauchos naturales y los sintéticos como el SBS y SBR, son la materia prima que compone las llantas; a su vez hacen parte de estas, aditivos entre los que sobresalen aceites, resinas fenólicas, sulfuro y ácidos grasos. Estos materiales, que son considerados desechos del tráfico, pueden tener una mejor

aplicación y plantear una alternativa para su manipulación. El caucho natural aporta propiedades elásticas, en tanto que el caucho sintético proporciona la estabilidad térmica.

2.3. Fundamentos de la modificación

Los pavimentos sufren deterioro a lo largo de su vida útil, los tres principales factores que influyen en este deterioro son:

- Clima
- Deformaciones por tránsito (ahuellamiento)
- Tiempo

El clima tiene que ver fundamentalmente con la temperatura promedio a la que se ve expuesto el pavimento (ambiente) y las variaciones de la misma por cuestiones climáticas y por humedad propiciada por la lluvia, así como las bajas temperaturas en los meses de invierno.

Las deformaciones se deben al tránsito vehicular. Los pavimentos se diseñan para una carga promedio que genera una deformación debida a la circulación de vehículos. Estas deformaciones obligan a pensar en las ventajas que tiene el tener un asfalto que permita la recuperación elástica que responda a dichas deformaciones. El tiempo se relaciona fundamentalmente con el envejecimiento térmico del pavimento, ya que a medida que transcurre el tiempo posterior a su aplicación el asfalto se va degradando, este proceso es conocido como oxidación.

La mayoría de estas fallas se producen fundamentalmente por una baja recuperación elástica del pavimento, a excepción de la última falla mencionada por desprendimiento del asfalto y pérdida de los agregados pétreos, también el

deslavado de la carreteada que se produce por una pobre adherencia del asfalto a la base, bien sea por usar mayor relación de agregado a la mezcla en caliente, o a que el asfalto tenía poca fuerza cohesiva con el agregado o bien por un envejecimiento térmico prematuro.

Como ya se ha mencionado, esta pérdida de la memoria elástica del pavimento o de la propiedad de recuperación elástica se da por el exceso de carga vehicular, degradación del pavimento por la exposición al sol, lluvia, cambios de temperatura y el tiempo.

Debido a esto los especialistas en ingeniería vial han buscado métodos de medición que permitan la predicción de fallas en los pavimentos y sobre todo el diseño de pavimentos que garanticen menor frecuencia en el mantenimiento por desgaste, unificado a una mayor seguridad para los usuarios.

En Estados Unidos: la Administración Federal de Carreteras (*Federal Highway Administration*) en colaboración con el Departamento de Transportes (*Department of Transportation*) DOT por sus siglas en inglés, el Instituto del Petróleo (*Petroleum Institute*) y universidades, trabajaron en conjunto para diseñar un programa estratégico de pavimentos que se le llamo SHRP, siglas en inglés de "*Strategic Highway Research Program*". Dicho programa surge la metodología de diseño de super-pavimentos llamada *Superpave* que permite la evaluación y diseño de pavimentos con el objetivo de predecir su desempeño en diferentes intervalos de temperatura, así como la predicción de fallas, por efecto del envejecimiento.

Este procedimiento establece y define las técnicas reológicas y termo mecánicas necesarias para definir los llamados: grados de desempeño comúnmente expresados por sus siglas en inglés PG, que significan *Performance*

Grade. De esta manera, aquel asfalto normalmente modificado permite alcanzar las especificaciones mínimas requeridas para el PG deseado.

Así también existen otras normas en Latinoamérica, como por ejemplo: la norma Mexicana NCMT 4-05.002, que complementan las propiedades del método *Superpave*, con otras propiedades que tienen que ver con predicción de la recuperación elástica del pavimento, mediante pruebas de torsión o ductilómetro.

También considera otras propiedades como la temperatura de ablandamiento y una propiedad importante que es el índice de separación de fases. Esta última propiedad permite definir si el asfalto modificado va a ser estable o puede experimentar separación de sus componentes que le hacen perder sus propiedades y estabilidad.

Las propiedades reológicas del asfalto se miden usando un equipo definido como DSR por sus siglas en inglés de *Dynamic Scanning Rheometer* (Reómetro de corte dinámico) que se realiza utilizando un equipo llamado Reómetro de platos paralelos, regido por la norma ASTM D-7175. En este ensayo una muestra de asfalto se ve sometida, en el equipo para este ensayo, a deformaciones torsionales a diferentes temperaturas y frecuencias de deformación.

Dicho ensayo permite conocer qué tanto se deforma el material o con qué rapidez lo hace o al contrario si no se deforma tan rápidamente, medir qué tan rígido es el material y cuáles son las temperaturas más altas que puede resistir el asfalto modificado ante tales deformaciones que simulan las cargas debidas al tránsito vehicular.

La rigidez del sistema se mide con un parámetro conocido como: Módulo de Corte Reológico que se expresa de la siguiente forma:

$$G = G'' / \text{sen } \delta$$

donde:

G = módulo de corte reológico

G'' = rigidez del material

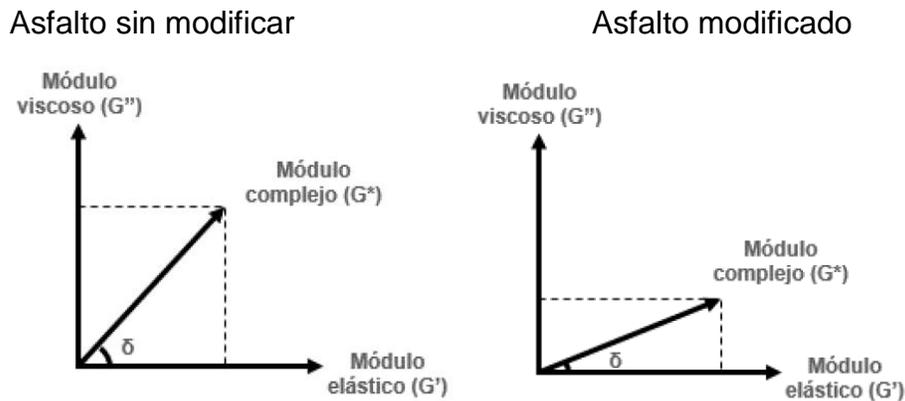
δ = deformación que sufre el material a través de la deformación torsional

La anterior ecuación se puede observar representada gráficamente en la siguiente figura donde δ es el ángulo de fase, definido por la deformación torsional del material sobre la referencia de los ejes vertical y horizontal antes de que la muestra sea deformada, gráficamente es el ángulo existente entre la recta que representa el módulo de corte reológico o módulo compuesto que a su vez esta compuesto por el módulo viscoso (G) en la abscisas y el módulo elástico (G') en las ordenadas.

En la figura 16 se puede observar como el módulo de corte reológico o módulo complejo se comporta de un asfalto sin modificar a un asfalto modificado y como disminuye el ángulo de fase en un asfalto modificado con polímero, esto se puede interpretar con el polímero actúa haciendo el asfalto más elástico sin que su viscosidad aumente (rigidez) o visto desde otro punto de vista, la rigidez no disminuye al incrementar la temperatura como se puede observar en la figura 17, de ello se ampliará en el siguiente tema.

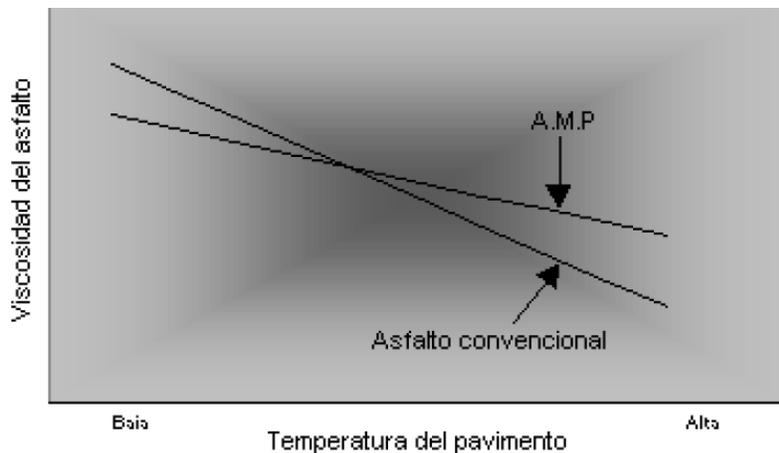
Como se puede observar en la tabla V, descrita a continuación, el asfalto modificado permite mejorar sustancialmente todas las propiedades del asfalto sin modificar, así también en la figura 17.

Figura 16. **Módulo de corte reológico (viscosidad vs. elasticidad)**



Fuente: HERNÁNDEZ, Gabriel. Informe Técnico: “Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Co polímeros de Estireno-Butadieno”. Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Departamento de Asistencia Técnica y Desarrollo, 2012.

Figura 17. **Efecto de un polímero sobre la rigidez y la temperatura del asfalto**



Fuente: TONDA, Mauricio. “Asfalto Modificado con Polímeros”. Monografías.com, Septiembre 2012 [ref. de 08 de junio de 2014]. Disponible Web: www.monografias.com/trabajos15/asfaltos-modificados/asfaltos-modificados.shtml#PROPESPEC.

Tabla V. **Propiedades de un asfalto modificado que califica para un PG vs asfalto sin modificar**

PROPIEDADES DEL ASFALTO	GRADO	ASFALTO
<i>Descripción de la muestra</i>	<i>PG 76-22</i>	<i>AC-20</i>
Propiedades		
Viscosidad Rotacional Brookfield, @ 135°C, cp	144	430
Penetración, @25°C, 100g/5seg., 1/10mm	57	77
Penetración, @6°C 100g/5seg., 1/10mm	35	29
Recuperación Torsional @ 25°C, %	48	93
Punto de reblandecimiento, °C	67	50
Separación de polímero, °C	0.5	0
G*/send @ 76°C, Kpa	1.192	-
Angulo de Fase 76°C	64	-
G*/sen d @ 64°C, Kpa	-	1.11
Angulo de Fase 64°C	-	70
Después de RTFO		
Pérdida de masa, %	0.3291	0.2942
Penetración, @25°C, 100g/5seg., 1/10mm	38	46
Ductilidad @6°C, 5cm/min., cm	11.5	
Recuperación Elástica @10°C, 20cm/5min., %	46.5	16
G*/send @ 76°C, Kpa	2.658	-
Angulo de Fase 76°C	68.3	-

Fuente: HERNÁNDEZ, Gabriel. Informe Técnico: “Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Co polímeros de Estireno-Butadieno”. Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Departamento de Asistencia Técnica y Desarrollo, 2012. 20pp.

2.4. Estructura de los asfaltos modificados

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella. Esta micro morfología

bifásica y las interacciones existentes entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto parecen ser la causa del cambio de propiedades que experimentan los asfaltos modificados con polímeros.

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad vs temperatura, sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas, como se ve en la figura 17, permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas.

2.4.1. Compatibilidad de los polímeros

Para que los asfaltos modificados con polímeros consigan las prestaciones óptimas, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base (es necesario que los polímeros sean compatibles con el material asfáltico), el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje.

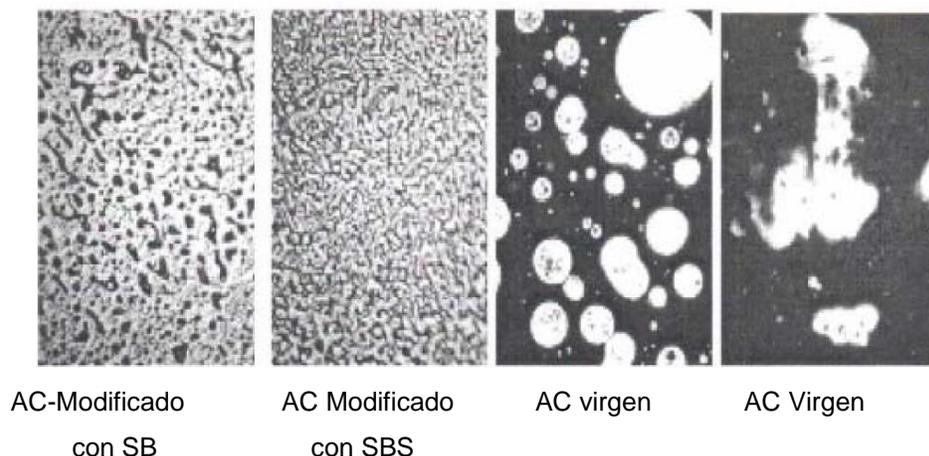
Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de ésta, el polímero sólo actúa como un filler (mineral como: cemento, cal, talco, sílice, etc.); y por debajo de ésta, pasan a estar muy solubilizados y aumentan la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia. Si un polímero se añade a dos diferentes asfaltos, las propiedades físicas de los productos finales, pueden ser muy diferentes. Para mayor efectividad, el polímero debe crear una red continua de trabajo en el asfalto; para que esto ocurra, la química del polímero y del asfalto necesita ser compatible.

Los polímeros compatibles producen rápidamente un asfalto estable, usando técnicas convencionales de preparación. Estos sistemas convencionales

de preparación de asfaltos modificados con polímeros son grandes recipientes de mezclado con paletas agitadoras a velocidades lentas, o recipientes especiales que favorecen la recirculación con agitadores mecánicos de corte de gran velocidad. El polímero puede venir en polvo, en forma de pequeñas bolitas o en grandes panes. La temperatura de mezclado depende del tipo de polímero utilizado.

En las microfotografías de la figura 18, muestran polímeros tipo SB o SBS en diferentes asfaltos (lo blanco es polímero y lo negro es asfalto). Las dos primeras presentan una red continua de polímero, teniendo una estructura estable que no se separa, tomando ventaja de las propiedades elásticas del polímero. Las dos siguientes no están en red, separadas durante el almacenaje, y por tanto, no tendrán el mismo incremento benéfico sobre las distintas propiedades.

Figura 18. **Microfotografías de asfalto**



Fuente: WULF, Fernando. Tesis: "Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero". Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Valdivia, Chile. 2008.

Los productores de asfalto modificado utilizan procesos especiales para lograr compatibilidad entre el polímero y el asfalto. Cuando la tecnología es apropiada, las propiedades del cemento asfáltico pueden reducir el efecto de las roderas, el desprendimiento de pétreos, el agrietamiento térmico o fluencia de la mezcla, así como el incremento en la vida útil del pavimento, debido a una mayor estabilidad y resistencia a la fatiga.

2.5. Elección del tipo de modificado a utilizar

Cuando se trata el tema de modificadores existe una gran gama de productos que se pueden utilizar en el cemento asfáltico, considerando a cualquier material que no forma parte de la composición original del asfalto y cuyo objetivo es modificar sus propiedades termo- mecánicas y reológicas que puede considerarse como un agente modificador.

Entendido este concepto se puede mencionar algunos agentes modificadores que se pueden considerar a la hora de elegir el más adecuado como lo son la cargas inorgánicas que principalmente son agentes que imparten rigidez y alto módulo al asfalto modificado. Sin embargo, incrementan la susceptibilidad de las mezclas asfálticas al sufrir “*cracking*; térmico” ante los cambios bruscos de la temperatura ambiente, que anteriormente explicamos es el gradiente de temperatura.

Otros agentes modificadores son aquellos mejoradores de adherencia, rejuvenecedores u oxidantes, los cuales por su naturaleza química permiten mejorar las propiedades de adherencia entre el cemento asfáltico y los agregados en una mezcla en caliente y los llamados rejuvenecedores son los utilizados ampliamente en el manejo de asfaltos reciclados, estos no son muy recomendados, ya que el cemento asfáltico es rigidizado químicamente mediante

procesos oxidativos o de envejecimiento térmico, incrementando el módulo (σ) a altas temperaturas, pero empobreciendo la respuesta elástica y la resistencia a la deformación a bajas temperaturas.

Así también existen los agentes modificadores provenientes de materiales reciclados como el hule molido de neumáticos, quizá el más conocido por la componente ecológica y de reciclado que acompaña a su uso; este tipo de materiales normalmente infieren tenacidad al cemento asfáltico que se requiere modificar, utilizados principalmente para reducir la formación de roderas en pavimentos asfálticos expuestos a climas cálidos, superiores a los 25°C, no teniendo el mismo beneficio a temperaturas muy bajas y generalmente se requiere su uso acompañado de otro tipo de modificadores.

Como bien se indicó en el inciso 2.2 del presente capítulo, los principales agentes modificadores de cemento asfáltico son los de naturaleza polimérica. Los polímeros es un grupo muy amplio de productos ya descritos anteriormente (incisos 2.2.4 a 2.2.6) de los que ya mencionamos a los materiales reciclados (hule molido de neumáticos).

Otro grupo dentro de los polímeros es el látex (polímero tipo II), descrito en el inciso 2.2.5, del cual se puede agregar en su estado líquido, estos polímeros se mezclan fácil y rápidamente con el asfalto. Son ampliamente usados en la producción de emulsiones asfálticas modificadas, que se utilizan para tratamientos de rehabilitación de carreteras y formulaciones de mezclas en frío, tiene mejor comportamiento en bajas temperaturas.

También existen los plastómeros, descritos en el inciso 2.2.6, de los cuales se puede mencionar que aportan una mejora en las propiedades visco-elásticas al cemento asfáltico a modificar, incrementando su resistencia a la formación de

roderas (ahuellamiento), particularmente en climas con temperaturas de moderadas (15°C) a cálidas, no así en temperaturas bajas (menores a 15°C).

Dentro del último grupo de los polímeros están los elastómeros, descritos en el inciso 2.2.4, se puede mencionar que mejora considerablemente el comportamiento visco-elástico del asfalto que modifican, permitiéndole incrementar su resistencia al ahuellamiento en climas cálidos, mejorando su resistencia al *cracking* térmico en climas fríos (con temperaturas inferiores a los 0°C). Adicionalmente, aportan excelentes propiedades mecánicas y elásticas al asfalto modificando, brindando durabilidad. Una característica importante de lo que se mencionó anteriormente es que ofrece un buen comportamiento, tanto a altas como a bajas temperaturas, por lo que se pone especial atención en este tipo de polímeros, que básicamente es la composición de dos homopolímeros: el estireno y el butadieno.

Figura 19. **Elastómeros SBS**

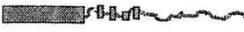
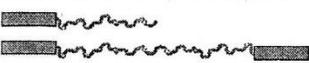
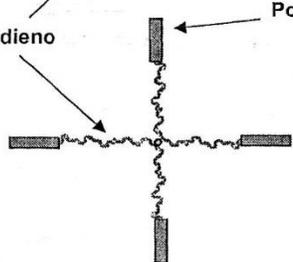


Fuente: MEXICANO, Jesús Alberto. Conferencia: “Asfalto Modificado con SBS sobre losas de concreto hidráulico fracturado”. Cámara Guatemalteca de la Construcción. Guatemala, septiembre de 2014.

2.5.1. Elastómeros de estireno – butadieno

Existen diferentes tipos de co polímeros de estireno- butadieno, los cuales se describen en la tabla VI, cada familia otorga diferentes propiedades en el asfalto, así como afinidad dependiendo de la compatibilidad del asfalto que se esté utilizando. Por ejemplo, los co polímeros SBS radiales infieren altas recuperaciones elásticas torsionales que cumplen sin problema alguno de los requerimientos de las normas de un PG, los co polímeros SBR mejoran la adhesión del asfalto a los agregados y además pueden ser emulsionados fácilmente.

Tabla VI. **Familias principales de co polímeros de estireno- butadieno para modificación de cemento asfáltico**

Copolímeros de estireno-butadieno de bloque parcial.		S-1205 S-1110
Elastómeros Termoplásticos	SB / SBS 	S-4318
Lineal	SBS 	C-500, C-501
Radial	(SB)n  Polibutadieno  Poliestireno 	S-416 S-411 C-401 C-419

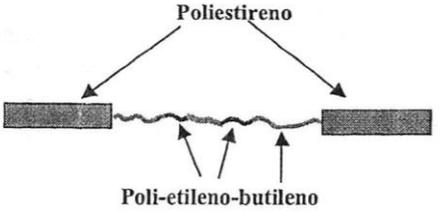
Fuente: HERNÁNDEZ, Gabriel. Informe Técnico: “Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Co polímeros de Estireno-Butadieno”. Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V.

Departamento de Asistencia Técnica y Desarrollo, 2012. 20pp.

Actualmente existen diferentes tipos de fabricación de estos productos y ya existen derivados de estos los cuales se describen en la tabla VII. Estos son los co polímeros SEBS que son materiales que por su naturaleza absorben gran cantidad de aceites nafténicos y aromáticos, componentes del asfalto, esta capacidad de absorción facilita su aplicación cuando se les usa para modificar cementos asfálticos.

Además infieren una elevada estabilidad térmica, se les utiliza principalmente en el sector de selladores para grietas de pavimentos y pistas de aterrizaje que requieren asfaltos de alto desempeño.

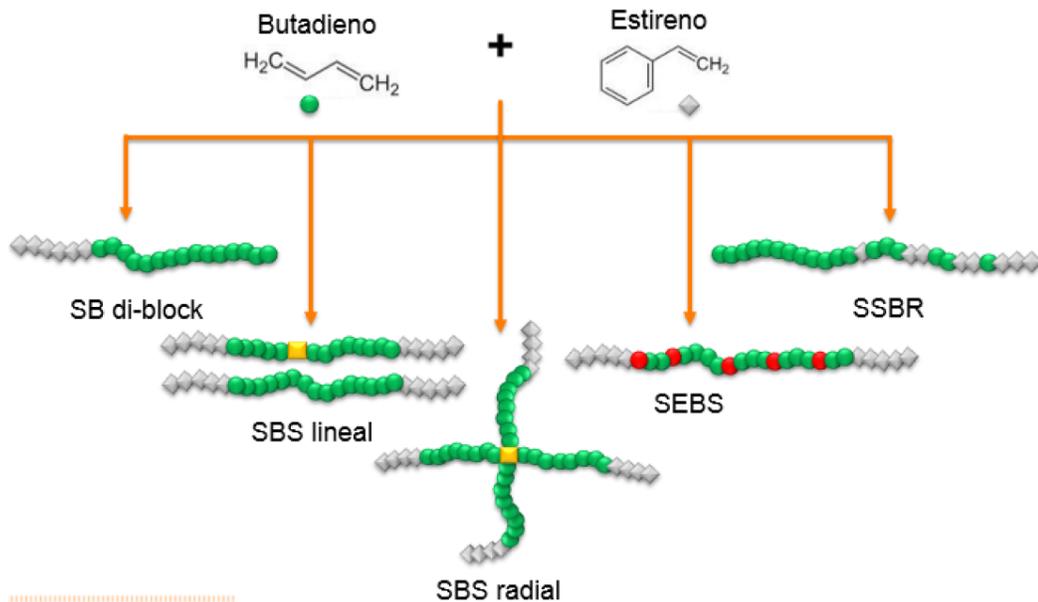
Tabla VII. **Polímero derivado de los co polímeros de estireno- butadieno a través de proceso de hidrogenación**

<p>Copolímeros ternarios de Estireno-Butileno-Etileno SEBS</p>	 <p>Poliestireno</p> <p>Poli-etileno-butileno</p>	<p>C-H6170 C-H6120 C-H6110</p>
---	---	--

Fuente: HERNÁNDEZ, Gabriel. Informe Técnico: “Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Co polímeros de Estireno-Butadieno”. Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Departamento de Asistencia Técnica y Desarrollo, 2012. 20pp.

Como se pudo observar existen cinco tipos de polímeros de estireno-butadieno, como se puede observar en la figura 20, que a continuación se explicará brevemente:

Figura 20. **Co polímeros de estireno- butadieno**



Fuente: MEXICANO, Jesús Alberto. Conferencia: “Asfalto Modificado con SBS sobre losas de concreto hidráulico fracturado”. Cámara Guatemalteca de la Construcción. Guatemala, septiembre de 2014.

- **SB Di- block:** este polímero tiene la capacidad de dispersarse muy fácilmente en el cemento asfáltico, sin necesidad de pasar por un molino, por ello se utilizan en emulsiones asfálticas, ya que puede usarse a temperatura ambiente.
- **SS BR:** elastómeros termoplásticos que ofrecen ventajas en materia de adherencia, utilizados en la modificación de cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y selladores asfálticos.
- **SBS Lineal:** elastómero que aporta a las propiedades mecánicas del cemento asfáltico, de uso sencillo en el proceso de modificación del asfalto, por su configuración lineal, debido a las propiedades mecánicas que mejora, reduce las deformaciones en los pavimentos, debido al tráfico (ahuellamientos).

- SBS Radial: este tipo de elastómero aporta propiedades elásticas al cemento asfáltico, así también incrementa la capacidad de recuperación elásticas del mismo, proporciona temperaturas de servicio mayores a las del asfalto virgen, inclusive a los asfaltos modificados con otros elastómeros, se utiliza en áreas como la impermeabilización, en emulsiones asfálticas, la forma en que se presentan es en bloques o en pequeñas esferas de fácil dispersión.
- SEBS: elastómeros que anteriormente se explicó provienen derivados del co polímero estireno- butadieno, a través del proceso de hidrogenación, se caracterizan por ayudar a los pavimentos a retardar el proceso de degradación del mismo, utilizados en la modificación de asfaltos, mayormente en impermeabilización, sin embargo el proceso de modificación requiere de altas temperaturas.

2.5.2. Elección del elastómero SBS

Hasta este punto, por lo descrito anteriormente, lo más adecuado es elegir un elastómero, debido a que el látex y los plastómeros no ofrecen buen desempeño a bajas temperaturas. Los elastómeros descritos anteriormente se ajustan más a las necesidades de una mezcla asfáltica modificada en cuanto a resistencia al ahuellamiento y al *cracking* térmico, se refiere.

Dentro de los elastómeros, el SBS radial muestra mejores características a la hora de elegir el modificador, por su alta recuperación elástica, sin embargo, se requiere que los cementos asfálticos modificados sean sometidos a una serie de ensayos que permitan conocer las características visco- elásticas de asfalto modificado, para ello existe el protocolo *superpave*, anteriormente descrito en el inciso 2.3, dicho protocolo establece seis ensayos importantes para caracterizar un asfalto modificado, estos son:

- Viscosímetro rotacional (RV) o viscosidad de *Brookfield*, que permite conocer la temperatura de colocación y compactación de la mezcla asfáltica en caliente.
- Horno rotativo de película delgada (RTFO), dicho ensayo simular el estado del asfalto endurecido producto de la oxidación que ocurre durante el mezclado y colocación de la mezcla.
- Horno de envejecimiento a presión (PAV): dicho ensayo oxida aceleradamente la mezcla simulando el envejecimiento severo que sufre una mezcla después de haber estado en servicio por muchos años.
- Reómetro de corte dinámico (DSR): este ensayo mide las propiedades del asfalto a media y alta temperatura.
- Reómetro de viga de flexión (BBR): este ensayo mide las propiedades del asfalto modificado a baja temperatura.
- Equipo de tracción directa (DTT): este ensayo mide las propiedades del asfalto a baja temperatura, simulando el estado de envejecimiento térmico.

El protocolo *Superpave* permite comparar los resultados del asfalto modificado y saber que grado de desempeño hemos alcanzado al modificarlo, este tema de caracterización del asfalto esta fuera de los alcances de investigación del presente trabajo, sin embargo es necesario conocerlo, para la elección del modificador, ya que es un buen tema de investigación la caracterización de los asfaltos modificados con co polímeros de estireno-butadieno.

Planteado lo anteriormente descrito, a manera de ejemplo para conocer el comportamiento de los cinco tipo de co polímeros, se cita los estudios comparativos de un asfalto modificado usando un cemento asfáltico tipo AC-20 de la refinería de Ciudad Madero, México y contenidos de modificadores elastoméricos en proporción 3.5 % peso/peso ambos mezclados en un sistema

de alto esfuerzo de corte, en la que se evaluaron de manera primaria las temperaturas de ablandamiento, penetración a 25°C, viscosidad de *Brookfield* a 135°C y la caracterización reológica: módulo de corte y temperatura máxima de falla reológica (siguiendo el criterio *Superpave* con el método DSR)¹.

Estos resultados se ejemplifican en las siguientes figuras de la 21 a la 26, en la figura 21, se presentan los resultados de temperatura de ablandamiento, donde se observa el SBS Radial presenta el mayor valor de temperatura con una notable diferencia sobre el elastómero SB di-block. En la segunda figura, se presentan los resultados del ensayo de penetración a 25°C, esta gráfica se observa que el el SB di-*block* tiene mayor penetración y el SBS radial tiene la menor penetración de los cinco polímeros.

En la figura 23, se muestra los cinco polímeros evaluados con el ensayo de viscosidad rotacional (RV), observándose que los valores están comprendidos entre 1400 y 1800 centi Poises, cumpliendo adecuadamente con la regulaciones de pavimentos que sugieren un valor máximo de 3000 centi Poises, los mayores valores los representa los SBS Radial y lineal.

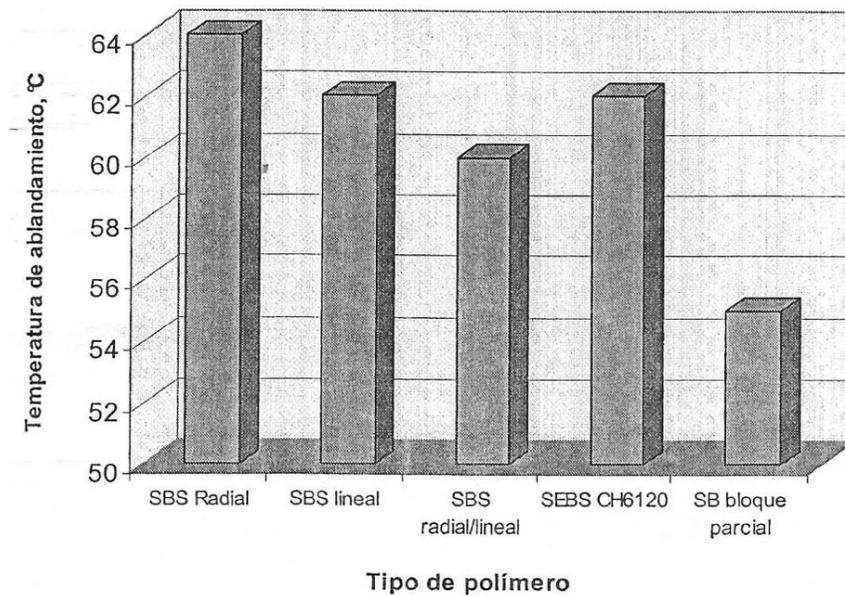
La figura 24 representa los datos de temperatura máxima de falla reológica, esta indica la temperatura donde el asfalto modificado empieza a perder sus propiedades visco- elásticas cediendo ante la deformación y la temperatura, se determina cual el valor de $G'/\text{sen } \delta$ es menor a 1 kilo Pascal (ver figura 16).

Se puede observar que los mayores valores los representan el SBS radial y el SEBS, en dicho análisis la muestra de asfalto modificado de dimensiones

¹ HERNANDEZ, Gabriel. "Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Copolímeros de Estireno-Butadieno". Dynasol Elastómeros, S.A., 2012.

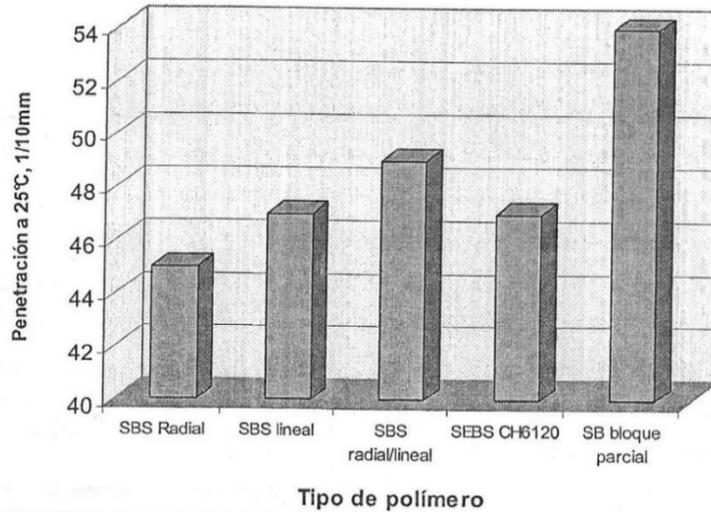
estándar, es sometida a un esfuerzo de deformación controlado y a velocidad constante, la recuperación visco-elástica del asfalto evita el ahuellamiento en la mezclas en servicio, tema importante que se ha tratado en el presente tema, debido a los altos volúmenes de tráfico así como las temperaturas de servicio a la que son sometidas las mezclas asfálticas modificadas.

Figura 21. **Temperatura de ablandamiento de cemento asfáltico**



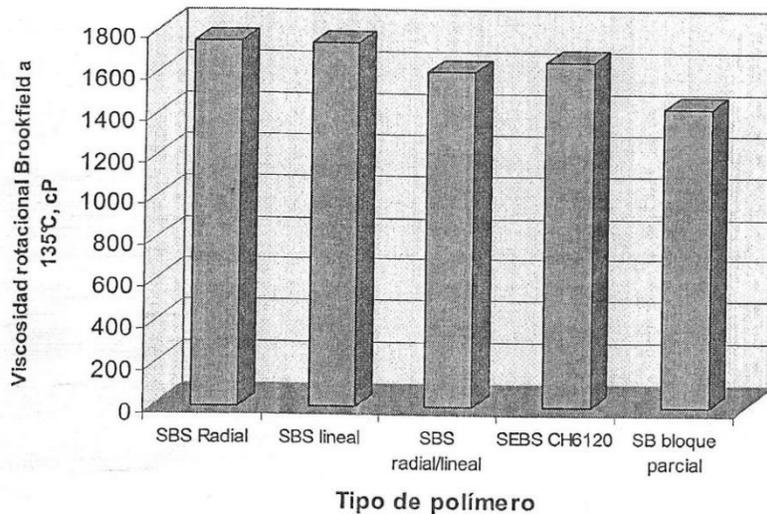
Fuente: HERNÁNDEZ, Gabriel. "Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Co polímeros de Estireno-Butadieno". Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Depto de Asistencia Técnica, 2012.

Figura 22. **Penetración con diferentes co polímeros de estireno-butadieno.**



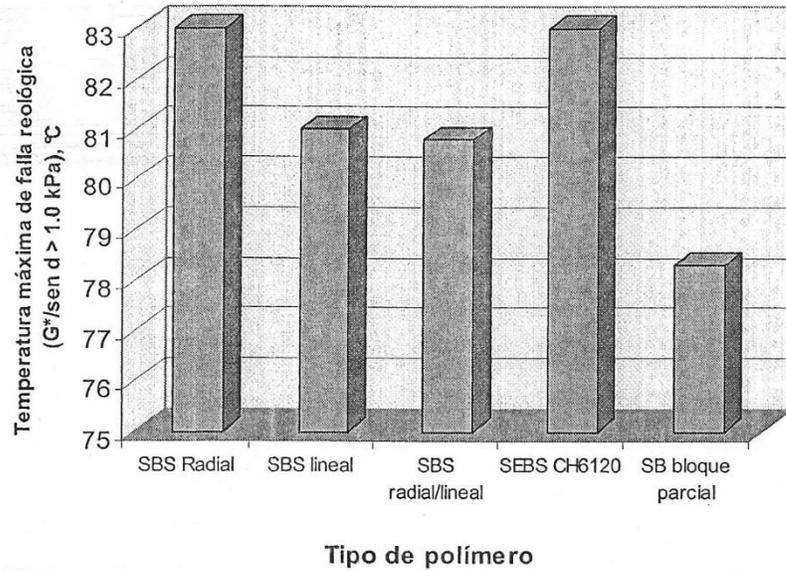
Fuente: HERNÁNDEZ, Gabriel. "Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Co polímeros de Estireno-Butadieno". Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Depto de Asistencia Técnica, 2012.

Figura 23. **Viscosidad rotacional a 135°C de cemento asfáltico modificado con diferentes co polímeros de estireno-butadieno.**



Fuente: HERNÁNDEZ, Gabriel. "Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Co polímeros de Estireno-Butadieno". Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Depto de Asistencia Técnica, 2012.

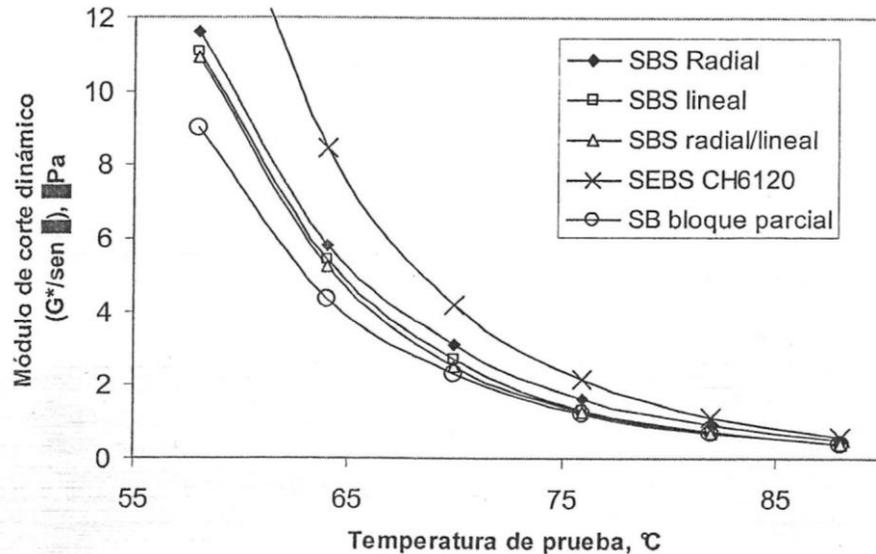
Figura 24. Temperatura máxima de falla reológica, análisis DSR



Fuente: HERNANDEZ, Gabriel. "Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Co polímeros de Estireno-Butadieno". Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Depto de Asistencia Técnica, 2012.

En conclusión, se puede observar que el co polímero de estireno- butadieno SBS radial presenta mejores propiedades frente a los demás co polímeros, esto se confirma en la siguiente gráfica, partiendo de la figura 24, cuando se grafica la relación $G'/\text{sen } \delta$ contra la temperatura de prueba, se observa que el comportamiento visco elástico es mejor en el caso de los SEBS, seguidos por los SBS radial y una notable superioridad sobre los co polímeros SB di *bloque*.

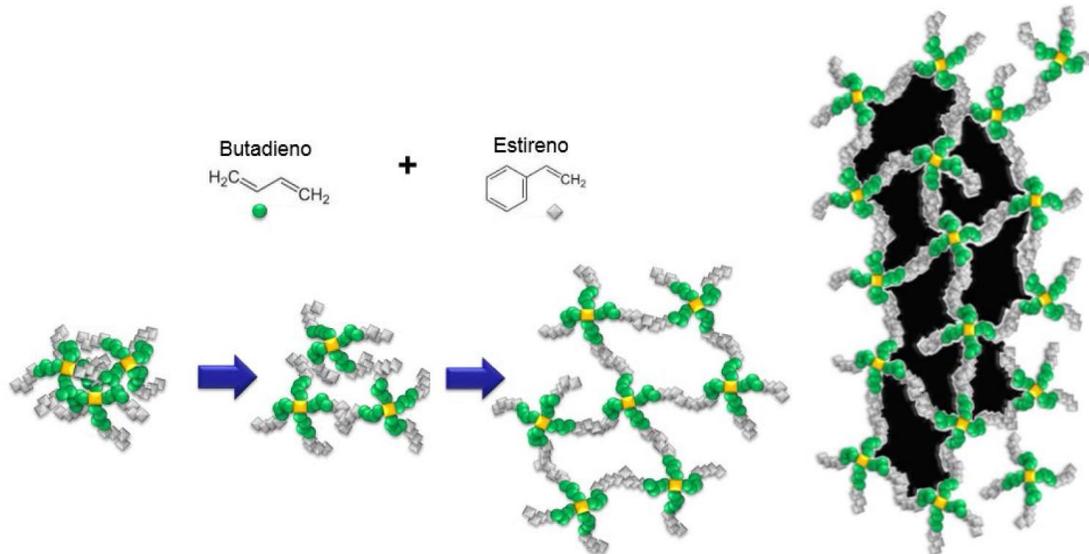
Figura 25. Relación de $G'/\text{sen } \delta$ vs la temperatura de las pruebas



Fuente: HERNÁNDEZ, Gabriel. "Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Co polímeros de Estireno-Butadieno". Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Depto de Asistencia Técnica, 2012.

Las gráficas anteriores sugieren que los co polímeros SEBS presentan resultados competitivos frente a los demás elastómeros, sin embargo, la configuración de los SEBS es lineal, en el caso del elastómero SBS Radial, su configuración de estireno butadieno en forma de malla, como se puede observar en la figura 20, esto ayuda a la hora de modificar el asfalto, creando una red conformada por el elastómero y rellena por el cemento asfáltico, esto se puede representar en el siguiente esquema (figura 26) en la cual vemos como en el proceso de modificación al aumentar la temperatura cada partícula de SBS radial va formando una malla la cual es llenada por el cemento asfáltico, por lo que en el presente trabajo de investigación se utilizará un Elastómero tipo SBS Radial. El proceso de modificación se explicará a continuación.

Figura 26. **Esquema de modificación de un cemento asfáltico**



Fuente: MEXICANO, Jesús Alberto. Conferencia: “Asfalto Modificado con SBS sobre losas de concreto hidráulico fracturado”. Cámara Guatemalteca de la Construcción. Guatemala, septiembre de 2014.

2.6. **Proceso de modificación de un cemento asfáltico**

El asfalto es una mezcla compleja de componentes, como se trató en la sección 1.5 del presente trabajo y en la figura 4 se puede observar dicha composición: asfaltenos y maltenos.

Así también de la fracción malténica se separa en fracciones saturadas, aromáticas y resinas, es en la segunda fracción, la aromática, en donde los elastómeros o co polímeros de estireno- butadieno- estireno, tienen mayor afinidad para modificar el asfalto, para que esto suceda es necesario cuando la agitación de las moléculas las haga separarse entre sí, esto se logra incrementando la temperatura y mezclando el cemento asfáltico, dicho proceso

se puede observar en la figura 26, en donde al incrementar la temperatura la red permite que el asfalto quede embebido dentro del co polímero.

Para llevar a cabo la modificación del asfalto se requiere de un tanque provisto de agitadores y temperaturas entre 170 y 180°C, para formulaciones de mezclas asfálticas con elastómeros SBS se pueden usar entre 3-4 % peso/peso de polímeros en asfalto, dependiendo del grado PG y del tipo de elastómero a utilizar.

Cuando se añaden los co polímeros al cemento asfáltico, las propiedades del asfalto modificado dependen de los siguientes parámetros:

- Tipo de polímero a emplearse ya sean elastómeros o plastómeros.
- Su forma física.
- Naturaleza y grado de asfalto.
- Tipo de equipo.
- Tiempo y temperatura durante el mezclado.
- La compatibilidad asfalto - polímero.

El proceso apropiado de modificación es variable de acuerdo al tipo de polímero, en este caso el co polímero del tipo SBS requieren etapas de molienda y otros como el tipo EVA requieren solamente proceso de agitación.

Las etapas para modificar un asfalto con un co polímero de estireno-butadieno- estireno son de manera general, las más importantes del proceso de modificación:

- Evaluar el asfalto base
- Incrementar la temperatura del asfalto (hasta 180°C)

- Proceso de molienda y/o homogenización asfalto - polímero. Se requiere de un molino de alto corte.
- Finalización de la reacción.
- Control de calidad realizando corrida de pruebas físicas para asfaltos modificados después de 24 horas de reacción.
- Las temperaturas de mezclado son de 170° C a 180° C. Y el tiempo de mezclado varía dependiendo de la dispersión del polímero.

El proceso de elaboración del asfalto modificado se realiza con los siguientes pasos:

- Se transfiere asfalto al tanque donde va a ser modificado.
- Una vez terminado el proceso de transferencia de asfalto, se inicia la agitación, por medio de ejes motorizados provistos de paletas en los extremos dentro del tanque.
- Se somete el asfalto a calentamiento a una temperatura controlada de 180° C \pm 10° C, el calentamiento puede ser por medio de aplicación de calor por la combustión de combustible (bunker) o por resistencias eléctricas, se recomienda la primera opción ya que la segunda no provee la temperatura de manera uniforme provocando temperaturas altas en algunas partes del tanque.
- Se dosifica el polímero por medio de una tolva que esté provista de una malla para tamizar el co polímero, esto evita que material se integre de mejor forma, se agrega al molino a una velocidad de 20 a 25 kg./minuto. Como se puede observar en la figura 27 y 28. Se integra por una compuerta al tanque de molienda.
- Luego de integrado todo el material SBS. El cemento asfáltico debe mantenerse en un rango de temperatura de 180°C a 190°C, al mismo tiempo es agitado por aproximadamente 6 horas en condiciones de agitación constante y en rango de temperatura antes mencionado.

- Después del periodo de dispersión ha transcurrido, se debe observar que el polímero esté incorporado completamente al asfalto.
- El asfalto se debe controlar a una temperatura de 180° C a 190° C por una hora, antes de pasar al proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente.

Figura 27. **Sistema de dosificación del polímero al tanque con molinos de mezclado**



Fuente: Planta de producción de mezclas asfálticas Pavimentos de Guatemala, S.A.

Figura 28. **Dosificación del co polímero SBS al tanque de molienda**



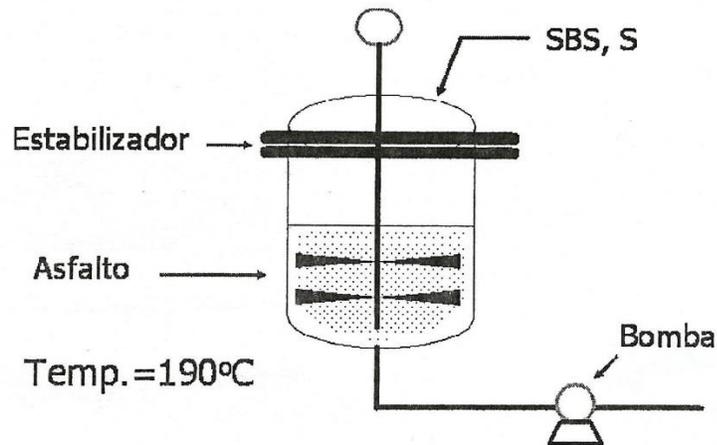
Fuente: Planta de producción de mezclas asfálticas Pavimentos de Guatemala, S.A.

Figura 29. **Tolva de recepción del co polímero con malla incluida**



Fuente: Planta de producción de mezclas asfálticas Pavimentos de Guatemala, S.A.

Figura 30. Diagrama de tanque de molienda cemento asfáltico – co polímero SBS



Fuente: HERNÁNDEZ, Gabriel. “Beneficios de la Modificación de Asfalto Usando Co polímeros de Estireno-Butadieno”. Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Departamento de asistencia técnica, 2012.

Figura 31. Protocolo *Superpave*, valores de comparación

Grado PG		PG 70-					PG 76-					
Temperatura máxima promedio (7 días), °C		< 70					< 76					
Temperatura mínima de servicio del pavimento, °C		-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34
Condiciones de prueba		Limite		Temperatura de prueba (°C)								
Asfalto en estado original												
Temperatura de Flash	230°C min											
Viscosidad Brookfield	3 Pa.s máx	135°C										
Análisis DSR G*/sin delta, 10 rad/s	≥ 1.0 kPa	70					76					
Asfalto envejecido por RTFO												
Pérdida en masa	1% máx	163°C										
Análisis DSR G*/sin delta, 10 rad/s	≥ 2.2 kPa	70					76					
Asfalto envejecido por PAV												
Análisis DSR G* x sin delta, 10 rad/s	≤ 5000 kPa	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25
Análisis BBR S y m, 60s	S ≤ 300 MPa m ≥ 0.3 min	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24
Análisis DTT ξf	1.0% min	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24

Fuente: MEXICANO, Jesús Alberto. “Asfalto Modificado con SBS sobre losas de concreto hidráulico fracturado”. Cámara Guatemalteca de la Construcción, septiembre 2014.

3. MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA

Como ya se ha estudiado en el capítulo anterior, la modificación de una mezcla asfáltica en caliente inicia seleccionando el tipo de modificador, como se expone en la sección 2.5.2, verificar su compatibilidad con el cemento asfáltico, sección 2.4.1, luego añadiendo el modificador al cemento asfáltico; ya modificado, el material entra en el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente modificada, que denominaremos de aquí en adelante: MACM; el proceso de fabricación, transporte y colocación no es distinto al de una mezcla asfáltica en caliente convencional, a excepción del proceso de compactación, que ampliaremos en el capítulo 4.

Una mezcla asfáltica en caliente modificada (MACM) debe ser producida de acuerdo a las especificaciones dadas por el Manual de: Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes, de la Dirección General de Caminos del país, en la Sección 400, en la que abarca métodos de diseño, selección de materiales, parámetros de control de calidad, procedimientos constructivos, entre otros.

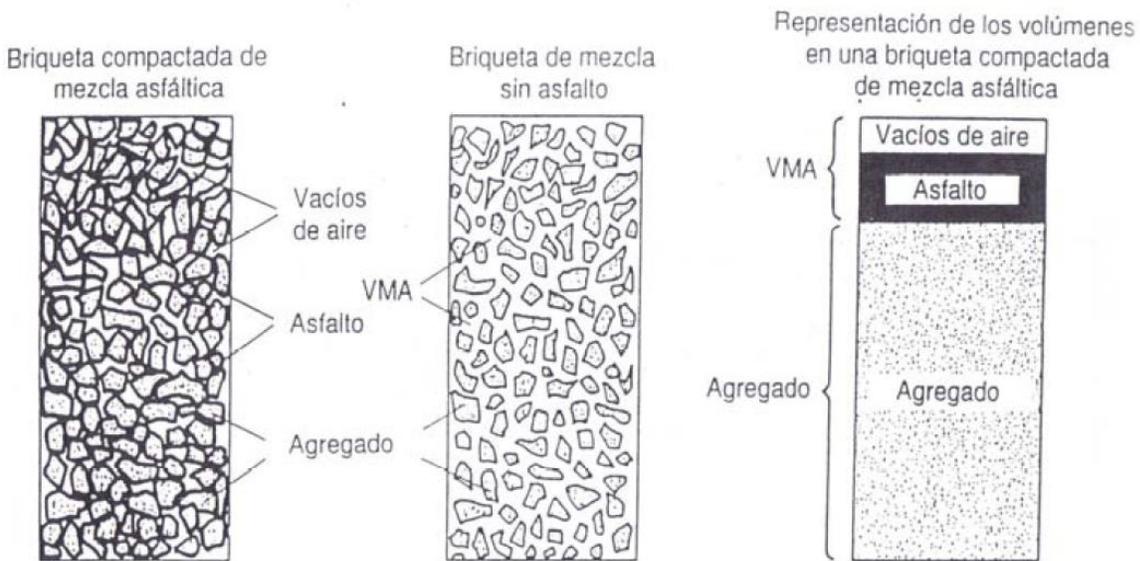
3.1. Definición

Una MACM es la combinación principal de un aglomerante, en este caso el cemento asfáltico con el polímero, agregados finos y gruesos para la conformación de una carpeta de rodadura. Está constituida aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos gruesos y finos, 5 % de vacíos y otro 5 % de cemento asfáltico (AC). Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de

calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El cemento asfáltico y los agregados son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

El contenido de vacíos de aire (VA) es uno de los parámetro de desempeño más importantes de una mezcla asfáltica. El rango adecuado de desempeño de una mezcla se consigue para contenidos de vacíos de 3 % a 5 %. Para contenidos de vacíos bajo 3 % la mezcla es muy propensa a exudar y presentar ahuellamientos. Por otro lado, para contenidos de vacíos superiores a 5 % la mezcla puede sufrir excesiva oxidación, agrietamiento prematuro y desintegración. La composición de una MAC se observa en la figura 32.

Figura 32. **Composición física de una MAC**



Fuente: WULF, Fernando. Tesis "Análisis de Pavimento Asfáltico Modificado con Polímero". Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Valdivia, Chile. 2008.

3.2. Selección del modificador

En el capítulo 2, se definieron los distintos modificadores que existen en el mercado que pueden utilizarse en cementos asfálticos, sin embargo, no todos ofrecen un buen desempeño a los distintos esfuerzos a los que son sometidos durante el servicio de la carpeta asfáltica como por ejemplo: esfuerzos a tensión, ahuellamiento, estrés térmico, volumen de tráfico, de ello se concluyó que los modificadores del tipo elastómeros eran los que mejor desempeño presentaban, debido a su respuesta elástica. Este tipo de polímero es el más utilizado por el efecto de la adición de aumentar su intervalo de plasticidad y disminuir la susceptibilidad térmica. El punto de ablandamiento puede aumentar hasta 20°C, a temperaturas inferiores a 70°C los asfaltos tienen menor penetración, a estas temperaturas se dan deformaciones en las superficies de rodamiento.

Este modificador mejora la viscosidad del cemento asfáltico en relación con la temperatura, pero siendo elástico lo que evita la formación de roderas y el agrietamiento por contracción térmica. La rigidez de estos asfaltos ayuda a soportar los largos tiempos de carga sin deformaciones.

Entre -10°C y + 10°C el elastómero proporciona al asfalto mayor elasticidad sin aumentar la rigidez, los demás modificadores como por ejemplo los Plastómeros que su desempeño elástico disminuye en bajas temperaturas (menores a 15°C) aumentando el riesgo de sufrir “*cracking* térmico” y polímeros como el látex su mejor desempeño es a temperaturas ambiente.

Planteado lo anterior, existen varios tipos de elastómeros descritos en la sección 2.2.4, dentro de los cuales están los elastómeros de Estireno Butadieno (SB) que tienen un mejor comportamiento tiene durante la vida útil de la MACM, como se ve en la figura 15, su resistencia a los esfuerzos de tensión es

considerablemente mejor que los demás modificadores, reflejándose en un menor ahuellamiento. Este tipo de elastómero aporta propiedades elásticas al cemento asfáltico, así también incrementa la capacidad de recuperación elásticas del mismo. En conclusión, el co polímero de estireno- butadieno SBS radial presenta mejores propiedades frente a los demás co polímeros.

3.3. Selección de materiales

Para la elaboración de una MACM, se debe tener cuidado en la selección primeramente del cemento asfáltico y los agregados pétreos (finos y gruesos), a continuación se tratará de sobre estos tres elementos principales.

3.4. Agregados

Son materiales pétreos inertes que sirven para elaborar mezclas asfálticas en caliente y/o mezclas asfálticas en frío (fuera del contexto del presente trabajo) dichos materiales no deben reaccionar químicamente con los conformados por la mezcla (cemento asfáltico y co polímero SBS).

Los agregados se pueden clasificar por su tamaño en:

- Finos
- Gruesos

Así también por su origen:

- Ígneas:
- Sedimentarias:
- Calizas (tienden a erosionarse con el tiempo y el tráfico)

- Areniscas (mejor comportamiento durante el servicio del pavimento)
- Metamórficas

Por su procedencia se clasifican en:

- Naturales
- Artificiales (procesos industriales)
- Gravas trituradas

3.4.1. Agregados finos

Generalmente consisten en piedra triturada con la mayoría de sus partículas menores que 5 mm, como se mencionó anteriormente se toman como agregados finos aquellos que pasan del tamiz No. 4 hasta pasa tamiz No. 200 en un análisis granulométrico.

3.4.2. Agregados gruesos

Consisten en una o en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominantemente mayores que 5 mm (0.2") y generalmente entre 9.5 mm y 25 mm (3/8" y 1"). El asfalto reciclado o triturado es una fuente viable de agregados y una realidad económica. Los agregados deben cumplir con algunas normas para que su uso en ingeniería se optimice. Deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimientos de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la adherencia de los agregados y el cemento asfáltico.

Las características físicas y químicas solicitadas a los agregados se encuentran en el libro: Especificaciones generales para la construcción de carreteras puentes" en la sección 401.03 inciso (a).

3.5. Cemento asfáltico

Del cemento asfáltico ya se ha expuesto en los capítulos anteriores, su origen, forma de obtención, tipos y lo más importante dentro de este trabajo, la modificación del mismo con un copo limero de estireno butadieno estireno (SBS). Como se definió en el primer capítulo un cemento asfáltico tiene ciertas características físicas que le permiten su uso como aglutinante en la elaboración de una MAC.

El cemento asfáltico tiene las propiedades ideales para la construcción de pavimentos cumpliendo las siguientes funciones: impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración de agua y proporcionar una fuerte unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos. En una MAC el cemento asfáltico representa entre un 3 y 6 % del total del volumen de la mezcla, para este caso es el 5 %, la tabla 401-16 del libro de Especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras indica los porcentajes permisibles de cemento asfáltico.

Es importante mencionar que para la elaboración de una MACM o convencional se utiliza un cemento asfáltico del tipo AC-20. Dicha clasificación es una caracterización por su grado de viscosidad a 60°C, normado a nivel centroamericano, por el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.01.22:047 donde se indican los ensayos de control de calidad, especificaciones y caracterización de productos de petróleo y asfaltos. Este reglamento está sustentado en las Normas ASTM o en su equivalente a las Normas AASHTO, según el Anexo A del reglamento. Dichas especificaciones se observan en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Especificaciones para cementos asfálticos por su grado de viscosidad a 60°C**

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	Grado de viscosidad					
			AC-25	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60°C	N s/m ²	D-2170	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	3000 ± 600	4000 ± 800
Viscosidad, 135°C, mínimo	mm ² /s	D.2170	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, mínimo	1/10 mm	D-5	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta, mínimo	°C	D-92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
<u>Pruebas sobre residuo del ensayo de horno sobre película delgada:</u>		D-1754						
Viscosidad, 60°C, máx.	N s/m ²	D-2171	1250	2500	5000	10000	15000	20000
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, mínimo	cm	D-113	100 ^A	100	75	50	40	25

Fuente: SALAZAR, Jorge. Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047). Método y Materiales Volumen I, septiembre 2011.

3.6. Tipos de MAC

En una mezcla asfáltica en caliente (MAC) la proporción de cemento asfáltico es exacta. Las cantidades relativas de asfalto y de agregado determinan las propiedades físicas de la mezcla. Se puede clasificar las mezclas asfálticas en caliente, por la proporción de vacíos, este parámetro suele ser imprescindible para que no se produzcan deformaciones plásticas como consecuencia del paso de las cargas y de las variaciones térmicas, y esta normado por el Método Marshall, que ampliaremos en el capítulo 5, nos define la graduación de los agregados finos y gruesos, en la sección 401.03 del libro de Especificaciones

generales para la construcción de puentes y carreteras, define las graduaciones y clasificaciones de las mezclas, a continuación un breve resumen.

- Mezclas cerradas o densas: La proporción de vacíos no supera el 4 % utilizada mayormente en capas de rodadura, diseñada para resistir abrasión y desintegración por efectos ambientales.
- Mezclas semi-cerradas o semi-densas: La proporción de vacíos está entre el 4 % y el 6 %.
- Mezclas abiertas: La proporción de vacíos supera el 6 %. Utilizadas en capas intermedias o *binder*
- Mezclas porosas o drenantes: La proporción de vacíos es superior al 20 %. Se utilizan en capas de base asfáltica, colocada justo sobre la base granular.

Por el tamaño máximo del agregado pétreo:

- Mezclas gruesas: tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm, como por ejemplo las tipo D (agregado máximo pasa tamiz 25mm o 1") y el tipo E (agregado máximo pasa tamiz 19mm o 3/4"). Utilizadas en carpetas de *binder* o base asfálticas y en espesores de carpeta asfálticas mayores a 3cms de espesor.
- Mezclas finas: denominadas tipo F donde el tamaño máximo del agregado es de 9.5mm o 3/8" (pasa tamiz 1/2" retenido tamiz 3/8"), utilizadas en espesores de carpeta 3cms mínimo y máximo 5cms, en capas de rodadura.
- Micro aglomerados: se denomina también morteros asfálticos, pues se trata de mezclas formadas por un árido fino incluyendo el polvo mineral y un ligante asfáltico. El tamaño máximo del agregado pétreo determina el

espesor mínimo con el que ha de extenderse una mezcla que vendría a ser del doble al triple del tamaño máximo.

Dicha clasificación se puede observar en la tabla IX.

Tabla IX. **Graduación de agregados para MAC (ASTM D 3515)**

Tamaño del Tamiz	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal ⁽¹⁾					
	A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)
	2"	1 ½"	1"	¾"	½"	? "
63.00 mm	100					
50.00 mm	90-100	100				
38.10 mm	-	90-100	100			
25.00 mm	60-80	-	90-100	100		
19.00 mm	-	56-80	-	90-100	100	
12.50 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9.50 mm	-	-	-	56-80	-	90-100
4.75 mm	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2.36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0.30 mm	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0.075 mm	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

⁽¹⁾ El tamaño máximo nominal es el tamaño del tamiz mayor siguiente al tamaño del primer tamiz que retenga más del 10% del agregado combinado. El tamaño máximo es el del tamiz mayor al correspondiente al tamaño máximo nominal.

Fuente: Dirección General de Caminos, Ministerios de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras. República de Guatemala, diciembre 2000.

3.7. Introducción al diseño de una MACM

El objetivo principal del diseño de mezclas asfálticas en caliente modificadas MACM, consiste en determinar una combinación y graduación del cemento asfáltico y agregados que produzcan una mezcla con suficiente asfalto para proporcionar un pavimento durable, que tenga una buena estabilidad para satisfacer las demandas de tránsito sin producir deformaciones o desplazamientos, suficiente trabajabilidad para evitar la segregación al momento

de la colocación, contenido de vacíos lo suficientemente alto, para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas producidas por el paso de vehículos sin que se produzca exudación.

El diseño de mezcla adecuado, es generalmente el que cumple satisfactoriamente los criterios mencionados anteriormente y detallados en la tabla X del libro de Especificaciones Generales para la construcción de Puentes y Carreteras. De acuerdo a esta normativa existen dos tipos de diseños de mezclas asfálticas, basados en la ASTM T245 y en la AASHTO MP-2:

3.7.1. Método Marshall

Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la 2da. Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años cuarenta, se encuentra dentro de las “Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes” año 2001, sección 401 (Pavimentos) y bajo la norma ASTM T245, descritos en la tabla X.

3.7.2. Método *Superpave*:

Basado en el método AAMAS y, el protocolo en la norma AASHTO MP-2, el protocolo *Superpave* contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000, promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de

laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

Tabla X. **Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico**

METODO DE DISEÑO ⁽¹⁾	VALORES LÍMITES	
	MINIMO	MAXIMO
1) <u>MARSHALL</u> (AASHTO T 245)		
• Temperatura de compactación de pastilla para producir una viscosidad de	0.25 Pa-s (250 cS)	0.31 Pa-s (310 cS)
• Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen ⁽²⁾	75	75
• Estabilidad	5,338 N (1,200 libras)	
• Fluencia en 0.25 mm (0.01 pulg.)		
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	8	16
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	8	14
• Relación Estabilidad/Fluencia (lb./0.01 pulg.)	120	275
• Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada ⁽³⁾	3	5
• Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM)	Tabla 401-13	
• Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto		
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	65	78
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	65	75
• Relación finos/bitumen ⁽⁴⁾	0.6	1.6
• Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283		
Resistencia retenida	80 %	
• Partículas recubiertas con bitumen, para definir tiempo de mezclado, AASHTO T 195	95 %	

Fuente: Dirección General de Caminos, Ministerios de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Especificaciones Generales para construcción de puentes y carreteras. República de Guatemala, diciembre 2000.

El método Marshall es el más utilizado y solicitado por las normativas nacionales, solo se aplica a MAC, que usan cemento asfáltico clasificado por penetración o viscosidad y que contienen agregados con tamaño máximo de 25 mm (1 pulgada). Puede ser usado para el diseño en laboratorio o para el control de campo de pavimentos. Los dos datos más importantes del diseño de mezclas del método Marshall son: determinación del porcentaje de vacíos en la mezcla y el ensayo de estabilidad y fluencia Marshall de las muestras compactadas, en el capítulo 5 se describen los ensayos de control de calidad.

3.8. Proceso de fabricación de una MACM

Para producir una MACM y en general, se realiza con una planta de producción, que es un conjunto de equipos mecánicos y electrónicos en donde los agregados son combinados, calentados, secados y mezclados con cemento asfáltico para producir una mezcla que debe cumplir con ciertas especificaciones (ej. Método Marshall). Existen varios tipos de planta de producción: por su capacidad de producción (pequeña y grande), por la disposición de sus equipos: fijas (situada en un lugar permanente) o portátiles (transportada de una obra a otra). En términos generales cada planta puede ser clasificada en dos grandes grupos: plantas de dosificación y plantas mezcladoras de tambor.

El propósito es el mismo sin importar el tipo de planta o la tecnología utilizada, el de producir una mezcla que posea las proporciones deseadas de cemento asfáltico y agregado pétreo, que cumpla con todas las especificaciones. Ambos tipos de planta (de dosificación y mezcladoras de tambor) están diseñadas para lograr este propósito. La diferencia entre los dos tipos de planta es que las plantas de dosificación seca, calientan el agregado y después, en un mezclador separado, lo combinan con el asfalto en dosis individuales; mientras que las plantas mezcladoras de tambor secan el agregado y lo combinan con el cemento asfáltico en un proceso continuo y en la misma sección del equipo lo que ha hecho que sean más versátiles y eficientes.

Las plantas mezcladoras de tambor pueden producir todos los diferentes tipos de mezcla sin ningún inconveniente, en la actualidad la mayoría de las plantas más modernas son del tipo tambor secador-mezclador, por esta razón en las secciones siguientes se hará mayor énfasis en la producción de MACM en este tipo de planta.

Se debe tomar en consideración que previo a la producción, en cualquier tipo de planta se deben seguir ciertos lineamientos generales según sea el caso, esto son:

- Revisión general de la planta
- Establecimiento de tipo de mezcla a producir
- Análisis de los agregados
- Análisis de cemento asfáltico
- Calibraje de la planta
- Revisión de suministros de materia prima
- Revisión de suministros (combustible, gas, lubricantes).
- Disponibilidad de operarios
- Consumo de la mezcla o cantidad a producir.

El proceso de producción, en las plantas de mezcladoras de tambor dan inicio cuando la máquina de carga, por lo regular un cargador frontal llena inicialmente las tolvas del sistema dosificador de agregados, cada tolva (tres) es llenada con un solo tipo de agregado, esto según sea el tipo de mezcla a producir, y posterior al análisis granulométrico de los mismos, posteriormente, se revisa la temperatura del cemento asfáltico y se procede al arranque en la secuencia determinada, según el manual del fabricante de la planta, las bandas transportadoras de cada una de las tolvas empieza a acarrear cada uno de los agregados a la banda colectora, cada una de las bandas está equipada con dispositivos encargados de monitorear automáticamente el peso de cada uno de los agregados, este sistema de control hace las correcciones necesarias para la dosificación de cada uno de los agregados, variando la velocidad de cada uno de los motores de las bandas transportadoras, cumpliendo de esta manera la correcta dosificación de cada uno de los agregados.

En las bandas transportadoras, a medida que pasa cargada, el peso es registrado en toneladas hora, y una lectura es normalmente corregida para dar cuenta de la humedad en el agregado, puesto que los datos del agregado seco son utilizados en laboratorio para establecer el porcentaje de cemento asfáltico que requiere la mezcla.

Actualmente los sistemas de control de las plantas mezcladoras de tambor pueden hacer correcciones de dosificación de agregados, variando la velocidad de las bandas y/o controlando el flujo de cemento asfáltico hacia la parte de mezclado.

Posteriormente, los agregados dosificados son depositados en el tambor secador-mezclador, en éste los agregados, son inicialmente secados, retirándose así la humedad, por lo regular no mayor al 5 %, luego son calentados para seguir el proceso, dentro del mismo tambor es mezclado con el cemento asfáltico de manera continua. Estas acciones se consiguen gracias al movimiento giratorio del tambor. Por último, la mezcla es elevada por el transportador escalonado hacia un depósito (silo) el cual abre y cierra con determinada frecuencia para evitar la segregación, dependiendo de la velocidad de producción; en otros casos se cuenta con el sistema de compensación y almacenaje de mezcla; previo a la descarga hacia los camiones. La temperatura de la mezcla es monitoreada a través de sensores de temperatura ubicados en la salida del tambor, esta debe estar dentro de los límites establecidos.

Hay que mencionar que el sistema de secado se hace posible gracias a la acción de un quemador en el extremo superior del tambor secador-mezclador; también en el extremo inferior del tambor secador-mezclador se encuentra el sistema de extracción de polvos, ya sea de vía seca o vía húmeda, los cuales retiran las partículas finas del tambor y las atrapan para evitar la contaminación.

En las figuras 33 a 38 se ilustran las distintas partes que conforman una planta de producción de MACM.

Figura 33. **Vista general de una planta mezcladora de tambor**



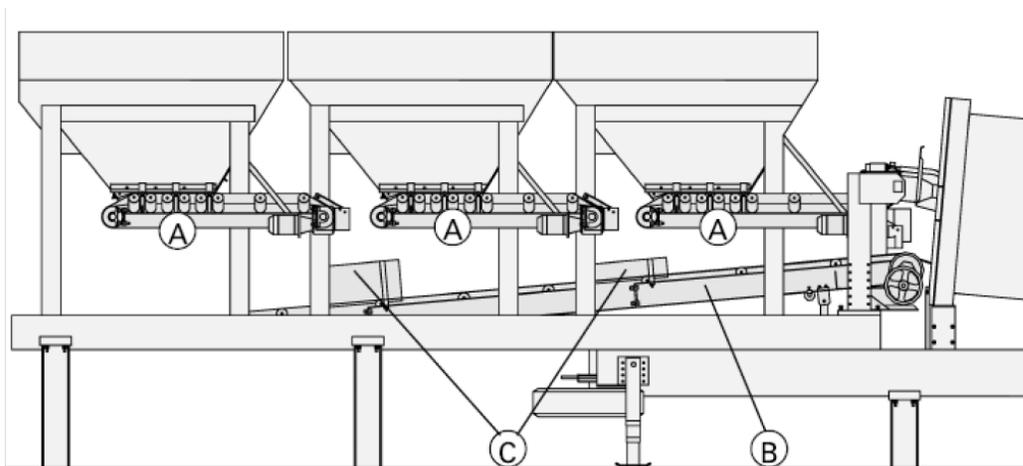
Fuente: http://www.hotmixmag.com/index.php?option=com_content&view=article&id=311:bluegrass-business&catid=56:vol-17-num-1-2012#ixzz3N8ayzM. Consulta: 27 diciembre 2014.

Figura 34. **Tolvas del sistema dosificador de agregados**



Fuente: <http://www.gruasyequipos.com/productos/equipos-de-asfalto/plantas-asfalticas.html>,
fecha de consulta: 27 de diciembre 2014.

Figura 35. **Vista lateral, sistema dosificador**



A. Sistema dosificador B. Banda transportadora C. Células de carga

Fuente: RODRÍGUEZ, Axel Gabriel. Montaje, operación y mantenimiento de plantas para mezcla asfáltica en caliente. Universidad de San Carlos de Guatemala. julio 2008. Pág.22.

Figura 36. **Vista lateral de una tambor mezclador**



Fuente: RODRÍGUEZ, Axel Gabriel. Montaje, operación y mantenimiento de plantas para mezcla asfáltica en caliente. Universidad de San Carlos de Guatemala. julio 2008. Pág.44.

Figura 37. **Conjunto de transportador escalonado y silo de almacenamiento**



Fuente: RODRÍGUEZ, Axel Gabriel. Montaje, operación y mantenimiento de plantas para mezcla asfáltica en caliente. Universidad de San Carlos de Guatemala. julio 2008. Pág.71.

En conclusión, una MACM se fabrica con cemento asfáltico a temperaturas elevadas, en el rango de los 150 grados centígrados, se calientan los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos. La puesta en obra se realiza a temperaturas muy superiores a la ambiente, pues en caso contrario, estos materiales no pueden extenderse y menos aún compactarse adecuadamente.

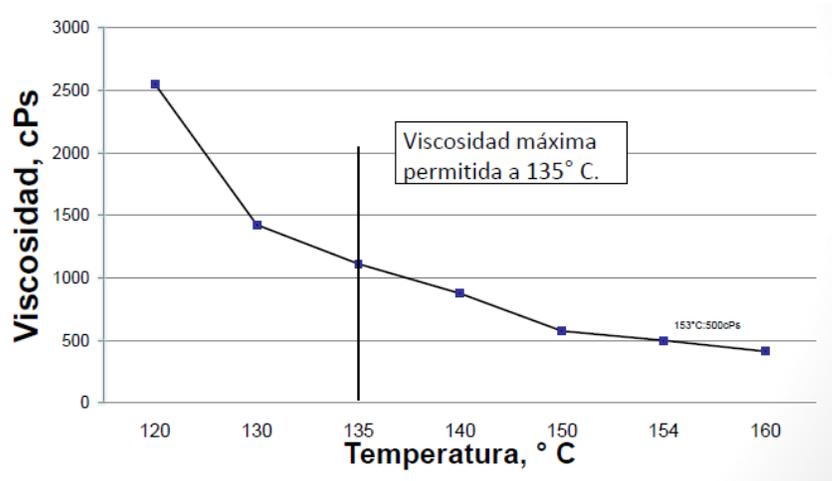
3.9. Importancia de la temperatura

El aspecto de la temperatura en la producción, transporte y colocación de una MACM, es de suma importancia para lograr una correcta integración del AC en los agregados y una buena compactación.

Para la temperatura de mezclado se establece mediante el ensayo del viscosímetro Rotacional de *Brookfield* (ASTM D-1439), para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas asfálticas, se realiza la viscosidad a 135° C, 150° C, 170° C y 190° C. Se grafica la curva de calentamiento entre las viscosidades obtenidas a las temperaturas dadas, se considera temperatura de mezclado la que se obtiene para una viscosidad de entre 170 +/-20 cPs y la temperatura de compactación para una viscosidad de 280 +/-30 cPs, pero nunca a una temperatura menor de 140 °C y la compactación se debe completar antes que la temperatura de la capa alcance los 85° C. los resultados se pueden ver en la figura no. 38 y 39. El centi-poise (cPs) es la unidad de medida de la viscosidad dinámica.

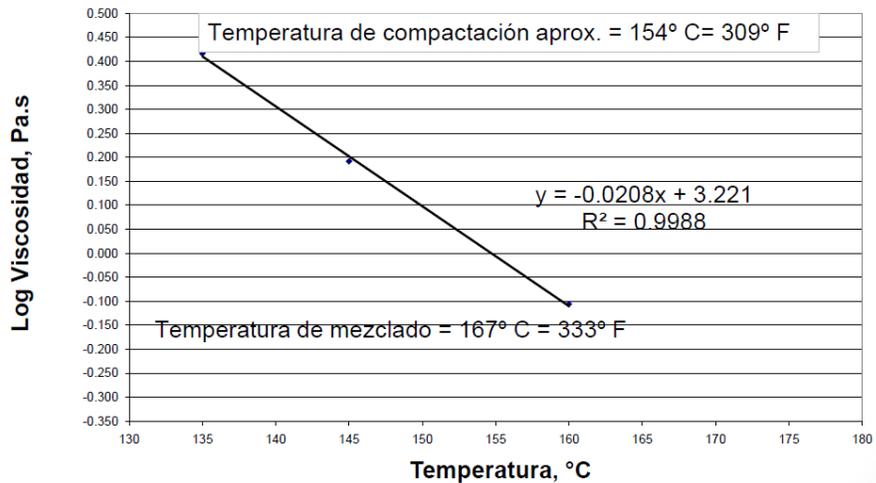
La temperatura de mezclado (167°C) y la de compactación (154°C) ayudan en la obra a obtener los mejores resultados de desempeño de la MAC

Figura 38. **Viscosidad cPs vs. temperatura. manejo de asfalto en planta**



Fuente: GALLARDO, Miguel. Conferencia: Asfalto modificado con SBS sobre losas de concreto hidráulico, septiembre 2014.

Figura 39. **Gráfica viscosidad vs. temperatura MAC modificada con elastómero SBS radial**



Fuente: GALLARDO, Miguel. Conferencia: Asfalto modificado con SBS sobre losas de concreto hidráulico, septiembre 2014.

3.10. Transporte

Luego de producida la mezcla asfáltica en caliente es necesario transportarla hacia el lugar donde será colocada, para ello se requiere la utilización de medios de transporte destinados a la misma, que denominaremos vehículo de transporte de mezcla VTM.

Estos vehículos provistos de una tolva convenientemente preparados para ese objetivo, cubiertos con carpa térmica (lona), libre de contaminantes (aceites, diésel, jabones, entre otros). No deben aceptarse transportes que lleguen a obra con temperatura de la mezcla inferior a 150 °C, como se vio en la sección 3.9, ello con el fin de que la temperatura de la mezcla al inicio del proceso de compactación no podrá ser inferior a 140 °C. Las tolvas metálicas de los vehículos de transporte de mezcla deben estar limpias y lisas, libres de cualquier contaminante, como derivados del petróleo (ejemplo diésel), así también el vehículo deberán cubrirse con lona u otro material que preserve la mezcla del polvo y la lluvia, disminuyendo la pérdida de temperatura durante el trayecto.

Existen varios tipos de transporte de mezcla, los cuales se pueden clasificar en dos grandes grupos: los de descarga superior y los de descarga inferior. Ambos tipos de transporte dependen de la terminadora de asfalto a utilizar en obra y se diferencian por la forma en que se carga el asfalto hacia la terminadora, en el primer caso el camión de transporte descarga directamente a la tolva de la terminadora de asfalto por medio de un sistema hidráulico que eleva la caja de volteo que esta provista de una compuerta posterior abatible de modo que se abrirá cuando se esté elevando, descargando así directamente sobre la pavimentadora.

El segundo tipo de camiones son los de descarga inferior, estos son utilizados para colocar una capa de material directamente sobre el área de trabajo y pueden usarse únicamente con pavimentadoras que tiene un elevador para levantar la MACM desde la base y transferirlo a la tolva.

En cualquiera de los dos casos es importante controlar la operación de descarga sea de forma continua para hacer más eficiente la colocación y de igual forma evitar interrupciones que puedan provocar atrasos, recordando que la temperatura del asfalto debe ser la óptima (no menor a 130 °C) para una buena compactación.

Figura 40. **Vehículo de transporte de mezcla, descarga superior**



Fuente: <http://www.arqhys.com/construccion/fotos/construccion/Camion-de-Volteo-300x218.jpg>

Fecha de consulta 29 de diciembre de 2014.

Figura 41. **Vehículo de transporte de mezcla, descarga inferior**



Fuente: <http://www.arqhys.com/construccion/fotos/construccion/Camion-de-Volteo-300x218.jpg>

Fecha de consulta 29 de diciembre de 2014.

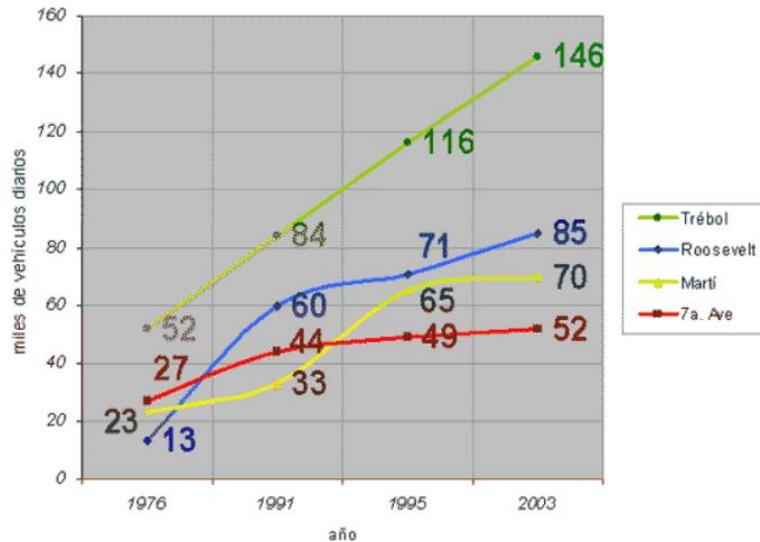
4. REHABILITACIÓN DE UN TRAMO DE CARRETERA CON MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA

En los capítulos anteriores se ha definido las generalidades del asfalto, tipos de modificadores, procesos de producción de la mezcla asfáltica en caliente hasta el transporte de la misma a la obra. En el presente capítulo tratará la rehabilitación de un tramo de carretera, utilizando una MACM con polímeros SBS, el proceso de evaluación del tramo, los trabajos previos a colocar la mezcla asfáltica y el correcto proceso constructivo de la carpeta asfáltica.

4.1. Antecedentes

Debido al creciente volumen de tránsito en la ciudad de Guatemala, las estructuras de pavimento actuales están cediendo bajo las cargas a las que son sometidas a diario, así también la influencia del agua, entre otros., genera la formación de grietas, hundimientos, cueros de lagarto, en general se van deteriorando, lo que requieren trabajos que permitan una mejorar la estructura del pavimento y el confort en el manejo, estos trabajos de rehabilitación deben estar enfocados en la correcta utilización de la inversión inicial y los materiales para prolongar la vida útil de la vías.

Figura 42. **Volúmenes de tránsito en la ciudad de Guatemala**



Fuente: Municipalidad de Guatemala, conteos de tránsito municipal

4.2. Descripción geográfica del tramo a rehabilitar

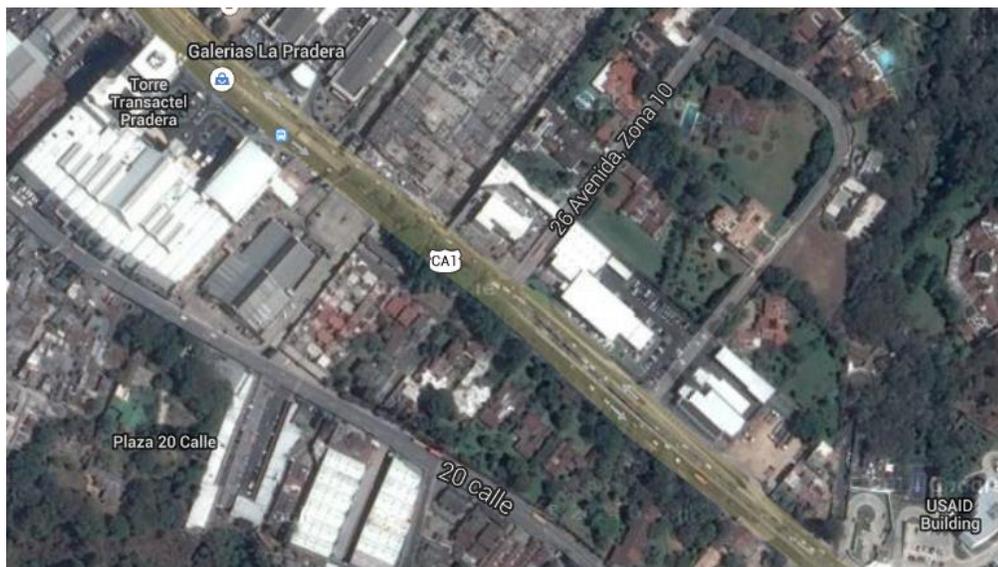
Ubicado en la ciudad de Guatemala y como parte de los trabajos del sector, el tramo a rehabilitar está ubicado sobre el bulevar Los Próceres entre la 25 avenida y el cruce hacia Muxbal, en la zona 10 como se puede observar en la figura 43, dicho tramo es parte de la Carretera CA-1 que conecta el tránsito de dirección Occidente hacia Oriente.

4.2.1. Características climatológicas

El proyecto se encuentra en el área de la meseta central de Guatemala, en esta área de la ciudad las montañas definen mucha variabilidad con elevaciones mayores o iguales a 1,400 metros snm, generando diversidad de microclimas, la región es densamente poblada por lo que la acción humana se convierte en factor

de variación apreciable. Las lluvias no son tan intensas, los registros más altos se obtienen de mayo a octubre, en los meses restantes estas pueden ser deficitarias. En cuanto a la temperatura se tiene en promedio anual una máxima de 25°C, mínima de 10°C y la media anual de 15°C por lo tanto, en esta región existen climas que varían de templados y semifríos con invierno benigno a semi cálidos, veranos de carácter húmedos y semi seco.

Figura 43. **Tramo a rehabilitar Bulevar Los Próceres**



Fuente: Google Earth, fecha de consulta: 07 de marzo de 2015.

4.2.2. **Zona de Influencia**

Para el año 2011, circulan 75,000 vehículos diariamente² con una velocidad máxima de 70 kms/hora y con un área de influencia de las zonas 9, 10, 13, 14 de

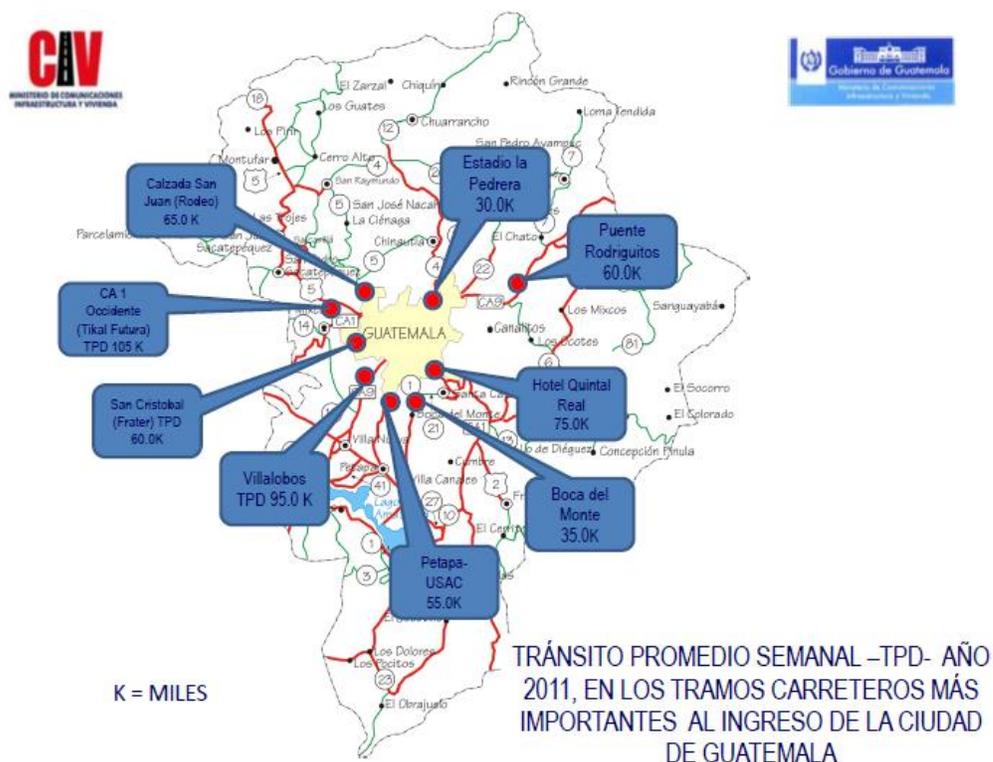
²: Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda, Plan estratégico de movilidad en la ciudad de Guatemala, 2011.

la ciudad de Guatemala, como se puede ver en la figura 44. Para el año 2015, se tienen conteos en horas pico de 14,000 vehículos (7,000 existentes más 7,000 que incrementaron al parque vehicular ese año) en un período máximo de 4 horas (de 5am a 9am, ver figura 45) por lo que interpolando de la siguiente forma se tiene:

$$TPD = 24 \text{ horas} \times \frac{14,000 \text{ vehiculos}}{4 \text{ horas}} = 84,000 \text{ vehiculos}^3$$

Lo que significa un incremento del 12 % en el TPD en dicho sector.

Figura 44. Volúmenes de tránsito de las áreas de influencia



Fuente: CIV, Plan estratégico de movilidad en la ciudad de Guatemala. 2011.

³: Datos de: Prensa Libre, edición miércoles 04 de marzo de 2015.

Figura 45. Tasa de tráfico en tramo a rehabilitar



Fuente: Prensa Libre, edición miércoles 04 de marzo de 2015.

4.3. Evaluación circunstancial del tramo y medidas preliminares

Una evaluación circunstancial, es de suma importancia para conocer el estado actual del pavimento a rehabilitar y consiste la evaluación *in situ* de los daños que presentan en el asfalto existente, clasificación y localización de los mismos, con el fin de evaluar los trabajos a realizar con base al tipo de daño encontrado. El criterio para la evaluación debe ser el siguiente:

- Áreas (superficie) que presentan cueros de lagarto
- Número de grietas transversales
- Promedio de profundidad de surcos (ahuellamiento)
- Evidencia de bombeo en la grietas y bordes del pavimento

A continuación se presenta la tabla XI, evaluación del pavimento existente:

Tabla XI. **Evaluación del pavimento existente**

No.	CARRIL	ESTACIÓN INICIAL	ESTACIÓN FINAL	TIPO DE DAÑO	ANCHO	LARGO	ÁREA
1	Centro	0+ 080	0 + 92	ahuellamiento 2cms de profundidad	1.20	12.00	14.40
2	Izquierdo	0 + 123	0 + 143	ahuellamiento 2cms de profundidad	1.2	20	24.00
3	Izquierdo	0 + 215	0 + 222	ahuellamiento 2cms de profundidad	1.8	7	12.60
4	Centro	0 + 311	0+ 329	ahuellamiento 2cms de profundidad	1	18	18.00
5	Izquierdo	0 + 602	0 + 623	ahuellamiento 2cms de profundidad	1.1	20	22.00
6	Centro	0+ 321	0 + 325	Bache	3	4	12.00
7	Izquierdo	0+ 440	0+ 448	Bache	2	8	16.00
8	Izquierdo	0 + 010	0+015	Cuero de lagarto	3.30	5.00	16.50
9	Centro	0+ 49	0 + 51	Cuero de lagarto	0.70	3.00	2.10
10	Centro	0+ 115	0 + 119	Cuero de lagarto	1.00	4.00	4.00
11	Izquierdo	0+ 190	0 + 199	Cuero de lagarto	1.5	9	13.50
12	Derecho	0 + 285	0+300	Cuero de lagarto	0.5	15	7.50
13	Izquierdo	0+ 403	0 + 407	Cuero de lagarto	2.5	3	7.50

Continúa Tabla XI.

14	Izquierdo	0 + 449	0 + 451	Cuero de lagarto	2	2	4.00
15	Izquierdo	0+ 529	0 + 533	Cuero de lagarto	1	4	4.00
16	Izquierdo	0 + 589	0 + 593	Cuero de lagarto	2	4	8.00
17	Centro	0+ 250	0 + 260	Grieta Longitudinal	0	10	0.00
18	Izquierdo	0 + 499	0+ 506	Grieta Longitudinal	0	7	0.00
19	Izquierdo	0+ 567	0 + 578	Grieta Longitudinal	0	9	0.00
20	Izquierdo	0+ 020	0+ 020	Grieta transversal	7.00	0.00	0.00
21	Derecho	0 + 61	0 + 62	grieta transversal	2.00	0.00	0.00
22	Izquierdo	0+ 481	0+ 481	grieta transversal	3	0	0.00

RESUMEN DE DAÑOS	AREA M2	% DE AREA TOTAL
ahuellamiento 2cms de profundidad	91.00	1.8%
Bache	28.00	0.6%
Cuero de largarto	67.10	1.3%
Grieta Longitudinal	26.00	0.5%
Grieta transversal	12.00	0.2%

area total = 4,994.82 m2 (ver apéndice 1)

Fuente: Evaluación realizada en Bulevar Los Próceres, 25 de mayo 2013. Pavimentos de Guatemala, S.A.

De la tabla XI se puede observar que el daño no rebasa el 2 % del área total del proyecto (ver medición en Apéndice 1), no presenta falla de la base, ni de la sub rasante por lo que no es necesario realizar medidas de deflexión (ensayo de la Viga Benkelman) según la sección 8.3.1 del Manual centroamericano de especificaciones para la construcción de carreteras y puentes regionales, SIECA 2001. De este mismo manual en la tabla 8-3, indica que los tipos de falla encontrados no requieren ningún tipo de reparación previo a la rehabilitación.

4.4. Propuesta de trabajos a realizar

Para la rehabilitación del tramo se proponen trabajos de recapeo de la superficie con una MACM con asfalto SBS. El trabajo consiste en la colocación de una carpeta asfáltica en caliente sobre una capa de ligante asfáltica, cuando el área de rodadura existente, tiene un alto grado de deterioro que impide realizar sobre la misma, labores de mantenimiento rutinario (sección 8.3, SIECA 2001).

Así también no debe presentar deflexiones visibles o fallas de la subrasante, condiciones límite de la vida útil de la carretera, es posible realizar la rehabilitación por medio del recapeo y utilizar una mezcla modificada evitará en ahuellamiento y responderá mejor al incremento de volumen de tránsito en el sector.

Se deben considerar los siguientes trabajos, previos a la colocación de la MACM:

- Fresado de la carpeta de asfalto existente, : este trabajo es necesario para eliminar todas las irregularidades en la superficie de rodadura (ahuellamientos, depresiones y elevaciones) que afecten el IRI de la carretera, conservar en la medida de lo posible la rasante actual del tramo y no restar altura a los bordillos (protección del asfalto) y la pendiente longitudinal y transversal.
- Bacheo mayor (corte de cajuela, extracción de material dañado, relleno y compactación con base granular) en los puntos indicados en la tabla XI, para reestablecer las características existentes de soporte de la base.
- Nivelación con mezcla asfáltica de manera superficial en los puntos donde existan depresiones, puntos de inflexión (PI) en la rasante de la carretera.

- Bacheo menor en las partes erosionadas o donde quede, después del fresado, capas menores a 2cms de espesor del asfalto existente que puedan provocar corrimientos en la nueva capa asfáltica.

El recapeo con MACM se debe realizar con un espesor mínimo de 5 centímetros, ya compactado a fin de rehabilitar zonas con problemas de cueros de lagarto, ahuellamiento y grietas, contribuir al confort de los vehículos y prologar la vida útil de la carretera debido al incremento del tránsito (sección 8.3.1, SIECA 2001), también se deber considerar realizarla con el equipo adecuando que en la sección siguiente describiremos.

4.5. Proceso de rehabilitación del tramo

Definidos los trabajos a realizar en la presente sección se ampliará el proceso de preparación, colocación y compactación de la carpeta asfáltica, que en su mayoría es similar al de una mezcla convencional a excepción del proceso de compactación, en el desarrollo del capítulo ampliaremos.

4.5.1. Maquinaria y equipo

La maquinaria utilizada en los trabajos está de acuerdo al proceso descrito en la sección 4.4, de acuerdo a ello se enlistará a continuación.

- Perfiladora: la función de esta máquina es remover una capa con espesor específico del asfalto existente dañado, en este caso 5cms. La tarea la realiza por medio de un rotor dentado y sensores para verificar el espesor, así mismo una banda que recoge el material perfilado para depositarlo en un vehículo de transporte, en este caso es el mismo para el transporte de

mezcla asfáltica, el sistema de corte y carga de perfilado se puede observar en la figura 46.

Figura 46. **Perfiladora de asfalto y vehículo de transporte**



Fuente: Bulevar Los Próceres, zona 10 Ciudad de Guatemala, 2 de junio de 2013, maquinaria de la empresa Pavimentos de Guatemala, S.A.

- Mini cargador con aditamento de perfiladora: esta maquinaria dentro del proyecto realiza funciones de limpieza, carga y acarreo de material perfilado y con el aditamento de perfiladora de asfalto, realizará las áreas en donde la perfiladora de mayor tamaño no logre trabajar, a continuación la ilustramos.

Figura 47. **Mini cargador con aditamento de perfiladora**



Fuente: Bulevar Los Próceres, zona 10 Ciudad de Guatemala, 06 de junio de 2013 maquinaria de la empresa Pavimentos de Guatemala, S.A.

- **Barredora mecánica:** esta máquina está provista por un rotor con cepillos metálicos y plásticos, designada para las tareas de limpieza después de realizado el perfilado del asfalto existente y para remover el polvo o la suciedad de la superficie (perfilada) antes de colocar la nueva capa de carpeta asfáltica modificada (ver figura 48)
- **Compresor de aire:** la función de este es realizar tareas de limpieza por medio de la aplicación de aire comprimido directamente a la superficie de colocación de la MACM por medio de una barra metálica, para eliminar el polvo residual que la barredora mecánica no logra eliminar y se encuentra en los surcos dejados por los dientes de la perfiladora.

Figura 48. **Barredora mecánica**



Fuente: Bulevar Los Próceres, zona 10 ciudad de Guatemala, 09 de junio de 2013, maquinaria de la empresa Pavimentos de Guatemala, S.A.

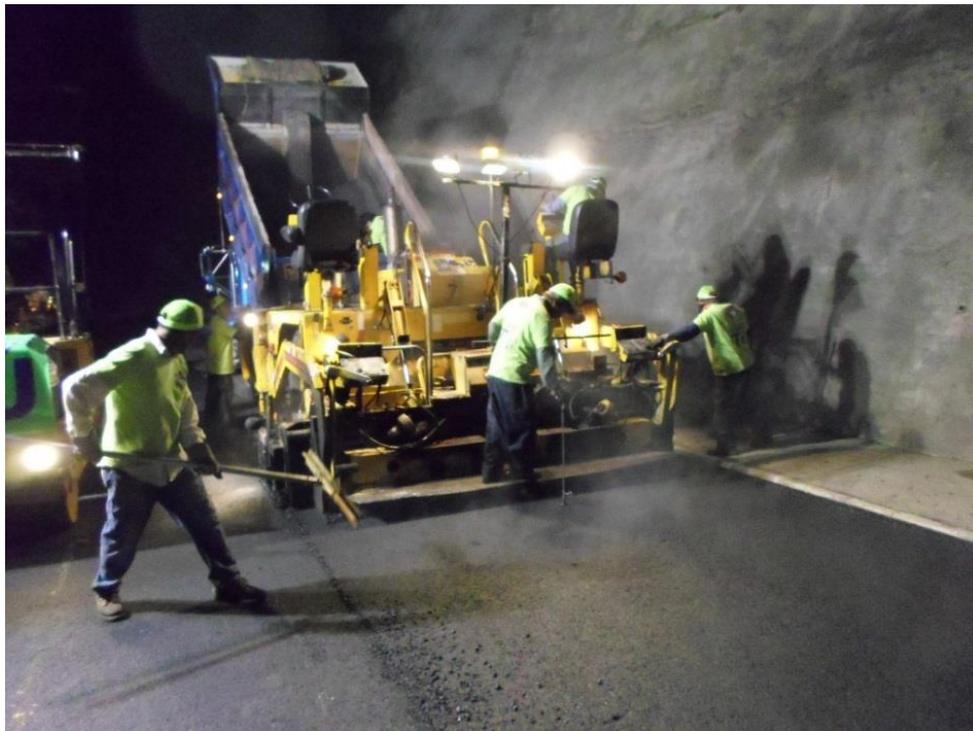
Figura 49. **Compresor de aire para limpieza**



Fuente: Bulevar Los Próceres, zona 10 ciudad de Guatemala, 09 de junio de 2013, maquinaria de la empresa Pavimentos de Guatemala, S.A.

- Terminadora de asfalto: es la encargada directa de la colocación de la MACM directamente sobre el tramo a rehabilitar, existen varios tipos y marcas de terminadoras de asfalto, en este caso se utilizará una terminadora de descarga superior, que es un tractor sobre ruedas provista de una plancha rasante del asfalto acumulado por delante de ella por medio de tornillos sin fin motorizados, así también en la parte delantera tiene una tolva de recepción de la mezcla y un sistema de cadenas encargadas de llevarla hasta los tornillos frente a la plancha, la carga de la mezcla se realizará por medio de vehículos de transporte de mezcla de descarga superior, que se abordaron en la sección 3.10.

Figura 50. **Terminadora de asfalto**



Fuente: Bulevar Rafael Landívar, zona 16 ciudad de Guatemala, 17 de junio de 2013, maquinaria de la empresa Pavimentos de Guatemala, S.A.

- Tanque distribuidor de ligante: este depósito es utilizado debido a su versatilidad y realiza la función de la Pipa distribuidora de ligante, consiste en un depósito provisto de una bomba centrífugadora que bombea la emulsión asfáltica a través de una tubería y una manguera con una barra y boquilla en el extremo de salida, con la cual se realiza la aplicación de ligante en las áreas a asfaltar, la barra tiene una llave de paso que el operador puede regular la salida o flujo de la emulsión, así lograr controlar la tasa de riego. Este tanque puede engancharse a vehículos lo que lo hace bastante versátil en el manejo del proyecto.

Figura 51. **Tanque distribuidor de ligante**



Fuente: Bulevar Los Próceres, zona 10 ciudad de Guatemala, 09 de abril de 2013, maquinaria de la empresa Pavimentos de Guatemala, S.A.

- Compactadora de rodos lisos: está destinada a compactar la MACM a una densidad en la que la relación del contenido de aire en los vacíos no se mayor del 5% del volumen total de la mezcla (ver figura 52) y como se explica en la sección 3.6, la realizará por medio de los tambores metálicos

provistos en su interior de motores que generan vibración, esto ayuda acomodando los diferentes tamaños de agregados dentro de la mezcla, resultando en una carpeta más densa. El rodo está provisto por barras con aspersores de agua que evitan que la mezcla se adhiera al metal y dejan un mejor acabado.

Figura 52. **Compactadora de rodos lisos**



Fuente: Bulevar Los Próceres, zona 10 ciudad de Guatemala, 09 de junio de 2013, maquinaria de la empresa Pavimentos de Guatemala, S.A.

4.5.2. Perfilado del asfalto existente

Como ya se mencionó en la sección 4.4, este trabajo es necesario para eliminar todas las irregularidades en la carretera, que afecten el IRI de la misma, conservar en la medida de lo posible la rasante actual del tramo y no restar altura a los bordillos (protección del asfalto) y la pendiente longitudinal y transversal. Se realizará con el equipo descrito en la sección 4.5.1, la perfiladora, que tiene un

ancho efectivo de 2 m, se trabajará en franjas longitudinales traslapándolas 5 cms entre sí para evitar errores en la profundidad del perfilado, las áreas donde no le sea posible perfilar las realizarán con el mini cargador y el aditamento de perfiladora.

4.5.3. Bacheo menor

Los trabajos de bacheo menor se realizarán en las áreas donde el asfalto, ya perfilado, se encuentre dañado, con grietas muy concentradas o donde el espesor del mismo sea menor de dos centímetros, esto para evitar que cuando se realice la colocación de la carpeta asfáltica y compactación, no existan corrimientos que provoquen el daño del asfalto.

Estos trabajos se deben realizar de la siguiente forma: identificar el área de forma rectangular, remover el asfalto dañado, limpiar el área de polvo y contaminantes, ligar el área con una emulsión asfáltica, colocar el asfalto y compactarlo con el rodo liso hasta que el asfalto este lo suficientemente cerrado, en general son dos ciclos de compactación.

En caso de existir un área con deflexiones notablemente visibles, es necesario realizar un bacheo mayor que consiste en remover el material de base existente hasta una profundidad donde el material no este saturado, luego compactarlo en capas no mayores de 20cms y por ultimo colocar una capa de asfalto de 5 centímetros compactada de forma que se indicó.

Luego de realizados los trabajos previos en el tramo a rehabilitar como lo son el perfilado y bacheo menor se procederá a la colocación de la carpeta asfáltica de la siguiente forma:

4.5.4. Preparación de la superficie

Una mala preparación de la superficie puede reducir considerablemente la vida útil de la carretera, para este caso, la colocación de la MACM sobre el asfalto perfilado previamente, la superficie debe realizarse el bacheo (sección 4.5.3), sello de grietas con material bituminoso y limpia, libre de cualquier contaminante o polvo que impida la buena adherencia de la nueva capa de asfalto.

En un área perfilada se ha eliminado los puntos altos y depresiones de la superficie, se han retirado las áreas con daños severos (bacheo) sustituidas con mezcla asfáltica para luego realizar el proceso de limpieza.

Una superficie de pavimento que ha sido perfilada generalmente está muy empolvada y sucia, cuando el pavimento se ha secado del agua utilizada por la perfiladora generalmente se necesitan múltiples barridas con una barredora mecánica (figura 48) para retirar el residuo en la superficie, también es necesario realizar la limpieza con un compresor de aire logrando así retirar las partículas más finas de polvo (figura 49). Una superficie que no esté limpia impide la adherencia de la nueva carpeta asfáltica y produce corrimientos (grietas y ahuellamiento)

4.5.5. Aplicación de la capa ligante

El material utilizado para el riego es una emulsión asfáltica, consiste en una fina dispersión de partículas de asfalto en agua, estas pequeñas gotas de asfalto se mantiene uniformemente dispersadas en la fase acuosa gracias a la ayuda de un agente emulsificante, generalmente aceites. El tipo de emulsión es una emulsión catiónica CSS-1h de rompimiento lento, según normas ASTM D-2397.

4.5.5.1. Consideraciones

El propósito de la capa de ligante es adherir la superficie perfilada con la nueva carpeta asfáltica, evitar que la humedad penetre en el pavimento y sellar cualquier grieta, esta capa debe ser aplicada por la barra rociadora descrita en el la sección 4.5.1 y figura 51, la boquilla debe estar limpia y libre de cualquier acumulación de asfalto para evitar que el riego sea irregular, además el operador debe colocarla a una altura de un metro de la superficie y un ángulo de 30° sobre la horizontal para realizar el riego. Otro factor importante es la temperatura de aplicación que no debe ser menor a los 5°C ni mayor a los 80°C esto para evitar que las partículas de asfalto y agua se separen antes de realizar el riego.

La uniformidad en la aplicación y el rango apropiado son clave para lograr una capa de liga funcional, esta no debe ser dispareja resultado de una mala operación de aplicación, con excesos en unas áreas y poca en otras provocará exudación en el asfalto y desprendimiento de la carpeta en las áreas con poca emulsión.

4.5.5.2. Cálculo del punto de riego

En una superficie perfilada se encuentran surcos, dejados por los dientes de la maquina perfiladora puede necesitarse una capa de liga adicional a la recomendada para asegurarse una unión adecuada entre las capas, que generalmente es un 20 % más para una superficie que no fue fresada. Debido a que la emulsión asfáltica contiene agua y asfalto existe una diferencia entre el rango de aplicación y el rango residual que es el cemento asfáltico que queda después del fraguado de la emulsión y/o evaporación del agua contenida en la emulsión, para facilitar el cálculo, generalmente una emulsión asfáltica es aproximadamente dos tercios de cemento asfáltico y un tercio de agua.

Para efectos de cálculo del punto de riego se recomienda un rango residual de entre 0.25 – 0.30 litros/m², esto implica un rango de aplicación de 0.37 – 0.45 litros/m² (ejemplo $0.25 \div 2/3 = 0.37$).

Si la cantidad de agua en la emulsión asfáltica no se toma en cuenta cuando se determine el rango de aplicación desde el distribuidor puede que no se logre el grado correcto de adhesión, muy poca ligo no proporcionará suficiente unión entre las capas del asfalto viejo y el nuevo; un excedente puede contribuir al deslizamiento de la capa nueva sobre el asfalto existente y la exudación de la emulsión a través de la carpeta asfáltica.

4.5.5.3. Tiempo de ruptura y fraguado

Cuando se aplica la emulsión asfáltica visualmente es de color café por el contenido de agua y cemento asfáltico, después de un corto período (aproximadamente 30 minutos) las partículas de asfalto dispersas en la fase acuosa coalescen, es decir se juntan restaurando el volumen de asfalto a este proceso se le llama ruptura, la emulsión cambia de color café a un color negro. Luego el agua contenida comienza a evaporarse, la rapidez con que se evapora depende del tipo de emulsión, rango de aplicación, temperatura de la superficie, temperatura ambiente. Cuando el agua se ha evaporado se dice que la emulsión ha fraguado, el tiempo de fraguado depende de las mismas condiciones, este proceso durará entre 1 a 2 horas.

Típicamente se debe esperar todo el proceso de ruptura y fraguado de la emulsión antes de iniciar el proceso de colocación de la MACM, por experiencia y por el tiempo disponible para la operación de colocación es limitado se puede colocar la nueva capa sobre la capa de liga no fraguada y aún sobre una capa de liga de emulsión que no ha roto, sin efectos dañinos sobre el rendimiento del

pavimento, la unión siempre se formará, sin embargo debe tenerse cuidado que los vehículos de transporte de mezcla y la terminadora de asfalto no remuevan la emulsión de la superficie. El calor de la MACM producirá la evaporación del tercio de agua contenido en la emulsión asfáltica.

Figura 53. **Superficie con ligante**



Fuente: Bulevar Liberación, zona 10 ciudad de Guatemala, 09 de junio de 2013, maquinaria de la empresa Pavimentos de Guatemala, S.A.

4.5.6. Colocación de la MACM

La colocación de la nueva carpeta asfáltica se realizará con el equipo adecuado, la terminadora de asfalto descrita en la sección 4.5.1 y figura 50, el fin es colocar la MACM en el ancho, grado, inclinación, espesor deseados y obtener una textura uniforme en la capa, la terminadora de asfalto también deberá ser

capaz de colocar la carpeta de manera que resulte en un mejor recorrido y confort de la carretera.

Existen varios aspectos en los que se tiene especial atención al momento de la colocación que se describe a continuación.

Antes de iniciar el proceso de descarga se deben planificar bien la colocación de la mezcla, definiendo el espesor compactado de la misma, en este caso 5 cms, el sentido en que se realizara la operación el número de carriles a realizar que dependerá del ancho efectivo de la terminadora de asfalto que generalmente esta provista de extensiones hidráulicas en las que se pueden definir anchos mínimos (3.10 m) y máximos (5.25 m), esto se realiza marcando el área con cal o definiendo los carriles en partes iguales. Se debe poner especial atención en la ubicación de los vehículos de transporte de mezcla VTM, ya que estos deben estar ubicados delante de la terminadora y deben permanecer sobre la capa ligante únicamente el tiempo necesario antes y durante la colocación de la carpeta asfáltica.

En la unidad de tracción, la parte principal de la terminadora, se debe tener especial cuidado al momento de recibir la mezcla del vehículo de transporte de mezcla, en este caso el de descarga superior, visto en el la sección 3.10, esta operación debe realizarse de forma continua, evitando que el vehículo de transporte impacte con la parte frontal de la terminadora, el llenado de la tolva no debe exceder la altura de la misma ni debajo de las compuertas frente a las cadenas de alimentación y al momento que la misma arranque el camión debe ir justo enfrente de la tolva con la caja de volteo elevada a un ángulo no mayor de 45° lo cual asegurará el suministro de MACM constante, esta operación se observa en la figura 54, en suministro debe ser constante y evitar fluctuaciones en la misma esto evitará el enfriamiento de la mezcla y una cantidad constante

frente la terminadora de asfalto de la máquina lo que resulta en una capa uniforme

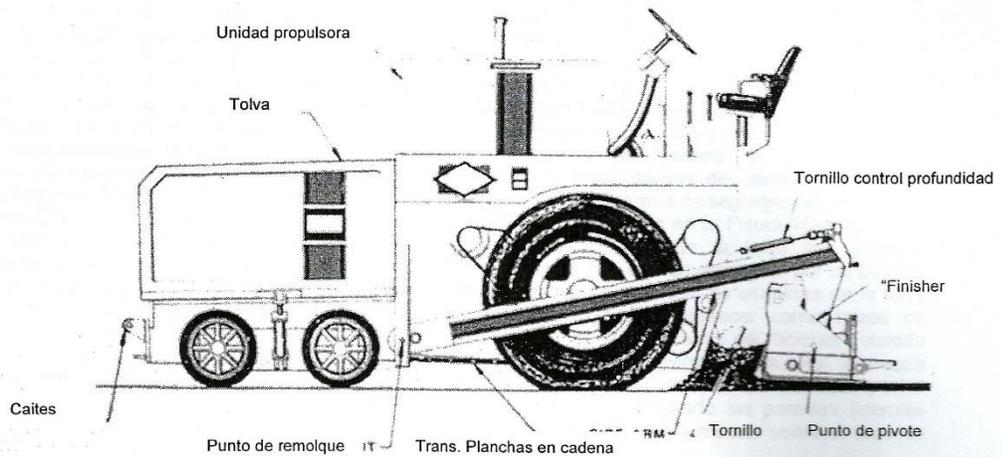
En la figura 55 el *Finisher*, que es la segunda parte principal de la terminadora, consiste en una plancha horizontal con controles de altura, pivotes y alimentadores (tornillos), la plancha debe tener una cantidad constante de mezcla que evite cuando esté rasando la MACM fluctúe en el espesor requerido, una acumulación generará un espesor mayor y la falta de mezcla dará como resultado un espesor menor al requerido.

Figura 54. **Operación de descarga en la terminadora de asfalto**



Fuente: Ciudad de Guatemala, maquinaria de la empresa Pavimentos de Guatemala, S.A.

Figura 55. Esquema de la terminadora de asfalto



Fuente: Mezcla de asfalto en caliente, Capítulo III Manual de Colocación y Compactación. Pavimentos de Guatemala, S.A., Guatemala 2005.

La unidad del finisher (sujeta a la unidad de tracción) es la que determina el espesor de la capa de asfalto y proporciona la textura inicial a la nueva superficie, además a través del peso y acción vibratora este imparte cierto nivel de densidad al material que está siendo colocado, esta unidad opera bajo el concepto de flotación ya que está unida a la tracción en solo un punto de cada lado de la máquina lo que asegura que en superficies irregulares el Finisher irá a una altura constante siempre y cuando la velocidad y alimentación de la misma permanezcan constantes.

Cuando se inicie la operación de colocación de la MACM, se debe tener en cuenta que los VTM se encuentren en el lugar o al menos el 50 % de los mismos antes de iniciar el proceso, el área debe estar completamente lista, ya que lo que se busca es que en el proceso no existan interrupciones, en caso se inicie la colocación sin que este toda la mezcla, es necesario saber la capacidad de la producción de la planta, la distancia y el tiempo en que tardan los camiones para

que la colocación sea continua y determinar la velocidad de la terminadora de asfalto.

Por ejemplo, para el tramo en estudio, si la planta tiene una capacidad de 200 toneladas/hora, el espesor de la carpeta asfáltica es de 5 cms compactado, el ancho del carril es de 4.50 m, espesor de 5 cms y una densidad de la MACM de 2.45 toneladas/metro³, la velocidad máxima de la pavimentadora se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 & \textit{Velocidad de Descarga} \\
 &= 200 \frac{\textit{tons}}{\textit{hora}} * \frac{1 \textit{ hora}}{60 \textit{ min}} * (4.50 * 0.05) \textit{m}^2 * 2.45 \frac{\textit{tonelada}}{\textit{m}^3} \\
 &= 6.04 \textit{m/min} \\
 &= 6 \textit{ metros /minuto}
 \end{aligned}$$

Verificando el resultado: si el trayecto de la planta al proyecto dura 30min, y la planta despacha un camión cada 6 minutos y la capacidad de cada VTM es de 20 toneladas comparando el tiempo de descarga de cada camión de la siguiente forma:

$$\textit{Tiempo de descarga} = 6 \textit{m/min} * (4.50 * 0.05) \textit{m}^2 * 2.45 \frac{\textit{tonelada}}{\textit{m}^3} = 3.30 \frac{\textit{ton}}{\textit{min}}$$

$$20 \frac{\textit{toneladas}}{\textit{camión}} * \frac{1}{3.30 \textit{ton/min}} = 6 \textit{min/camión}$$

El tiempo de descarga es igual al tiempo de despacho de la planta (o la capacidad de producción de la planta), tomando en cuenta que el tiempo de descarga del camión será mayor debido a que es necesario ubicar cada camión, alinearse e iniciar el levantamiento de la caja de volteo esto incrementa en 2

minutos la operación por lo que la velocidad de descarga de la pavimentadora no debe disminuir con esto aseguraremos que el tiempo de descarga sea mayor al tiempo de despacho de los VTM en planta lo que evitará interrupciones en el proceso.

Por último, el operador de la terminadora de asfalto ubicado en la parte del Finisher controlará directamente el espesor por medio de los tornillos de control de espesor, que son manijas que mueven o rotan alrededor de sus puntos de pivotes permitiendo bajar o subir la plancha del Finisher, a medida que la mezcal pasa bajo la plancha del Finisher este flota sobre la mezcla, estableciendo el espesor de la capa y la textura del material, así como dando una compactación inicial a la MACM.

El operador revisará el espesor de la capa usando un tornillo o regla que medirá la profundidad de la capa la cual ira graduando girando las manijas de los tornillos de control de profundidad, tomando en cuenta que la reacción del Finisher a estos cambios será gradual y no inmediata, sino en un espacio en que la reacción que permite que el Finisher promedie las variaciones de las fuerzas que actúan sobre él, al momento de colocar la MACM esta posee vacíos que luego serán compactados y reducidos en el proceso de compactación, es necesario pues incrementar el espesor de la capa al momento de colocarla con la terminadora, este incremento es un 15 % más de la altura requerida ya compactada, para este caso es el espesor compactado es de 5cms, la altura de la regla debe estar a 5.7 centímetros ($5 * 1.15 = 5.7$). Cabe mencionar que se recomienda controlar el rendimiento en área de cada VTM colocado esto asegura que el espesor colocado es el indicado.

4.5.7. Compactación de la mezcla asfáltica en caliente

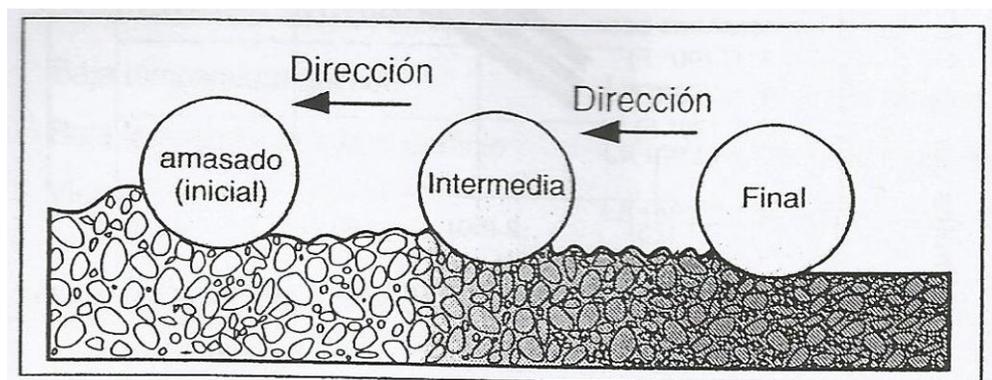
El objetivo de este proceso es lograr reducir los vacíos contenidos en la MACM y llevarla a una densidad óptima para el desempeño en la carretera. Como hay una relación entre los vacíos del pavimento con la estabilidad mecánica, la durabilidad y la permeabilidad al agua, las mezclas asfálticas en caliente se diseñan asumiendo que será compactadas a la densidad especificada, para un pavimento bien diseñado, el contenido de aire en los vacíos debe estar entre el 4 - 6 % (ver sección 3.6). Los factores que afectan la compactación son las características de la mezcla y las características operativas del equipo de compactación.

Existen varios tipos de compactadoras: Rodos lisos, compactadoras neumáticas y rodos mixtos, sin embargo recordando el capítulo 2, sección 2.5.2, la mezcla asfáltica en caliente contiene un modificador del tipo elastómero de Estireno Butadieno (SBS) mezclado al cemento asfáltico y los cauchos naturales y los sintéticos como el SBS y SBR, son la materia prima que compone las llantas de las compactadoras neumáticas, por compatibilidad de materiales y las altas temperaturas de trabajo no es posible utilizar este tipo maquinaria sin evitar que la mezcla asfáltica se adhiera a las llantas, es por ello que se utilizan únicamente la compactadora de rodos lisos descrita en la sección 4.5.1 con un peso de 15 toneladas distribuida en dos rodos.

Para el proceso de compactación es necesario definir el sentido de roleo, seccionándolo en tramos rectos o tangentes, iniciando a compactar del centro de la carretera hacia los bordillo y/o cunetas, el rodo debe ir a una distancia prudente de la terminadora de tal forma que la mezcla asfáltica no pierda temperatura y permita al rodo operar, se recomiendan una distancia de 20 metros detrás de la terminadora.

Los ciclos de compactación dependerán del espesor de la capa, para este caso se recomienda realizar 4 ciclos, un ciclo implica del área a compactar el rodo debe pasar dos veces en el mismo lugar, el primer ciclo debe aplicarse vibración a ambos rodos debido a que el espesor es de 5cms, con el objetivo de consolidar y acomodar los agregados dentro de la capa de asfalto, luego seguir el roleo sin vibración para dar la terminación superficial de la mezcla, luego de terminado todo el proceso de compactación se realiza una última pasada en todo el tramo, llamada también “blanqueo” que elimina cualquier irregularidad en la superficie, el proceso se puede observar en la siguiente figura. La velocidad de compactación deberá estar entre los 3 a 4 km/hora (50- 70 metros/minuto) siendo 3 km/hr la pasada inicial y 4 km/hr la pasada de blanqueo o final. El objetivo es evitar la formación de olas frente al rodo, como se puede ver en la figura 56.

Figura 56. **Compactación**

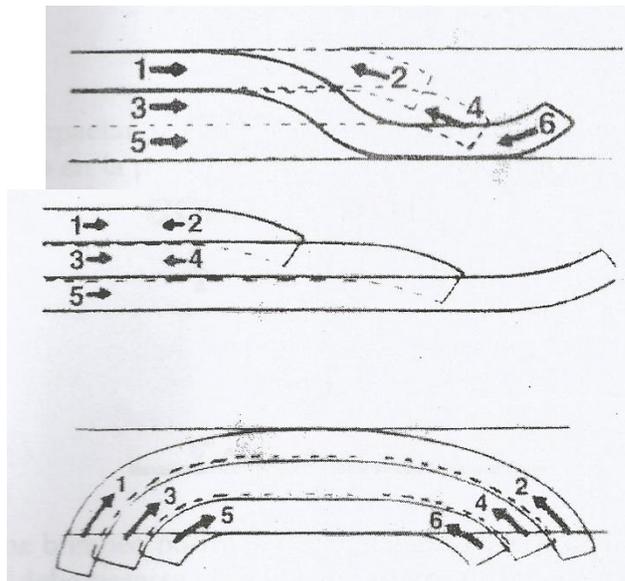


Fuente: *National Asphalt Pavement Association*, “Calidad en la operación del compactador de rodillo” Lanham, EE.UU, 2002.

Las ruedas de la compactadora deben permanecer humedecidas con agua y con jabón neutro, generalmente se diluye dentro de los depósitos una solución jabonosa sin detergentes que provoque una película entre el asfalto y el metal

del rodo evitando adherencias del material, el agua debe ser dosificada de manera continua, generalmente el rodo trae mecanismos aspersores que realizan la tarea de forma automática.

Figura 57. **Patrones de compactación**



Fuente: *National Asphalt Pavement Association*, "Calidad en la operación del compactador de rodillo" Lanham, EE.UU, 2002.

Las formas descritas en la figura 57 ayuda a que la ola que se forma delante del rodo cuando se está compactando sea llevada a un lado de la carretera, si el proceso no se realiza de esta forma, esto afectara el IRI de la carretera reduciendo el confort en el manejo, es por ello también que se busca que el roleo sea de forma longitudinal y continua.

En el caso de las juntas longitudinales, los rastrilleros son los encargados de dejar el acabado ideal para el paso del rodo, extrayendo el agregado excedente como se ve en la figura 58, el rodo pasará primero montado sobre la

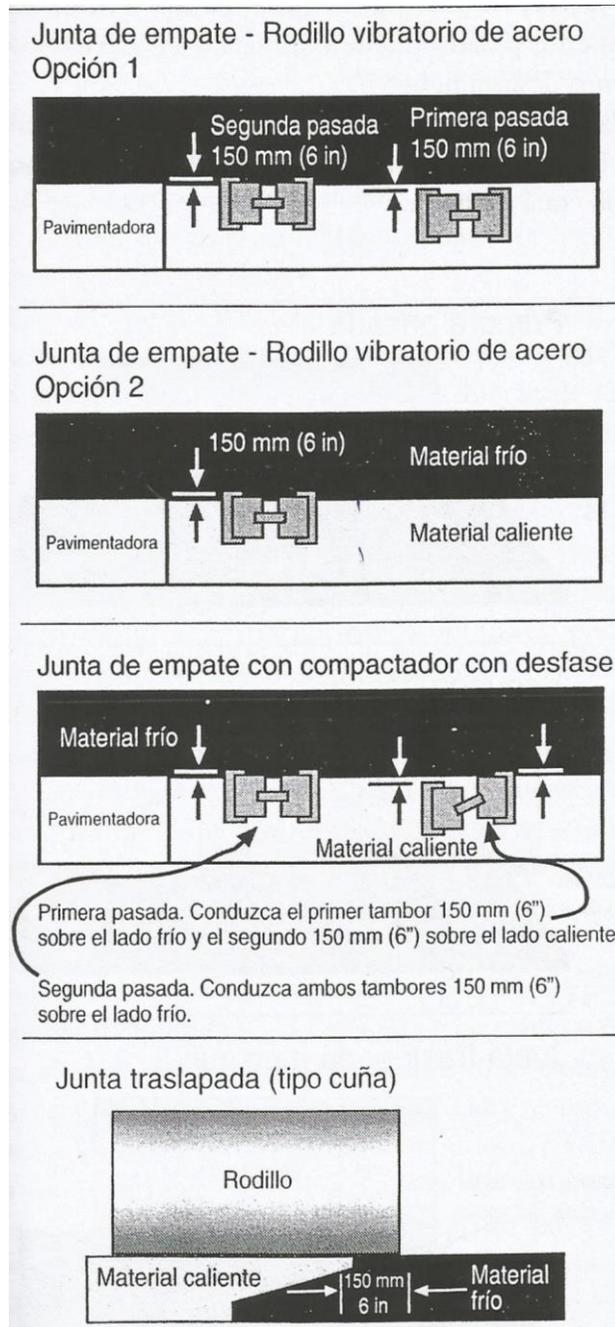
carpeta ya compactada y a 15 centímetros sobre la carpeta sin compactar para luego ya iniciar a compactar el resto del área como se indicó en el esquema de la figura 59.

Figura 58. **Colocación de asfalto y trabajo del rastrillero en la junta**



Fuente: Ciudad de Guatemala, maquinaria de la empresa Pavimentos de Guatemala, S.A.

Figura 59. **Compactación en junta longitudinal**



Fuente: *National Asphalt Pavement Association*, "Calidad en la operación del compactador de rodillo" Lanham, EE.UU, 2002.

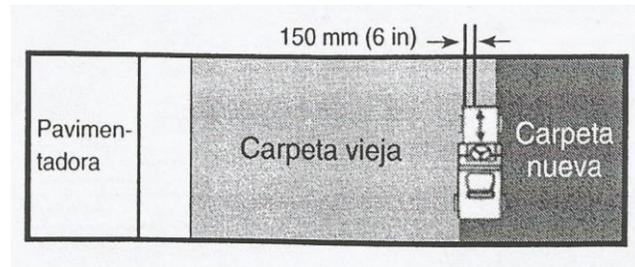
La junta transversal sucede cuando el trabajo en total no puede realizarse en un solo día de trabajo, lo cual requiere interrumpir la colocación día a día, para ello debe dejarse una o varias juntas trasversales una distanciada de la otra, pero paralelas a ellas y perpendiculares a las franjas de colocación, al iniciar el siguiente día de trabajo deben cortarse en ángulos rectos con una cortadora de disco y aplicarse 5 centímetros de emulsión asfáltica sobre la carpeta existente, esto para asegurarse un pegue correcto y evitar aparecimiento de grietas.

De nuevo es importante la habilidad del rastrillero en darle la altura adecuada para evitar que al compactarse la mezcla cerca de la junta esta no baje más del nivel de referencia del asfalto existente, ya que esto generará otro tipo de grieta en el asfalto nuevo.

Es importante realizar los procesos correctamente para evitar problemas con mala compactación en las juntas o en la carpeta en general que pueden provocar problemas como:

- Afectar el IRI de la carretera.
- Corrimiento de la carpeta cuando se excede en la compactación.
- Textura no uniforme cuando el trabajo de los rastrilleros no se realiza a cabalidad.
- Marcas de plancha, cuando la secuencia de la compactación se realiza de forma irregular pueden dejar partes más compactadas que otras, esto se nota con los filos del rodo quedan marcados en el asfalto.
- Muy poca compactación genera vacios en la mezcla los cual acelera el proceso de oxidación del asfalto reduciendo su vida útil.
- Una junta compactada con baja temperatura generará aparecimiento de grietas prematuras.

Figura 60. **Compactación en junta transversal**



Fuente: *National Asphalt Pavement Association*, "Calidad en la operación del compactador de rodillo" Lanham, EE.UU, 2002.

Figura 61. **Juntas transversales**



Fuente: Ciudad de Guatemala, maquinaria de la empresa Pavimentos de Guatemala, S.A.

5. ENSAYOS Y CONTROL DE CALIDAD DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE

Como se expuso en la sección 1.6 a 1.7 los ensayos para caracterizar el cemento asfáltico modificado estos no se tratarán en el presente capítulo trataremos sobre las normas y ensayos que establecen las propiedades óptimas de una mezcla asfáltica en caliente modificada.

5.1. Especificaciones para asfaltos modificados con polímeros

En la sección 1.6 tratamos sobre las propiedades físicas y mecánicas que definen a un cemento asfáltico como la viscosidad y ductilidad; los ensayos que definen las propiedades como por ejemplo el punto de reblandecimiento y su ensayo de caracterización de anillo y bola, sin embargo en el libro Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos del país, Sección 411 se especifican los parámetros que deben cumplir enlistados en la tabla XII, y como se mencionó anteriormente el asfalto utilizado para la MACM es modificado con un Elastómero SBS, del tipo I-D, según la sección 411.02 inciso A, el cual se clasifica al cemento asfáltico modificado con co polímeros de bloque de Estireno, dentro de esta se cuentan las configuración de tipo tri bloques SBS, su uso está estipulado para climas calurosos en los cuales la MACM estará sometida al paso de altos volúmenes de tráfico, con un alto porcentaje de camiones (mayor a 3×10^6 ESAL's).

Tabla XII. Especificaciones de los asfaltos modificados, tipo I

Propiedades	Norma		Clases de Asfalto Modificado Tipo I			
			I-A	I-B	I-C	I-D
Penetración, a 25° C, 100g y 5 s	AASHTO T 49	Min. Máx.	100 150	75 100	50 75	40 75
Penetración, a 4° C, 200g y 60 s	AASHTO T 49	Min.	40	30	25	25
Viscosidad, 60° C, Poises	AASHTO T 202	Min.	1000	2500	5000	5000
Viscosidad, 135° C, centi Stokes	AASHTO T 201	Máx.	2000	2000	2000	2000
Punto de ablandamiento, R & B, ° C	AASHTO T 53	Min.	43.3	48.9	54.4	60
Punto de Flama, ° C	AASHTO T 48	Min.	218.3	218.3	232.2	232.2
Solubilidad en Tricloro etileno (TCE), % ⁽¹⁾	ASTM D 2042	Min.	99	99	99	99
Separación ⁽²⁾ , diferencia R & B, ° C	AASHTO T 44	Máx.	2.2	2.2	2.2	2.2
Ensayo del Residuo del Horno de Película Delgada (RTFOT)						
Recuperación elástica ⁽³⁾ , a 25° C, %	AASHTOT179	Min.	45	45	45	50
Penetración a 4° C, 200g y 60s	AASHTO T 49	Min.	20	15	13	13

⁽¹⁾ Solubilidad del asfalto original.

⁽²⁾ Diferencias de puntos de ablandamiento de la parte superior e inferior de una muestra de asfalto modificado con polímeros, a 162.8° C durante 48 horas según se describe en el Apéndice A de las especificaciones guía para asfaltos modificados con polímeros, elaboradas por la AASHTO-AGC-ARTBA.

⁽³⁾ Deformación recuperable después del ensayo de ductilidad, AASHTO T 51 descrito en el Apéndice B de las especificaciones guías para asfaltos modificados con polímeros, elaboradas por la AASHTO-AGC-ARTBA.

Fuente: Dirección General de Caminos, Ministerios de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. Especificaciones generales para construcción de puentes y carreteras. República de Guatemala, diciembre 2001.

5.2. Cemento asfáltico

A continuación describiremos brevemente los ensayos utilizados de control de calidad el cemento asfáltico modificado:

5.2.1. Viscosidad por viscosímetro rotacional (RV) ASTM-2170

Como se mencionó en la sección 2.5.2 con este ensayo se obtienen dos tipos de resultados; el primero, referente a las temperaturas necesarias para el mezclado y compactación del cemento asfáltico modificado; y el segundo, respecto al manejo del asfalto en planta.

Las temperaturas de mezclado y compactación de la muestra están dadas con base en la viscosidad del cemento asfáltico, en donde se especifica que para mezclarse, éste debe tener una viscosidad entre 1500 y 2000 cPs y con respecto a la compactación deberá estar entre 2500 y 3000 cPs (ver sección 3.9) para tal determinación se realiza una carta de viscosidad-temperatura provista por el proveedor del cemento asfáltico (ver anexo 3), para este caso tenemos una temperatura de mezclado de 155°C y una temperatura de compactación de 141.5°C del AC Modificado.

5.2.2. Penetración ASTM D-5

El ensayo de penetración es otra medida de consistencia. La prueba está incluida en las especificaciones basadas en viscosidad para impedir que sean utilizados los cementos asfálticos que tengan valores inapropiados de penetración a 25°C y 4°C. Es aplicable a materiales con viscosidades dentro de un rango de 0.0036 a 20,000 Pascales por segundo ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), equivalentes a 0.036 a 200,000 Pascales. El resultado para el AC- Modificado lo vemos en el anexo 4, con un valor de penetración de 62, contenido dentro de las especificaciones (40 mínimo – 75 máximo).

5.2.3. Punto de inflamación ASTM D-92

Ensayo conocido como punto de inflamación para materiales bituminosos, define la temperatura más baja a la cual se separan los materiales volátiles del cemento asfáltico y crean un destello en presencia de una llama abierta. Es importante hacer notar que el punto de inflamación no es lo mismo que punto de combustión (temperatura más baja a la cual el cemento asfáltico se inflama y se quema). Se determina para identificar la temperatura máxima a la cual este puede ser manejado y almacenado sin peligro de que se inflame. El aparato utilizado con este fin es llamado Copa Abierta de Cleveland. Es importante conocer esta información para el manejo en planta del mismo, en el anexo 5 vemos el valor del punto de inflamación o Flash Point (en inglés) con un valor de 273.9°C (525°F).

5.2.4. Prueba de asfalto envejecido en horno rotativo de película delgada (RTFO)

Normado por la ASTM D-2872, dicho ensayo caracteriza los efectos de calor y aire en una película en movimiento de asfalto, dicho ensayo simula el estado del asfalto endurecido producto de la oxidación que ocurre durante el mezclado en planta y colocación de la mezcla. El método consiste en colocar una pequeña muestra de cemento asfáltico en un tubo de vidrio el cual es colocado en un rack rotatorio en un horno, la muestra se mantiene en el horno a 163°C durante 75 minutos, al final de la prueba se determina la pérdida de masa y las propiedades del asfalto envejecido. Los resultados de esta prueba se utilizan para determinar las características del asfalto envejecido, para prevenir ahuellamientos y grietas.

Esta prueba se realiza dentro de la metodología Superpave descrita en la sección 3.7.2, para un asfalto PG 76-22, los resultados cumplen con las especificaciones de la figura 31. En el anexo 2 se ven los resultados de pérdida

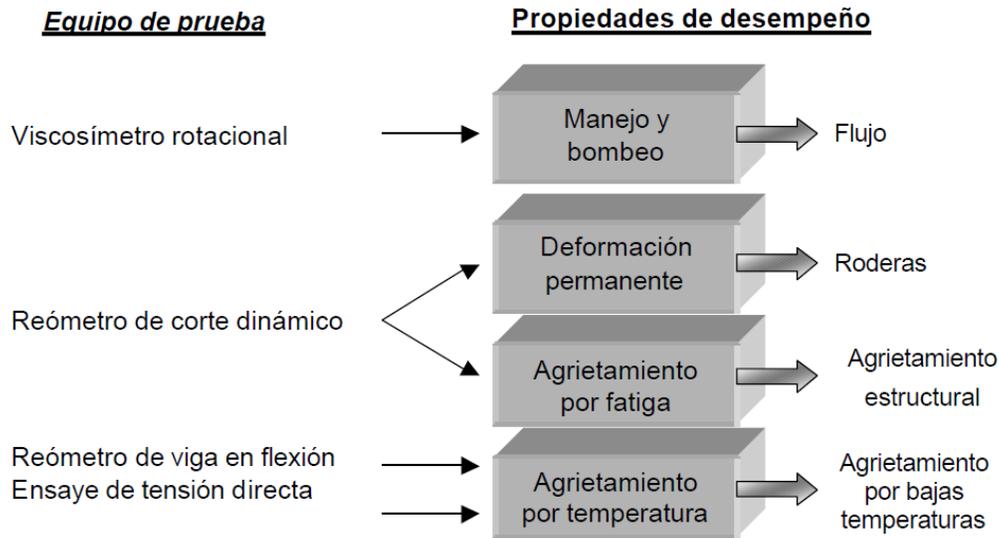
de masa son de 0.672 % menor al valor máximo de 0.8 %, una recuperación elástica de 51 % mayor a la especificación de un 50 % y la penetración 17 dmm mayor del mínimo requerido de 13 dmm.

Las pruebas de pérdida de masa, viscosidad y penetración efectuadas sobre las muestras obtenidas después de los ensayos de RTFO, son usadas para medir la cantidad de aceites volátiles perdidos que indican el posible envejecimiento de la mezcla durante la producción, medir el endurecimiento anticipado del material durante la construcción y servicio del pavimento.

5.2.5. Punto de ablandamiento ASTM D-3695 (Anillo y bola):

Este ensayo proporciona una relación de la dureza del asfalto (duro o blando). Para realizarlo, una esfera de acero es colocada en el centro de un anillo del mismo material, el cual es sumergido en un baño de agua o de glicerina. Se utiliza agua cuando el asfalto posee un punto de reblandecimiento menor a 80 °C y la glicerina es utilizada cuando el punto de ablandamiento es mayor a 80 °C (ver sección 1.6.2.2). La temperatura del baño debe estar controlada y aumentar a una tasa de 5 °C por minuto. En el momento en que la esfera toca la base (25 milímetros por debajo del anillo) la temperatura es tomada siendo este el punto de ablandamiento del asfalto. En el anexo 4 se puede observar que para el AC-Modificado con polímeros tiene un valor de 60 °C (140 °F). En la figura de abajo se hace un breve resumen de las propiedades de desempeño que tienen algunos de los ensayos descritos arriba

Figura 62. **Propiedades de desempeño de los ensayos**



Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Algunos aspectos de la densificación de mezclas asfálticas con el compactador giratorio, Sanfandila, Querétaro, 2003.

5.3. Agregados pétreos

En la sección 3.4 se abordó de los distintos tipos de agregados que componen una mezcla asfáltica, su origen (ígneas, calizas, etc.), por su tamaño (finos, arenas y gruesos) y por su procedencia (naturales, gravas y procesados), en la presente sección abordaremos los criterios y ensayos utilizados en caracterizar este componente de la mezcla asfáltica en caliente modificada.

En la tabla XII y XIV, se describen los ensayos utilizados, normas y valores máximos o mínimos que deben cumplir los agregados para la producción de una MACM en base a la sección 401.03 del libro Especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras.

Tabla XIII. Especificaciones para agregados gruesos

Ensayo	Norma	Valor
Análisis Granulométrico	AASHTO T11	Ver tabla IX
Abrasión (máquina de los Ángeles)	AASHTO T 96	35% máximo
Desintegración al sulfato de sodio (5 ciclos)	AASHTO T 104	12% máximo
Caras fracturadas:		
1 cara fracturada		90% mínimo
2 caras fracturadas		75% mínimo
Partículas planas o alargadas	ASTM D 4791	8% máximo

Fuente: Sección 401.03.a.1 de Especificaciones generales para construcción de puentes y carreteras. Guatemala, 2001.

Tabla XIV. Especificaciones para agregados finos

Ensayo	Norma	Valor
Equivalente de Arena	AASHTO T 176	35% mínimo
Índice Plástico	AASHTO T 90	4% máximo
Graduación no.2 o 3	AASHTO M29	

Fuente: Sección 401.03.a.1 de Especificaciones generales para construcción de puentes y carreteras. Guatemala, 2001.

5.3.1. Granulometría de los agregados sin asfalto

El método utilizado está normado por la ASTM C-136, que es el método estándar para el análisis de agregados por tamizado que determina la distribución del agregado fino y grueso, este material debe estar seco (libre de humedad)

El procedimiento consiste en lavar y secar en horno la muestra de agregados luego son pasados por una serie de tamices, que corresponden a la

graduación de la tabla IX (AASHTO T11), correspondiente a una mezcla tipo E que van desde 1/2" (12mm) hasta el No.200 (5mm) y colocados en una tamizadora que genera vibración para lograr clasificarlos, luego se procede a calcular los pesos retenidos en cada tamiz.

El análisis granulométrico del agregado utilizado en la mezcla asfáltica en caliente es calculado mediante el porcentaje pasante en cada malla de los tamices armados desde el más grueso (12mm) hasta llegar a los más finos que son los pasantes de la malla No.200 (0.5mm), luego con los porcentajes se calcula la curva de distribución granulométrica y se verifica que la curva este dentro de los puntos de control, es decir contenida dentro de las curvas límite que dicta la tabla IX. En la tabla a continuación se observa la distribución granulométrica para la mezcla asfáltica tipo E, utilizada en el proyecto, la curva granulométrica se observa en el anexo 7, en la que se puede ver que la distribución está contenida dentro del límite superior e inferior.

Tabla XV. **Distribución granulométrica agregado grueso**

TAMIZ	PBR	PNR	% Retenido	% Ret. Acumulado	% Pasa	Especificación	
3/4"	99.21	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1/2"	145.20	45.99	6.07	6.07	93.93	90	100
4	419.20	274.00	36.14	42.20	57.80	44	74
8	545.60	126.40	16.67	58.88	41.12	28	58
50	754.80	209.20	27.59	86.47	13.53	5	21
200	803.40	48.60	6.41	92.88	7.12	2	10

Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de Concreto Asfáltico en Caliente, Guatemala 10 de abril de 2013.

5.3.2. Prueba de abrasión por máquina de los Ángeles

Ensayo bajo la norma AASHTO T-96, de amplia utilización internacional, mide la resistencia del agregado a la degradación por abrasión e impacto por medio de la máquina de los Ángeles, el ensayo se realiza a una muestra con la graduación más cercana al diseño de la mezcla, el procedimiento cubre la evaluación de los agregados finos y gruesos.

El procedimiento consiste en colocar 2.5 kg de muestra de agregado fino y grueso con la granulometría aproximada de la mezcla asfáltica en la máquina de los Ángeles junto con 12 esferas de acero para el tamaño de agregado tipo E, durante 17min y 500 revoluciones, luego se tamiza el material por el tamiz no.12 se lava y se seca al horno para obtener un peso constante, el porcentaje de desgaste del agregado se calcula haciendo la diferencia entre el peso original de la muestra y el peso final y dividiéndolo dentro del peso inicial de la misma, este porcentaje no debe exceder el 35 % (ver tabla XIII). Los resultados del ensayo se observan en la tabla del anexo 8, en los que los agregados presentan un porcentaje desgaste de 19.96 %.

Existe factores que afectan este porcentaje como: el origen de la roca, la graduación, la forma de las partículas y la homogeneidad del material (toma de muestra), esta penúltima la veremos en los siguientes incisos.

5.3.3. Desintegración al sulfato de sodio

Este ensayo utiliza la desintegración de agregados por sulfato de sodio o de magnesio, bajo la norma AASTHO T-04 o la ASTM C-88, no debe exceder el 12 %, el procedimiento evalúa la desintegración del agregado cuando es sometido a efectos climáticos, se realiza mediante inmersiones y secado (5

ciclos), luego se tamiza de la misma forma en que fue realizada la muestra, para el caso del agregado de 19mm a 0.5mm se recomienda 1000 +- 10gr de muestra, el porcentaje de desintegración es la pérdida en peso de la muestra inicial y la muestra final. En el anexo no. 9 se observa que el resultado para los agregados de la mezcla es de 0.17 % en los agregados gruesos y en el anexo 10, un valor 0.19 % para los agregados finos, en total suman 0.358 % de desgaste, muy por debajo del máximo permitido.

5.3.4. Gravedad específica ASTM C-127, C-128

Es el método estándar para determinar la gravedad específica y el porcentaje de absorción de agregado fino y grueso. La gravedad específica puede ser expresada como gravedad específica bulk (Gmb), generalmente usada para calcular el volumen ocupado por el agregado dentro de la MACM, porcentaje de vacíos dentro de la misma y la gravedad específica aparente (GSA). La Gmb y el porcentaje de absorción son realizados a agregados que han sido sumergidos en agua durante un periodo de 24 horas y es usado para calcular el cambio de la masa de un agregado debido al cemento asfáltico absorbido en los espacios de poro con las partículas constituyentes, en el anexo 11, se observa el valor de 2.6551 gr/cm³.

5.3.5. Inspección de partículas planas y alargadas ASTM D-4791

La forma de las partículas del agregado grueso influencia las propiedades y resistencia del esqueleto mineral de la MACM, en este método se determina la proporción de partículas planas, alargadas, planas y alargadas y partículas que no son ni planas ni alargadas en agregados gruesos retenidos en el tamiz no. 4, esta norma cubre el procedimiento para evaluar el porcentaje de partículas

planas y alargadas en una muestra de agregado ya sea por conteo o masa. El porcentaje máximo permisible de partículas planas y alargadas es de 8 %, el resultado se observa en el anexo 12, indica un 0.84 % de partículas planas y alargadas.

5.3.6. Equivalente de arena, AASHTO T-176

Esta norma determina el valor de equivalente de arena en suelos y agregados finos, es decir la relación de material arcilloso o fino en una fracción del agregado. Esta prueba se realiza únicamente a agregados que pasan el tamiz No.4 (4.75 mm). El término equivalente de arena se refiere a que la mayoría de suelos granulares así como agregados finos son una mezcla de partículas de arena y generalmente partículas indeseables de arcilla, finos y polvo.

El procedimiento se realiza en un volumen medido de agregado fino y una pequeña cantidad de solución floculante, generalmente sosa caustica (hidróxido de sodio), los cuales son colocados dentro de una probeta de plástico graduada y es agitado para desprender la arcilla que recubren las partículas de arena en el espécimen de ensayo. Entonces el espécimen es “irrigado” usando solución floculante adicional forzando al material de arcilla entrar en suspensión sobre la arena. Luego de 24 horas se procede a tomar la altura de la arcilla suspendida en la solución, esto con la ayuda de la probeta graduada.

El equivalente de arena es la relación de la altura de arena a la altura de arcilla por 100. Para su utilización en pavimentos asfálticos, el agregado debe tener como mínimo un 35 % de equivalente de arena y menos del 15 % de presencia de limo. En el anexo 13 el resultado es de 71.60 % de equivalente de arena.

5.3.7. Índice plástico AASHTO T-90

El ensayo es utilizado para determinar el contenido de agua de suelos o agregados, de acuerdo al cual el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. Para su uso en carreteras, es permisible hasta un máximo de 4% como límite plástico. Idealmente el material utilizado no debe presentar límite plástico, como se puede observar en el anexo 14, el agregado no presenta índice de plasticidad.

5.4. Mezcla asfáltica

Una muestra de MACM preparada en laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento, el análisis está enfocado principalmente las siguientes características y ensayos, así como la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla, estas son:

5.4.1. Contenido de cemento asfáltico en la mezcla

El contenido de asfalto en una MAC está determinado por propiedades predeterminadas (diseño de mezcla) y establecida mediante criterios técnicos y económicos. El contenido de asfalto está definido como el volumen de asfalto no absorbido por el agregado y que forma una película ligante efectiva sobre la superficie del agregado. El contenido efectivo de asfalto se obtiene de restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

El ensayo está normado por la ASTM D2172, la cual describe el método para la determinación cuantitativa de cemento asfáltico en una MACM empleando un extractor centrífugo y utilizando como solvente gasolina, tricloroetileno, cloruro de metileno, sin embargo estos dos últimos requieren de un manejo mucho más cuidadoso por su grado de toxicidad.

El contenido de asfalto se calcula por diferencia de pesos, del agregado extraído, del contenido de humedad y del material mineral en el extracto, este se expresa como porcentaje en peso de la mezcla libre de humedad, el propósito del ensayo es determinar que la mezcla en planta cumpla con las especificaciones del diseño, control de producción, investigación y corrección de valores en planta y laboratorio. La fórmula para calcular el porcentaje de asfalto es la siguiente:

$$Pne = (PBE + Pd) - (Tara + Pa)$$

Donde:

- PB = peso bruto de la muestra de mezcla
- Tara = recipiente utilizado para contener la muestra
- PN = peso neto de la mezcla (PB – TARA)
- Pa = peso de papel filtro antes de la extracción
- Pd = peso del papel filtro después de la extracción
- PBE = peso bruto de material de la mezcla seco sin asfalto
- Pne = peso neto de material de la mezcla seco sin asfalto

El contenido de asfalto está determinado por la fórmula:

$$\% \text{ asfalto} = \frac{PN - Pne}{PN} * 100$$

El porcentaje de asfalto no debe variar en más o menos tres por ciento del valor de diseño. Los agregados obtenidos mediante este método se pueden utilizar para el ensayo de granulometría, en el caso de verificar que la dosificación sea la correspondiente al diseño, en el anexo 7 se observa que el valor obtenido de las muestras es de 5.08 % y en el anexo 15 el valor óptimo de asfalto según el diseño es de 5.15 %.

5.4.2. Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (AASHTO T 166-05)

La gravedad específica de la MACM compactada se define como la masa contenida en un volumen específico de la muestra, esta característica es muy importante en el control de calidad debido a que este valor obtenido en laboratorio se convierte en un valor patrón y es utilizado como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es la adecuada, este se calcula de la siguiente forma:

$$\% \text{ Compactación} = \frac{G_{\text{muestra}}}{G_{\text{mb}}} \times 100$$

Este ensayo permite determinar la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada, el volumen de vacíos de la mezcla compactada en porcentaje, es útil ya que los resultados se pueden relacionar con el contenido de cemento asfáltico de la muestra y la estabilidad Marshall (ASTM D-1559) y demuestran que cuando la temperatura de compactación sea lo más aproximada al valor recomendado mayor será la gravedad específica de la mezcla compactada, debido a que su peso se mantiene constante pero el volumen se reduce al evacuar los vacíos de aire, de los anexos 7 y 15 obtenemos los valores de G_{mb} de la muestra y G_{mb} de diseño, calculando tenemos:

$$\% \text{ Compactación} = \frac{G_{\text{muestra}}}{G_{\text{mb}}} \times 100 = \frac{2.392}{2.406} \times 100 = 99.42\%$$

El método se realiza tomando una muestra de la producción en planta de la MACM con la cual se realizan briquetas en moldes y compactadas a temperatura y número de golpes normado, después de 24 horas, se calcula su volumen y se pesan en aire luego sumergidas en agua y pesadas, luego pesadas saturadas de

agua y con superficie seca. La densidad se calcula por el principio de Arquímedes, el volumen de la briqueta es igual al volumen desplazado de agua, este valor es corregido debido a la temperatura del agua. La gravedad específica de la mezcla compactada o densidad “bulk” está dada por la siguiente fórmula:

$$Gmb = \frac{W_s}{(W_{aire_{sss}} - W_{agua_{sss}}) * K}$$

Donde:

- W_s = peso en aire de la muestra en estado seco
- $W_{agua_{sss}}$ = peso en agua de la muestra en estado sss
- $W_{aire_{sss}}$ = peso en el aire de la muestra en estado sss
- sss = saturado superficialmente seco
- Gmb = gravedad específica de la mezcla compactada (Bulk) en gr/cm³
- K = factor de corrección por temperatura del agua
- Volumen = $(W_{aire_{sss}} - W_{agua_{sss}})$

En el anexo 7 se observa los resultados de cada uno de los valores antes descritos, para la muestra de asfalto producido, esta se debe compactar a temperatura establecida para que los resultados no varíen y no se vean alterados con respecto al diseño.

5.4.3. Gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico en caliente, ASTM D-2041 y AASHTO T-209

También conocida como gravedad específica Rice, debido a su autor James Rice. Este método determina la gravedad específica de una MACM, en su estado suelto eliminando la presencia de vacíos posible, esto corresponde al que

teóricamente se obtendría si fuese posible comprimir la muestra hasta obtener una masa de asfalto y agregados carente de vacíos de aire (100 % de compactación).

La gravedad específica es la relación de masa en un volumen dado de material a una temperatura 25 °C con respecto de un volumen igual de agua a la misma temperatura.

El procedimiento de este ensayo consiste en tomar una muestra de la mezcla asfáltica a temperatura ambiente dentro de un picnómetro lleno a $\frac{3}{4}$ partes del volumen con agua que luego es armando de forma específica con un vibro desairador, que es un conjunto de vibrador con base para el picnómetro y una serie de tuberías de extracción de vacíos de aire conectadas a una bomba de vacíos durante 15 minutos, luego de este periodo se completa el volumen de agua y se toma el peso de la mezcla dentro del picnómetro.

La gravedad específica teórica máxima G_{mm} se obtiene a través del peso neto de la mezcla de aire dividido entre la sumatoria del peso neto de la muestra al aire más el peso del picnómetro y la resta del peso del picnómetro, agua y muestra, esto se resume en la siguiente fórmula:

$$G_{mm} = \frac{p_{ma}}{p_{ma} + p_{pa} - p_{pma}}$$

Donde:

- p_{ma} = peso neto de la muestra en el aire
- p_{pa} = peso del picnómetro completamente lleno de agua
- p_{pma} = peso del picnómetro + agua + muestra de asfalto

- Gmm = gravedad específica teórica máxima

Si el resultado es menor al de diseño indica que algún material {agregado} es muy absorbente, los vacíos quedan fuera de los parámetros e incrementan la demanda de AC. En el anexo 15 vemos que el valor de Gmm de diseño tiene un valor de 2.4951 gr/cm³, esta se obtiene de la gráfica del anexo 17, porcentaje de asfalto versus Densidad Rice, si se compara el resultado con la densidad teórica máxima (DTM) de la muestra de asfalto tiene un valor de 2.5070 gr/cm³, este debe ser similar cuando el porcentaje de asfalto es el óptimo, este ensayo lo explicaremos a continuación.

5.4.4. Determinación del porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica en caliente

Este ensayo normado por la AASHTO T-269, determina un parámetro importante en el diseño de mezclas asfálticas con el cual se puede determinar el porcentaje de AC presente en la mezcla y el contenido de material mineral.

Los vacíos de aire VA, son espacios pequeños que están presentes en los agregados revestidos de AC, en la mezcla final compactada. Es necesario pues que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir que la carpeta se compacte adicionalmente por efecto del tráfico proporcionando espacios donde pueda fluir el asfalto durante esa compactación adicional.

La durabilidad de una MACM es función del contenido de vacíos, a menor cantidad de vacíos, menor es la permeabilidad de la mezcla. Un contenido alto proporciona pasajes a través de la mezcla por los cuales puede entrar el agua y aire, acelerando el proceso de oxidación, por el contrario un contenido bajo de huecos causa exudación del AC, condición donde el exceso de cemento asfáltico

asciende a la superficie de la carpeta asfáltica debido a que no encuentran espacios vacíos donde acomodarse.

Los vacíos se calculan a partir del peso específico de los componentes de la mezcla asfáltica, la cantidad de vacíos presentes es inversamente proporcional a la demanda de asfalto en la mezcla, a mayor cantidad de asfalto la cantidad de vacíos es menor y de manera inversa.

Otros conceptos que se deben conocer para el cálculo de vacíos, se describen a continuación.

5.4.4.1. Vacíos del agregado mineral VAM

Se define como los vacíos internos en los agregados o partículas de agregado en una mezcla asfáltica compactada que incluye vacíos de aire y el contenido de asfalto, se expresa como un porcentaje del volumen total. Cuanto mayor sea el valor de este, más espacio habrá disponible para las películas de asfalto, si la película de asfáltico que cubre las partículas del agregado es más gruesa, la mezcla será más durable. El resultado lo vemos en el anexo 7 de la muestra de asfalto con un valor de 16 % contra un 15.47 % de VAM de diseño, valores similares a lo especificado en la tabla 401-13 del libro de Especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras con un valor del 15 % para una mezcla de agregado máximo de 12.50 milímetros y 5 % de asfalto.

5.4.4.2. Vacíos de relleno asfáltico VRA

Indican el porcentaje de vacíos entre las partículas de agregado que se encuentran llenas de asfalto, es decir el VAM incluye el cemento asfáltico y aire, él VA es únicamente aire, por lo tanto el VRA se calcula al restar los vacíos de

aire de los vacíos de agregado mineral y luego dividiéndolo por el VAM, expresado en porcentaje.

Para el cálculo de VAM es necesario conocer los valores de los ensayos anteriormente descritos: gravedad específica de la mezcla compactada, gravedad específica teórica máxima, porcentaje de asfalto y agregados utilizados en la mezcla y la gravedad específica de cada uno de ellos. Calculado de la siguiente forma:

$$VAM = 100 - \frac{Gmb * \%AG}{Gsb}$$

Donde:

- VAM: vacíos de agregado mineral
- Gmb: densidad de la mezcla asfáltica
- % AG: porcentaje de agregados en la mezcla
- Gsb: gravedad específica bruta del agregado

Los vacíos de aire se calculan con la siguiente fórmula:

$$VA = 100 * \frac{DTM - Gmb}{DTM}$$

Donde:

- VA: vacíos de aire en la mezcla asfáltica
- DTM: densidad teórica máxima de la mezcla asfáltica que se calcula:

$$DTM = \frac{100}{\frac{\%AG}{GSE} + \frac{\%AC}{Gb}}$$

Donde:

- % AC: porcentaje de cemento asfáltico (diseño)
- Gb: gravedad específica del AC
- GSE: gravedad específica efectiva del agregado integrado

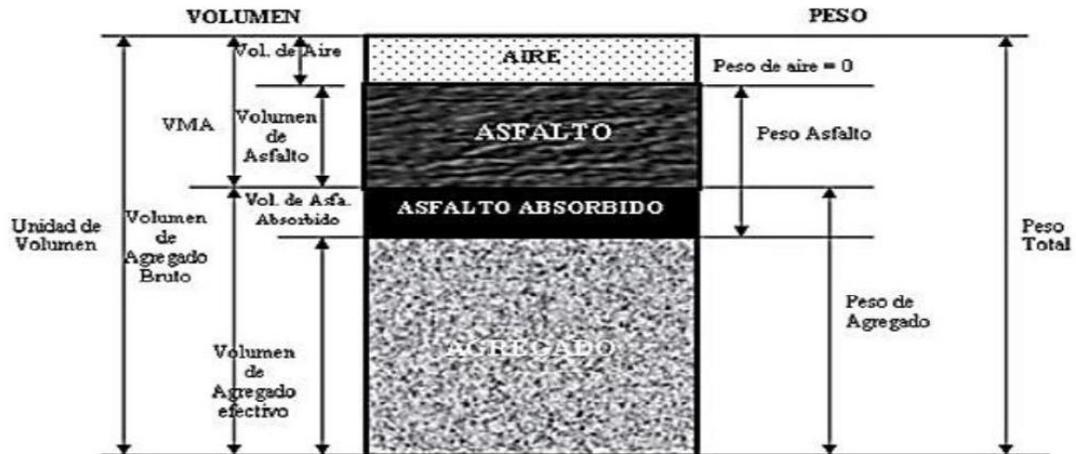
Los vacíos de relleno asfáltico se calcular de la siguiente forma:

$$VRA = 100 - \frac{VAM - VA}{VAM}$$

Los valores de diseño se observan en el anexo 15, con valores de VA de 4.15 %, un VRA de 73.97 %. Los valores de la muestra de asfalto se observan en el anexo 7, el valor de VA de 4.01 % y un valor VRA de 74.14 %, en todos los caso cumplen con las especificaciones del libro: Especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras (VA de 3 % a 5 % y VRA de 65 % a 75 %).

Los resultados de estos ensayos deben cumplir con las especificaciones de diseño, tanto en vacíos (del 3-5 %), también los vacíos de agregado mineral los cuales deben cumplir con un mínimo del 15 % y los vacíos de relleno asfáltico en un rango del 65 al 75 %, todos estos parámetros son proporcionales al contenido de asfalto en la MACM. La representación gráfica de estas ecuaciones se observa en la figura 63.

Figura 63. Composición típica de una MAC



Fuente: *Strategic Highway Research Program SHRP. A – 369 –EE.UU. 1994.*

5.4.5. Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall, AASHTO T-245, ASTM D -6927

Este ensayo es parte del método Marshall descrito en la sección 3.7.1 que es aplicable a MAC que utilizan un AC clasificado por su viscosidad y penetración y que contiene agregados máximos de 25 milímetros o menos, el método puede ser aplicado tanto en laboratorio para determinar cuál es la mejor combinación de agregados y cemento asfáltico, así como para el control en campo de las MACM.

Los datos más importantes de este método son el análisis de la relación de vacíos– densidad descrita en los ensayos anteriores y la prueba de estabilidad-flujo de las muestra de MACM, que se describirá en esta sección.

Este ensayo tiene como objetivo medir la resistencia que ofrece una MACM bajo una carga aplicada y la fluencia mide la deformación bajo esa misma carga.

El valor obtenido de este ensayo, es una medida de carga bajo la cual la muestra cede totalmente o falla, una MACM debe presentar un mayor valor de estabilidad que una MAC, ya que el objetivo de modificar el asfalto es mejorar sus propiedades mecánicas, la estabilidad es la capacidad de una MAC de resistir las cargas de tránsito sin que se produzcan deformaciones, esta propiedad depende principalmente de la fricción interna.

El ensayo consiste en preparar 3 probetas de una muestra de la mezcla asfáltica en planta de dimensiones de 64 milímetros de alto y 102 milímetros de diámetro, colocadas dentro de los moldes normados, apisonados con espátula 25 veces y compactados con el martillo Marshall con 75 golpes en cada lado de la briqueta, este procedimiento se debe hacer cuando la mezcla aún posee una temperatura de entre 137 a 143°C, luego se dejan reposar 24 horas antes de desencofrar las briquetas, ya desencofradas estas se toman un promedio de sus dimensiones.

Las briquetas son sumergidas en baño de maría a una temperatura de 60°C, temperatura representativa de la máxima que experimenta una mezcla en servicio, luego es retirada del baño maría, secada y colocada inmediatamente después en la máquina de ensayo Marshall, que consiste en un dispositivo que aplica una carga sobre la briqueta, aplicada a una velocidad constante de 51mm por minuto hasta que la muestra falle, como se explicó la estabilidad es el valor de carga máxima que la probeta pueda resistir, cede o falla, esta dada en libras.

La fluencia es tomada del lector de la máquina de ensayo, esta mide la deformación bajo la carga que ocurre en la mezcla, medida en centésimas de pulgada y representa la deformación en la briqueta. En el anexo 15, se observa que la estabilidad Marshall del diseño de la mezcla tiene un valor de 2,867 libras y en el anexo 7 el valor de estabilidad es de 2930 libras, ambos valores cumplen

con los requisitos de la tabla 401-12 del libro de Especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras de la Dirección General de Caminos de Guatemala.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y altos valores de estabilidad se consideran demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio y aquellas que tienen alta fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienden a deformarse fácilmente bajo cargas de servicio, los valores de fluencia (*flow*) Marshall de diseño que se observa en el anexo 15 es de 12 (0.01”) y la fluencia de la muestra de asfalto es de 14 (0.01”), ambos valores se encuentran en el rango de 8-16 de la tabla anteriormente mencionada.

Otro valor importante es la relación estabilidad – flujo que resulta de dividir la estabilidad dentro de la fluencia, este valor debe estar en un rango de 120 a 275, en ambos casos se observa que los valores cumplen con la especificación, con valores de 226 lbs/0.01plg para el diseño y 217 lbs/0.01plg para la muestra, según especificaciones de la tabla 401-12 del libro: Especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras de la Dirección General de Caminos de Guatemala.

CONCLUSIONES

Al finalizar el presente trabajo de investigación del uso del tipo de polímero elastómero del tipo estireno butadieno estireno para modificar un cemento asfáltico y utilizarlo en la rehabilitación de un tramo carretero, se dan a conocer las siguientes conclusiones:

1. El proceso correcto para modificar un asfalto requiere de una molienda (molino de alto corte) a altas temperaturas para la correcta integración del elastómero SBS al cemento asfáltico.
2. La elección del tipo de polímero elastómero SBS para modificar influye en la mejora de las propiedades físico- mecánicas de la mezcla, ofrecen un mejor comportamiento bajo cargas y a altas o a bajas temperaturas. Esto se respalda comparando dichas propiedades con la del cemento asfáltico sin modificar; la temperatura de ablandamiento aumenta y el índice de penetración disminuye haciéndolo más rígido, soportando largos períodos de carga sin deformaciones, la capacidad de recuperación elástica mejora (ensayo DSR), su alta viscosidad lo hace más resistente y disminuye el riesgo de fluir a altas temperaturas (ahuellamiento).
3. Para la compactación de una MACM, se debe utilizar compactadora de rodos lisos metálicos, debido a que la compactadora de neumáticos por las altas temperaturas y compatibilidad de materiales con la MACM se le pueden adherir los componentes de la mezcla a las llantas.

4. Todos los componentes de la MACM evaluada, cemento asfáltico, agregados pétreos y sus resultados de laboratorio cumplen con la normativa descrita en el libro: Especificaciones generales para la construcción de puentes y carreteras del año 2001, de la Dirección General de Caminos, descritas en su sección 401 “Pavimentos de Concreto Asfáltico en Caliente”.

5. La modificación de una mezcla asfáltica en caliente se realiza con el objetivo de mejorar las propiedades de desempeño en la carpeta de rodadura y ampliar su vida útil, esto no debe influir en el diseño de espesores de las capas a colocar, es decir, un asfalto modificado no es un asfalto con menor espesor.

RECOMENDACIONES

1. La temperatura de compactación debe ser controlada cuidadosamente en la colocación de una MACM, así evitar que no esté demasiado alta (mayor a 165°C) para que el rodo liso provoque corrimientos en la carpeta y que no sea demasiada baja (menor a 130°C) para evitar que la mezcla esté muy viscosa y difícil de manejar.
2. Es necesario realizar investigaciones con diferentes tipos de polímeros, ya que la elección de estos depende de las condiciones de clima, tráfico y tiempo de las cargas; sin embargo, existe variedad de polímeros que se acoplan a las necesidades del proyecto y mejoran el desempeño de la MACM (ver anexo 1).
3. Llevar a cabo un estudio de la utilización de polímeros reciclados como por ejemplo: el hule molido de neumáticos, polímeros reciclados de partes de computadores, entre otros, con el fin de hacer mezclas asfálticas en caliente ecológicas.
4. Realizar una comparación entre el costo de una mezcla asfáltica en caliente convencional y una mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros, con el fin de establecer si el costo inicial de la MACM extra de agregar el polímero resulta ser más bajo a largo plazo, ya que requiere de menor mantenimiento a mediano plazo que una mezcla convencional, tomando en cuenta que la mezcla modificada no presentará ahuellamientos ni grietas en dicho plazo.

5. Se requiere capacitar al personal de campo en la importancia de cuidar los tiempos de colocación, transporte y temperatura de la MACM, así como de los trabajos previos a la colocación se realicen de la forma correcta, para evitar que una mala colocación se reflejen en fallas en la carpeta asfáltica y reduzcan la vida útil del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. SANCHEZ, Jorge. Curso: “*Mezclas Especiales Con Asfaltos Modificados*”, Cámara Guatemalteca de la Construcción, 21 octubre de 2008. 122pp.
2. HERNÁNDEZ, Gabriel y RESENDIZ, Rodrigo. Informe: “*Caracterización y pruebas de modificación en asfalto de Guatemala con SOLPRENE 411*”, Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Departamento de Asistencia Técnica y Desarrollo, 2012. 8pp
3. MIRO, Jorge. “Metodología para la caracterización de cemento asfálticos asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro”. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona, España, marzo 1994.
4. HERNÁNDEZ ZAMORA, Gabriel. Informe Técnico: “*Beneficios de la modificación de asfalto usando Co polímeros de estireno-butadieno*”. Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Departamento de Asistencia Técnica y Desarrollo, 2012. 20pp.
5. CORONADO ITURBIDE, Jorge. Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos. Secretaria de Integración Económica Centroamericana, noviembre 2002.

6. WULF RODRIGUEZ, Fernando Andrés. “Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero”. Director: COLLARTE CONCHA, Luis. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencia de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Valdivia, Chile, 2008.
7. AVELLAN CRUZ, Martha Dina. “Asfaltos modificados con polímeros”. Director: CASTAÑEDA LEMUS, Sergio Vinicio. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Guatemala, marzo de 2007.
8. GUERRERO ÁLVAREZ, Andrés. Informe Técnico: “Procedimiento sugerido para la producción de asfalto modificado con SBS a nivel planta”, Dynasol Elastómeros, S.A. de C.V. Departamento de Asistencia Técnica y Desarrollo, 2013.
9. DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS, Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes. Ingenieros Consultores de Centro América, S.A. República de Guatemala, diciembre 2000.
10. COX TUCH, Pablo Missael. “Manual de Laboratorio para estudiantes para el desarrollo de Ensayos en concreto asfáltico en caliente”. Director: YON CHAVARRÍA, Wuillian. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Guatemala, marzo de 2015.

APÉNDICE

Apéndice 1. Medición de áreas de tramo a rehabilitar en Bulevar los Próceres.

No.	Caminamiento	Ancho	Promedio	Longitud	Área	Acumulado
1	0+	0	11.00	0.000	0	0.00
2	0+	27.6	11.00	11.000	27.6	303.60
3	0+	27.6	4.40	7.700	0	303.60
4	0+	45.6	5.65	5.025	18	394.05
5	0+	45.6	7.25	9.125	0	394.05
6	0+	65.6	7.25	5.825	20	510.55
7	0+	85.6	7.25	7.250	20	655.55
8	0+	105.6	7.25	7.250	20	800.55
9	0+	125.6	7.25	7.250	20	945.55
10	0+	134.1	7.25	7.250	8.5	1,007.18
11	0+	134.1	12.50	9.875	0	1,007.18
12	0+	154.1	11.00	11.750	20	1,242.18
13	0+	174.1	11.00	11.000	20	1,462.18
14	0+	194.1	11.00	11.000	20	1,682.18
15	0+	214.1	11.00	11.000	20	1,902.18
16	0+	234.1	11.00	11.000	20	2,122.18
17	0+	254.1	11.15	11.075	20	2,343.68
18	0+	274.1	11.00	11.075	20	2,565.18
19	0+	294.1	11.00	11.000	20	2,785.18
20	0+	314.1	11.00	11.000	20	3,005.18
21	0+	334.1	10.75	10.875	20	3,222.68
22	0+	354.1	10.50	10.625	20	3,435.18
23	0+	374.1	10.20	10.350	20	3,642.18
24	0+	394.1	10.15	10.175	20	3,845.68
25	0+	402.6	10.15	10.150	8.5	3,931.95
26	0+	402.6	3.00	6.575	0	3,931.95
27	0+	458.1	3.00	3.000	55.5	4,098.45
28	0+	458.1	3.35	3.175	0	4,098.45
29	0+	509.35	2.70	3.025	51.25	4,253.48
30	0+	509.35	3.30	3.000	0	4,253.48

Continúa Apéndice 1.

31	0+	545.95	3.35	3.325	36.6	121.70	4,375.18
32	0+	551.7	6.90	5.125	5.75	29.47	4,404.65
33	0+	581.7	5.90	6.400	30	192.00	4,596.65
34	0+	611.7	5.70	5.800	30	174.00	4,770.65
35	0+	641.7	6.45	6.075	30	182.25	4,952.90
36	0+	648.2	6.45	6.450	6.5	41.93	4,994.82 m2

Fuente: Elaboración Propia.

ANEXOS

1. Usos de los diferentes polímeros

Hule hidrogenado SEBS

Tipo	Estructura	Estireno	Viscosidad Brookfield	Resistencia al Ozono	Principales Aplicaciones
CH-6110	Lineal	30	470 ⁽¹⁾ cps	Excelente	Adhesivos, Modificación de polímeros, Selladores
CH-6120	Lineal	32	1 900 ⁽¹⁾	Excelente	Adhesivos, Compuestos, Mod. polímeros, Selladores
CH-6140	Lineal	31	400 ⁽²⁾	Excelente	Compuestos
CH-6144	Lineal	31	400 ⁽²⁾	Excelente	Compuestos
CH-6170	Lineal	33	2 300 ⁽²⁾	Excelente	Compuestos
CH-6171	Lineal	33	2 000 ⁽²⁾	Excelente	Compuestos
CH-6174	Lineal	33	2 300 ⁽²⁾	Excelente	Compuestos

⁽¹⁾ 20% contenido en sólidos en tolueno, 25°C ⁽²⁾ 10% contenido en sólidos en tolueno, 25°C

Hule termoplástico multi-rama SBS

Tipo	Estructura	Estireno	Viscosidad Brookfield	Dureza	Principales Aplicaciones
S-9320	Multi-rama	32	750 ⁽³⁾ cps	70 °Shore A	Adhesivos, Modificación de polímeros
S-9340	Multi-rama	34	950 ⁽³⁾	71	Adhesivos, Modificación de polímeros
S-9360	Multi-rama	36	650 ⁽³⁾	76	Adhesivos, Modificación de polímeros
S-9618	Multi-rama	31	600 ⁽³⁾	75	Adhesivos, Modificación de polímeros

⁽³⁾ 25% contenido en sólidos en tolueno, 25°C

Hule termoplástico SBS

Tipo	Estructura	Estireno	Viscosidad Brookfield	Viscosidad TSV	Principales Aplicaciones
C-401	Radial	20	9 700 ⁽⁴⁾ cps	20 ⁽⁵⁾ cSt	Carreteras, Impermeabilización, Compuestos
C-405	Radial	33	3 700 ⁽⁴⁾	13.5 ⁽⁵⁾	Compuestos
C-411*	Radial	30	18 500 ⁽⁴⁾	26 ⁽⁵⁾	Carreteras, Impermeabilización, Compuestos
S-411*	Radial	30	20 000 ⁽⁴⁾	28 ⁽⁵⁾	Carreteras, Impermeabilización, Compuestos
C-412	Radial	31.5	23 100 ⁽⁴⁾	28 ⁽⁵⁾	Carreteras, Impermeabilización
S-416*	Radial	30	2 200 ⁽⁴⁾	11 ⁽⁵⁾	Adhesivos, Mod. de polímeros, Compuestos, Carreteras
C-419*	Radial	30	11 100 ⁽⁴⁾	20 ⁽⁵⁾	Carreteras e Impermeabilización
C-485*	Radial	33	-----	9 ⁽⁷⁾	Compuestos
C-487**	Radial	55	-----	14 ⁽⁷⁾	Compuestos
S-4316	Radial	30	-----	11 ⁽⁵⁾	Modificación de polímeros, Adhesivos
S-4301	Lineal	33	3 000 ⁽⁴⁾	11 ⁽⁵⁾	Carreteras, Impermeabilización, Adhesivos
S-4302	Lineal	31	890 ⁽⁴⁾	7 ⁽⁵⁾	Adhesivos, Mod. polímeros, Carreteras, Impermeabilización
S-4318	Lineal	32	700 ⁽⁴⁾	8 ⁽⁵⁾	Impermeabilización, Modificación de polímeros, Adhesivos
S-4321*	Lineal	32	-----	11 ⁽⁵⁾	Impermeabilización, Modificación de polímeros, Adhesivos
C-500	Lineal	30	1 100 ⁽⁴⁾	5 ⁽⁷⁾	Compuestos, Modificación polímeros, Adhesivos
C-501	Lineal	31	5 000 ⁽⁴⁾	13 ⁽⁵⁾	Carreteras, Impermeabilización, Compuestos, Adhesivos
C-540	Lineal	40	600 ⁽⁴⁾	5 ⁽⁷⁾	Compuestos, Adhesivos, Modificación de polímeros
C-710**	Lineal	30	1 700 ⁽⁴⁾	-----	Compuestos, Modificación de polímeros

⁽⁴⁾ 25% contenido en sólidos en tolueno, 25°C ⁽⁵⁾ 5.23% contenido en sólidos en tolueno, 25°C

⁽⁷⁾ Índice de fluidez, 190°C, 5 kg (g/10')

* Disponible libre de BHT/TNPP
** Libre de BHT/TNPP

⁽⁶⁾ Índice de fluidez, 200°C, 5 kg (g/10')

*Oleo-extendido (contenido en aceite = 45 phr)
**Oleo-extendido (contenido en aceite = 40 phr)

Continúa Apéndice 1.

Hule estireno-butadieno en solución SSBR

Tipo	Estireno	Poliestireno	Viscosidad Mooney	Viscosidad en estireno	Principales Aplicaciones
	%	%	ML1+4,100°C	cps	
S-1106	10	6	-----	35 ^(B)	Modificación de polímeros
S-1110	15	10	-----	35 ^(B)	Carreteras, Calzado, Bajo Alfombra
S-1205*	25	17.5	47	-----	Carreteras, Calzado, Bajo Alfombra, Adhesivos
S-1217**	25	17.5	47	-----	Adhesivos, Selladores, Modificación de polímeros, Carreteras
S-1322	30	22	-----	25 ^(B)	Modificación de polímeros
S-1430	40	31	-----	42 ^(B)	Modificación de polímeros

^(B) 5% contenido en sólidos en estireno, 25°C

* Disponible libre de BHT/TNPP
** Libre de BHT/TNPP

Forma Física
SBS & SEBS disponible en pellets y polvo
SBS multi-rama disponible en pellets
SSBR disponible en pacas

Marzo 2010

Este documento muestra valores típicos y no

Fuente: <http://www.dynasolelastomers.com>, fecha de consulta: Marzo 2010.

2. Caracterización de AC modificado con elastómeros tipo SBS

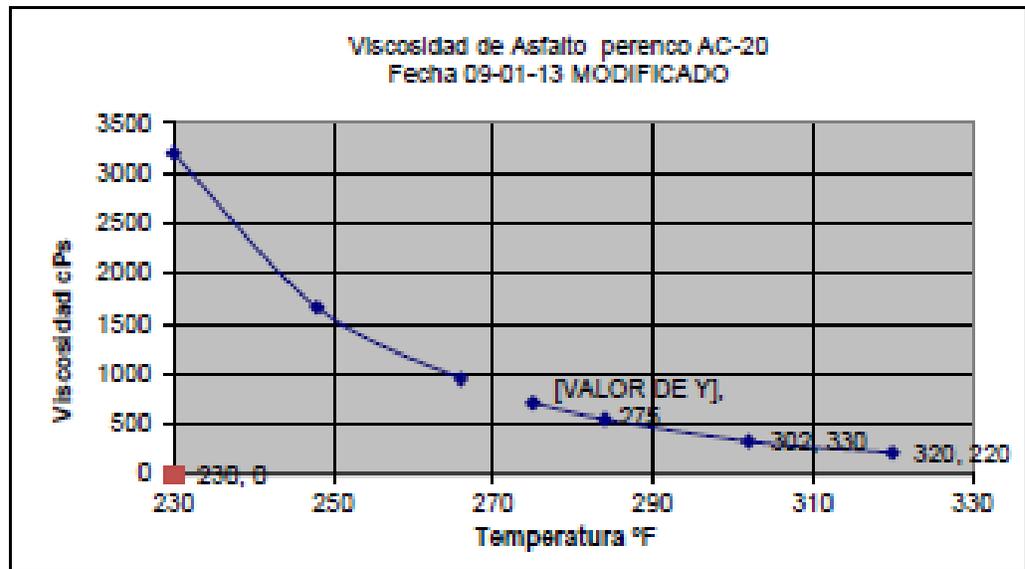
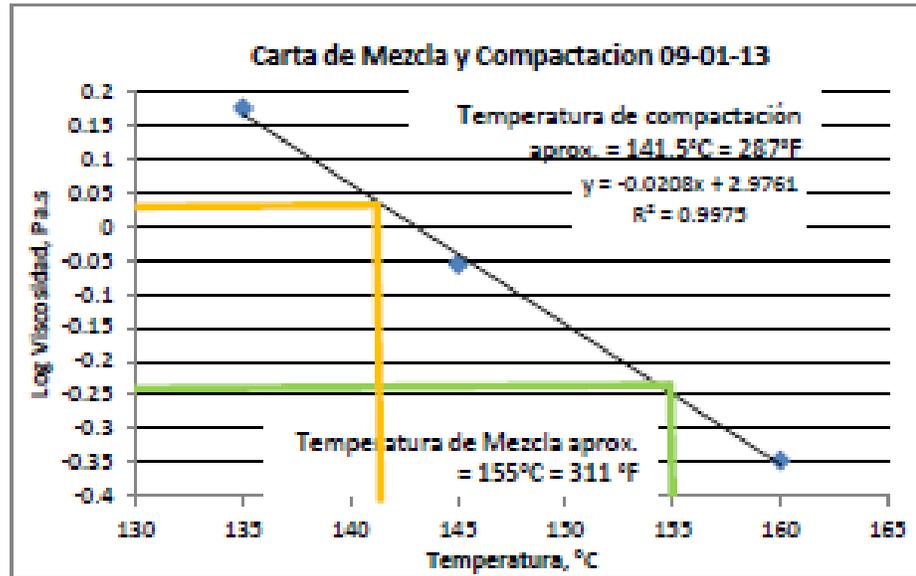


RESULTADO DE ANÁLISIS DE LABORATORIO

Producto:	Asfalto Modificado		
Especificación:	AC-20 Modificado		
Fecha:	09-01-13		
Hora:	8 am		
Tanque:	5		
Lote:	034-2013		
Proyecto:	Fideicomiso de Transporte de la Ciudad de Guatemala - FIDEMUNI -		
ANÁLISIS	RESULTADO	NORMA	RANGO
Penetración, a 25° C, 100g y 5 s	62	ASTM D 5	Max, min 40-75
Penetración, a 4° C, 200g y 60 s	30.50	ASTM D5	Min 25
VISCOSIDAD, 135° C, centi Poises	1132	ASTM D2170	Max 2000
Punto de ablandamiento, R & B, ° C	60	ASTM D 3695	Min 60
Ensayos después de RTFOT, pérdida de masa, %	0.672	INV E-720-07	Max 0.8
Recuperación elástica, a 25 °C, %	51	M-MMP-4-05-024/02	Min 50
Penetración, a 4° C, 200g y 60 s	17	AASHTO T 49	Min 13

Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente, Guatemala 10 de enero de 2013.

3. Gráficas temperatura vs. viscosidad del AC modificado



Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente, Guatemala 10 de abril de 2013.

**4. Pruebas de penetración, ablandamiento y gravedad específica bruta del
AC modificado**



Fecha: 10 de enero de 2013
 Interesado: PADEGUA
Fideicomiso de Transporte de la Ciudad de Guatemala -
 Proyecto: FIDEMUNI -
 Asfalto: AC-20 Modificado

AC - 20 PERENCO			
ANALISIS PADEGUA	RESULTADO	ESPECIFICACIONES	NORMA
Penetración	62	40 MINIMO - 75 MAXIMO	ASTM D5
Punto de ablandamiento	60° C (140°F)	60 °C MINIMO	ASTM D3695
GSB a 15°C	1.062655	-----	

Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente,
Guatemala 10 de enero de 2013.

5. Hoja técnica cemento asfáltico sin modificar



Perenco Guatemala Limited

5ª Av. 6-08 Zona 14, Torre 4, Nivel 12 Edificio Europlaza
 PBX (502) 2384-6100 FAX (502) 2384 - 6192 (502) 2384 - 6198



RESULTADO DE ANALISIS DE LABORATORIO

Certificado No. 3856706D580

PRODUCTO:	ASFALTO
ESPECIFICACIÓN:	AC-20 [ASTM D 3381]
FECHA:	Marzo 29 de 2,013
HORA:	08:30
TANQUE:	05
LOTE:	034 - 2,013

AC-20

ANALISIS	RESULTADO	ESPECIFICACION ASTM D 3381 TABLA 2	METODO ASTM
GRAVEDAD ESPECIFICA, 60°F,	1.062	N.E.	D 70
PESO (Lbs/Gal)	8.738	N.E.	D 70
GRAVEDAD ESPECIFICA, 77°F,	1.056	N.E.	D 70
PENETRACION, 77°F, 100g, 5 seg.	87	60 min.	D 5
VISCOSIDAD, 140°F, POISES	2,018	2,000 ± 400	D 2171
VISCOSIDAD, 275°F, cSt.	442	300 min.	D 2170
FLASH POINT, COC, °F	525	450 min.	D 92
PUNTO DE ABLANDAMIENTO, °F	112	N.E.	D 36
SOLUBILIDAD EN TCE, %	99.9	99.0 min.	D 2042
ENSAYOS AL RESIDUO TFOT			D 1754
VISCOSIDAD, 140°F, POISES	6,224	10,000 max.	D 2171
DUCTILIDAD, 77°F, 5 cm/minuto	>100	50 min.	D 113
VTS	3.43	**	

* min. = mínima

max. = máximo

N.E. = No Especifica

** Dato Calculado sin especificación ASTM, para uso exclusiva del interesado.

Firma del representante de Perenco:

Nombre: Hugo R. Castillo Taracena.

Fuente: Perenco Guatemala Limited. Resultados Análisis Laboratorios Refinería La Libertad, La Libertad, Petén 29 de marzo de 2013.

6. Gráfica temperatura – viscosidad cemento asfáltico sin modificar



Perenco Guatemala Limited

6ª Av. 6-66 Zona 14, Torre 4, Nivel 12 Edificio Europlaza
PBX (502) 2384-6100 FAX (502) 2384 - 6192 (502) 2384 - 6196

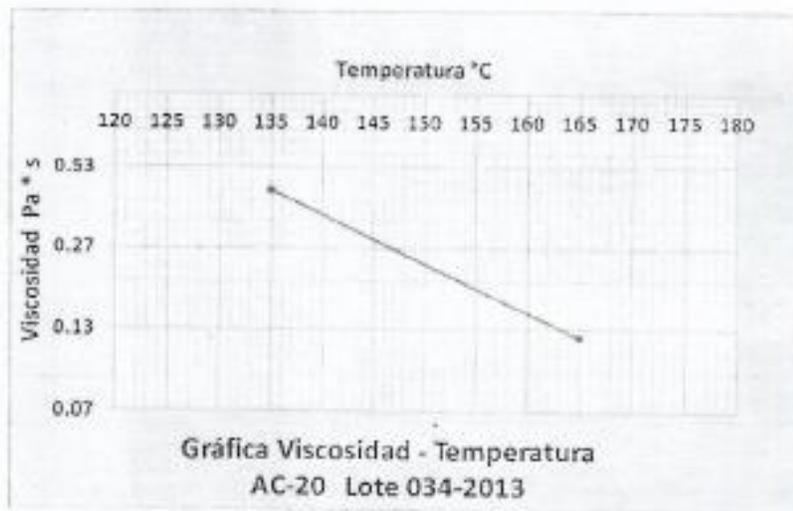


RESULTADO DE ANALISIS DE LABORATORIO

Certificado No. 3856706D580

PRODUCTO:	ASFALTO
ESPECIFICACION:	AC-20 [ASTM D 3381]
METODO DE ENSAYO:	AASHTO T-316
VISCOSIMETRO:	DV-II +
VASTAGO	21
RPM	20
FECHA:	Marzo 29 de 2,013
HORA:	08:30
TANQUE:	05
LOTE:	034 - 2,013

AC-20



Firma del representante de Perenco:

Nombre: **Hugo R. Castillo Taracena,**

Fuente: Perenco Guatemala Limited. Resultados Análisis Laboratorios Refinería La Libertad, La Libertad, Petén 29 de marzo de 2013.

8. Ensayo de abrasión (máquina de los Ángeles)

MALLA		PESO DE LOS TAMAÑOS INDICADOS (gr)						
Pasa	Retenido	GRADO "A" (12)	GRADO "B" (11)	GRADO "C" (8)	GRADO "D" (6)	GRADO "E" (12)	GRADO "F" (12)	GRADO "G" (12)
3"	2 1/2"					2500 +/- 50		
2 1/2"	2"					2500 +/- 50		
2"	1 1/2"					5000 +/- 50	5000 +/- 50	
1 1/2"	1"	1250 +/- 25					5000 +/- 25	5000 +/- 25
1"	3/4"	1250 +/- 25						5000 +/- 25
3/4"	1/2"	1250 +/- 25	2500					
1/2"	3/8"	1250 +/- 25	2500					
3/8"	Nº 3			2500				
Nº 3	Nº 4			2500				
Nº 4	Nº 8				5000			
TOTALES		5000 +/- 10	5000	5000	5000	10000 +/- 100	10000 +/- 75	10000 +/- 50
Peso del Material Retenido en el Tamiz Nº 12			4012	4002	3992			
Peso del Material Pasante el Tamiz Nº 12								
DESGASTE (%)			19.8	20.0	20.2			
OBSERVACIONES:		PROMEDIO 19.96						
ELABORÓ:		REVISÓ:						
TOMÁS H. MEJÍA ALVAREZ PADEGUA		CARLOS E. OVALLE M. GERENTE LABORATORIO						

Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente, Guatemala 10 de enero de 2013.

9. Desintegración del sulfato de sodio (agregados 3/4" y 3/8")



ENNSAYO DE BONDAD EN AGREGADO GRUESO
DESINTEGRACION AL SULFATO DE SODIO

FECHA: 9-ene.-13 PROYECTO: Fideicomiso de Transporte de la Ciudad de Guatemala - FIDEMUNI -

CANTERA: AGREGUA PALIN OESTE TIPO DE MATERIAL Y USO: DISEÑO TIPO "E" (12.5mm) 1/2" CON AC - 20 MODIFICADO

SOLUCION UTILIZADA: SULFATO DE SODIO PESO ESPECIFICO: 1.158

METODO: AASHTO T 104 TEMPERATURA: 20

ABERTURA TAMICES		GRADACION POR	PESOS		% DE DESGASTE	% DESGASTE POR GRADACION O CORRECCION
PASA	RETENIDO	FRACCION	PESO INICIAL	PESO FINAL		
2 1/2 63.5 m.m.	1 1/2 38.1 m.m.					
1 1/2 38.1 m.m.	3/4 19.0 m.m.					
3/4 19.0 m.m.	3/8 9.5 m.m.	16.96	1000.3	999.70	0.060	0.010
3/8 9.5 m.m.	No. 4 4.76 m.m.	29.56	300.06	298.46	0.533	0.158
No. 4 4.76 m.m.	No. 8 2.36 m.m.					
FONDO		53.48				
TOTALES		100	1298.16		0.593	0.168

Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente, Guatemala 09 de enero de 2013.

10. Desintegración del sulfato de sodio (agregados pasa tamiz no.4)



ENNSAYO DE BONDAD EN AGREGADO FINO
DESINTEGRACION AL SULFATO DE SODIO

FECHA: 10-ene.-13 PROYECTO: Fideicomiso de Transporte de la Ciudad de Guatemala - FIDEMUNI -

CANTERA: AGREGUA PALIN OESTE TIPO DE MATERIAL Y USO: DISEÑO TIPO "E" (12.5mm) 1/2" CON AC - 20 MODIFICADO

SOLUCION UTILIZADA: SULFATO DE SODIO PESO ESPECIFICO: 1.158

METODO: AASHTO T 104 TEMPERATURA: 20

ABERTURA TAMICES		GRADACION POR	PESOS		% DE DESGASTE	% DESGASTE POR GRADACION O CORRECCION
PASA	RETENIDO	FRACCION	PESO INICIAL	PESO FINAL		
3/8 9.5 m.m.	No. 4 4.76 m.m.					
No. 4 4.76 m.m.	No. 8 2.36 m.m.	30.78	100.1	100.00	0.10	0.03
No. 8 2.36 m.m.	No. 16 1.18m.m.	17.9	100.00	99.87	0.13	0.02
No. 16 1.18m.m.	No. 30 .600 m.m.	12.05	100	99.93	0.07	0.01
No. 30 .600 m.m.	No. 50 .300 m.m.	10.45	100	98.74	1.26	0.13
FONDO		28.82				
TOTALES		100				0.19

OBSERVACIONES:

TOTAL DE DESGASTE SUMA DE GRUESOS Y FINOS **0.358 %**

Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente, Guatemala 10 de enero de 2013.

11. Gravedades específicas de los agregados (combinados) mezcla e modificada



PAVIMENTOS DE GUATEMALA S.A.
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

PBX 502-247923021 FAX 502-24793021

Gravedades Especificas y Porcentaje de Absorción Integradas

FECHA: Fecha: 10 de enero de 2013
 DISEÑO TIPO: Diseño E (12.5 mm) 1/2" con AC-20 modificado
 PROYECTO: Fidelcomiso de Transporte de la Ciudad de Guatemala - FIDEMUNI -

Gravedad específica bruta Gmb					
Fracción a retenido No. 4 =	45.73	X	2.6774	% =	1.2244
Fracción pasante No. 4 =	54.27	X	2.6364	% =	1.4308
					2.6551
Gravedad específica bruta superficie seco saturado Gsb (s.s.s.)					
Fracción a retenido No. 4 =	45.73	X	2.6882	% =	1.2293
Fracción pasante No. 4 =	54.27	X	2.6738	% =	1.4511
					2.6804
Gravedad específica aparente Gsa					
Fracción a retenido No. 4 =	45.73	X	2.7065	% =	1.2377
Fracción pasante No. 4 =	54.27	X	2.7389	% =	1.4864
					2.7241
% de absorción integrada					
Fracción a retenido No. 4 =	45.73	X	0.4016	% =	0.1837
Fracción pasante No. 4 =	54.27	X	1.4199	% =	0.7706
					0.9542

Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente, Guatemala 10 de enero de 2013.

12. Control de partículas planas y alargadas



CONTROL DE PARTÍCULAS

FECHA: 9 de enero de 2013 PROYECTO: **Fideicomiso de Transporte de la Ciudad de Guatemala - FIDEMUNI -**

TIPO DE MATERIAL Y USO: DISEÑO TIPO E (12.5mm) 1/2" con AC - 20 modificado CANTERA: **AGREGUA PALIN OESTE**

LUGAR DE MUESTRO	MUESTRA No	TIPO DE MATERIA L	% de Particulas con 1 o mas Caras Fracturadas	% de Particulas con 2 o mas Caras Fracturadas	% de Particulas sin ninguna cara fracturada	% de Particulas Planas y Alargadas	% de Particulas No Planas No Alargadas
Pavimentos de Guatemala, S.A.	1	AGREGADO 3/4" Y 3/8"	100.0	100.0	0.0	0.84	99.16

Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente, Guatemala 10 de enero de 2013.

13. Equivalente de arena



EQUIVALENTE DE ARENA

AASHTO T 176

PROYECTO:	Fideicomiso de Transporte de la Ciudad de Guatemala - FIDEMUNI -		
TIPO DE MATERIAL Y USO:	DISEÑO TIPO "E" (12.5 mm) 1/2" CON AC-20 MODIFICADO		
CANTERA:	AGREGUA PALIN OESTE	FECHA:	9-ene.-13

FRACCIÓN Nº	1	2	3
HORA DE INICIO DE INMERSIÓN	08:50	08:55	09:10
HORA DE SALIDA DE INMERSIÓN	09:00	09:05	09:20
HORA DE INICIO POST-AGITACIÓN	09:03	09:08	09:23
HORA DE SALIDA POST-AGITACIÓN	09:23	09:28	09:43
NIVEL SUPERIOR DE SUSPENSIÓN DE FINOS	5.2	5.1	4.8
NIVEL SUPERIOR DE ARENA	3.7	3.6	3.5
EQUIVALENTE DE ARENA	71.20	70.60	72.90
EQUIVALENTE DE ARENA PROMEDIO	71.6		

Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente, Guatemala 09 de enero de 2013.

14. Límites de Atterberg



LÍMITES DE ATTERBERG

AASHTO T 89 y AASHTO T 90

PROYECTO: Fidelcomiso de Transporte de la Ciudad de Guatemala - FIDEMUNI -

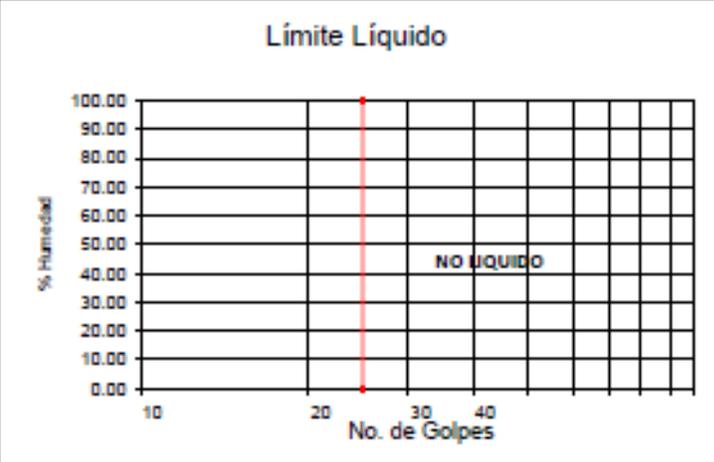
TIPO DE MATERIAL Y USO: DISEÑO TIPO "E" (12.5mm) 1/2" CON AC-20 MODIFICADO

CANTERA: AGREGUA PALIN OESTE

FECHA: 10-ene.-13

LÍMITE LÍQUIDO

Capsula	Nº						
Peso Capsula	(gr)						
Capsula + Suelo Húmedo	(gr)						
Capsula + Suelo Seco	(gr)						
Humedad	(%)						
Número de Golpes	Nº						



LÍMITE LÍQUIDO: _____

LÍMITE PLÁSTICO: _____

ÍNDICE PLÁSTICO: _____

LÍMITE PLÁSTICO

Capsula	Nº	30	10				
Peso Capsula	(gr)						
Capsula + Suelo Húmedo	(gr)						
Capsula + Suelo Seco	(gr)						
Humedad	(%)						

Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente, Guatemala 09 de enero de 2013.

15. **Diseño de mezcla asfáltica en caliente modificada, método Marshall**



PAVIMENTOS DE GUATEMALA

MEZCLAS ASFALTICAS Y EMULSIONES

Boulevard Vista Hermosa 23-80 Nivel 11 Of. 1101 Vista Hermosa 2 zona 15

Guatemala C.A.

Teléfono 502-23871010 Fax 23871020

DISEÑO DE CONCRETO ASFÁLTICO

Fecha: 12 de enero de 2013
 Fideicomiso de Transporte de la Ciudad de Guatemala
 Proyecto: - FIDEMUNI -
 Diseño Tipo: E (12.5 mm) 1/2" con AC-20 Modificado

No.	COMBINACION DE AGREGADOS	%
1	1/2"- 0, AGREGUA PALIN OESTE	50
2	3/8" # 8 AGREGUA PALIN OESTE	40
3	3/4" ESPECIAL AGREGUA PALIN OESTE	10

Pruebas efectuadas	Resultado	Especificaciones
Número de Golpes por Cara de Pastillas	75	75
% Optimo de Asfalto	5.15	3 a 8
% Asfalto Absorbido	0.38	***
% Asfalto Efectivo	4.77	***
% Vacios de Aire	4.15	3 a 5
% Vacios Rellenos de Asfalto	73.97	65 a 75
% Vacios de Agregado Mineral	15.47	> 13
Estabilidad Marshall	2867	>1200
Fluencia Marshall	12	>8
Relación Polvo / Asfalto	1.41	0.6 a 1.6
Relacion Estabilidad / Fluencia	226	120 a 275
Sensibilidad a la Humedad (resis. retenida, estab.remanente)	94.28	> 80 %
Gravedad Especifica Bruta de la Mezcla	2.392	***
Grav. Especifica Rice de la mezcla AASHTO T 209 (Gmm)	2.4951	***
Gravedad Especifica Bruta del Agregado (Bulk)	2.6551	***
Gravedad Especifica Superficie Seco Saturado(Bulk SSS)	2.6804	***
Gravedad Especifica Efectiva	2.6896	***
Gravedad Especifica Aparente	2.7241	***
Gravedad Especifica del Asfalto Modificado	1.063	***
% Absorción de Agua	0.9542	***
% de Vestimiento del Agregado	100	> 95
% Equivalente de Arena	73.10	> 35
Indice Plastico	0.00	< 4
Peso Unitario Seco Suelto	1577	> 1360 Kgs./Mts.3
% Caras Fracturadas (1 cara)	100	> 90

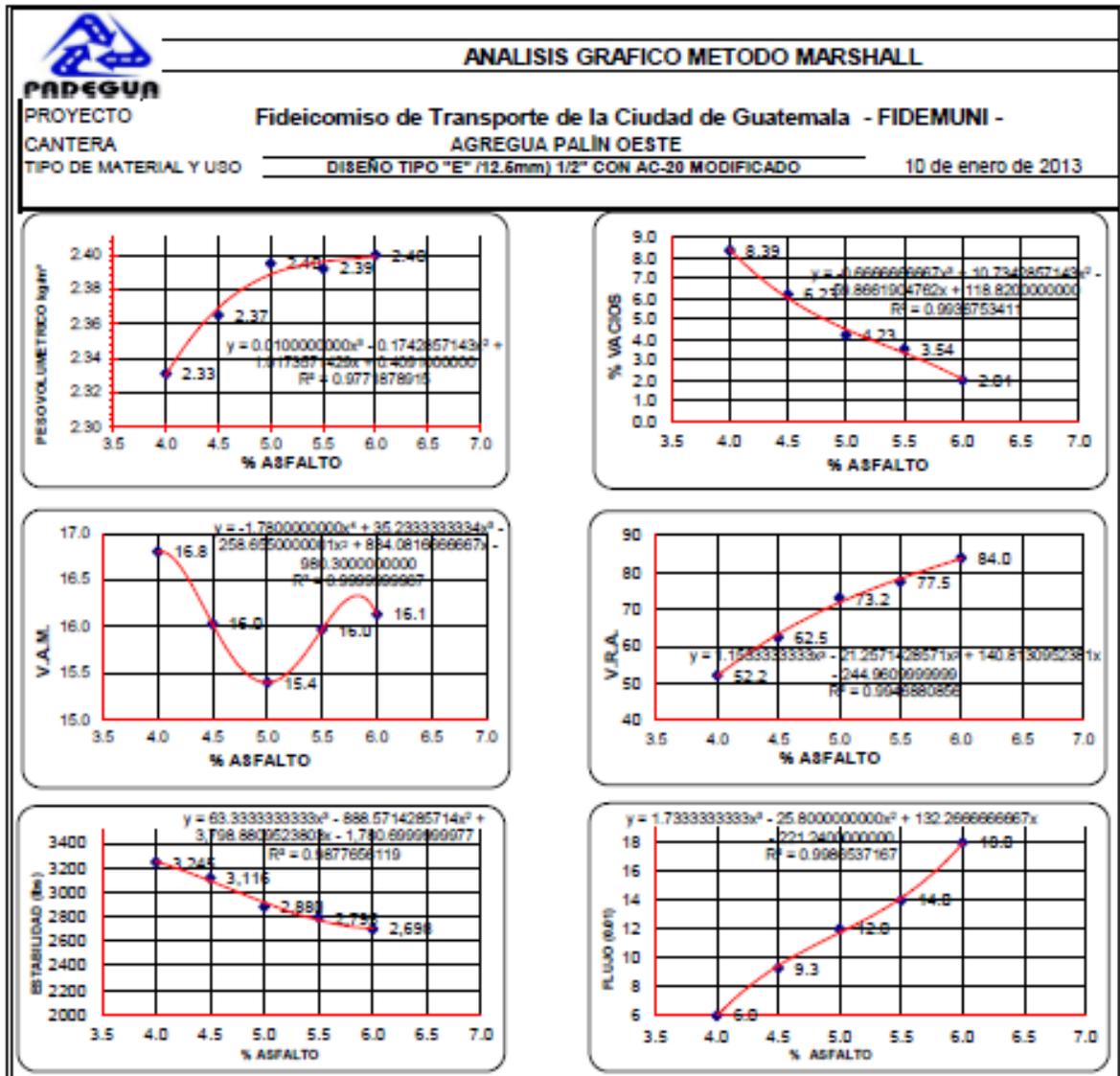
Continúa Anexo 15.

% Caras Fracturadas (2 caras)	100	> 75
% Particulas Planas y Alargadas	0.00	< 8
Desintegración al Sulfato (Finos y Gruesos)	0.358%	< 12
% de Abrasión	19.96	< 35

Especificaciones: Según Libro Azul D.G.C. Edición 2001 e Instituto de Asfaltos MS-2 6a. Edición.

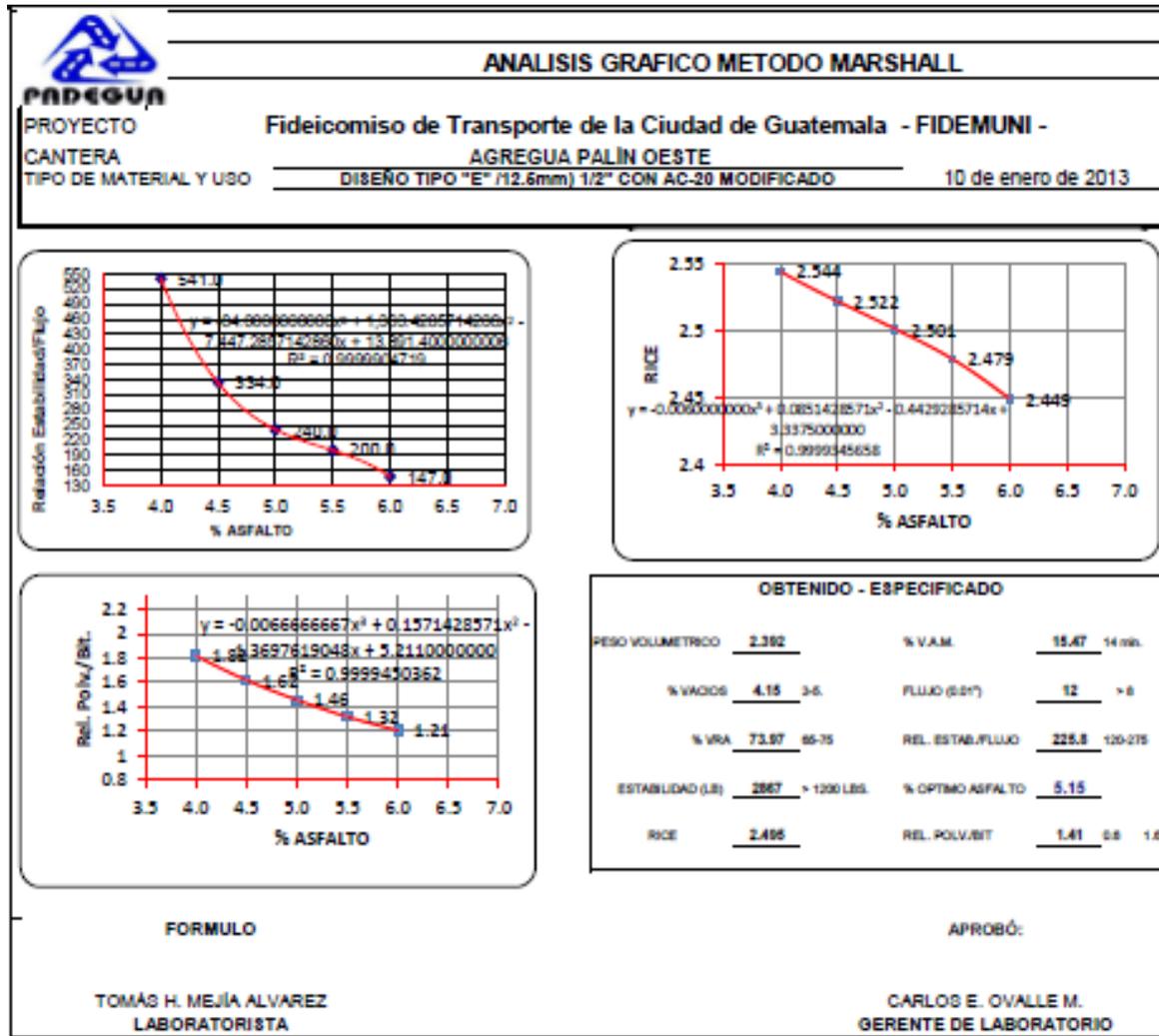
Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente,
Guatemala 09 de enero de 2013.

16. Análisis gráfico Marshall, diseño de mezcla asfáltica modificada tipo E



Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente, Guatemala 10 de enero de 2013.

17. Análisis gráfico Marshall, diseño de mezcla asfáltica modificada tipo E



Fuente: Laboratorio Pavimentos de Guatemala, S.A., Control de concreto asfáltico en caliente, Guatemala 10 de enero de 2013.