

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE UTILIZANDO
ASFALTO MODIFICADO, REVISIÓN Y PROPUESTA DE
ESPECIFICACIÓN**

TESIS

Presentada a la Junta Directiva de la
Facultad de Ingeniería

POR

Ingeniero Civil Carlos Arnoldo Morales Rosales

Asesorado por el Ingeniero Msc. Armando Fuentes Roca

Al conferírsele el título de

MAESTRO EN INGENIERÍA VIAL

GUATEMALA, MAYO DE 2012

Guatemala, 23 de mayo de 2012

Doctora
Mayra Virginia Castillo Montes
Directora Escuela de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería
Presente

Le saludo muy cordialmente.

El motivo de la presente es para informarle que en cumplimiento con las normas y estatutos de la Universidad de San Carlos, tuve a bien revisar la ortografía, redacción y estilo del trabajo de graduación del Ingeniero Civil **Carlos Arnoldo Morales Rosales**, de la carrera de Maestría en Ingeniería Vial, el cual se titula: **“MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO, REVISIÓN Y PROPUESTA DE ESPECIFICACIÓN”**; luego de haber cotejado su contenido hasta quedar conforme, procedo a la aprobación respectiva, expresando que significa un aporte significativo para la comunidad de la ingeniería vial.

Atentamente,



Lcda. Aura Mayorga Salguero
Magíster en Literatura Hispanoamericana y
Posgrado de Lingüística del Español
Colegiado 2702
Teléfono: 52243149





Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado

Como Revisor de la Maestría en Ingeniería Vial del trabajo de tesis de graduación titulado **MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO, REVISIÓN Y PROPUESTA DE ESPECIFICACIÓN**. Presentado por el Ingeniero Civil **Carlos Arnoldo Morales Rosales**, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, junio de 2012.

Cc: archivo
/la



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del trabajo de tesis de graduación titulado **"MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO, REVISIÓN Y PROPUESTA DE ESPECIFICACIÓN"** presentado por el Ingeniero Civil **Carlos Arnoldo Morales Rosales**, apruebo el presente y recomiendo la autorización del mismo.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, junio de 2012.

Cc: archivo
/la



Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios
De Postgrado

Como Coordinador de la Maestría de Ingeniería Vial, y revisor del trabajo de tesis de graduación titulado **“MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO, REVISIÓN Y PROPUESTA DE ESPECIFICACIÓN”**, presentado por el Ingeniero Civil **Carlos Arnoldo Morales Rosales**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. César Augusto Akú Castillo
Coordinador General
Escuela de Estudios de Postgrado



Guatemala, junio de 2012.

Cc: archivo
/la



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al trabajo de graduación de la Maestría de Ingeniería Vial titulado: **MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO, REVISIÓN Y PROPUESTA DE ESPECIFICACIÓN**, presentado por el Ingeniero Civil **Carlos Arnoldo Morales Rosales**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, junio de 2012.



ACTO QUE DEDICO A:

Mi esposa	Evelyn Lucia Rosales Gómez, por su amor, comprensión y apoyo.
Mis hijas	María Fernanda y María Jimena, por ser fuente de mi inspiración.
Mis padres	Gladys Rosales y Carlos Morales con mucho amor y en recompensa por todos sus sacrificios.
Mis hermanos	Nancy de Eskenasy y Brayan.
Mis sobrinos	Para que este logro sirva de motivación para ellos y continúen sus estudios a nivel de post grado en sus respectivas carreras.
Mi familia	Con cariño.
Todas las personas	Que de alguna manera contribuyeron a que alcanzara este logro. Gracias.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por sobre todas las cosas, por haberme permitido culminar mi carrera profesional a nivel de maestría.
- Ing. Tonio Bonatto** Por compartir conmigo su amplia experiencia, sin la cual no hubiese sido posible la elaboración del presente trabajo de graduación, asimismo por haberme dado la oportunidad de desarrollarme en el área vial brindándome en todo momento su amistad y confianza.
- Arq. Giovanni Bonatto** Por compartir conmigo su amplia experiencia, y en especial por haberme brindado su amistad y confianza.
- Ing. Msc. Armando Fuentes** Por compartir conmigo su amplia experiencia, sin la cual no hubiese sido posible la elaboración del presente trabajo de graduación.

Ing. Víctor Rosales Gómez

Por apoyarme en los momentos más difíciles de mi formación profesional, y por haber compartido conmigo sus conocimientos en el área vial.

Los ingenieros:

Irvin Martínez,

Pedro Roberto Martínez,

Ranfis Pérez Guillén

Quienes siempre me apoyaron y contribuyeron en mi formación profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	II
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	IX
OBJETIVOS.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XIII
1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	1
1.1. Mezclas asfálticas en caliente (MAC).....	1
1.2. Características de los materiales componentes de las (MAC).....	2
1.2.1. Características del cemento asfáltico (ligante).....	2
1.2.2. Características del cemento asfáltico modificado (ligante).....	8
1.2.3. Características del agregado pétreo.....	10
1.2.4. Características de las mezclas asfálticas en caliente.....	15
1.3. Tipos de deterioro de las mezclas asfálticas en caliente (MAC).....	17
1.3.1. Deformación permanente.....	18
1.3.2. Agrietamiento por fatiga.....	19
1.3.3. Fisuración por baja temperatura.....	20
1.4. Reseña histórica de especificaciones para las (MAC).....	21
2. REVISIÓN Y PROPUESTA DE ESPECIFICACIÓN.....	25
2.1. Especificaciones para agregados sección 401.03 a) y b).....	26
2.1.1. Abrasión.....	26
2.1.2. Desintegración al sulfato de sodio.....	27
2.1.3. Caras fracturadas.....	27
2.1.4. Partículas planas y alargadas.....	29

2.1.5.	Equivalente de arena del agregado fino pasa 100% tamiz de 4.75 mm.....	.29
2.1.6.	Índice de plasticidad del agregado fino pasa 100% tamiz de 4.75 mm.....	.30
2.1.7.	Granulometrías utilizadas en las MAC.....	.32
2.2.	Especificaciones para asfalto modificado sección 401.03 d).....	.39
2.3.	Especificación para la mezcla asfáltica 401.03 e).....	.44
2.4.	Uso de la curva reológica del asfalto.....	.49
3.	CONTROL DE CALIDAD A IMPLEMENTAR.....	.51
3.1.	Ensayo de inmersión – compresión.....	.52
3.2.	Ensayo de tracción indirecta.....	.53
3.3.	Ensayo de máquina de pista.....	.58
3.4.	Ensayo Hamburgo <i>wheel tracking</i>60
3.5.	Otros ensayos.....	.61
	CONCLUSIONES.....	.63
	RECOMENDACIONES.....	.65
	BIBLIOGRAFÍA.....	.67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Materiales que forman una mezcla asfáltica y su proceso de mezclado en laboratorio.....	2
2.	Banco de agregados naturales en el lecho del río Pantaleón.....	11
3.	Trituración de agregados naturales en planta de trituración de la empresa Sigma Constructores.....	12
4.	Deformación permanente.....	19
5.	Agrietamiento por fatiga.....	20
6.	Fisuración por baja temperatura.....	21
7.	Curva reológica de un asfalto convencional y un asfalto modificado.....	50
8.	Ruptura de una briqueta en el ensayo de tracción indirecta.....	54
9.	Esquema de configuración de carga aplicada y deformación vs tiempo.....	57
10.	Máquina de pista (NLT 173).....	59
11.	Disponibilidad de máquina de pista.....	60
12.	Hamburgo <i>wheel tracking</i>	61

TABLAS

I.	Ensayos al asfalto	8
II.	Especificación de abrasión de agregados.....	26
III.	Especificación de desintegración al sulfato de sodio.....	27
IV.	Especificación de caras fracturas	28
V.	Especificación de partículas planas y alargadas	29
VI.	Especificación de equivalente de arena	30
VII.	Especificación de plasticidad	31
VIII.	Especificación de granulometría en Guatemala	32
IX.	Especificación de granulometría Instituto de asfalto	33
X.	Especificación de granulometría, Secretaría de Comunicaciones y Transportes	34
XI.	Especificación de granulometría metodología SUPERPAVE	38
XII.	Requisitos para cemento asfáltico clasificado por viscosidad, asfalto original	40
XIII.	Requisitos para cemento asfáltico clasificado por viscosidad, residuo de ensayo RTFO	41
XIV.	Requisitos para cemento asfáltico clasificado por penetración	42
XV.	Requisito para cemento asfáltico AC-20 modificado	43
XVI.	Requisitos para la mezcla asfáltica en caliente	44
XVII.	Requisitos de vacíos en el agregado mineral (VAM)	45
XVIII.	Parámetros de diseño que utiliza el Instituto del Asfalto	45
XIX.	Porcentajes mínimos de VMA que utiliza el instituto del Asfalto	46
XX.	Requisitos volumétricos de mezclas diseño Marshall	46
XXI.	Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral (VAM)	47
XXII.	Valores de relación estabilidad / fluencia y relación finos/asfalto	48
XXIII.	Dimensiones de briquetas y núcleos para tracción indirecta	55

XXIV. Coeficiente de Poisson (ν) en función de la temperatura de
Ensayo56

GLOSARIO

ESALs	Número de ejes equivalentes a 18,000 libras.
Estabilidad Marshall	Por medio de este ensayo se mide la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica; es la medida de la carga bajo la cual la briqueta cede o falla totalmente.
Fluencia o Flujo	Mide la deformación bajo carga que ocurre en la mezcla, se representa como la reducción del diámetro de la briqueta en el momento de alcanzar la carga máxima.
Pbe	Contenido de asfalto efectivo. Contenido de asfalto total de una mezcla asfáltica, menos la cantidad de asfalto absorbido en las partículas del agregado.
Va	Vacíos de aire. Son espacios pequeños de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, expresados como el porcentaje del volumen total de la briqueta compactada.

VAM

Vacíos en el agregado mineral. Son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla asfáltica compactada, incluyendo los vacíos que están llenos de asfalto, expresados como porcentaje de volumen total de la muestra.

VFA

Vacíos llenos de asfalto. Parte del porcentaje del volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado, que es ocupado por el asfalto efectivo.

RESUMEN

En la actualidad está claro que una carpeta que posea las propiedades de deformarse y recuperarse en gran parte al paso de las cargas del tránsito, obtendrá un buen desempeño durante su vida útil. Esta característica de recuperación se mejora de manera sensible cuando las mezclas en caliente utilizan asfaltos modificados; por tal motivo y pensando en impulsar el uso de mezclas con asfalto modificado, se propondrán las especificaciones, para que en un futuro las autoridades competentes, las analicen y pongan en marcha.

El primer capítulo de este trabajo de graduación consiste en el marco teórico de las generalidades de las Mezclas Asfálticas en Caliente (MAC), que se ha desarrollado con investigaciones a lo largo del tiempo, iniciando con la definición de las MAC, la descripción de características y propiedades individuales y en conjunto de cada componente que forma las MAC; inicialmente, con asfalto convencional y seguidamente con asfalto modificado.

En forma resumida se distinguen los tipos de deterioro más comunes en las mezclas asfálticas, y para finalizar se da una reseña histórica de las especificaciones para mezclas asfálticas en caliente (MAC) que se han utilizado en Guatemala.

Hay que tomar en cuenta que los países más industrializados y con mayor avance tecnológico marcan las estrategias a seguir en las diferentes áreas y afinan sus técnicas iniciando a prueba y error con trabajos de campo, y por último las correlacionan a procesos científicos.

El capítulo dos “Revisión y Propuesta de Especificación”, utiliza como base la sección 401 “Pavimentos de concreto asfáltico en caliente” de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes edición 2,001, las cuales son las que se utilizan actualmente en Guatemala, realizando una comparación con especificaciones que se utilizan en otros países con avances tecnológicos y de investigación, sobre el desempeño de las mezclas asfálticas en caliente (MAC).

El mismo caso sucede para las superficies de rodadura con asfalto modificado en las cuales países como Alemania, España, Italia, Estados Unidos, Chile, Colombia e incluso México, han partido en un inicio, de las especificaciones para MAC y posteriormente han ido agregando las especificaciones para los asfaltos modificados, esto último con base en qué lo que se pretende es mejorar el desempeño en un tiempo más prolongado de las MAC, tomando en cuenta que al ligante asfáltico se le atribuye alrededor del 40% de la resistencia a la deformación, el 60% del agrietamiento por fatiga y el 90% del agrietamiento debido a bajas temperaturas.

OBJETIVOS

General

Realizar una revisión de las especificaciones que actualmente se utilizan en Guatemala, con el fin de verificar si están dentro de los valores utilizados en otros países con avances en la investigación del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente, con el fin de proponer los cambios necesarios para que las mezclas asfálticas en caliente mantengan por un tiempo mayor un buen desempeño, al estar expuestas a los agentes nocivos cuando están en servicio.

Específicos

1. Impulsar el uso del asfalto modificado en las mezclas asfálticas en caliente para proyectos con altos valores de ejes equivalentes y expuestos a gradientes de temperatura extremos, con base en los beneficios que se obtienen al usar asfaltos modificados, haciendo que las mezclas sean más duraderas a lo largo de su vida útil.
2. Definir las características de los materiales componentes de las mezclas asfálticas en caliente.
3. Realizar diversos tipos de ensayos, para determinar la calidad de las mezclas y así proponer un asfalto modificado con características mejoradas.

INTRODUCCIÓN

El trabajo de graduación de la Maestría en Ingeniería Vial titulado, "Mezclas asfálticas en caliente utilizando asfalto modificado, revisión y propuesta de especificación", tiene como fin dar los primeros pasos para proponer las especificaciones necesarias al momento de utilizar este tipo de mezcla; esto con base en que las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, edición 2001, en la sección 401 "Pavimentos de Concreto Asfáltico en Caliente" no contempla la utilización de asfalto modificado en las mezclas asfálticas.

La necesidad de crear especificaciones utilizando asfalto modificado, radica en los múltiples beneficios que se obtienen del producto y que además, al día de hoy el país cuenta con empresas que poseen la infraestructura necesaria para desarrollar la modificación del mismo.

Hay que tomar en cuenta que en Guatemala, a diferencia de muchos países del mundo, no se han utilizado con frecuencia mezclas asfálticas con asfalto modificado; pocos son los proyectos que se han lanzado a la aventura de trabajar mezclas con asfaltos modificados, una de las razones de peso es la falta de especificaciones técnicas que se adapten a las características de los diseños, pudiendo definir las metodologías de colocación y compactación, cantidades de asfalto y temperaturas adecuadas para su manipuleo, entre otros.

En lo concerniente al diseño de la mezcla asfáltica en caliente, en Guatemala se utilizan dos métodos: Marshall y Superpave; siendo el primero el más utilizado en nuestro medio, debido a que tanto los laboratorios de gabinete como de campo cuentan con el equipo necesario para desarrollarlo.

Otro aspecto muy importante que debe especificarse es la utilización de la curva reológica del asfalto que se utilizará, puesto que en ella se obtiene la información necesaria para efectuar la mezcla, traslado, colocación y compactación de la mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado; por lo que en este trabajo de graduación se darán los lineamientos para interpretar la curva de temperaturas de trabajo del asfalto (curva reológica).

La importancia de utilizar mezclas asfálticas en caliente con asfalto modificado, radica en que se logra un mejor desempeño en un tiempo más prolongado, obteniendo una mejor resistencia a la deformación permanente, agrietamiento por fatiga y al agrietamiento por bajas temperaturas; todos los anteriores son atribuibles en gran medida al ligante asfáltico a razón del 40% para la deformación permanente, 60% al agrietamiento por fatiga y un 90% al agrietamiento por bajas temperatura.

Con base en lo anterior, si se utilizan agregados con características que cumplan para mezclas asfálticas en caliente (MAC), y se mezclan con un asfalto modificado se obtendrá una MAC con un mejor desempeño a los deterioros comunes de este tipo de mezcla, cuando están expuestas a los efectos dañinos del tránsito y medio ambiente.

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.1. Mezclas asfálticas en caliente (MAC)

Son aquellas que por lo regular están formadas por la combinación de agregados pétreos cubiertos por una película uniforme de cemento asfáltico.

Para poder realizar de buena manera la mezcla de estos materiales tanto los agregados pétreos como el cemento asfáltico deben ser calentados antes de proceder a mezclarlos, esto con el fin de utilizar agregados secos que favorezcan la adherencia entre el asfalto y los agregados, y para obtener la fluidez y trabajabilidad deseada del cemento asfáltico. En forma general, este tipo de mezcla está formada en un rango que oscila entre el 93% y 97% de agregados pétreos y un 3% a 7% de asfalto respecto de la masa total de la mezcla.

Las propiedades relativas de cada material influyen sustancialmente en las propiedades físicas que determinan el comportamiento y desempeño funcional de la mezcla.

Cuando se diseña una mezcla asfáltica en caliente (MAC), se espera que esta conserve durante su vida útil las propiedades siguientes:

- Durable, flexible y trabajable
- Resistente a la deformación plástica, a la fatiga, al fracturamiento por baja temperatura, al daño por humedad y al deslizamiento.

1.2. Características de los materiales componentes de las (MAC)

Aunque el cemento asfáltico y los agregados actúan como un conjunto dentro de la mezcla asfáltica en caliente (MAC), es necesario analizar las propiedades individuales de cada uno de estos componentes. A continuación, en forma resumida, se hará una descripción de los mismos para obtener una mejor idea de la importancia de cada uno de ellos.

Figura 1: **Materiales que forman una mezcla asfáltica y su proceso de mezclado en laboratorio**



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en laboratorio de Concal.

1.2.1. Características del cemento asfáltico (ligante)

El ligante asfáltico puede ser un cemento asfáltico convencional o modificado; su función dentro de la mezcla asfáltica es la de un agente ligante que aglutina las partículas en una masa cohesiva, que de acuerdo con sus características de origen, hace en cierto grado impermeable la mezcla asfáltica en caliente.

Su característica más importante y que en ocasiones representa ventaja y en otras desventaja, es la susceptibilidad térmica, por lo que también es llamado material viscoelástico. La susceptibilidad a la temperatura es tal, que a altas temperaturas ($T > 100^{\circ}\text{C}$) y bajo cargas de movimiento lento, actúa como un fluido viscoso con un comportamiento plástico que puede presentar deformaciones permanentes, y a bajas temperaturas ($T < 0^{\circ}\text{C}$); bajo cargas de movimiento rápido se comporta como un sólido menos elástico, que cuando actúa la carga se deforma y cuando deja de actuar puede fragmentarse y no regresar a su posición inicial.

Por otra parte, como el cemento asfáltico está compuesto por moléculas orgánicas, este reacciona con el oxígeno del medio ambiente, proceso que se conoce como oxidación del asfalto. Cuando en una mezcla asfáltica en caliente (MAC) se produce la oxidación del ligante, la estructura del asfalto se hace más dura y frágil, dando origen al término “endurecimiento por oxidación” o “endurecimiento por envejecimiento”, produciéndose más rápidamente a altas temperaturas, ya que la capa de recubrimiento se hace más delgada.

Entre las propiedades más importantes de un asfalto se encuentran las químicas y las físicas.

Las propiedades químicas lo hacen un material apto para la construcción de carreteras; los asfaltos están formados por asfaltenos y maltenos, los primeros le dan al asfalto su color y dureza; los maltenos son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites; las resinas le proporcionan al asfalto las cualidades adhesivas y los aceites actúan como medio de transporte para los asfaltenos y las resinas.

La relación entre asfaltenos y maltenos en un asfalto puede variar debido a una variedad de factores, entre los cuales están: temperaturas altas, exposición a la luz y al oxígeno, tipo de agregado usado y espesor de la película de asfalto en los agregados, originando evaporación de los compuestos más volátiles, oxidación, polimerización, entre otros.

Los cambios más comunes en las propiedades químicas de un asfalto generalmente se manifiestan de la siguiente manera: las resinas se convierten en asfaltenos y los aceites en resinas, ocasionando un aumento en la viscosidad del asfalto, produciendo así un envejecimiento que en algunos casos es prematuro.

En lo que respecta a las propiedades físicas del asfalto de mayor importancia en lo concerniente a diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos asfálticos, se pueden mencionar las siguientes: durabilidad, adhesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

- **Durabilidad:** representa la medida de qué tanto puede mantener sus características originales un asfalto expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es muy difícil de definir con base en las propiedades del asfalto, puesto que está íntegramente relacionada con el comportamiento del pavimento, que a su vez está afectado por el diseño estructural del pavimento, el diseño de la mezcla, las características del agregado y el proceso constructivo, entre otros aspectos. Las pruebas de laboratorio que se utilizan para determinar la durabilidad del asfalto son: Prueba de película delgada en horno (TFO) y Prueba de película delgada al horno rotatorio (RTFO).

- Adhesión y cohesión: en la mezcla asfáltica el asfalto debe ser capaz de adherirse fuertemente al agregado pétreo, a esta propiedad se le conoce como adhesión, y a la capacidad del asfalto de mantener firmemente en su lugar las partículas de agregado pétreo en la mezcla asfáltica se le conoce como cohesión.

El ensayo de laboratorio con el que se correlaciona la adhesión y cohesión de la mezcla es el de ductilidad, aunque no mide directamente estas características del asfalto, examina una propiedad que se ha venido relacionando con estas; la presencia o ausencia de ductilidad es de mayor importancia que el grado de ductilidad que presenta la mezcla, debido a que los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos a los que les falta esta característica; por otra parte, los asfaltos con ductilidad muy alta son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura.

- Susceptibilidad a la temperatura: una característica principal de los asfaltos es que son termoplásticos, por lo tanto se vuelven más duros o viscosos a medida que la temperatura disminuye, y más blandos o menos viscosos a medida que la temperatura aumenta.

Por lo tanto, es de suma importancia conocer la susceptibilidad a la temperatura del asfalto que se va a utilizar, debido a que por medio de esta se puede definir la temperatura de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica. Este dato es fácilmente identificado por medio de la curva reológica del asfalto que se va a utilizar.

- Endurecimiento y envejecimiento: la tendencia común de los asfaltos es de endurecerse durante la construcción, y continúa posteriormente cuando está en funcionamiento la mezcla asfáltica en caliente (MAC); este endurecimiento es causado principalmente por la oxidación la cual se origina debido al contacto del asfalto con el oxígeno; esta ocurre a altas temperaturas con base en lo anteriormente expuesto, debido a que a mayor temperatura, el asfalto se presenta en forma fluida por lo que proporciona una película delgada.

Generalmente, el mayor endurecimiento del asfalto se puede ocasionar en el proceso de mezclado al no tener un buen control de calidad; este proceso se puede retardar cuando la mezcla asfáltica presenta una cantidad pequeña de vacíos interconectados y que los agregados presenten una capa gruesa de recubrimiento.

Con base en las propiedades físicas del asfalto anteriormente expuestas, hoy en día la tendencia para seleccionarlo es en función del clima donde estará en servicio, introduciendo el concepto de grado de desempeño o grado de *performance* por sus siglas en inglés (PG) del ligante.

Estos cementos asfálticos PG son aquellos cuyo comportamiento en los pavimentos está definido por las temperaturas máxima y mínima que se esperan en el lugar de su aplicación, dentro de las cuales se asegura un desempeño (*performance*) adecuado para resistir deformaciones o agrietamientos por temperaturas bajas o por fatiga, en condiciones de trabajo que se han correlacionado con ensayos especiales y simulaciones de envejecimiento a corto y a largo plazo.

Por lo regular los cementos asfálticos PG están clasificados por su grado de desempeño, si se tiene un asfalto tipo PG 70-22, esto representa lo siguiente: el primer número (70) conocido como “grado de alta temperatura” significa que el ligante mantendrá sus propiedades físicas adecuadas al menos hasta los 70°C, lo que representa la temperatura más alta correspondiente al clima donde el ligante estará en servicio.

El segundo número (-22) llamado regularmente “grado de baja temperatura”, significa que el ligante mantendrá las propiedades físicas adecuadas hasta al menos los -22°C.

Aunque en los laboratorios de campo o gabinete de los proyectos no es muy común encontrar equipo para realizar ensayos a los asfaltos, es indispensable conocer las propiedades que deben cumplir los asfaltos que llegan al proyecto; esta información se puede verificar en la hoja técnica del asfalto abastecido.

Por lo tanto, sin entrar en detalles, se presenta a continuación una tabla resumen con los ensayos de laboratorio que por lo regular deben realizarse, e incluir en la hoja técnica del asfalto recibido.

Esta tabla incluye la norma AASHTO y su correspondiente de la Secretaría de Comunicación y Transporte (SCT) de México, por ser el país geográficamente más cerca con avance significativo en la investigación en el ramo de materiales para carreteras.

Tabla I **Ensayos al asfalto**

ENSAYO AL ASFALTO	NORMA AASHTO	NORMA SCT
Viscosidad dinámica 60°C	T-202	MMP-4-05-002
Viscosidad cinemática 135°C	T-201	MMP-4-05-003
Viscosidad Saybolt-Furol 135°C	T-72	MMP-4-05-004
Penetración 25°C	T-49	MMP-4-05-006
Punto de Inflamación	T-48	MMP-4-05-007
Punto de reblandecimiento	T-53	MMP-4-05-009
Prueba de película delgada en horno (TFO)	T-179	MMP-4-05-010
Prueba de película delgada en horno rotatorio (RTFO)	T-240	MMP-4-05-025
Ductilidad	T-51	MMP-4-05-011
Solubilidad	T-44	MMP-4-05-008
Gravedad específica absoluta	T-228	ASTM D-70

Fuente: elaboración propia.

1.2.2. Características del cemento asfáltico modificado (ligante)

Los ligantes asfálticos modificados tienen como objetivo superar las propiedades del asfalto convencional, mejorando así el desempeño de la MAC a largo plazo.

Si bien existe una gran variedad de modificadores que cambian muchas propiedades de las MAC, la mayoría de ellos reducen la dependencia con la temperatura, el endurecimiento por oxidación prematuro del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad, aumentando la flexibilidad de la MAC.

Las propiedades viscoelásticas del cemento asfáltico pueden ser mejoradas mediante la adición de modificadores del asfalto que pueden ser polímeros. Los polímeros pueden ser clasificados en elastómeros utilizados para mejorar las propiedades elásticas del cemento asfáltico y en plastómeros los cuales mejoran la rigidez del asfalto.

Con el uso de los polímeros, se pueden modificar varias propiedades del cemento asfáltico, entre las cuales se encuentran las siguientes:

- Susceptibilidad a la temperatura
- Adhesión a los agregados
- Resistencia a la deformación permanente, y al agrietamiento por fatiga, ductilidad y elasticidad

De acuerdo con las especificaciones guía para asfaltos modificados con polímeros, desarrolladas por el Grupo de Trabajo No. 31 de la AASHTO - AGC (*American General Contractor*) – ARTBA (*American Road and Transportation Builders Association*), se agrupan los diferentes modificadores de asfaltos de la siguiente manera:

- a) Polímero tipo I: es un modificador que mejora el comportamiento de las mezclas asfálticas tanto en altas temperaturas como en bajas temperaturas; entre las configuraciones más utilizadas de este tipo de modificador se encuentran las de Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) y la de Estireno-Butadieno (SB) entre otras, las cuales son comúnmente utilizadas en mezclas asfálticas para carpetas delgadas, así como para carpetas de rodadura, en pavimentos con altos índices de tránsito y vehículos pesados, en climas fríos y cálidos.

- b) Polímero tipo II: es un modificador que mejora el comportamiento de las mezclas asfálticas en bajas temperaturas de servicio; entre la configuración más utilizada de este tipo se encuentran Estireno-Butadieno-Látex o Neopreno-Látex, que se utiliza en todos los tipos de carpetas para pavimentos donde se requiera mejorar su comportamiento de servicio en climas fríos y templados.

- c) Polímero tipo III: es un modificador que mejora la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas; es fabricado con base de polímero de tipo plastómero; las configuraciones más utilizadas son de Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad (HDPE, LDPE), entre otras; se utiliza en climas calientes en mezclas para carpetas de rodadura para pavimentos, que presentan altos índices de tránsito.

- d) Hule molido de neumático: es un modificador que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por gradientes de temperaturas, se fabrica con base en productos de molienda de neumáticos.

1.2.3. Características del agregado pétreo

Los agregados pétreos que comúnmente se utilizan en las mezclas asfálticas en caliente pueden ser naturales o procesados.

Los naturales son los que sencillamente se extraen de depósitos formados por procesos naturales como la erosión y degradación por la acción del viento, agua, movimiento del hielo y los químicos.

Estos agregados se utilizan sin ningún tratamiento más que la limpieza y el cribado para separarlo por tamaño. Entre los principales agregados naturales se encuentran las gravas y arenas, como se puede apreciar en la figura 2.

Figura 2. **Banco de agregados naturales en el lecho del río Pantaleón**



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en el km. 89 de la circunvalación de Siquinalá y Santa Lucía Cotzumalguapa de la CA-2 Occidente para la empresa FCC Construcción, S.A.

Los agregados procesados (figura 3), son agregados naturales que han sido lavados, triturados o tratados para mejorar ciertas características de comportamiento de la mezcla asfáltica, por lo regular su explotación se da en canteras.

La trituración a la cual están sometidos es con la finalidad de modificar las siguientes características: cambiar la textura superficial de la partícula de lisa a rugosa, cambiar la forma de la partícula de redonda a angular y para mejorar la distribución de los tamaños de las partículas.

Figura 3. Trituración de agregados naturales en planta de trituración de la empresa Sigma Constructores



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en la visita a planta de trituración de la empresa Sigma Constructores, por parte del curso de Tipología de Pavimentos, de la Maestría en Ingeniería Vial de la Universidad de San Carlos de Guatemala, sexta cohorte, noviembre de 2010.

Existen otros dos tipos de agregados que en menor grado se utilizan en las mezclas asfálticas como los sintéticos, que por lo regular son un subproducto industrial como la escoria de alto horno, los pavimentos existentes pueden ser reciclados RAP ("*reclaimed asphalt pavement*") los cuales son una fuente de agregados para mezclas asfálticas.

El agregado constituye aproximadamente entre el 93 y 97 por ciento en peso, y entre un 75 y el 85 por ciento en volumen del total de la mezcla asfáltica en caliente (MAC); por lo que el comportamiento de esta se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características portantes de las mezclas asfálticas en caliente (MAC).

Con base en lo anterior, se comprueba que el comportamiento de la mezcla asfáltica dependerá de la calidad del agregado utilizado, por lo que la calidad de este es el factor principal al momento de escoger los agregados que se van a utilizar, y en segundo plano pero muy relacionado a ello, se deberán tomar en cuenta los siguientes aspectos: la distancia, costo y disponibilidad de agregados.

Entre las principales propiedades o características que debe cumplir el agregado mineral a utilizar en una MAC son las siguientes:

- Graduación y tamaño máximo del agregado
- Limpieza (Materiales deletéreos)
- Dureza (Tenacidad)
- Durabilidad al sulfato de sodio
- Forma del agregado (angularidad, partículas planas y alargadas)
- Textura del agregado (lisa o rugosa)
- Capacidad de absorción
- Afinidad con el asfalto
- Peso específico

La importancia de las propiedades anteriores de los agregados, radica en que cada una de ellas al no estar dentro de los valores de especificación, originan un comportamiento no deseado de la mezcla asfáltica en caliente puesta en servicio; por ejemplo: al especificar la angularidad de los agregados tanto gruesos como finos, se logra un alto ángulo de fricción interna por lo que la mezcla presentará alta resistencia al corte y al ahuellamiento.

Los agregados de textura rugosa de buena cubricidad, proporcionan más resistencia que los redondeados y de textura lisa, las partículas planas y alargadas cuya relación entre las dimensiones máxima y mínima es mayor de 5, origina que los agregados sean más propensos a fracturarse, al ser manipulados en la construcción de la carpeta de rodadura o al efecto de las cargas de tránsito al entrar en servicio.

Al limitar la cantidad de arcilla se garantiza la mejor adherencia entre el ligante asfáltico y los agregados. Los materiales deletéreos como esquistos, madera y carbón entre otros, al estar presentes dentro de la mezcla asfáltica hacen que esta tenga un comportamiento no adecuado al momento de entrar en servicio.

Al utilizar agregados con valores altos de dureza, presentarán mayor resistencia a la degradación mecánica al momento de ser manipulados en la construcción y servicio de la carpeta de rodadura. Los agregados que presenten mayor durabilidad al ataque con sulfato de sodio o magnesio, tendrán mejor resistencia al deterioro originado por la acción del clima.

Los agregados pétreos que se van a utilizarse pueden presentar dos características de afinidad con el agua:

- Aquellos que repelen el agua conocidos como hidrofóbicos, los cuales por lo general no presentan problemas al ser utilizados en las MAC.
- Los que atraen el agua y la retienen, más conocidos como hidrofílicos, los cuales hacen que la cubierta de asfalto se pierda por acción del agua.

Por lo que para este caso es necesario utilizar un aditivo antidesvestimiento dentro de los materiales que formen las mezclas asfálticas en caliente, con el fin de favorecer la adherencia entre el agregado y el asfalto.

1.2.4. Características de las mezclas asfálticas en caliente

El desempeño de una mezcla asfáltica en caliente está íntegramente relacionado con las características de funcionamiento de la mezcla, y estas a la vez lo están directamente con las propiedades de los materiales que la conforman; allí radica la importancia de seleccionar el tipo, cantidad de agregados y asfalto, con el fin de obtener las características de desempeño que satisfagan las exigencias de cada proyecto de pavimento flexible, por lo que las características que debe tener una mezcla asfáltica en caliente al entrar en servicio son las siguientes:

- **Estabilidad:** es la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir la deformación y el desplazamiento originados por la acción de las cargas del tránsito. La estabilidad es proporcionada por la fricción interna y la cohesión; la fricción interna depende de la textura superficial, forma de la partícula, granulometría del agregado, densidad de la mezcla, y la cantidad y tipo de asfalto; la cohesión depende del contenido de asfalto.
- **Trabajabilidad:** es la capacidad de la mezcla de ser colocada y compactada sin requerir esfuerzos muy grandes, esta característica depende de una característica o la combinación de algunas propiedades del agregado pétreo, granulometría y contenido y viscosidad del asfalto utilizado.

- Durabilidad: es la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir los efectos dañinos del agua, temperatura, tránsito y aire que pueden provocar el envejecimiento del asfalto, la desintegración del agregado y desprendimiento de la película de asfalto del agregado; esta característica de la mezcla asfáltica está directamente relacionada con el espesor de la película de asfalto y con los vacíos de aire.
- Flexibilidad: es la capacidad de la mezcla asfáltica de amoldarse sin sufrir agrietamiento o fisuración, ocasionados por los asentamientos de las capas inferiores del pavimento incluyendo la subrasante.
- Resistencia a la fatiga: es la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir la repetición de cargas del tránsito; el agrietamiento por fatiga está relacionado con el contenido y rigidez del asfalto; si la mezcla trabaja con un contenido muy alto, la mezcla tenderá a deformarse elásticamente, la resistencia a la fatiga depende en gran medida de la capacidad estructural del pavimento.
- Resistencia al fisuramiento por baja temperatura: es la capacidad de la mezcla asfáltica a no agrietarse a bajas temperaturas; depende de la rigidez del asfalto a bajas temperaturas.
- Resistencia a la humedad: es la capacidad de la mezcla de resistir el paso de agua y aire por los vacíos dentro de la mezcla asfáltica; se relaciona con las propiedades químicas del agregado pétreo y de los vacíos de aire en la mezcla compactada.

- Resistencia al deslizamiento: es la capacidad de la mezcla asfáltica a no perder la adherencia entre las llantas y la superficie de rodadura en épocas cuando está expuesta a la humedad; las características de los agregados y el contenido de asfalto proporcionan la resistencia al deslizamiento.

1.3. Tipos de deterioro de las mezclas asfálticas en caliente (MAC)

Hoy en día es de suma importancia conocer los tipos de fallas que pueden presentarse en una mezcla asfáltica en caliente durante su vida útil al estar expuesta a las cargas del tránsito y al medio ambiente, sin embargo debido a las limitaciones de presupuesto en Guatemala, no se ha logrado desarrollar la investigación en muchas áreas de la ingeniería vial como lo han hecho otros países como Chile, Colombia, México y especialmente Estados Unidos. Con base en lo anterior, se investigaron varios manuales que se han originado de estudios previos como:

- FHWA-SA-95—003 “*Background of superpave asphalt mixture design and analysis*”.
- Publicaciones técnicas No. 197 y No. 267 “Mecánica de materiales para pavimentos” y “Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas” respectivamente, de la Secretaría de Comunicación y Transporte de México; entre otros.

Estos estudios coinciden en dividir en tres, los grupos básicos de deterioro que presentan las mezclas asfálticas en caliente, los cuales están directamente relacionados con las propiedades individuales o en conjunto de los materiales que las forman.

1.3.1. Deformación permanente

En nuestro medio es ampliamente conocida como ahuellamiento y es irrecuperable; por lo regular es una manifestación de un déficit estructural del pavimento, debido a que la deformación se da en todas las capas de la estructura de pavimento, incluyendo a la subrasante, originado por la repetición de cargas de tránsito.

Existe otro tipo de ahuellamiento donde la deformación se da únicamente en la carpeta asfáltica, este es originado por la baja resistencia al corte que presenta la mezcla asfáltica y por lo tanto no es capaz de soportar las cargas del tránsito; está asociado a altas temperaturas de trabajo de la mezcla asfáltica en caliente.

De acuerdo con el manual de pavimentos para mezclas asfálticas en caliente del Departamento del Transporte y la Administración de Carreteras de los Estados Unidos, entre las principales causas de la deformación permanente o ahuellamiento están:

- Baja cantidad de vacíos de aire (menos del 4%)
- Exceso de vacíos de aire (más del 8%)
- Cemento asfáltico de baja viscosidad
- Mayor consolidación de las capas inferior a la carpeta de rodadura
- Mayor exposición de la carpeta de rodadura a velocidades bajas o cargas de larga duración
- Utilización de arena natural, poca cantidad de polvo mineral y la utilización de agregados redondeados

Figura 4. **Deformación permanente a nivel de carpeta asfáltica**



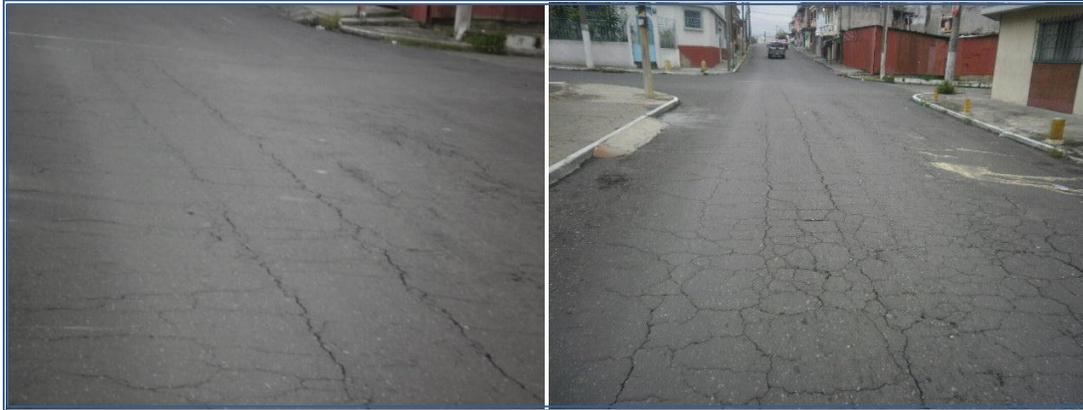
Fuente: Instituto Nacional de Vías. Guía Metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. P B-20.

1.3.2. Agrietamiento por fatiga

Es el resultado de un esfuerzo de tensión mayor a la resistencia a la tensión de la mezcla asfáltica en caliente; en un inicio se manifiesta por fisuras longitudinales intermitentes dentro de la huella; generalmente es asociado con la repetición y magnitud de las cargas del tránsito.

El problema se hace más grave cuando existe un drenaje deficiente en el pavimento lo cual contribuye a que las capas inferiores se saturen y pierdan resistencia, otra causa del agrietamiento por fatiga es el reiterado paso de camiones sobrecargados y/o por espesores de pavimento no adecuados; en su estado más avanzado se representa por medio de baches y desprendimientos de la carpeta asfáltica, en general se considera que el agrietamiento por fatiga es más un problema estructural que de materiales.

Figura 5. **Agrietamiento por fatiga**



Fuente: elaboración propia. Fotografía tomada en noviembre de 2010, en la vía que va de la calzada Roosevelt hacia avenida La Castellana z. 9, en la 41 calle "A" entre 7 y 8 avenida, z. 8.

1.3.3. Fisuración por baja temperatura

Es atribuible a la deformación por tensión inducida en la mezcla asfáltica en caliente a medida que la temperatura baja; este tipo de deterioro es atribuible más a los efectos del medio ambiente que a la acción de las cargas de tránsito; se representa por medio de fisuras transversales intermitentes perpendiculares a la dirección del flujo de tránsito.

Las fisuras por baja temperatura se forman por contracciones en la carpeta asfáltica que por lo regular están en servicio en climas fríos; cuando la carpeta se contrae, se originan deformaciones de tensión en su interior, cuando estos esfuerzos exceden la resistencia a la tensión de la mezcla asfáltica, esta se fisura; entre algunas de las causas que pueden originar este tipo de deterioro están: la utilización de asfaltos duros en climas fríos, ligantes asfálticos oxidados y mezclas con un alto porcentaje de vacíos.

Figura 6. **Fisuración por baja temperatura**



Fuente: Instituto Nacional de Vías. Guía Metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras. P. B-16.

1.4. Reseña histórica de especificaciones para las (MAC)

En Guatemala se publicaron en mayo de 1975 las primeras especificaciones de diseño y trabajo de mezclas asfálticas en caliente, realizadas por Ingenieros Consultores de Centro América, los cuales tuvieron la colaboración de ingenieros de la Dirección General de Caminos del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas, así como de ingenieros miembros de la Cámara Guatemalteca de la Construcción.

En estas especificaciones en la sección 407 “Concreto Asfáltico” se especificaba todo lo relacionado con los materiales, mezcla, diseño, colocación y control de calidad de mezclas asfálticas en caliente.

Posteriormente, debido al avance en tecnología y cambios en los equipos utilizados en construcciones viales, en septiembre del 2001 se actualizaron las especificaciones anteriores por parte de Ingenieros Consultores de Centro América, S.A., y con la colaboración de ingenieros de la Dirección General de Caminos del Ministerio de Comunicaciones Infraestructura y Vivienda, así como de ingenieros miembros de la Cámara Guatemalteca de la Construcción.

En estas especificaciones en la sección 401 “Concreto Asfáltico en caliente” se especifica todo lo relacionado con los materiales, mezcla, diseño, colocación y control de calidad de mezclas asfálticas en caliente.

En la sección 411, “Asfaltos Modificados” se mencionan los tipos de polímeros con los cuales se puede modificar un asfalto y los posibles usos que estos pueden tener, asimismo de acuerdo con la guía para asfaltos modificados con polímeros, desarrollada por el Grupo de Trabajo No. 31 de la AASHTO-AGC (*American General Contractor*) ARTBA (*American Road and Transportation Builders Association*) se detallan los diferentes tipos de asfaltos modificados que se pueden trabajar.

Para efectos de diseño en las Especificaciones Generales de 1975 se utilizaban los siguientes: método de Hubbard Field (AASHTO T-169, ASTM D 1138), método Hveem (AASHTO T-246, ASTM D 1560) desarrollado por Francis N Hveem, ingeniero del Departamento de Transportes de California, el cual para compactar las briquetas utiliza el compactador de amasado de California, y el método Marshall (AASHTO T-245, ASTM D 1559), desarrollado por Bruce Marshall ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi, el cual utiliza para la compactación de las briquetas el martillo Marshall, siendo este último el más utilizado en Guatemala hasta la fecha.

En las Especificaciones Generales del 2001, se mencionan como métodos de diseño los siguientes: método Marshall que debido a que el equipo que utiliza es más fácil de adquirir y de un precio relativamente accesible, se ha mantenido a la vanguardia como método de diseño de mezclas asfálticas en caliente, sin embargo hoy en día en los países con avances en la investigación del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente le adjudican dos limitaciones esenciales a este método, las cuales son:

- La compactación por impacto que utiliza este método no refleja la densificación que la mezcla sufre bajo los esfuerzos producidos por las cargas del tránsito, en un pavimento en servicio.
- El valor de Estabilidad Marshall, el cual es de suma importancia para este método; no se puede correlacionar con la resistencia al corte que debe tener la mezcla asfáltica en caliente.

Por lo que también incluye un método desarrollado por el SHRP (*Strategic Highway Research Program*) conocido como SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavement*) incluyendo un sistema más avanzado de especificación de materiales, diseño de mezclas asfálticas y su análisis con el objeto de poder predecir su comportamiento o desempeño en el futuro, bajo las cargas de tránsito de diseño y clima.

2. REVISIÓN Y PROPUESTA DE ESPECIFICACIÓN

En la actualidad, en Guatemala las especificaciones para mezclas asfálticas en caliente que están vigentes son las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes edición septiembre 2001. En esta edición en la división 400 “Pavimentos asfálticos”, sección 401 “Pavimentos de concreto asfáltico en caliente”, se rige todo lo concerniente a la explotación de agregados, apilamiento, trituración, asfalto convencional, diseño, mezcla, colocación, compactación, control de calidad, medida, tolerancias y pago de mezclas asfálticas en caliente.

En la sección 411, “Asfaltos modificados”, se especifica lo concerniente a tipos de asfaltos modificados, usos, normas de aplicación y medidas de pago de los asfaltos modificados.

De acuerdo con los beneficios en desempeño que se obtienen al utilizar las mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados, las mismas se vuelven más duraderas y capaces de soportar las exigencias del tránsito y medio ambiente, que cada día son más severos y de acuerdo con las limitaciones que se tiene como país en el área de investigación, se analizarán las especificaciones que se utilizan en países con avances significativos en el campo de las mezclas asfálticas, para poder definir cuáles se pueden aplicar en Guatemala y proponerlas para que en un futuro sean incluidas en la siguiente versión de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes.

A continuación se analizará cada una de las propiedades, con las que deben cumplir los elementos que conforman una mezcla asfáltica en caliente.

2.1. Especificaciones para agregados sección 401.03 a) y b)

En esta sección se realizó una comparación entre las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes edición 2001, la cual es la que actualmente se utiliza en Guatemala, así como de especificaciones de otros países con avances en la investigación del comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente como: Estados Unidos (Instituto de Asfalto), México (Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)), entre otros. A continuación se analizará cada una de las propiedades con las que deben de cumplir los agregados que van a utilizarse en una MAC.

2.1.1. Abrasión

Los agregados deben tener una resistencia a la desintegración mecánica siguiente:

Tabla II. **Especificación de abrasión para mezclas asfálticas en caliente (MAC) según métodos: AASHTO T-96, ASTM C-131**

GUATEMALA: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes ed. 2,001	35%
ESTADOS UNIDOS: Instituto de asfalto	Capas de base, intermedias y nivelación $\leq 50\%$ Capas de desgaste $\leq 40\%$
ESTADOS UNIDOS: Superpave	35% a 45%
MEXICO: SCT	30%

Fuente: elaboración propia. Recopilación de especificaciones de otros países.

De acuerdo con los valores que se muestran en la tabla anterior, se considera adecuado el valor utilizado en Guatemala.

2.1.2. Desintegración al sulfato de sodio

Los agregados deben tener una resistencia a la desintegración química siguiente:

Tabla III. Especificación de desintegración al sulfato de sodio para mezclas asfálticas en caliente (MAC) según métodos: AASHTO T-104, ASTM C-88

GUATEMALA: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes ed. 2001	12%
ESTADOS UNIDOS: Instituto de Asfalto	15%
ESTADOS UNIDOS: Superpave	10% a 20%
MEXICO: SCT	10%

Fuente: elaboración propia. Recopilación de especificaciones de otros países.

De acuerdo con los valores que se muestran en la tabla anterior, se considera adecuado el valor utilizado en Guatemala, por lo que no debe cambiarse.

2.1.3. Caras fracturadas

Los agregados deben tener los números de caras fracturadas que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla IV. **Especificación de número de caras fracturadas para mezclas asfálticas en caliente (MAC) según métodos: ASTM D-5821**

ESALs 10 ⁶	Guatemala	Estados Unidos		Chile
	Especificaciones 2001	Instituto Asfalto	Superpave capa desgaste	Manual de carreteras vol. 5 5.408.201
< 0.3	90/75**	60/60**	55/-**	90/70*
< 3	90/75**	60/60**	75/-**	90/70*
< 10	90/75**	60/60**	85/80**	90/70*
< 30	90/75**	60/60**	95/90**	90/70*
< 100	90/75**	60/60**	100/100**	90/70*
≥ 100	90/75**	60/60**	100/100**	90/70*

Fuente: elaboración propia. Recopilación de especificaciones de otros países.

A continuación se detalla el significado de las especificaciones utilizadas en los países consultados.

- Chile: (90/70), 90% caras fracturadas para rodadura y 70% para capa intermedia.
- Guatemala: (90/75), 90% con una cara fracturada y el 75% con dos caras fracturadas.
- Estados Unidos: (95/90), 95% con una cara fracturada y el 90% con dos caras fracturadas.

De acuerdo con los valores que se muestran en la tabla anterior, se recomienda cambiar como mínimo a 90% con dos caras fracturadas, de preferencia un 100% triturado.

2.1.4. Partículas planas y alargadas

Los agregados deben tener el porcentaje de partículas planas y alargadas siguiente:

Tabla V. **Especificación de partículas planas y alargadas para mezclas asfálticas en caliente (MAC) según método ASTM D-4791**

GUATEMALA: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes ed. 2001	8% max.
CHILE: Manual De Carreteras vol 5. Sección 5.408.201	Capa de desgaste 10% max. Capa intermedia 15% max.
ESTADOS UNIDOS: Superpave	10% max.
MEXICO: SCT	35% max.

Fuente: elaboración propia. Recopilación de especificaciones de otros países.

De acuerdo con los valores que se muestran en la tabla anterior, se considera adecuado el valor utilizado en Guatemala, por lo que no debe cambiarse.

2.1.5. Equivalente de arena del agregado fino pasa 100% tamiz de 4.75 mm.

Los agregados finos deben tener un equivalente de arena, como lo muestra la tabla siguiente.

Tabla VI. **Especificación de equivalente de arena del agregado fino para mezclas asfálticas en caliente (MAC) según método AASHTO T-176**

GUATEMALA: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes ed. 2001	35% min.
CHILE: Manual De Carreteras vol 5. Sección 5.408.201	Capa de desgaste 50% min. Capa intermedia 45% min.
ESTADOS UNIDOS: Superpave	40% - 50% min. Según ESALs.
MEXICO: SCT	50% min.

Fuente: elaboración propia. Recopilación de especificaciones de otros países.

De acuerdo con los valores que se muestran en la tabla anterior, se puede observar que el mínimo utilizado en Guatemala es menor a los especificados en los países analizados; por lo que se propone cambiar este valor a por lo menos 45% como mínimo, debido a que la geología de Guatemala contiene materiales en todo el territorio nacional que cumplen con ese valor, obteniendo un mejor comportamiento de este material.

2.1.6. Índice de plasticidad del agregado fino pasa 100% tamiz de 4.75 mm.

Los agregados finos deben tener un índice de plasticidad, que estén especificados en la tabla VII.

Tabla VII. **Especificación de Índice de plasticidad del agregado fino para mezclas asfálticas en caliente (MAC) según método AASHTO T-90**

GUATEMALA: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes ed. 2001	4% max.
CHILE: Manual de Carreteras vol 5. Sección 5.408.201	No presenta plasticidad
ESTADOS UNIDOS: Superpave	No presenta plasticidad
MEXICO: SCT	No presenta plasticidad

Fuente: elaboración propia. Recopilación de especificaciones de otros países.

De acuerdo con los valores que se muestran en la tabla anterior, se puede observar que el valor utilizado en Guatemala es mayor a los especificados en los países analizados; por lo que se propone cambiar este valor por materiales que no presenten plasticidad N.P.

Esta transformación puede hacerse, con base en que, esta propiedad cuando está presente, es característica propia de los agregados finos e incluso de algún tipo de *filler*, los cuales juegan un papel importante en la composición de las mezclas asfálticas densas en caliente, debido a su gran superficie específica, condicionando así la cantidad de asfalto a utilizar.

Las mezclas asfálticas en caliente compuestas con agregados que presentan algún valor de plasticidad, son más propensas a experimentar un mal desempeño al entrar en servicio en especial en época de lluvia, debido a los cambios volumétricos que experimentan y a la pérdida de adherencia entre el agregado y asfalto, originando así el envejecimiento de la mezcla.

2.1.7. Granulometrías utilizadas en las MAC

Los agregados utilizados en las MAC, al momento de mezclarlos, deben cumplir con las granulometrías presentadas en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Especificación de granulometría del agregado para mezclas asfálticas en caliente (MAC) según método: AASHTO T-27, T-11**

GUATEMALA: Sección 401.03 a) Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes edición 2,001.							
Tamiz No.	Abertura mm.	A 50.8 mm.	B 37.5 mm.	C 25.4 mm.	D 19 mm.	E 12.5 mm.	F 9.5 mm.
2 1/2 "	63	100					
2 "	50	90-100	100				
1 1/2 "	37.5	-	90 - 100	100			
1 "	25	60 - 80	-	90 - 100	100		
3/4 "	19	-	56 - 80	-	90 - 100	100	
1/2 "	12.5	35 - 65	-	56 - 80	-	90 - 100	100
3/8 "	9.5	-	-	-	56 - 80	-	90 - 100
No. 4	4.75	17 - 47	23 - 53	29 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85
No. 8	2.36	10 - 36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67
No. 50	0.3	3 - 15	4 - 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23
No. 200	0.075	0 - 5	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10

Fuente: DGC. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes edición 2001, sección 401. P.3.

En Guatemala se utilizan las granulometrías anteriores para mezclas asfálticas en caliente, tomando especial importancia en las especificaciones analizadas el material que pasa el tamiz 2.36 mm. (No. 8); ya que de este material depende en gran medida el desempeño de la MAC.

Tabla IX. **Especificación de granulometría del Instituto de asfalto**

		ESTADOS UNIDOS (INSTITUTO DEL ASFALTO), UTILIZANDO TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL				
Tamiz No.	Abertura mm.	1 1/2" 37.5 mm.	1 " 25.4 mm.	3/4" 19 mm.	1/2" 12.5 mm.	3/8" 9.5 mm.
2 "	50	100				
1 1/2 "	37.5	90 - 100	100			
1 "	25	-	90 - 100	100		
3/4 "	19	56 - 80	-	90 - 100	100	
1/2 "	12.5	-	56 - 80	-	90 - 100	100
3/8 "	9.5	-	-	56 - 80	-	90 - 100
No. 4	4.75	23 - 53	29 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85
No. 8	2.36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67
No. 50	0.3	4 - 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23
No. 200	0.075	0 - 5	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10

Fuente: Instituto de asfalto. Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla asfáltica en Caliente, serie de manuales No. 22 (MS-22). P. 45.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, las granulometrías que se utilizan en Guatemala son las mismas que las del Instituto de Asfalto, siguiendo con el criterio de prestarle especial atención al material que pasa el tamiz No. 8.

Tabla X. **Especificación de granulometría de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)**

MÉXICO , Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) cualquier número de ESALs, utilizando tamaño máximo nominal						
Tamiz No.	Abertura mm.	1 1/2" 37.5 mm.	1 " 25.4 mm.	3/4" 19 mm.	1/2" 12.5 mm.	3/8" 9.5 mm.
2 "	50	100				
1 1/2 "	37.5	90 - 100	100			
1 "	25	74 - 90	90 - 100	100		
3/4 "	19	62 - 79	79 - 90	90 - 100	100	
1/2 "	12.5	46 - 60	58 - 71	72 - 90	90 - 100	100
3/8 "	9.5	39 - 50	47 - 60	60 - 76	76 - 90	90 - 100
No. 4	4.75	25 - 34	30 - 39	37 - 48	45 - 59	56 - 69
No. 10	2	13 - 21	17 - 24	20 - 29	25 - 35	28 - 42
No. 20	0.85	6 - 13	9 - 16	12 - 19	15 - 22	18 - 27
No. 40	0.425	3 - 9	5 - 11	8 - 14	11 - 16	13 - 20
No. 60	0.25	2 - 7	4 - 9	6 - 11	8 - 13	10 - 15
No. 100	0.15	1 - 5	2 - 7	4 - 8	5 - 10	6 - 12
No. 200	0.075	0 - 3	1 - 4	2 - 5	2 - 6	2 - 7

Fuente: SCT. Normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México, Materiales pétreos para mezclas asfálticas, N-CMT-4-04. P. 4.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México (SCT), especifica dos granulometrías para MAC: una para valores de ESALs menor a 1 millón y la otra para cualquier número de ejes equivalentes a 18,000 libras; esta última fue la que se utilizó en el presente trabajo.

La metodología SUPERPAVE varía un tanto de las anteriores debido a que utiliza un gráfico en donde las ordenadas son los porcentajes que pasa cada uno de los tamices, y las abscisas en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm. elevadas a la potencia 0.45, conocido como gráfico de Fuller.

En lo que concuerda la especificación de la SUPERPAVE con las demás analizadas, es en la definición del tamaño máximo nominal del agregado el cual es un tamiz más grande que el primero que retiene más del 10%, y la de tamaño máximo, el cual es el tamaño de tamiz mayor que el tamaño máximo nominal.

Para especificar la granulometría de agregados, la metodología SUPERPAVE utiliza dos conceptos adicionales como: puntos de control y zona restringida. Los puntos de control son de paso obligado y corresponden al tamaño máximo nominal; un tamaño intermedio utilizando el tamiz No. 8, y un tamaño de polvo pasa No. 200. La zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (tamices No. 4 o No. 8 y el tamiz No. 50), formando un área que debe ser librada por la curva granulométrica que se vaya a trabajar.

Con base en lo anterior, se puede decir que la zona de restricción forma una banda a través de la cual fue recomendado no pasar graduaciones de agregados. La zona de restricción fue adoptada para reducir la posibilidad de que aparezcan ahuellamiento en las MAC.

Aunque la zona restringida fue incluida por Superpave como una recomendación y no como una especificación requerida, algunas agencias en EUA la interpretaron como un requerimiento; a raíz de eso, hoy en día se han realizado estudios en los que se pone en duda la utilidad de la zona restringida.

Uno de esos estudios es el realizado por investigadores de la *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP – Cooperativa Nacional de Investigación en Carreteras) los cuales desarrollaron una investigación titulada *NCHRP Report 464 The Restricted Zone in the Superpave Agregate Gradation Specification*, basando la revisión de las recomendaciones de la zona de restricción en el Reporte SHRP-A-408 de la SHRP, nivel uno del diseño de mezclas; en donde se incluyen las secciones de selección de materiales, compactación, acondicionamiento, y surge la idea de la zona de restricción.

El Reporte SHRP-A-408 de la SHRP, resume el desarrollo de los aspectos de diseño volumétrico de Superpave bajo el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP).

Bajo este programa se reunió a un grupo de expertos en el área de producción de agregados y diseño y comportamiento de mezclas asfálticas en caliente, con la finalidad de presentar ante ellos una serie de cuestionamientos consistente básicamente en siete características del agregado:

- Límites de graduación
- Caras fracturadas
- Contenido de arenas naturales
- Abrasión
- Agregados redondeados
- Materiales deletéreos
- Equivalente de arena

Según esto, la intención original de incluir una zona restringida, se debió a que algunas graduaciones se ven afectadas por el uso de arenas naturales redondeadas o con distribución de tamaño limitado y a la proporción admisible de la fracción fina (0.15 a 0.6 mm) del total de la arena (que pasa por 2.36 mm), con el fin de producir una MAC que tuviera una buena resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento.

En el informe “*Report 464 The Restricted Zone in the Superpave Agregate Gradation Specification*”, algunos expertos coincidieron en que cumplir con el criterio de la zona de restricción, quizás no es necesario para producir mezclas que tengan un buen comportamiento en términos de ahuellamiento.

El criterio anterior tomó como referencia, el hecho de que algunas agencias de carreteras de EUA, proporcionaron datos de graduaciones de agregados con un valor alto de angularidad (FAA) que pasan a través de la zona de restricción, obteniendo mezclas que presentan buen comportamiento; por lo que se concluyó que si se tiene una mezcla de agregados con un valor alto de angularidad, es probable que la misma sea resistente al ahuellamiento bajo tráfico, sin tener en cuenta si la graduación pasa a través de esta zona restringida.

Debido a que la zona de restricción es aplicada dentro de los tamaños de agregados finos, la forma y textura de estos, son los factores más importantes que afectan el comportamiento de las MAC. Por lo tanto, es importante tomar en cuenta la variación de los valores de FAA; también debe considerarse que otro factor importante en el comportamiento de las MAC es la mineralogía del tipo de agregado y el tipo de trituración. A continuación se presentan las granulometrías propuestas por la metodología de SUPERPAVE para mezclas asfálticas en caliente MAC.

Tabla XI. Especificación de granulometría de metodología SUPERPAVE

Tamiz No.	Abertura mm.	ESTADOS UNIDOS (SUPERPAVE), TAMAÑO NOMINAL 37.5 mm.				ESTADOS UNIDOS (SUPERPAVE), TAMAÑO NOMINAL 25 mm.				ESTADOS UNIDOS (SUPERPAVE), TAMAÑO NOMINAL 19 mm.				ESTADOS UNIDOS (SUPERPAVE), TAMAÑO NOMINAL 12.5 mm.				ESTADOS UNIDOS (SUPERPAVE), TAMAÑO NOMINAL 9.5 mm.				
		PUNTOS DE CONTROL		ZONA RESTRINGIDA		PUNTOS DE CONTROL		ZONA RESTRINGIDA		PUNTOS DE CONTROL		ZONA RESTRINGIDA		PUNTOS DE CONTROL		ZONA RESTRINGIDA		PUNTOS DE CONTROL		ZONA RESTRINGIDA		
2 "	50		100																			
1 1/2 "	37.5	90	100				100															
1 "	25					90	100				100											
3/4 "	19									90	100				100							
1/2 "	12.5												90	100							100	
3/8 "	9.5																			90	100	
No. 4	4.75			34.7	34.7			39.5	39.5													
No. 8	2.36	15	41	23.3	27.3	19	45	26.8	30.8	23	49	34.6	34.6	28	58	39.1	39.1	32	67	47.2	47.2	
No. 16	1.18			15.5	21.5			18.1	24.1			22.3	28.3			25.6	31.6			31.6	37.6	
No. 25	0.6			11.7	15.7			13.6	17.6			16.7	20.7			19.1	23.1			23.5	27.5	
No. 50	0.3			10	10			11.4	11.4			13.7	13.7			15.5	15.5			18.7	18.7	
No. 100	0.15																					
No. 200	0.075	0	6			1	7			2	8			2	10			2	10			

Fuente: Instituto de Asfalto. Antecedentes del Diseño y Análisis de Mezclas Asfálticas de SUPERPAVE, FHWA-SA-95-003. P.143.

De acuerdo con los valores que se muestran en las tablas anteriores, se puede observar que los utilizados en Guatemala para la definición de las curvas granulométricas, son similares a las del Instituto de Asfaltos de los Estados Unidos y parecidas a las Mexicanas; asimismo si se desarrollaran las de Superpave con el mismo formato que las demás, se obtendrían resultados parecidos; por lo que la propuesta es de seguir utilizando las mismas especificaciones.

2.2. Especificaciones para asfalto modificado sección 401.03 d)

La sección 401.03 inciso d) “Requisitos para el cemento asfáltico” especifica lo concerniente al tipo, grado, norma y usos del cemento asfáltico que se va a utilizar en las MAC; sin embargo, el fin de este trabajo de graduación es que en Guatemala se utilicen exclusivamente asfaltos modificados, por tal motivo se darán las especificaciones para este tipo de asfalto.

De acuerdo con lo expuesto en las secciones anteriores, está claro que un asfalto modificado proviene de la mezcla de un asfalto convencional con algún polímero, dando como resultado un asfalto con mejores características físicomecánicas y reológicas. Con base en lo anterior, inicialmente se darán las especificaciones que deben cumplir los asfaltos convencionales que posteriormente serán modificados.

El cemento asfáltico puede ser clasificado por su viscosidad a 60°C tanto en el asfalto original como en el residuo de la prueba de película delgada en horno rotatorio (RTFO), como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla XII. **Requisitos para cemento asfáltico clasificado por viscosidad a 60°C (AASHTO M 226), asfalto original**

Prueba	GRADO DE VISCOSIDAD					
	AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad dinámica a 60°, <i>poises</i>	250±50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
Viscosidad cinemática a 135°, Cs-min.	125	175	250	300	350	400
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C, s min.		80	110	120	150	
Penetración 25°C, 100g, 5 seg-min.	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación, Cleveland, °C/°F min.	163/325	177/350	219/425	232/450	232/450	232/450
Solubilidad en tricloroetileno % min.	99	99	99	99	99	99
Punto de reblandamiento, °C		37-43	45-52	48-56	50-58	

Fuente: Instituto de Asfalto. Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente. P.14.

Algunos países analizan la viscosidad de los asfaltos después de envejecidos, con el fin de simular el envejecimiento que ocurre en la planta asfáltica durante el mezclado; por lo que el asfalto debe ser ensayado con la prueba de película delgada en horno rotatorio (RTFO) y el residuo asfáltico debe cumplir con la siguiente especificación.

Tabla XIII. Requisitos para cemento asfáltico clasificado por viscosidad a 60°C (AASHTO M 226), residuo del ensayo RTFO

Prueba AASHTO T 240	GRADO DE VISCOSIDAD				
	AR-10	AR-20	AR-40	AR-80	AR-160
Viscosidad dinámica 60°, poises	1000±250	2000±500	4000±1000	8000±2000	16000±4000
Viscosidad cinemática 135°, Cs-min.	140	200	275	400	550
Penetración 25°C, 100g, 5 seg-min.	65	40	25	20	20
Penetración retenida 25°C min.		46	50	54	58
Perdida por calentamiento %, max.		1	0.5	0.5	0.5

Fuente: Instituto de Asfalto. Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente. P.15.

El cemento asfáltico convencional también puede clasificarse por su penetración AASHTO M 20; a continuación se presenta la tabla de clasificación por penetración del cemento asfáltico convencional.

Tabla XIV. **Requisitos para cemento asfáltico clasificado por penetración a 25°C (AASHTO M 20)**

Prueba	GRADO DE PENETRACIÓN									
	40-50		60-70		85-100		120-150		200-300	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Penetración 25°C, 100g, 5 seg-min.	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto de inflamación, Cleveland, °C min.	450	----	455	----	450	----	425	----	350	----
Solubilidad en tricloroetileno % min.	99	----	99	----	99	----	99	----	99	----
Ductilidad 25°C, cm-min	100	----	100	----	100	----	100	----	100	----
Pruebas sobre el residuo del ensayo TFO. 3.2 mm. 163°C, 5 horas										
Pérdida por calentamiento %	----	0.8	----	0.8	----	1.0	----	1.3	----	1.5
Penetración del residuo % del original	58	----	54	----	50	----	46	----	40	----
Ductilidad del residuo 25°C, cm-min	----	----	50	----	75	----	100	----	100	----

Fuente: Instituto de Asfalto. Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente. P.16.

Si el asfalto convencional cumple con cualquiera de las dos clasificaciones anteriores por viscosidad o penetración, se puede decir que es apto para ser modificado puesto que los estudios que se han hecho a nivel mundial de asfaltos modificados, parten de la premisa de que se cumpla con cualquiera de las dos especificaciones mencionadas.

Con base en lo anterior, se presentan en la siguiente tabla las especificaciones para asfalto modificado, teniendo como base el tipo AC-20, el cual es el asfalto que más se distribuye en nuestro medio.

Tabla XV. **Requisitos para cemento asfáltico AC-20 modificado**

Características	Tipo de cemento asfáltico y tipo de modificador			
	AC -20 TIPO I	AC-20 TIPO II	AC-20 TIPO III	AC-20 hule molido
Del cemento asfáltico modificado				
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C, s, max.	1000	1000	1000	----
Viscosidad rotacional Brookfield a 135 °C, Pas s, max.	4	3	3	----
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 10 ⁻¹ mm, min.	40	40	30	30
Penetración a 4°C, 200 g, 60 s, 10 ⁻¹ mm, min.	25	25	20	15
Punto de inflamación Cleveland, °C, min.	230	230	230	230
Punto de reblandecimiento, °C, min.	55	55	53	57
Recuperación elástica por torsión a 25°C,% min.	35	30	15	40
Resiliencia a 25°C, %, min.	20	20	25	30
Del residuo de la prueba de película delgada, 3.2 mm, 50 g.				
Pérdida por calentamiento a 163°C, %,max.	1	1	1	1
Penetración a 4°C, 200 g, 60 s, 10 ⁻¹ mm, min.	---	---	---	10
Penetración retenida a 4°C, 200 g, 60 s, %, max.	65	65	55	75
Recuperación elástica en ductilómetro a 25°C, %, max.	60	60	30	55
Incremento en temperatura anillo y esfera, °C, max.	---	---	---	10
Módulo reológico de corte dinámico a 76°C (G*/sen δ), kPa, min.	2.2	2.2	2.2	2.2
Ángulo fase (δ) [visco-elasticidad], a 76°C, grados max.	75	70	75	---

Fuente: SCT. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Manual N-CMT-4-05-002. P.5.

2.3. Especificación para la mezcla asfáltica 401.03 e)

Respecto de la metodología de diseño Marshall, el cual es el más utilizado en Guatemala, las tablas XVI y XVII muestran los parámetros de diseño que se utilizan en la actualidad.

Tabla XVI. **Requisitos para la mezcla asfáltica en caliente**

AASHTO T 245	MÍNIMO	MÁXIMO
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	75	75
Estabilidad	5338 N 1200 lb.	
Fluencia en 0.25 mm (0.01 plg.)		
Tránsito < 10 ⁶ ESAL	8	16
Tránsito > 10 ⁶ ESAL	8	14
Relación Estabilidad / Fluencia (lb/0.01 plg)	120	275
Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada	3	5
Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto		
Tránsito < 10 ⁶ ESAL	65	78
Tránsito > 10 ⁶ ESAL	65	75
Relación finos/bitumen	0.6	1.6
Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283	80%	
Partículas recubiertas con asfalto, para definir tiempo de mezclado, AASHTO T 195	95%	

Fuente: D.G.C. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes ed. 2001, sección 401. P.8.

Tabla XVII. Requisitos de vacíos en el agregado mineral (VAM)

Tamaño nominal máximo del agregado mm.	Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)		
	3%	4%	5%
9.5	14	15	16
12.5	13	14	15
19.	12	13	14
25.	11	12	13
37.5	10	11	12
50	9.5	10.5	11.5

Fuente: D.G.C. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes ed. 2001, sección 401. P.8.

El Instituto de asfalto utiliza los parámetros de diseño que se muestran en la tabla XVIII. Los porcentajes mínimos de vacíos de agregado mineral (VMA) que utiliza se presentan en la tabla XIX.

Tabla XVIII. Parámetros de diseño que utiliza el Instituto del Asfalto

Criterios para mezcla con método Marshall	Tránsito liviano		Tránsito mediano		Tránsito pesado	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Compactación número de golpes en cada cara de la probeta	35		50		75	
Estabilidad, N / (lb).	3336 (750)	----	5338 (1200)	----	8006 (1800)	----
Flujo, 0.25 mm. (0.01 plg)	8	18	8	16	8	14
% de vacíos	3	5	3	5	3	5
% de vacíos llenos de asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

Fuente: Instituto de Asfalto. Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente. P.82.

Tabla XIX. **Porcentajes mínimos de VMA que utiliza el Instituto del Asfalto (USA)**

Tamaño máximo		VMA mínimo %		
mm.	plg.	3	4	5
1.18	No. 16	21.5	22.5	23.5
2.36	No. 8	19.	20.0	21.0
4.75	No. 4	16.	17.0	18.0
9.5	3/8	14.	15.0	16.0
12.5	½	13.	14.0	15.0
19.0	¾	12.	13.0	14.0
25.0	1.	11.	12.0	13.0
37.5	1.5	10.	11.0	12.0
50	2.0	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9.0	10.0	11.0

Fuente: Instituto de Asfalto. Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente. P.82.

En las siguientes tablas se muestran los parámetros de diseño que utiliza la Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México (SCT)

Tabla XX. **Requisitos volumétricos de mezclas diseño Marshall**

Parámetro	ESALs de diseño $\sum L$	
	$\sum L \leq 10^6$	$10^6 \sum L \leq 10^7$
Número de golpes en cada cara del espécimen	50	75
Estabilidad, N (lb) min.	5338 (1200)	8000 (1800)
Flujo, mm (10^{-2} pulg)	2-4 (8-16)	2-3.5 (8-14)
% de vacíos de aire	3-5	3-5
% de vacíos llenos de asfalto	65-78	65-75
$\sum L$ = Número de ejes equivalentes de 8.2 T. (ESALs), esperado durante la vida útil del pavimento. Para tránsitos mayores de 10^7 ejes equivalentes de 8.2 T, se requiere un diseño especial de la mezcla.		

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México, Publicación Técnica No. 267: "Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas". P.38.

Tabla XXI. **Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral (VAM)**

Tamaño máximo nominal del agregado		Porcentaje mínimo		
		Porcentaje de vacíos de aire de diseño		
mm.	designación	3.0	4.0	5.0
9.5	3/8	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2	13.0	14.0	15.0
19.5	3/4	12.0	13.0	14.0
25.0	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México, Publicación Técnica No. 267: "Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas". P.38.

De acuerdo con lo especificado en las tablas anteriores de esta sección, se puede determinar que Guatemala por medio de la sección 401 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes ed. 2001, Estados Unidos con el Instituto de Asfalto en su manual (MS-22) y México por medio de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) utilizan valores muy similares en el diseño Marshall de mezclas asfálticas en caliente.

Con base en lo que se ha venido desarrollando en este trabajo, el fin de modificar el asfalto es para mejorar sus propiedades de resistencia a la deformación permanente, fatiga, susceptibilidad a la temperatura y gradientes de temperatura, entre otras, logrando obtener carpetas de rodadura en mejor estado durante un tiempo más largo que al usar asfalto convencional; esto se logra debido a que tanto los agregados como el asfalto, cumplen con las especificaciones de calidad descritas. Se debe considerar en todo momento que existen factores externos al proceso de diseño y mezclado que pueden afectar el buen comportamiento de la mezcla diseñada, por lo que es de suma importancia el control de calidad a realizar.

En el diseño se debe buscar que las mezclas, al deformarse al paso de cargas, sean capaces de recuperarse en gran medida al dejar de aplicar la carga, así como su resistencia a los efectos del gradiente térmico de la región donde esté en servicio; por lo que es de suma importancia encontrar un balance entre los criterios de utilizar mezclas rígidas o blandas, los cuales están altamente vinculados a los parámetros de relación estabilidad / fluencia y relación finos / asfalto.

Por lo que si se toman los valores especificados, se tienen los siguientes valores de relación estabilidad / fluencia.

Tabla XXII. Valores de relación estabilidad / fluencia y relación finos / asfalto

Parámetro	Especificación	
	Mínimo	Máximo
Estabilidad (lbs)	1,200	
Fluencia (0.01 pulg)	8	14
Rel. estabilidad / fluencia (psi)	120	275
Relación finos / asfalto	0.6	1.6

Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, si se toman los valores límites tanto de estabilidad como de fluencia, al momento de calcular la relación estabilidad / fluencia, arrojan resultados que no entran dentro de la especificación de estabilidad / fluencia, por lo que al analizar esta situación, se llegó a la conclusión de que acertadamente se colocaron estos valores de especificación obligando al contratista a manejar la estabilidad y fluencia, para que cumpla con la especificación de relación estabilidad / fluencia.

De igual forma la relación finos / asfalto como se puede apreciar en la tabla XXII, maneja un intervalo entre 0.6 a 1.6; si se toman en cuenta los valores de las granulometrías de la tabla VIII de la sección 2.1.7 de este trabajo, los porcentajes pasa tamiz No. 200 van entre 0% a 10% en las distintas granulometrías especificadas; sin embargo, con los valores extremos de las granulometrías, para poder cumplir la especificación de finos / asfalto se tendrían que usar porcentajes de asfalto ilógicos y antieconómicos en algunos casos.

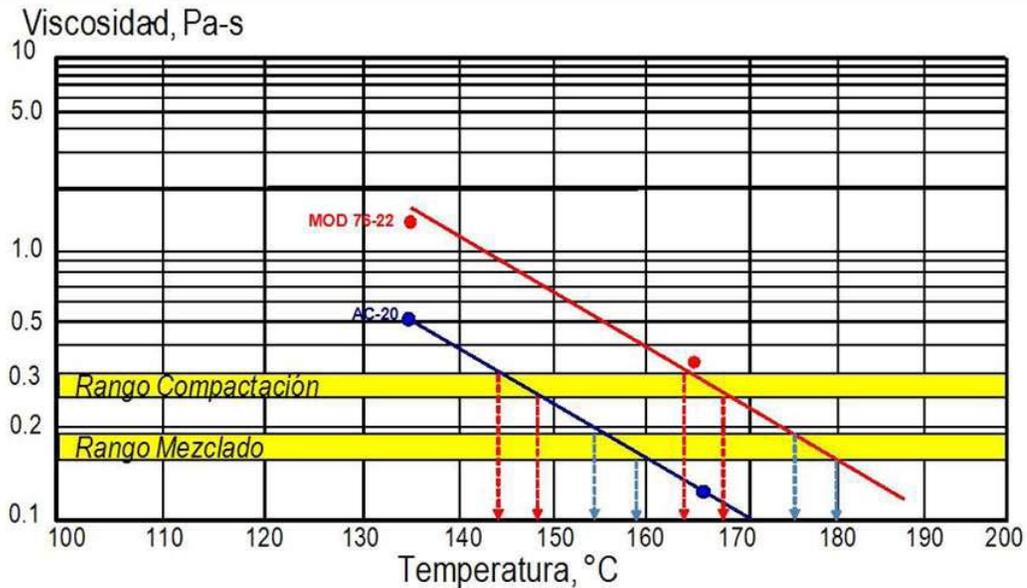
Puede concluirse, que tanto la relación estabilidad / fluencia, como la relación finos / asfalto, deberán fijarse dentro de lo especificado de acuerdo con la experiencia del diseñador, con el fin de que la mezcla presente un buen desempeño en su vida útil.

2.4. Uso de la curva reológica del asfalto

La temperatura a la cual debe de aplicarse el cemento asfáltico modificado es a la que corresponda una viscosidad cinemática entre 0.15 a 0.19 pascales – segundo, Pas-s, y para la compactación, la temperatura es la que corresponda a una viscosidad cinemática entre 0.3 a 0.25 pascales – segundo Pas-s.

A continuación se presenta un ejemplo de curva reológica para un asfalto convencional y un asfalto modificado, en donde se pueden observar las temperaturas de mezclado y compactado, respectivamente. Esta figura fue tomada del contenido impartido en el Diplomado de Pavimentos Asfálticos, a cargo del Dr. Carlos H. Fonseca, del Tecnológico de Monterrey, en la Universidad Rafael Landívar, Módulo 2: “Tecnología del cemento asfáltico con polímeros”.

Figura 7. **Curva reológica de un asfalto convencional y un asfalto modificado**



Fuente: FONSECA, Carlos. Tecnología del cemento asfáltico con polímeros, presentación ppt, diapositiva 48.

Según la figura anterior, para el asfalto convencional (AC-20) se tiene una temperatura de mezclado de 155°C a 159°C, y la temperatura de compactación de 144°C a 148°C; para el asfalto modificado, se tiene una temperatura de mezclado de 175°C a 180°C y la temperatura de compactación de 164°C a 168°C.

De acuerdo con el asfalto que se utilice, este tendrá su propia curva reológica, por lo que es de suma importancia tener esta a la mano, para poder determinar las temperaturas de trabajo.

3. CONTROL DE CALIDAD A IMPLEMENTAR

El llevar únicamente el control de calidad de la mezcla que sale de la planta mezcladora mediante el ensayo de laboratorio Marshall no es suficiente para garantizar que la mezcla diseñada y analizada en laboratorio, vaya a tener el desempeño esperado al momento de estar en servicio, esto debido a que un sinnúmero de situaciones pueden suceder desde el proceso de mezclado, transporte, descarga y compactación; de los cuales, la mayoría de ellos están directamente relacionados con la temperatura de la mezcla y características de agregados al momento de transportarlos, situaciones que originan una merma en las propiedades y características de la mezcla asfáltica en caliente (MAC).

Hay que tomar en cuenta que en Guatemala se le ha dado prioridad a los ensayos que determinan la resistencia a la deformación plástica por medio de la estabilidad en las metodologías Hubbard-Field, Hveem y Marshall; este último es el más utilizado en nuestro país, sin embargo hoy en día la tendencia es determinar el desempeño que tendrá la mezcla al entrar en servicio.

A continuación se citarán algunos ensayos que son los más utilizados en otros países para llevar el control de calidad de las mezclas asfálticas en caliente MAC, en especial los que representan el desempeño en servicio de las mezclas asfálticas en caliente; no necesariamente estos son los únicos ensayos a realizar, sin embargo son los que se han venido desarrollando a lo largo del tiempo en que se empezó a estudiar el desempeño en las MAC, en especial cuando se utiliza asfalto modificado.

3.1. Ensayo de inmersión - compresión

Este ensayo está regido por distintas especificaciones a nivel mundial entre las cuales están: AASHTO T 283, ASTM D 1075, NLT 162 Normas de Laboratorio de Transportes de España; I.N.V. E 738 del Instituto Nacional de Vías de Colombia y la M-MMP-4-05-042 de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México.

El ensayo consiste en evaluar la resistencia de las MAC al daño inducido por susceptibilidad a la humedad; en otras palabras, determinar la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua. Sin embargo este ensayo no mide directamente el desempeño de las mezclas asfálticas, su objetivo principal es el de evaluar si la combinación entre agregados y asfalto modificado es susceptible al agua, y por otro lado si se está utilizando un aditivo antidesvestimiento y si este está funcionando o no.

El procedimiento se hace en laboratorio y va de la mano con el ensayo Marshall, el número de briquetas que se va a utilizar, varía con cada norma; sin embargo, por lo regular se moldean 6 briquetas de una misma muestra de mezcla, con el fin de mantener la densidad media similar, se separan en dos grupos de 3 briquetas, el primer grupo se coloca en baño de aire o estufa a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ\text{F}$) como mínimo durante 2 horas, se secan superficialmente y a continuación se determina su resistencia a compresión.

El segundo grupo se sumerge en un baño de agua regulado a $49 \pm 1^\circ\text{C}$ ($120 \pm 1.8^\circ\text{F}$) durante 4 días, se sacan del baño y se mantienen durante 2 horas a temperatura ambiente, seguidamente se introducen en un baño de agua regulado a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ\text{F}$) durante 2 horas, se secan superficialmente y a continuación se determina su resistencia a compresión.

Existe un procedimiento alternativo el cual consiste en que el segundo grupo se coloca en baño de aire o estufa a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ ($140 \pm 1.8^\circ\text{F}$) durante 24 horas; seguidamente, se introducen en un baño de agua regulado a $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ\text{F}$) durante 2 horas, se secan superficialmente y a continuación se determina su resistencia a compresión.

El cálculo del índice de resistencia remanente (%) se hace de la siguiente manera:

$$\text{Resistencia remanente, \%} = (R_2/R_1) * 100$$

$$\left(\frac{R_2}{R_1} \right) * 100$$

Donde:

R_2 = Resistencia a compresión de briquetas sumergidas

R_1 = Resistencia a compresión de briquetas no sumergidas

En Guatemala se utiliza el valor especificado de estabilidad remanente de 80% de la estabilidad Marshall.

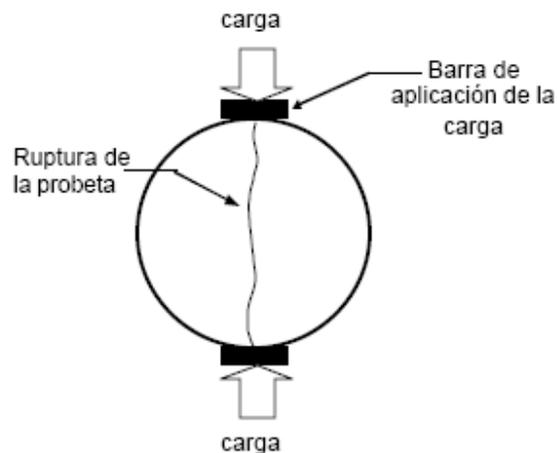
3.2. Ensayo de tracción indirecta

Este ensayo se utiliza para determinar la resistencia a compresión diametral tanto para briquetas fabricadas en laboratorio como para testigos extraídos de la carpeta de rodadura.

El método consiste en obtener una deformación por compresión diametral a una briketa colocada horizontalmente entre los platos de una prensa (ver figura 8), con el fin de que los esfuerzos aplicados a la briketa sean sobre dos generatrices opuestas, se mide la carga de rotura de la briketa; puede realizarse aplicando una carga estática (NLT 346) o una dinámica (NLT 360).

Con el ensayo de tracción indirecta se obtiene la información de propiedades elásticas resilientes, de fisuración térmica, de fisuración por fatiga, de deformación permanente y se evalúa el efecto de la humedad en las mezclas asfálticas.

Figura 8. **Ruptura de una briqueta en el ensayo de tracción indirecta**



Fuente: Publicación Técnica No. 267 "Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas".

P.51.

Este ensayo tiene la peculiaridad que se adapta muy bien al equipo disponible comúnmente en los laboratorios, puesto que se puede utilizar el equipo del ensayo Marshall.

Tabla XXIII. Dimensiones de briquetas y núcleos para tracción indirecta

Tamaño máximo agregado (mm)	Dimensiones (mm)	
	Altura	Diámetro
25	≥ 50	≥ 100
40	≥ 75	≥ 150

Fuente: NLT 360. Norma de laboratorio de transportes. P.2.

Para el caso estático, la resistencia a la tracción indirecta se calcula de la siguiente manera:

$$R_t = \frac{2 * P}{\pi * h * d}$$

Donde:

R_t = Resistencia a la tracción indirecta, $N * mm^{-2}$

P = Carga máxima de rotura, N

h = Altura de briketa o núcleo, mm

d = Diámetro de briketa o núcleo, mm

El caso dinámico (NLT 360) se utiliza para determinar el módulo resiliente de la mezcla asfáltica, sometiendo la briketa a una carga cíclica de compresión según un plano diametral y vertical.

Este ciclo de carga está compuesto por un impulso de amplitud y duración establecidas, seguido de un tiempo de relajación.

Los datos de deformación y de carga aplicada, junto al coeficiente de Poisson definido en función de la temperatura de ensayo como se puede apreciar en la tabla XXIV, sirven para determinar el módulo resiliente de la mezcla asfáltica, dato muy importante en el diseño de pavimentos por medio del coeficiente de capa de la mezcla asfáltica, con el fin de poder verificar si está de acuerdo con el diseño estructural del pavimento.

Tabla XXIV. **Coeficiente de Poisson (n) en función de la temperatura de ensayo**

Temperatura °C	-10	+5	+20	+40
Coeficiente de Poisson, n	0.20	0.25	0.35	0.40

Fuente: NLT 360. Norma de laboratorio de transportes. P.2.

Para el caso dinámico, los módulos resilientes instantáneo y total, se calculan de la siguiente manera:

$$EI = \frac{P * (n + 0.27)}{h * DI}$$

$$ET = \frac{P * (n + 0.27)}{h * DT}$$

Donde:

EI y ET = Módulos resilientes instantáneo y total en Mpa

P = Amplitud del pulso de carga, N

n = Coeficiente de Poisson

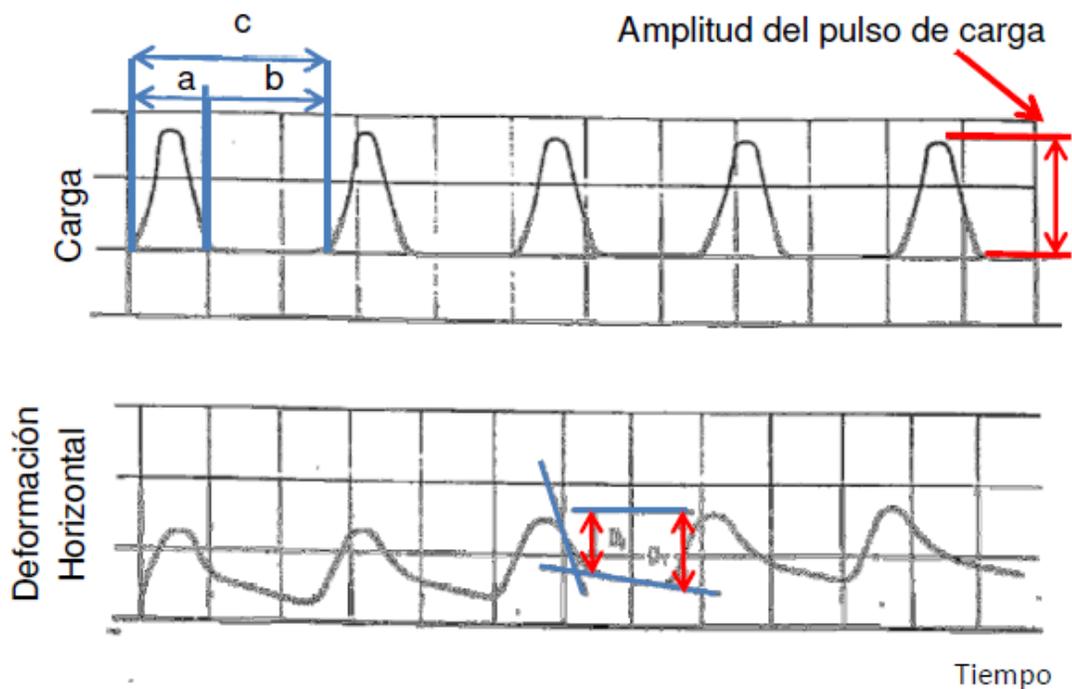
h = Espesor de briqueta o núcleo, mm

DI = Deformación resiliente instantánea, mm

DT = deformación resiliente total, mm

La figura 9, muestra un esquema de la aplicación de carga y determinación del módulo resiliente de una mezcla asfáltica en caliente (MAC).

Figura 9. **Esquema de configuración de carga aplicada y deformación versus tiempo**



Fuente: NLT 360. Norma de laboratorio de transportes en España. P.4.

Donde:

a = Duración del pulso de carga durante un ciclo de carga

b = Tiempo de relajación

c = Duración del ciclo

DI y DT = Deformaciones resilientes instantánea y total

3.3. Ensayo de máquina de pista

Este ensayo está especificado de acuerdo con la norma de laboratorio de transportes de España (NLT 173), y es utilizado tanto en probetas moldeadas en laboratorio como en núcleos extraídos de la carpeta de rodadura; los especímenes a ensayar deben tener las dimensiones 30 x 30 x 5 centímetros y se compactan por vibración.

El ensayo consiste en someter las briquetas al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura; midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. Los resultados obtenidos en este ensayo han correlacionado muy bien con el comportamiento de mezclas densas y es por ello que se pretenden establecer para proyectar una mezcla asfáltica resistente a las deformaciones plásticas.

En España, este ensayo se realiza de acuerdo con las siguientes características, se hace pasar una rueda de 20 cm de diámetro dotada de una banda de rodadura de goma maciza de 5 cm de ancho y 2 cm de espesor, ejerciendo una presión de contacto sobre la superficie del espécimen de 900 KN/m²; la temperatura de ensayo es de 60°C y la frecuencia del movimiento de vaivén es de 42 pasadas por minuto con un recorrido en cada sentido de 23 cm (ver figura 10).

Se registran las deformaciones totales del espécimen a los 1, 3 y 5 primeros minutos y posteriormente, a cada 5 minutos, hasta completar 45 minutos y a partir de aquí, a cada 15 minutos hasta completar los 120 minutos que dura el ensayo.

Figura 10. **Máquina de pista (NLT 173)**



Fuente: FONSECA, Carlos. Tipologías, Características y Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente, presentación ppt, diapositiva 22.

A partir de las deformaciones obtenidas en los intervalos de tiempo anteriormente especificados, se calcula la velocidad de deformación media en los intervalos de tiempo t_2/t_1 y se expresa en 10^{-3} mm/min mediante la fórmula.

$$\frac{Vt_2}{Vt_1} = \frac{dt_2 - dt_1}{d_2 - d_1}$$

Las normas españolas especifican un valor límite de velocidad de deformación en el intervalo de 105 a 120 minutos de $15 \mu\text{m} / \text{min}$, en condiciones de tráfico pesado en clima cálido; situación más favorable para producir la deformación permanente.

Hoy en día, ya se comercializa una gran variedad de máquinas que se adaptan a la norma NLT 173, para predecir el comportamiento de las MAC a las deformaciones permanentes, como se puede apreciar en las siguientes fotografías.

Figura 11. **Máquina de pista para determinar resistencia a la deformación permanente para 2 y 1 espécimen**



Fuente: MECÁNICA CIENTÍFICA, S.A. Catálogo de equipo de laboratorio para mezclas bituminosas. P.20.

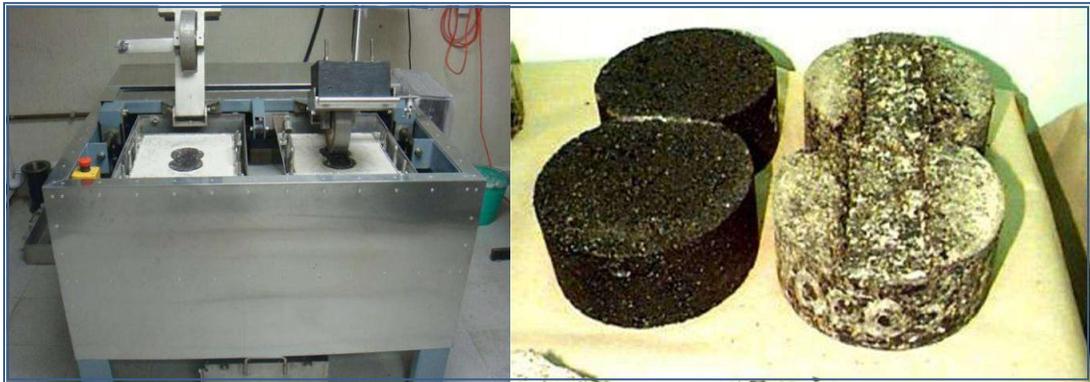
3.4. **Ensayo Hamburgo *wheel tracking***

Su principal función es la de determinar la resistencia a las deformaciones plásticas de la mezcla asfáltica tales como ahuellamientos; también se utiliza para medir la adherencia entre los agregados y el cemento asfáltico modificado, tanto para especímenes moldeados en laboratorio como para núcleos extraídos de la carpeta de rodadura; este método tiene sus inicios en los años 70's.

El ensayo consiste en movilizar axialmente 2 ruedas de acero de 4.7 cm sobre un espécimen de laboratorio de 32 x 26 cm, o en un espécimen extraído en campo de 10 pulgadas.

Cada rueda aplica una carga de 158 lb con una presión de contacto de 217 psi, la temperatura del ensayo es de 50°C la cual se mantiene en un baño de agua; cada rueda se moviliza a una velocidad de 30 cm por segundo; la prueba consiste en 20,000 ciclos o cuando se alcance una deformación límite de 2 cm; el criterio de falla especificado en la ciudad de Hamburgo es de 4 mm de deformación máxima en autopistas; el ensayo está especificado por la AASHTO T- 324.

Figura 12. **Hamburgo *wheel tracking***



Fuente: FONSECA, Carlos. Tipologías, Características y Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente, presentación en ppt, diapositiva 28.

3.5. **Otros ensayos**

Hoy en día existe una gran variedad de ensayos que demuestran el comportamiento que va a tener la mezcla asfáltica en caliente utilizando asfalto modificado; en su mayoría son una variación a los antes mencionados, adaptándolos a las normas y exigencias de cada uno de los lugares donde se han originado.

Existen otros que son de reciente creación que por lo tanto no se tiene disponibilidad de los equipos para realizarlos y son exclusivos de las entidades de investigación que los estudian, tal es el caso de ensayos normados por SUPERPAVE; sin embargo, se nombrarán a continuación con el fin de que se tenga en mente que existen y en un futuro puedan ser utilizados o adaptados a las condiciones de Guatemala:

- Analizador de pavimentos asfálticos, Estados Unidos (APA)
- Ensayo de compresión axial sin confinar (ASTM D 1074)
- Máquina de pista LCPC, Francia (NFP 98-253-1)
- *The Georgia wheel tester*
- The SUPERPAVE shear tester (SST)
- Ensayo de deformaciones plásticas de la universidad de Wyoming (GLWT)

CONCLUSIONES

1. Con base en la investigación realizada de especificaciones en otros países con mayor avance en el campo de las mezclas asfálticas en caliente utilizando asfaltos modificados, se pudo constatar que en su mayoría parten de las especificaciones que han utilizado en mezclas asfálticas en caliente con asfalto convencional, y a partir de allí se han creado especificaciones, primordialmente para el asfalto modificado.
2. En la actualidad, para el diseño de mezcla asfáltica ya sea con asfalto convencional o modificado se le ha dado especial importancia al cumplimiento de las especificaciones de calidad de los agregados a utilizar, puesto que se ha logrado determinar que estas contribuyen un 90% al tipo de falla denominado deformación permanente.
3. Los cambios a las especificaciones que aquí se proponen, puede ser que repercutan en mayores costos para los contratistas debido a que deberán adaptar sus trituradoras para que como mínimo, se obtenga un 90% de agregado con dos caras fracturadas.
4. Hoy en día el parque vehicular y las cargas de los mismos se han incrementado sustancialmente; además de eso, el cambio climático que experimenta el planeta está generando condiciones desfavorables para las mezclas asfálticas; debido a esto, el comportamiento de las mezclas asfálticas ha venido en detrimento.

5. Con el fin de poder asegurar el buen comportamiento de la mezcla asfáltica durante su vida útil, se les está adicionando los distintos tipos de polímeros para modificar el asfalto, debido a que los últimos estudios realizados en mezclas asfálticas en caliente utilizando asfalto modificado, han demostrado que estas mezclas mantienen un mejor desempeño, logrando acomodarse a los cambios sufridos durante su vida útil.
6. Los polímeros modificadores cambian las propiedades del asfalto con el fin de mejorar su resistencia a la deformación plástica, agrietamiento por fatiga, temperatura y la adherencia entre el agregado y el asfalto.
7. Se debe incentivar el uso de los asfaltos modificados por parte de las autoridades respectivas, con el fin de empezar a crear una base de datos con los desempeños obtenidos de las mezclas asfálticas en las distintas circunstancias de clima y cargas que se manejan en las distintas carreteras principales de Guatemala; a partir de allí se podrán hacer los ajustes necesarios para satisfacer los requerimientos de cada zona del país y escoger el polímero que mejor convenga.

RECOMENDACIONES

1. En la siguiente revisión de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, las autoridades asignadas para tal revisión, deberán considerar los cambios que aquí se proponen; pensando en que las mezclas asfálticas en caliente mantengan un buen comportamiento en un tiempo más prolongado, los cambios que se proponen son los siguientes: utilizar un 90% de agregados con dos caras fracturadas como mínimo; un equivalente de arena mayor o igual que 45% y agregados sin plasticidad.
2. La Dirección General de Caminos (DGC) deberá de realizar los esfuerzos necesarios con el fin de incentivar tanto a las empresas contratistas o supervisoras para realizar inversión en equipo de laboratorio, para determinar el desempeño de las mezclas asfálticas en caliente utilizando asfalto modificado.
3. Todos los proyectos con pavimentos asfálticos que se ejecuten en el país, para las carreteras con mayor número de ejes equivalentes a 18,000 libras, y/o que estén en servicio en áreas con gradientes térmicos grandes, deberán contemplar el uso de asfaltos modificados.
4. La Universidad de San Carlos de Guatemala por medio de la Facultad de Ingeniería, tanto a nivel de licenciatura como de postgrado, debe implementar en su pensum de estudios, cursos tanto teóricos como prácticos que manejen el diseño y comportamiento de las mezclas asfálticas, en especial utilizando asfalto modificado.

5. La Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos debe proporcionar las facilidades para la investigación del comportamiento de las mezclas asfálticas y convertirse en un juez al momento de existir controversia entre una empresa contratista o supervisora y la Dirección General de Caminos, con el fin de que se garantice la calidad en las obras.

6. La Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, debe de crear un plan de cooperación entre las distintas Facultades y Maestrías, de modo que cada una al momento de asignar proyectos a sus alumnos, tomen en cuenta los distintos dispositivos y equipo que se mencionaron en este trabajo, con el fin de poder construirlos y ser donados a la escuela donde sea de utilidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASPHALT INSTITUTE. *Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de SUPERPAVE*. Lexington, KY, EUA, 1994. 159 p.
2. ASPHALT INSTITUTE. Manual MS-1 *Thickness design – full depth pavement structures for highways and streets*. Lexington, KY, EUA, 1993. 187 p.
3. ASPHALT INSTITUTE. Manual MS-22 *Principios de construcción de pavimentos de mezclas asfáltica en caliente*. KY, EUA, 1994. 264 p.
4. CÁRDENAS, Jaleydi y FONSECA, Elsa. *Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad – temperatura*. Revista EIA, ISSN 1794-1237 No. 12, dic. 2009. 137 p.
5. DELGADO ALAMILLA, Horacio et al. *Influencia de la granulometría en las propiedades granulométricas de la mezcla asfáltica*. Publicación técnica No 299 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Sanfandila, Querétaro, 2006. 97.p.
6. DIRECCIÓN GENERAL DE CAMINOS. *Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes*. Sección 401 “Pavimentos de Concreto Asfáltico en Caliente”, edición 2,001, Guatemala. 22 p.

7. DIRECCIÓN DE VIALIDAD. Ministerio de Obras Públicas de Chile. *Especificaciones Técnicas Generales de Construcción*. Volumen No. 5, edición 2,008. Capítulo 5.400. Revestimiento y Pavimentos. 40 p.
8. GARNICA ANGUAS, Paul *et al.* *Análisis de la influencia de método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas*. Publicación técnica No 255 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Sanfandila, Querétaro, 2004. 33 p.
9. GARNICA ANGUAS, Paul *et al.* *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Publicación técnica No 267 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Sanfandila, Querétaro, 2005. 95 p.
10. GARNICA ANGUAS, Paul *et al.* *Comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con SBR*. Publicación técnica No 254 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Sanfandila, Querétaro, 2004. 37 p.
11. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Ministerio de Obras Públicas de Colombia. *Normas de ensayo para materiales de carreteras*. Edición 1996. 172 p.
12. MIRÓ F. *et al.* *Evaluación de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas formuladas a partir de la normativa española y francesa*. Universidad Politécnica de Cataluña. 14 p.
13. Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). *Método de muestreo y pruebas de materiales, materiales para pavimentos*. M-MMP-4, edición 2,002. 15 p.