



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS
TIPO STONE MASTIC (SMA) PARA APLICACIÓN COMO CAPA DE
RODADURA EN PAVIMENTOS DE ALTO VOLUMEN DE TRÁNSITO EN
COLOMBIA.**

**ESTEPHANIA AMAYA DIAZ
CARLOS JAVIER BETANCOUR
OSCAR JAVIER ZORRO**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTÁ
2019**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia
Vigilada Mineducación

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS
TIPO STONE MASTIC (SMA) PARA APLICACIÓN COMO CAPA DE
RODADURA EN PAVIMENTOS DE ALTO VOLUMEN DE TRÁNSITO EN
COLOMBIA**

**ESTEPHANIA AMAYA DIAZ
CARLOS JAVIER BETANCOUR
OSCAR JAVIER ZORRO**

PROYECTO DE GRADO

**Ph. D Juan Gabriel Bastidas
Coordinador Especialización en Ingeniería de Pavimentos**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTA
2019**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	15
2	JUSTIFICACIÓN	16
3	OBJETIVOS	17
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4	MARCO TEÓRICO	18
5	METODOLOGÍA	25
6	RESULTADOS	29
6.1	SELECCIÓN DE LOS MATERIALES	29
6.1.1	<i>Agregados Pétreos</i>	29
6.1.2	<i>Cemento Asfáltico</i>	33
6.2	DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO SMA.....	35
6.2.1	<i>Determinación de la fórmula de trabajo.</i>	35
6.3	ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (TSR)	36
6.3.1	<i>Determinación del número de golpes o ciclos:</i>	37
6.3.2	<i>Cálculo de la saturación de las probetas al vacío entre 55% y 80%</i>	37
6.3.3	<i>Determinación de los esfuerzos de tensión (T.S.R)</i>	37
6.4	RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLASTICA DE MEZCLAS BITUMINOSAS MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO (NLT-173/00).....	38
6.4.1	<i>Velocidad de deformación media</i>	39
6.5	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR TRACCIÓN POR TRACCIÓN INDIRECTA EN PROBETAS CILINDRICAS EN-12697-26	41
6.6	RESISTENCIA A LA FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS ENSAYO DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS SOBRE PROBETAS PRISMÁTICAS EN 12697-24 ANEXO D	43
6.7	TRAMO DE PRUEBA	46
6.8	MEZCLAS CONVENCIONALES PARA CARPETAS DE RODADURA.....	51
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
7.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULOS DINÁMICOS	55
7.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FATIGA.....	56



7.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA.	57
8	CONCLUSIONES	59
9	BIBLIOGRAFÍA	60
	ANEXOS	62



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Límites granulométricos por peso de las mezclas tipo SMA para capas de rodadura – fuente propia.....	29
Tabla 2.	Distribución granulométrica de los materiales pétreos recibidos. – fuente propia.....	30
Tabla 3.	Proporciones de combinación de materiales para la mezcla SMA-Tipo B. – fuente propia	30
Tabla 4.	Distribución granulométrica de diseño y controles – fuente propia	30
Tabla 5.	Caracterización físico-mecánica de los materiales pétreos combinados – fuente propia	32
Tabla 6.	Peso específico de los agregados Gruesos – fuente propia.....	33
Tabla 7.	Peso específico de agregados Finos – fuente propia	33
Tabla 8.	Peso específico del llenante mineral – fuente propia	33
Tabla 9.	Caracterización del cemento Asfáltico. – fuente propia.....	34
Tabla 10.	Rango preliminar de asfalto y propiedades del Diseño Marshall. – fuente propia.....	35
Tabla 11.	Contenido óptimo de asfalto y características de Control del Diseño Marshall. – fuente propia.....	36
Tabla 12.	Determinación de los esfuerzos de tensión (T.S.R) – fuente propia	37
Tabla 13.	Condiciones para la realización del ensayo de resistencia a la deformación plástica a 60°C. – fuente propia.....	40
Tabla 14.	Resultado del ensayo de deformación plástica de la mezcla asfáltica tipo SMA. – fuente propia.....	40
Tabla 15.	Módulos dinámicos de la mezcla asfáltica tipo SMA. – fuente propia	42
Tabla 16.	Resultados del análisis de ley de fatiga. – fuente propia.....	44
Tabla 17.	Constantes de regresión lineal de datos de Ley de Fatiga. – fuente propia	45
Tabla 18.	Generalidades de la producción industrial de la mezcla SMA. – fuente propia.....	47



Tabla 19. Resultado del ensayo de deformación plástica de la mezcla asfáltica producida a escala industrial – fuente propia.....	49
Tabla 20. Resultado del análisis de la ley de fatiga de la mezcla asfáltica producida a escala industrial. – fuente propia.....	50
Tabla 21. Constantes de regresión lineal de datos de Ley de Fatiga mezcla tramo de prueba. – fuente propia.....	51
Tabla 22. Resultado del ensayo de Deformación Plástica de las mezclas MDC-19 seleccionadas – fuente propia.....	52
Tabla 23. Resumen módulos dinámicos de la mezcla MDC-19 con asfalto modificado con polímero SBS – fuente propia.....	52
Tabla 24. Resumen módulos dinámicos de la mezcla MDC-19 con Asfalto convencional de Penetración:60/70 mm/10 – fuente propia.....	53
Tabla 25. Resultados del análisis de ley de fatiga. de la mezcla MDC-19 con asfalto modificado con polímero SBS– fuente propia	53
Tabla 26. Resultados del análisis de ley de fatiga. de la mezcla MDC-19 con asfalto convencional de penetración:60/70 mm/10 – fuente propia	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Granulometría de la mezcla.....	21
Figura 2. Distribución granulométrica de diseño y control – fuente propia	31
Figura 3. Roller Compactor y Wheel Tracker Tester – fuente propia	39
Figura 4. Variación de la velocidad de deformación media V105-120. – fuente propia	41
Figura 5. Variación del Módulo dinámico con la temperatura. – fuente propia	42
Figura 6. Equipo de flexión en cuatro puntos del NAT HYD25-II – fuente propia	43
Figura 7. Fatiga a deformación controlada. – fuente propia	44
Figura 8. Ubicación geográfica del tramo de prueba realizado. – fuente propia	46
Figura 9. Registro fotográfico del proceso constructivo del tramo de prueba.	48
Figura 10. Fatiga a deformación controlada mezcla tramo de prueba – fuente propia	50
Figura 11. Análisis de la variación de los módulos dinámicos de la mezcla SMA vs mezclas convencionales – fuente propia	55
Figura 12. Análisis de la resistencia a la fatiga de la mezcla SMA vs mezclas convencionales – fuente propia.....	56
Figura 13. Análisis de la resistencia a la deformación plástica de la mezcla SMA vs mezclas convencionales – fuente propia	57



ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A.	DIAGRAMA DE FLUJO	63
ANEXO B.	CERTIFICADOS DE CALIDAD DEL CEMENTO ASFALTICO	64
ANEXO C.	RESULTADOS DEL MÉTODO MARSHALL	67
ANEXO D.	GRAFICAS ANÁLISIS DISEÑO MARSHALL	68



GLOSARIO

A

Ahuellamiento: Es una depresión longitudinal de la superficie en correspondencia con la zona transitada por las ruedas. En algunos casos puede ocurrir un levantamiento del asfalto a ambos lados de la huella. Los ahuellamientos poco severos se notan durante una lluvia donde estas hendiduras son ocupadas por el agua. Estos cambios de forma se pueden dar también por factores como la temperatura y agentes químicos que influyen sobre el material del pavimento.¹

Asfalto: Es un material aglomerante de color oscuro, constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos no volátiles de alto peso molecular, originarios del petróleo crudo, en el cual están disueltos, pueden obtenerse por evaporación natural de depósitos localizados en la superficie terrestre, denominados Asfaltos Naturales, o por medio de procesos de destilación industrial cuyo componente predominante es el Bitumen.²

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials): órgano que establece normas, publica especificaciones y hace pruebas de protocolos y guías usadas en el diseño y construcción de autopistas en todo los Estados Unidos. A pesar de su nombre, la asociación representa no sólo a las carreteras, sino también al transporte por aire, ferrocarril, agua y transporte público.

C

Condición de pavimento: Con el concurrido uso de los pavimentos, estos presentan una condición que es relevada por los daños que sufre, a través de los cuales se indagan las causas que los han producido y al igual, se da una evaluación de su estado, para esta evaluación existen diferentes Tipos de metodologías usadas para catalogar estos daños y realizar un diagnóstico de la investigación de los pavimentos.³

¹ Scribd.com. Ahuellamiento. [En línea]. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible.

<https://es.scribd.com/doc/188408153/AHUELLAMIENTO-EN-PAVIMENTOS-ASFALTICOS>.

² Miranda, R, (2010). Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos (Tesis de pregrado). Universidad austral de chile, Valdivia, Chile.

³ Riascos C., Martin Hernesto y Zamir P. Hiovann. Índice de condición del pavimento de la vía Los Hongos – San Francisco, Tunja. Usando las metodologías VIZIR y PCI. L'esprit Ingénieur [en línea]. 15 octubre 2012, vol. 3, [fecha de consulta: 15 octubre 2016].

Conservación: Preservar una cosa en buen estado o en una situación óptima para evitar su degradación.⁴

D

Densidad o Peso Unitario: Es la relación entre el peso de la mezcla compactada y el volumen de la misma incluyendo los vacíos de aire. Usualmente se expresa en kg/m³.

E

Estabilidad Marshall: Es la carga máxima expresada usualmente en kilogramos o libras que puede resistir, sin que se produzca falla, una probeta cilíndrica de mezcla asfáltica en caliente, preparada y ensayada en condiciones normalizadas.

Evaluación del pavimento: La evaluación de un pavimento se aplica a un tramo específico de una carretera y tiene como objetivo determinar las condiciones de servicio, de capacidad estructural y de calidad de materiales, mediante equipo especializado y diversos procedimientos, a fin de determinar su estado de servicio o de funcionamiento.⁵

F

Flujo Marshall: Es la reducción del diámetro de la probeta, expresada en milímetros o pulgadas, en el momento de alcanzar la carga máxima y en la dirección de esta.

Fibras Viatop: Es una fibra de celulosa alemana de alta calidad que ha evolucionado en presentación y es útil para integrar más cantidad de asfalto a la mezcla de manera sencilla. Esto incrementa la capacidad de los agregados para ser envueltos por asfalto; permite la incorporación y la retención de más asfalto; además, minimiza los escurrimientos de éste. Es distribuida en pellets para facilitar su incorporación y manipulación. De ese modo es posible controlar la acción de las fuerzas de granulación sobre las fibras durante el proceso de granulación. Al mismo tiempo, el bitumen toma la función de espaciador entre las fibras, necesario para la completa dispersión de ellas durante el proceso de mezclado del asfalto. Cada pellet está conformado 90% fibra y 10% asfalto, por lo cual es perfectamente compatible con la mezcla. La fibra asegura que este alto porcentaje de ligante pueda ser mezclado sin efectos negativos en el diseño de la mezcla. Esta fibra también previene el drenaje del ligante de los agregados minerales.ⁱ

⁴ SCT. Secretaria de comunicaciones y transporte, GUIA DE PROCEDIMIENTOS Y TECNICAS PARA LA CONSERVACION DE CARRETERAS, 2014 [fecha de consulta: 15 octubre 2016].

⁵ SCT. Secretaria de comunicaciones y transporte, GUIA DE PROCEDIMIENTOS Y TECNICAS PARA LA CONSERVACION DE CARRETERAS, 2014 [fecha de consulta: 15 octubre 2016].

G

Granulometría: ensayo de laboratorio basado en clasificar los diferentes tamaños encontrados en una muestra de suelo por medio de Tamices de diferentes aperturas, con la cual se puede realizar una clasificación del suelo.

Gravedad específica BULK: relación entre la masa de un volumen dado de material a una determinada temperatura, generalmente a 25 °C para mezclas asfálticas y la masa de un volumen igual de agua destilada, libre de gas a la misma temperatura

Gravedad Específica: Relación entre la densidad de una sustancia y la de otra, tomada como patrón, generalmente para sólidos y líquidos se emplea el agua destilada y para gases, el aire o el hidrógeno. También llamada peso específico.

M

Mantenimiento: conservación del pavimento en condiciones óptimas.

Mezcla SMA (Stone Mastic Asphalt): Las mezclas de SMA tienen un contenido de asfalto entre 6.5 – 7.2%. El bitumen se mantiene estabilizado en la composición granulada de áridos durante el proceso de mezcla, almacenaje intermedio, transporte, pavimentación y compactación por el agregado de un aditivo en base a fibras celulósicas.⁶

Es una aplicación rápida y de pronta apertura al tránsito, con el objetivo principal de resistir las roderas y proporcionar mayor durabilidad, se reportan beneficios adicionales sobre la mezcla densa como: menor ruido, mayor fricción en húmedo, mayor resistencia al agrietamiento reflexivo. El alto contenido de ligante reduce el envejecimiento. No tiene función drenante.⁷

Mezcla Densa En Caliente: son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos. En una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla.

P

Pavimento: superficie terrestre formada por una o más capas de material granular o diferentes aditivos, puestos en un orden específico para su mejor desempeño a la hora de generar su fin el cual es transportar o transcurrir de un punto a otro a través de este.⁸

⁶ <http://www.e-asfalto.com/sma/>

⁷ http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/7cma_2011/21.pdf

⁸ Universidad tecnológica nacional. Pavimento. [En línea]. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible.

Pavimento flexible: Se le llaman flexibles a aquellas estructuras cuya deformación es deflactarse o flexionarse según las cargas o la utilidad que se le dé a fin a este pavimento. Se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico como puedan ser vías, aceras o parkings. Las principales características de estos son durabilidad, resistencia estructural y deformabilidad. La construcción de estos se realiza a base de varias capas de material. Cada una de las capas recibe cargas por encima de la capa.⁹

Pavimento Rígido: Constan de un pavimento formado por una losa de hormigón, apoyada sobre diversas capas, algunas de ellas estabilizadas, se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su periodo de vida varía entre 20 y 40 años.¹⁰

R

Reconstrucción: Reparación o nueva construcción de una cosa destruida, deteriorada o dañada.¹¹

Rehabilitación del pavimento: Como su nombre lo indica es un mecanismo mediante el cual la estructura del pavimento flexible o rígido, es llevada por medio de un proceso a su estado original o por lo menos ese es el propósito de este. Existen dos formas de rehabilitar un pavimento y es reciclándolo ósea, reutilizando las mismas partículas que ya fueron utilizadas desde su creación y la otra forma es haciendo una escarificación, reconfiguración, compactación e imprimación; Estos dos métodos son muy parecidos, pero con diferentes teorías, pero llevan al mismo punto.¹²

Relación filler-betún: Es la relación en volumen, del pasa tamiz número 200 del agregado sobre el mismo volumen más el volumen de cemento asfálticos.

https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Pavimentos.pdf.

⁹ Urbanismo.com. Pavimento flexible. [En línea]. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible. <http://www.urbanismo.com/pavimentos-flexibles/>.

¹⁰ Scribd, Método evaluación de carreteras vizir [En línea]. 2015 Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/57943562/pavimento-rigido> [fecha de consulta: 11 mayo 2016].

¹¹ SCT. Secretaria de comunicaciones y transporte, GUIA DE PROCEDIMIENTOS Y TECNICAS PARA LA CONSERVACION DE CARRETERAS, 2014 [fecha de consulta: 15 octubre 2016].

¹² Prezi. Rehabilitación de pavimento. [En línea]. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible.

<https://prezi.com/okz6hm6dd-l3/procesos-de-rehabilitacion-de-pavimentos-flexibles/>.

Relación Estabilidad-Flujo: Razón entre la carga máxima en Kg (ESTABILIDAD) y la deformación al alcanzar la carga máxima (FLUJO) en mm.

S

Subrasante: así es denominado el suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento. En la década del 40, el concepto de diseño de pavimentos estaba basado en las propiedades ingenieriles de la subrasante. Estas propiedades eran la clasificación de suelos, plasticidad, resistencia al corte, susceptibilidad a las heladas y drenaje.

Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

1. Propiedades físicas: son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.
2. Propiedades ingenieriles: dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos. La calidad de los suelos para subrasantes se puede relacionar con el módulo resiliente, el módulo de Poisson, el valor soporte del suelo y el módulo de reacción de la subrasante.¹³

V

Vacíos del Agregado Mineral: Volumen de los espacios entre partículas de agregados, expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla compactada

Vacíos de Aire: Volumen de los espacios entre partículas de agregados recubiertos de asfalto, expresado como porcentaje del volumen total de la probeta.

Vía: Es aquella ruta, camino, trayecto o espacio destinado para el flujo de personas y automóviles que se dirigen hacia un destino que conecta esta llamada vía, de un punto de inicio hasta un lugar de destino con ciertas características.¹⁴

¹³ <http://libro-pavimentos.blogspot.com/2011/03/caracteristicas-de-la-subrasante.html>

¹⁴ Definiciones ABC. Vía. [En línea]. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible.

<http://www.definicionabc.com/general/via.php>.

1 INTRODUCCIÓN

El concreto asfáltico ha sido durante años la forma de construcción estándar de las superficies de rodadura en Colombia, ya que en condiciones de tránsito y carga normales dio buenos resultados en su desempeño mecánico. Sin embargo, el aumento del tránsito y las cargas extraordinarias resultantes del mismo, evidenciaron las limitaciones del uso de concreto asfáltico, en particular en las vías de alto tráfico, que en Colombia son puntualmente las que vienen de los puertos hacia el interior de país, causando daños por de fatiga y ahuellamiento, los cuales requieren una gran inversión de recursos del estado, en actividades de mantenimiento y rehabilitación de las mismas, generando impactos en la movilidad. Esta problemática crea la necesidad de adoptar nuevos métodos constructivos y de diseño de mezclas asfálticas.

En 1968, en Alemania, los investigadores buscaban obtener un pavimento con la mayor resistencia al desgaste causado por los clavos usados en los neumáticos de los vehículos en las temporadas de invierno. Una empresa de pavimentos, Strabag, en colaboración con J. Rettenmaier & Söhne (líder mundial en tecnología de fibras) observó la necesidad de desarrollar una nueva mezcla asfáltica con mayor resistencia al desgaste, creando así las mezclas SMA (Stone Mastic Asphalt), las cuales requerían menor inversión en mantenimiento.

Tras la prohibición de los clavos en los neumáticos, en 1975, se observó que las mezclas SMA, además de que presentaban una mayor resistencia al desgaste, tenían un mejor desempeño en la fatiga y al ahuellamiento, entre otros, por lo cual en 1984 las autoridades viales de Alemania normalizaron este sistema constructivo de estructuras de pavimento. Debido a este alto desempeño en vías con altos volúmenes de tránsito, otros países europeos han incorporado esta tecnología en sus especificaciones.

En 1990 la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) realizó un estudio sobre este tipo de revestimientos asfálticos usados en Europa, y se decidió efectuar tramos de ensayo con mezclas asfálticas en caliente tipo SMA en 23 estados, especialmente en Maryland y Georgia, con los cuales confirmó su buen desempeño mecánico. Con los resultados satisfactorios obtenidos se logró una normatividad para la construcción y regulación de este tipo de mezcla.

Las mezclas asfálticas en caliente tipo SMA, que serán el objeto de estudio del presente proyecto, se presentan como una buena alternativa para mejorar el desempeño mecánico de los pavimentos de alto volumen de tránsito en Colombia.

2 JUSTIFICACIÓN

Los crecientes volúmenes de tránsito a los que están sometidos algunos pavimentos, el aumento en la magnitud de las cargas máximas permisibles, los climas adversos y la necesidad de brindarle al usuario pavimentos más seguros, han hecho que en nuestro país como en muchos otros, las mezclas tradicionales no cumplan con las nuevas exigencias a las que los pavimentos son sometidos, presentando problemas de deformación permanente, superficies deslizantes y daño por humedad.

Como respuesta ante tal necesidad, se propone este proyecto de investigación cuyo objetivo es analizar el comportamiento de mezclas con gradación discontinua SMA utilizando agregados y asfaltos nacionales, con el fin de generar especificaciones enfocadas a la utilización de mezclas de mejor desempeño como capas de rodadura en pavimentos de alto volumen de tránsito.

Las mezclas SMA se caracterizan por requerir propiedades volumétricas que generan un mayor requerimiento de asfalto, materiales pétreos de la mejor calidad (forma, resistencia y durabilidad) con granulometrías discontinuas que generan un esqueleto granular más robusto y el uso de asfaltos modificados con polímeros; características que le confieren a dichas mezclas un desempeño ideal para ser utilizado como superficie de ruedo. Entre otras, las características esperadas para este tipo de mezclas son: menor susceptibilidad al ahuellamiento (por su esqueleto granular), mayor durabilidad y menor susceptibilidad al envejecimiento (al contar con una película de asfalto modificado mayor que las mezclas convencionales), una mayor capacidad mecánica y rigidez (al estar conformada por agregados de la mejor calidad y asfaltos modificados) y mejores propiedades de fricción y reducción de ruido (debido a la macrotextura lograda por la disposición granulometría empleada) ligadas a un beneficio evidente en la seguridad de los usuarios al transitar por estas vías y mejores condiciones para mitigar el impacto urbano de esta infraestructura.

Pese a las ventajas que han presentado, las mezclas SMA a nivel internacional, en nuestro país no se cuenta con especificaciones fiables y basadas en estudios de investigación formales que permitan garantizar la factibilidad para su aplicación bajo las condiciones nacionales.



3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Analizar el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas tipo *STONE MASTIC ASPHALT* (SMA) para aplicación como capa de rodadura en pavimentos de alto volumen de tránsito en Colombia.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir una(s) fuente(s) de material pétreo con la(s) que se cumpla los requerimientos granulométricos y físico-mecánicos del agregado pétreo.
- Realizar un diseño de mezcla asfáltica en caliente tipo SMA con la granulometría elegida mediante la metodología Marshall.
- Evaluar el desempeño mecánico de la mezcla asfáltica en caliente tipo SMA por medio de ensayos de laboratorio.
- Evaluar el desempeño mecánico de una mezcla asfáltica tipo SMA a escala industrial en planta de producción de mezcla asfáltica en caliente para ser comparada con las propiedades de la mezcla diseñada y caracterizada en laboratorio.
- Comparar los resultados de desempeño mecánico entre una mezcla densa en caliente 19 (MDC-19) con la mezcla asfáltica en caliente tipo SMA diseñada en el laboratorio y fabricada en planta de producción.

4 MARCO TEÓRICO

La mezcla SMA (Stone Mastic Asphalt) fue desarrollada en Alemania a finales de los años 60. Se deseaba obtener un pavimento de máxima resistencia al desgaste y deterioro causado por los neumáticos de clavos en las rutas europeas. Una empresa de pavimentos, Strabag, con la colaboración de J. Rettenmaierm, fueron los pioneros en la investigación y creación de las mezclas SMA

Después de la prohibición del uso de neumáticos de clavos, se verifico que las mezclas SMA tenían una mayor resistencia que las mezclas convencionales por lo cual se desempeñaban mejor en las carreteras de alto transito debido al bajo desgaste que estas presentaban; dando como resultado la normalización de estas en 1984.

Debido a lo anterior países como Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda, China, Corea del Sur, Taiwán, entre otros, han implementado la elaboración e instalación de este tipo de mezclas ganando rápida aceptación por sus características, toda vez que han presentado un excelente rendimiento en comparación a las mezclas convencionales en cuanto a:

- Altos volúmenes de tráfico
- Aumento de las cargas por eje
- Mayor presión de los neumáticos

Las mezclas SMA son conocidas por

- Alta resistencia a la deformación
- Resistencia a la fatiga y el envejecimiento
- Drenaje
- Reducción del ruido

AHUELLAMIENTO:

El ahuellamiento es un deterioro estructural que se presenta en la huella caracterizado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no se recupera a su estado inicial, esta deformación puede ser causada por:

- Deformación en la capa de cimentación (sub-rasante) la cual refleja en las demás capas de la estructura reflejándose en la carpeta asfáltica afectando así la transitabilidad y seguridad. Este fenómeno se puede presentar al subdiseñar la estructura de pavimento, lo cual puede ser generado en un mal cálculo del tránsito, en un diseño deficiente de la estructura la cual no disipa los esfuerzos generados por el tránsito, una mala caracterización de los materiales a emplear en dicha estructura,

toda vez, que el módulo de los materiales granulares no cementados dependen de la primera invariante de esfuerzos, un drenaje deficiente el cual permite la saturación de la subrasante.

- Deformación en la carpeta asfáltica la cual se produce por una baja resistencia al corte la cual no está diseñada para soportar las cargas cíclicas del tránsito.

FISURACIÓN POR FATIGA

Deterioro el cual se presenta en la huella dejada por el tránsito por lo cual se considera estructural y un signo prematuro de fatiga. Este tipo de deterioro es progresivo, toda vez que si no se corrige a tiempo se unen entre si presentando el deterioro llamado Piel de Cocodrilo el cual más adelante puede presentar disgregación de los a granulares formando baches.

Se conoce que una mezcla asfáltica muy rígida tiende a oponer baja resistencia a la fatiga cuando la estructura permite deflectar a la capa asfáltica. Materiales rígidos, altas deflexiones y altos niveles de tensiones conducen a vidas útiles reducidas por la fatiga

Subrasantes con pobre drenaje, resultando en pavimentos blandos con altas deflexiones, es la causa principal del fisuramiento por fatiga. Pobres diseños y/o deficiente construcción de capas del pavimento que son también propensas a sufrir altas deflexiones, probablemente contribuyen al fisuramiento por fatiga.

También se debe tener en cuenta que el fisuramiento por fatiga es solo un signo de que un pavimento ha sido transitado por el número de cargas para el cual fue diseñado. Luego, esta simplemente agotado y necesita una rehabilitación planificada. Asumiendo que la ocurrencia del fisuramiento por fatiga coincide aproximadamente con el periodo de diseño, esto no sería necesariamente una falla, sino la progresión natural de una estrategia de diseño del pavimento. Si el fisuramiento observado ocurre mucho antes de concluido el periodo de diseño, sería un signo de que el pavimento recibió más cargas pesadas, antes de lo previsto

CONCEPTOS SOBRE EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SMA

Su elevada estabilidad reside en dos componentes: una fuerte estructura granular más un mortero altamente cohesivo producto de un elevado contenido de ligante y filler más la adición de fibras celulósicas.

El mortero formado por el conjunto ligante-filler-fibras debe rellenar parcialmente –hasta dejar solamente 2 a 3 % de vacíos de aire en la mezcla- a dicha estructura granular cuyos Vacíos del Agregado Mineral (VAM) no deben ser inferiores al 17%. A su vez los Vacíos

Rellenos de Betún (RBV) se ubican por lo general entre 78 y 93 %, valores estos superiores a los que posee una mezcla asfáltica densamente graduada

En la SMA se debe diseñar una estructura granular discontinuamente graduada, con contacto interparticular –resistencia friccional- rellena sin ser saturada por un mortero asfáltico – componente cohesiva- estable e impermeable. Estable significa que no ocurran escurrimientos de ligante durante la elaboración y colocación de la mezcla, Como tampoco exudaciones y deformaciones permanentes durante su vida de servicio bajo las acciones del tránsito y del clima. Cuanto más ligante asfáltico contenga la mezcla, mayor durabilidad tendrá la misma. Con las SMA se potencian tanto la fricción como la cohesión, alcanzando un nivel de comportamiento bajo tránsito inigualable por ninguna otra mezcla asfáltica existente.

Debido a que el esqueleto pétreo autoportante la SMA resiste mejor que ninguna los esfuerzos repetidos de las cargas más pesadas –resistencia a deformaciones permanentes- y debido al bajo contenido de vacíos de aire y elevado contenido de ligante resiste muy bien la fatiga –resistencia a la fisuración por esfuerzos repetidos. Ello se traduce en una vida de servicio que va desde un 50 hasta un 100% mayor que en el caso de las mezclas convencionales

El agente estabilizante juega un papel fundamental en la SMA por ello deben emplearse fibras de celulosa las cuales permiten la adición de la mayor cantidad de ligante asfáltico posible evitando el escurrimiento de la mezcla recién elaborada y almacenada, y la exudación en servicio.

Por tanto y por definición Stone-Mastic Asphalt es una mezcla asfáltica de gran estabilidad y superior durabilidad y está formada por:

- Agregados pétreos de alta calidad granulométricamente graduados maximizando la componente de fricción interna de la mezcla
- Mortero Asfáltico formado por: filler, ligante asfáltico y fibras,
- Composición volumétrica balanceada, tal que la mezcla resulte altamente resistente, impermeable, sin riesgos de exudaciones y brinde la máxima durabilidad.

FUNCIONAMIENTO DE LA SMA

Debido a que este tipo de mezcla contiene más agregado grueso (70-80%) y el ligante (6.5-7.5%), relleno mineral (9-11%), fibras celulósicas como aditivo (0.3-0.5%). Debido a las características, el agregado grueso forma una fuerte estructura esquelética compacta y entrelazada que contribuye a disipar el impacto subterráneo (capas inferiores), y el resto de los ingredientes forma lo que es llamado el mortero (mortero) el cual crea un cierre

impermeable que impide la absorción del agua por la mezcla SMA. Al mismo tiempo, su textura superficial más rugosa también reduce el hidroplaneo.

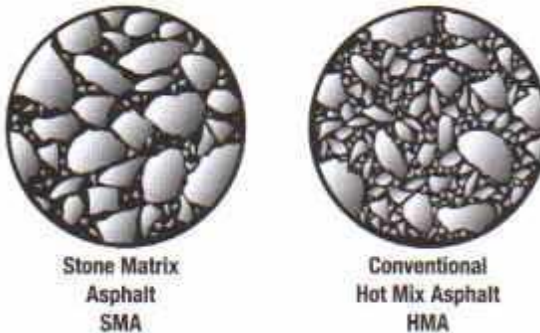


Figura 1. Granulometría de la mezcla.

VENTAJAS DE LAS SMA:

Buena estabilidad a elevadas temperaturas: La mezcla de SMA presenta un esqueleto pétreo de áridos de alta calidad que provee un incremento en la fricción interna y resistencia al corte dando así una estabilidad extremadamente elevada. **Buena flexibilidad a bajas temperaturas:** SMA utiliza un mortero rico en mortero que ofrece propiedades superiores a las de un concreto denso en caliente en sus características de resistencia al fisuramiento térmico.

Elevada resistencia al desgaste: SMA tiene bajo contenido en vacíos de aire totales que le confiere impermeabilidad y le provee buena resistencia al envejecimiento, a la humedad y eleva la durabilidad.

Elevada capacidad adhesiva entre los agregados y el bitumen: Estas mezclas SMA tienen una gran cantidad de filler y asfalto, las fibras celulósicas se agregan como estabilizante. Ello se hace para absorber bitumen, espesar la película bituminosa y mejorar la adhesión betumen / áridos.

Una mezcla que no tiende a separarse: Se obtiene una eficiente estabilización del mortero para evitar la separación de las partículas áridas gruesas.

Buena resistencia al deslizamiento: Debido a la profundidad de su textura superficial y al uso de áridos gruesos, se obtiene una excelente resistencia al deslizamiento.

Salpicado reducido: Debido a la profundidad de textura superficial hay menos salpicado de agua y, de noche, es menor el reflejo de la superficie y se mejora la visibilidad de las demarcaciones del camino.

Menos ruido de tráfico: SMA presenta generalmente disminución de ruidos debidos a las propiedades de textura conseguidos.

MEZCLA DENSA EN CALIENTE (MDC)

Las mezclas densas en caliente están compuestas por un ligante asfáltico y un agregado mineral. El primer componente, puede ser un ligante convencional o uno modificado el cual actúa como un agente que aglutina las partículas en una masa cohesiva e impermeabiliza la mezcla.

El agregado mineral, ligado por el material asfáltico, actúa como un esqueleto pétreo que aporta resistencia y rigidez al sistema.

Tanto para el ligante asfáltico como para el agregado mineral, su comportamiento es afectado por las propiedades individuales de cada componente y por la interrelación de aquellos dentro del sistema por lo cual se considera su comportamiento como un sistema dentro de la mezcla asfáltica

El comportamiento de la capa asfáltica de superficie dependerá de un gran grupo de factores entre los cuales podemos enumerar:

1. La composición de la mezcla asfáltica.
2. Las propiedades mecánicas de la mezcla compactada.
3. El control de calidad que se lleve a cabo durante la producción y colocación.
4. Las propiedades de soporte de las capas subyacentes, en particular de su rigidez, y la liga entre las capas.
5. La cantidad y tipo de tráfico
6. Condiciones ambientales y de drenaje

Este tipo de mezclas tienen buen comportamiento en servicio cuando son proyectadas, elaboradas, colocadas y apoyadas correctamente.

CARACTERÍSTICAS DE UNA MDC.

Durabilidad: resistentes a los agentes climáticos, particularmente a la acción desintegrante del agua y al alto efecto abrasivo del tránsito.

Resistencia al Deslizamiento: Es necesario contar con un porcentaje de cemento asfáltico óptimo y con un porcentaje de vacíos adecuado. Un exceso de cemento asfáltico en la carpeta de rodadura es la causa más común de los deslizamientos; un bajo contenido de cemento asfáltico (o una falta de adherencia) y agregados pulimentables, originan una falta de fricción entre los neumáticos y el pavimento, sobre todo en los periodos de lluvias o alta humedad

Flexibilidad: Es la capacidad para deformarse elásticamente, para acompañar, sin agrietamientos ni roturas, las deformaciones bajo la carga que sufre la capa sobre la cual está fundada una determinada mezcla asfáltica.

Estabilidad en Servicio: Puede definirse como la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas bajo la acción del tránsito.

Compactabilidad: Deben permitir una fácil distribución y una correcta densificación. Los factores que influyen en la compactabilidad son: tipo de cemento asfáltico y porcentaje óptimo del mismo; granulometría, textura y rugosidad de los agregados; y muy particularmente la forma de las partículas de agregado mineral y de la relación filler-betún.

METODO DE DISEÑO MEZCLAS ASFALTICAS.

1. Método MARSHALL

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrolló un criterio de diseño de mezclas. El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38 mm (1.5"). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con gradación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar. El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½") y 102 mm (4") de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes

compactados. La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60 ° C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm (1/100") que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.

2. DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL ESCURRIMIENTO EN MEZCLAS ASFALTICAS NO COMPACTAS.

Este ensayo pretende determinar el escurrimiento que se presenta en una mezcla asfáltica no compacta la cual consiste en elevar la temperatura de la mezcla a las temperaturas encontradas en la producción, almacenamiento, transporte e instalación de la misma. Este ensayo se realiza a mezclas gradación abierta y mezclas asfálticas tipo SMA

5 METODOLOGÍA

La metodología planteada tiene como objetivo valorar el desempeño de mezclas asfálticas tipo SMA fabricadas en laboratorio y en planta de producción en caliente con materiales del país y compararlo con el desempeño de una mezcla asfáltica de uso común en superficies de rodadura en pavimentos de alto volumen de tránsito, para así valorar inicialmente su viabilidad técnica para la aplicación en el país.

Para esto se realizó inicialmente un estudio bibliográfico de especificaciones y experiencias internacionales que permitieron entender detalladamente las restricciones para su uso (ventajas y desventajas), los procedimientos de diseño, requerimientos y especificaciones de materiales componentes y producto final, y el desempeño a escala de laboratorio de este tipo de mezclas.

Esta tesis se basó en el protocolo AAMAC PA-CR 04/2015 *Diseño, fabricación y colocación de las diferentes capas de rodadura en caliente*, para establecer los requerimientos de calidad en cuanto a los agregados, asfaltos y adiciones a utilizar para su composición, así como las especificaciones de parámetros volumétricos típicamente requeridos. Este estudio de las características base fue ampliado mediante otras especificaciones internacionales tales como: la norma AASHTO M 325-08 (2017) *Estándar Specification for Stone Matrix Asphalt*, las propuestas por la National Cooperative Research Program (NCHRP 9-8), el Federal Highway Administration (FHWA) y de otros países que han aplicado la técnica con éxito como Alemania, Argentina, Chile, México, entre otros.

El análisis de especificaciones y experiencias internacionales puntuales permitió reconocer las variables críticas y dosificaciones utilizadas con éxito, las cuales se utilizaron de base y nos facilitaron la elección de las características para la formulación de la mezcla asfáltica tipo SMA, para así tener las mejores expectativas de éxito y desempeño optimizado.

Los materiales asfálticos que se utilizaron para este estudio fueron suministrados por la empresa MANUFACTURAS Y PROCESOS INDUSTRIALES LTDA (MPI) y los materiales pétreos por la empresa PROCOPAL. El material asfáltico con el cual se desarrolló el proyecto, fue un Asfalto Modificado con polímero tipo SBS que formula esta empresa y los materiales pétreos fueron aquellos a los que la misma tiene acceso por su relación en proyectos de fabricación de mezclas asfálticas, su elección se basó en el cumplimiento de requerimientos y la información con la que cuenta la empresa de sus características.

De acuerdo a la investigación previa realizada se propuso los siguientes ensayos a desarrollar para su caracterización:

Material Asfáltico:

- (AASHTO T 315). Determinación de las propiedades reológicas de ligantes asfálticos mediante el DSR.
- (AASHTO T 240 / ASTM D2872). Efecto de calentamiento y ventilación en asfaltos RTFOT.
- (AASHTO R 28 / ASTM D 6521). Envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos mediante el dispositivo de envejecimiento presurizado (PAV).
- (ASTM D 6648). Determinación de la rigidez del asfalto con el reómetro de viga flexible (BBR).
- (AASHTO M 332). Multiple stress creep recovery (MSCR)
- (INVIAS Art. 414-1 – 2013) Especificaciones de asfalto modificado con polímero

Materiales pétreos:

- (ASTM C136/C117). Granulometría de agregados finos y gruesos.
- (AASHTO T 85 / ASTM C128). Gravedad específica y absorción de agregados.
- (AASHTO T 104 / ASTM C88). Sanidad de agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.
- (AASHTO T 96 / ASTM C131). Resistencia a la degradación de agregado grueso mediante abrasión en impacto en el equipo de Los Ángeles.
- (ASTM D4791). Procedimiento de ensayo para la determinación de partículas planas y elongadas en agregados gruesos.
- (ASTM D5821). Procedimiento de ensayo para la determinación del porcentaje de partículas fracturadas en agregados gruesos.
- (ASTM 6928). Procedimiento de ensayo para para la determinación de la resistencia al desgaste del agregado grueso mediante el equipo Micro-Deval.
- (TEX 438-A) Prueba de pulimiento acelerado del agregado grueso.
- (ASTM D2419) Procedimiento de ensayo para el valor de equivalente en arena de suelos y agregados finos.
- (RA-05) Determinación del valor de azul de metileno para materiales que pasa la malla #200 (75µm)
- (AASHTO T304) Procedimiento de ensayo para la determinación del contenido de vacíos no compactados en agregados finos.

Elegidos los materiales y sus características (propiedades y configuración granulométrica de materiales pétreos, tipo de asfalto y adiciones) se realizó un diseño de la mezcla asfáltica mediante la metodología MARSHALL. Basado en este diseño se estableció las dosificaciones óptimas y conformación de la mezcla SMA con la cual se analizó su desempeño.

Dado que estas mezclas asfálticas se caracterizan por consideraciones volumétricas que aumentan o favorecen consumos mayores de asfalto (en procura de un mejor desempeño) se torna de especial importancia la valoración del parámetro de escurrimiento de asfalto, este parámetro valora la susceptibilidad con la que una mezcla asfáltica SMA podría perder asfalto dada una separación con la matriz de agregado, evidenciado como un drenaje de asfalto durante su producción, transporte y colocación a altas temperaturas. Para valorar las condiciones de escurrimiento se propuso el ensayo de ASTM D6390 *Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixture*.

Consecuente con las experiencias, se utilizó una fibra de celulosa que permite retener el asfalto entre la matriz de material pétreo al funcionar como “esponjas” dentro del mastic que generan consistencia evitando el drenaje. La dosificación de esta fibra se hizo en función de las recomendaciones del productor de la fibra y de experiencias exitosas conocidas. La fibra celulosa utilizada es la suministrada por la empresa VIATOP con la cual se acordó el suministro para los ensayos correspondientes.

Finalmente se realizó una valoración del desempeño de la mezcla propuesta en su condición de dosificación óptima. Para la definición de los ensayos de desempeño se tuvo presente que las mezclas asfálticas SMA son propuestas a ser utilizadas en capas de ruedo en pavimentos de medio-alto volumen de tránsito, por lo que las principales características que se buscan de este tipo de mezclas asfálticas son: (a) adecuada capacidad mecánica que favorezca la distribución de esfuerzos a través de la estructura del pavimento, (b) durabilidad de la mezcla enfocada a la resistencia al daño por humedad y envejecimiento por oxidación de la mezcla asfáltica, (c) baja susceptibilidad a la deformación permanente o ahuellamiento que eviten empozamientos de agua mejorando la seguridad de los usuarios, (d) Resistencia al fisuramiento por fatiga (top-down) por presencia de porcentajes altos de vehículos pesados (pavimentos de alto volumen de tránsito), (e) fricción superficial de este tipo de mezclas que al contar con una matriz de agregado grueso que favorece la macrotextura influyendo en mayor fricción llanta-pavimento y reduciendo el fenómeno de hidropelaje.

Los ensayos propuestos para valorar el comportamiento de la mezcla SMA son los siguientes:

- (EN 12697-24) Determinación del módulo de rigidez de mezclas asfálticas por tracción indirecta en probetas cilíndricas. Con el cual se valorará la capacidad mecánica de la mezcla asfáltica.
- (AASHTO T 283). Resistencia de mezclas asfálticas compactadas al daño inducido por humedad. Con el cual se valorará la durabilidad de la mezcla asfáltica.
- (NLT-173/00) Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio
- (EN 12697-24 ANEXO D). Resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas ensayo de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas. Con la cual se valorará la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga.

Con el objetivo de tener un marco de referencia para la valoración de su viabilidad en el uso de mezclas SMA en nuestro país mediante la valoración de su desempeño; se estableció su comparación con el desempeño de una mezcla asfáltica de uso común en superficies de ruedo en pavimentos de alto tránsito en Colombia. Esta mezcla fue diseñada y fabricada de acuerdo a las consideraciones y requerimientos actuales para garantizar su concordancia con las prácticas actuales. Posteriormente se evaluó su desempeño mediante los mismos ensayos propuestos para la mezcla SMA con la cual se pudo valorar las ventajas y desventajas entre ambas mezclas asfálticas.

6 RESULTADOS

6.1 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

6.1.1 Agregados Pétreos

A continuación, se listan los materiales aluviales de las vegas del río Medellín suministrados por PROCOPAL S.A., para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente (Stone Mastic Asphalt – SMA), según el protocolo AMAAC PA-CR 04/2015.

- Arena Triturada
- Arena Lavada
- Triturado de ½”

6.1.1.1 Granulometría óptima de diseño

Para la selección de la granulometría óptima, el protocolo **AMAAC PA-CR 04/2015** establece la misma a partir de tres granulometrías de ensayo, una cercana al límite superior, otra cercana al límite inferior y la tercera, entre ambos límites. Para este caso en particular, teniendo en cuenta que el tamaño máximo del triturado suministrado es de ½”, el huso granulométrico seleccionado fue la Tipo B.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se especifican los límites de las configuraciones granulométricas propuestas por el protocolo **AMAAC PA-CR 04/2015** para mezclas asfálticas tipo SMA para capas de rodadura.

Tabla 1. Límites granulométricos por peso de las mezclas tipo SMA para capas de rodadura – fuente propia

<i>Clasificación</i>	<i>Tipo “A”</i>	<i>Tipo “B”</i>	<i>Tipo “C”</i>
<i>Abertura</i>	<i>% que pasa</i>		
<i>19.0mm (3/4”)</i>			<i>100</i>
<i>12.5mm (1/2”)</i>		<i>100</i>	<i>90 - 100</i>
<i>9.50mm (3/8”)</i>	<i>100</i>	<i>70 - 95</i>	<i>50 - 80</i>
<i>4.75mm (núm.4)</i>	<i>30 - 45</i>	<i>30 - 50</i>	<i>20- 35</i>
<i>2.38mm (núm. 8)</i>	<i>20 - 27</i>	<i>20 - 30</i>	<i>16 - 24</i>
<i>0.075mm (núm. 200)</i>	<i>9 -12</i>	<i>8 -12</i>	<i>8-11</i>

A continuación, se presenta la distribución granulométrica de cada uno de los materiales pétreos recibidos, la gradación compuesta y los límites aplicables según el protocolo **AMAAC PA-CR 04/2015**

Tabla 2. Distribución granulométrica de los materiales pétreos recibidos. – fuente propia

<i>Material</i>	<i>Tamices de control vs % que pasa el tamiz</i>				
	<i>1/2"</i>	<i>3/8"</i>	<i>No. 4</i>	<i>No. 8</i>	<i>No. 200</i>
<i>Arena Triturada</i>	100	99.8	69.7	40.4	6
<i>Arena Lavada</i>	100	100	98.8	82.9	6.2
<i>Triturado de ½"</i>	100	90	12.5	5.6	2.3
<i>Carbonato de Calcio</i>	100	100	100	100	90

Tabla 3. Proporciones de combinación de materiales para la mezcla SMA-Tipo B. – fuente propia

<i>Material</i>	<i>Arena Triturada</i>	<i>Arena Lavada</i>	<i>Triturado de ½"</i>	<i>Carbonato de Calcio</i>
<i>Proporciones</i>	12%	11%	70%	7%

Tabla 4. Distribución granulométrica de diseño y controles – fuente propia

<i>Tamiz</i>	<i>1/2"</i>	<i>3/8"</i>	<i>No. 4</i>	<i>No. 8</i>	<i>No. 200</i>
<i>% Pasa (Combinación)</i>	100	93	35	24.9	9.3
<i>Límites AAMAC PA-CR 04/2015 MSMA- Tipo B</i>	100	70 – 95	30 – 50	20 – 30	8 – 12

En la Figura 2. se representa gráficamente la distribución granulométrica óptima para el diseño y control de la mezcla asfáltica tipo SMA a escala laboratorio.

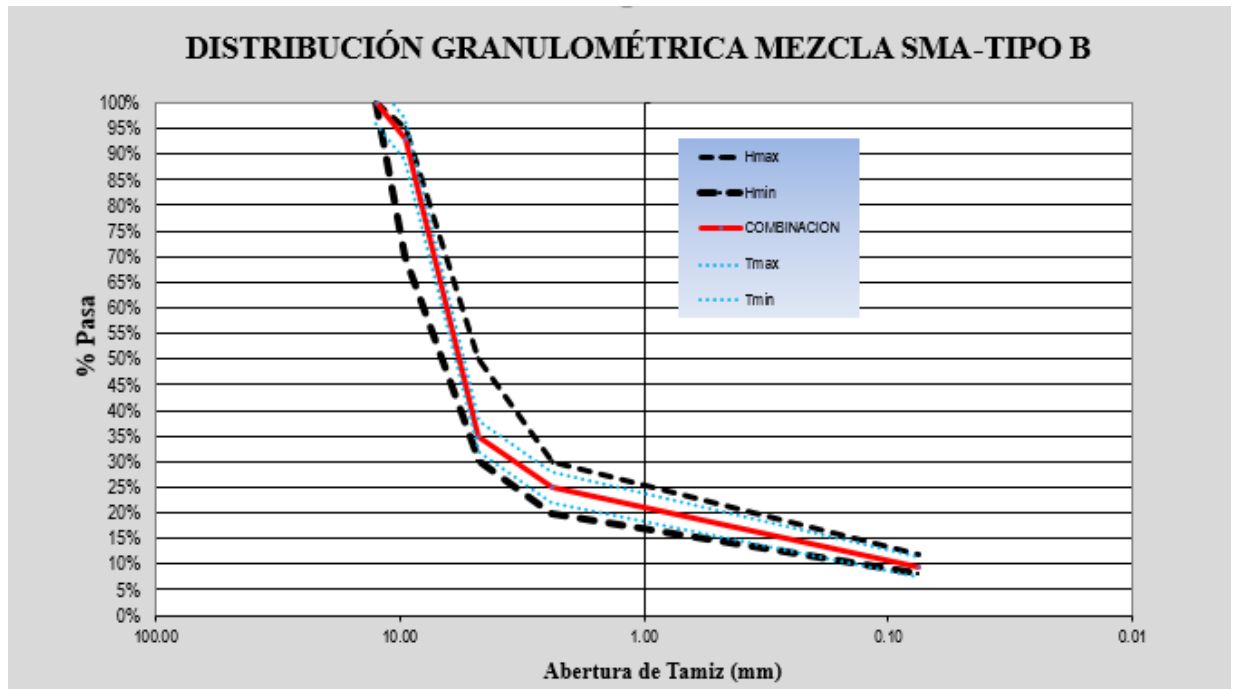


Figura 2. Distribución granulométrica de diseño y control – fuente propia

6.1.1.2 Caracterización físico-mecánica del agregado combinado

Para las mezclas asfálticas tipo SMA, el agregado grueso y fino se define en función de la clasificación de la mezcla establecida en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de este documento. De tal manera que para las mezclas SMA Tipo B, el agregado grueso se define como la fracción retenida en malla núm. 8 (2,38mm) y por consiguiente, el agregado fino se define como la fracción que pasa la malla núm. 8 (2,38mm).

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan los requisitos de calidad que deben cumplir los agregados pétreos que fueron utilizados en el diseño de la mezcla asfáltica tipo SMA.



Tabla 5. Caracterización físico-mecánica de los materiales pétreos combinados – fuente propia

<i>PROPIEDAD</i>	<i>NORMA</i>	<i>VALOR</i>	<i>ESPEFICACIÓN AAMAC PA-CR 04/2015</i>
DUREZA AGREGADO GRUESO			
<i>Desgaste en máquina de los ángeles, 500 Revoluciones (%)</i>	<i>ASTM C131</i>	12.0	25 máx.
<i>Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval (%)</i>	<i>ASTM 6928</i>	7.4	15 máx.
<i>Pulimiento Acelerado (%)</i>	<i>TEX438-A</i>	0.49	30 máx.
DURABILIDAD			
<i>Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso.(%)</i>	<i>ASTM C88</i>	8.76	20 máx.
LIMPIEZA GRADACIÓN COMBINADA			
<i>Equivalente de arena (%)</i>	<i>ASTM D2419</i>	64	55 mín.
<i>Valor de azul de metileno (mg/g)</i>	<i>RA 05</i>	5	12 máx.
GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS			
<i>Partículas Planas y Alargadas relación 5:1, (%)</i>	<i>ASTM D4791</i>	1,8	5 máx.
<i>% Caras fracturadas (1cara/ 2 caras)</i>	<i>ASTM D5821</i>	100/ 94	100/90 mín.
<i>Angularidad del agregado fino (%)</i>	<i>AASTHO T304</i>	45	45 mín

6.1.1.3 Pesos específicos de los materiales granulares

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados para el cálculo del peso específico de las fracciones del material combinado:

Tabla 6. Peso específico de los agregados Gruesos – fuente propia

<i>Peso Específico Agregado Grueso (Retenido No. 8)</i>				
<i>Peso Material</i> (g)	<i>Peso en agua</i> (g)	<i>Peso SSS</i> (g)	<i>Gsb Bulk</i>	<i>Absorción</i> (%)
2044.8	1315.5	2067.4	2.720	1.1

Tabla 7. Peso específico de agregados Finos – fuente propia

<i>Peso Específico Arenas (Pasa No.8 – Retiene No.200)</i>					
<i>Peso Material</i> (g)	<i>WMatraz + arena + H₂O</i> (g)	<i>WMatraz + H₂O</i> (g)	<i>Peso SSS</i> (g)	<i>Gsb Bulk</i>	<i>Absorción</i> (%)
495.9	7638.2	7324.4	500	2.663	0.8

Tabla 8. Peso específico del llenante mineral – fuente propia

<i>Peso Específico Filler (Pasa No.200)</i>			
<i>Peso Material</i> (g)	<i>WMatraz + filler + H₂O</i> (g)	<i>WMatraz + H₂O</i> (g)	<i>Gsb Bulk</i>
211.3	1864.3	1731.1	2.706

La gravedad específica de los agregados es: **2.704**

6.1.2 Cemento Asfáltico

El cemento asfáltico que se utilizó para la producción a escala laboratorio de la mezcla en caliente tipo SMA como capa de rodadura fue un asfalto modificado con polímero tipo SBS, suministrado por MANUFACTURAS Y PROCESOS INDUSTRIALES LTDA (MPI).



En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan los requisitos de calidad que debe cumplir el cemento asfáltico a utilizar en el diseño de la mezcla SMA, según las especificaciones establecidas en el protocolo **AMAAC PA-CR 04/2015** y los ensayos considerados en la metodología del presente documento.

Tabla 9. Caracterización del cemento Asfáltico. – fuente propia

<i>Propiedad</i>	<i>Norma de referencia</i>	<i>Especificación</i>		<i>Resultado</i>
		<i>mín</i>	<i>máx</i>	
<i>Penetración a 25°C, 100g, 5s, (0,1mm)</i>	<i>INV E-706</i>	55	70	57
<i>Punto de ablandamiento, (°C)</i>	<i>INV E-712</i>	65	-----	87
<i>Estabilidad al almacenamiento</i>	<i>INV E-726</i>	-----	5	5
<i>Diferencia en el punto de ablandamiento, (°C)</i>	<i>INV E-712</i>	-----	5	5
<i>Ductilidad a 5°C, 5cm/min, (cm)</i>	<i>INV E-702</i>	15	-----	33
<i>Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland, (°C)</i>	<i>INV E-709</i>	230	-----	288
<i>Recuperación elástica por torsión a 25°C, (%)</i>	<i>INV E-727</i>	70	-----	71.1
<i>Contenido de agua, (%)</i>	<i>INV E-704</i>	-----	0.2	0
<i>Peso Específico</i>	<i>INV E-707</i>	-----	-----	1.016
<i>Pérdida de masa por calentamiento en película Delgada rotatoria (RTFOT) 163°C, 85 min (%)</i>	<i>INV E-720</i>	-----	1	0.23
<i>Penetración del residuo después del ensayo RTFOT a 25°C, % de la penetración original.</i>	<i>INV E-706</i>	65	-----	70.1
<i>Ductilidad al residuo a 5°C, 5cm/min, (cm)</i>	<i>INV E-702</i>	8	-----	16
<i>Incremento en el punto de ablandamiento (°C)</i>	<i>INV E-712</i>	-----	10	5
<i>Grado de Desempeño PG</i>	<i>AASHTO M-320</i>	<i>Reportar</i>		<i>PG 76-28</i>
<i>Clasificación MSCR</i>	<i>ASTM D7405</i>	<i>Reportar</i>		<i>Very Heavy PG 76-28V</i>

En el ANEXO A se presentan los certificados de calidad del cemento asfáltico utilizado para el diseño de la mezcla SMA, suministrados por la empresa MANUFACTURAS Y PROCESO INDUSTRIALES LTDA.

6.2 DISEÑO DE LA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO SMA

6.2.1 Determinación de la fórmula de trabajo.

El valor óptimo de asfalto preliminar corresponde a aquel que dé lugar a un volumen de vacíos con aire, (**Va**), dentro del rango de **3% al 5%**.

En los Anexos B y C. se presentan los resultados Marshall obtenidos de la evaluación realizada a la serie de briquetas elaboradas, para obtener las características volumétricas y mecánicas de la mezcla.

A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se relacionan los parámetros Marshall para el rango de asfalto en el que se cumplen los lineamientos del protocolo **AAMAC PA-CR 04/2015**:

Tabla 10. Rango preliminar de asfalto y propiedades del Diseño Marshall. – fuente propia

<i>ASFALTO</i> (%)	<i>ESTABILIDAD</i> (N)	<i>FLUJO</i> (mm)	<i>GRAVEDAD ESPECIFICA BULK</i>	<i>VACIOS CON AIRE</i> (%)	<i>VAM</i> ¹⁵ (%)	<i>VFA</i> ¹⁶ (%)
6.7	13316	7.3	2.315	5.0	20.1	75
7.3	12977	8.2	2.329	3.6	20.2	82
Limites	<i>Reportar</i>	<i>Reportar</i>	<i>Reportar</i>	3 - 5	≥17	75 – 82

Del diseño Marshall se determinó un porcentaje óptimo de cemento asfáltico para la mezcla de **7,1%** con el que se satisfacen los requerimientos volumétricos para este tipo de mezcla de acuerdo con las especificaciones establecidas en el protocolo **AAMAC PA-CR 04/2015**.

¹⁵ VAM: Vacíos en agregados minerales

¹⁶ VFA: Vacíos llenos con Asfalto

A continuación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se resumen las propiedades de la mezcla para este óptimo de asfalto.

Tabla 11. Contenido óptimo de asfalto y características de Control del Diseño Marshall. – fuente propia

<i>Propiedad evaluada</i>	<i>Valor</i>	<i>Especificación Protocolo AAMAC PA-CR 04/2015</i>
<i>ASFALTO ÓPTIMO (%)</i>	7.1	$\geq 6,0$
<i>ESTABILIDAD (N)</i>	13158	<i>Reportar</i>
<i>FLUJO (mm)</i>	7.8	<i>Reportar</i>
<i>RELACIÓN ESTABILIDAD/FLUJO (kN/mm)</i>	1.7	<i>Reportar</i>
<i>GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK</i>	2.324	<i>Reportar</i>
<i>GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA DE MEZCLA –GMM</i>	2.463	<i>Reportar</i>
<i>VACÍOS AGREGADO MINERAL (%)</i>	20.2	≥ 17
<i>VACÍOS CON AIRE (%)</i>	4.0	3,0 – 5,0
<i>VACÍOS LLENOS DE ASFALTO (%)</i>	80	75 – 82
<i>RELACIÓN FILLER/LIGANTE</i>	1.3	<i>Reportar</i>
<i>FIBRA DE CELULOSA* (%)</i>	0.3	≥ 0.3
<i>ESCURRIMIENTO DE ASFALTO (%)</i>	0.23	≤ 0.3

6.3 ENSAYO DE SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (TSR)

Para evaluar la adherencia se utilizó la prueba de susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico por Tracción Indirecta - T.S.R., siguiendo los lineamientos establecidos en la norma de ensayo AASHTO T 283. La prueba se efectuó sobre probetas con el contenido óptimo de **7,1%** de cemento asfáltico y llevando a cabo los siguientes pasos:

6.3.1 Determinación del número de golpes o ciclos:

Este paso sirve para determinar el número de ciclos necesarios para alcanzar un porcentaje de vacíos totales en las mezclas compactadas en el rango de 6% a 8%. El número de ciclos de amasado en el compactador giratorio con los cuales se lograron los vacíos en la mezcla asfáltica fue de **85 ciclos**.

6.3.2 Cálculo de la saturación de las probetas al vacío entre 55% y 80%

Este paso determina el porcentaje de saturación de las tres (3) probetas por mezcla compactadas entre 6% y 8% de vacíos totales, las cuales fueron escogidas para saturación con agua al vacío en un recipiente hermético por un tiempo definido. Antes de efectuar la saturación de las probetas compactadas, se debe determinar el peso específico Bulk de las mismas para calcular el contenido de vacíos totales.

La saturación alcanzada finalmente, debe ocupar entre el 55% y el 80% de los vacíos totales en la mezcla compactada.

6.3.3 Determinación de los esfuerzos de tensión (T.S.R)

Luego de que la mitad de las probetas se sometieron a un ciclo de acondicionamiento en baño de agua a 60°C se procede a determinar los esfuerzos a tensión indirecta de las probetas de mezcla acondicionadas y no acondicionadas. La Tabla 12 muestra los resultados encontrados y el cálculo del valor de T.S.R para la mezcla asfáltica

Tabla 12. Determinación de los esfuerzos de tensión (T.S.R) – fuente propia

<i>Condición</i>	<i>St (lbf/in²) promedio</i>	<i>TSR</i>	<i>Especificación Protocolo AAMAC PA-CR 04/2015</i>
		<i>St(húmeda)/St(seca)*100</i>	
<i>Húmeda</i>	<i>126.4</i>	<i>83.9</i>	<i>80 min.</i>
<i>Seca</i>	<i>150.7</i>		

6.4 RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE MEZCLAS BITUMINOSAS MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO (NLT-173/00)

El ensayo consiste en someter una probeta, independientemente del tipo de mezcla y el tipo de asfalto utilizado, al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. Este procedimiento es aplicable principalmente a las mezclas asfálticas producidas en caliente y destinadas a trabajar en condiciones severas de tránsito y clima.

La prueba de deformación plástica se realiza con un equipo británico que consta de una cabina con control de temperatura para mantener una temperatura constante de 60 ± 1 °C.

Otras características del equipo son:

Carga Ejercida sobre la Probeta:	900 KN/m ²
Frecuencia:	21 ciclos/minuto
Número de Pistas:	Dos (2)
Ancho de Llanta:	5 cm
Tamaño del Molde:	30 cm x 30 cm x 5 cm
Distancia del Empotramiento a la Llanta	30,5 cm
Distancia del Empotramiento a la Pesa	84,3 cm

La compactación de las probetas se realiza con un compactador de rodillo estándar (Roller Compactor) que simula la compactación de la mezcla en campo. El equipo funciona de forma neumática y permite variar la presión de compactación y el número de ciclos de compactación mediante un controlador digital (Programmer Logic Controller, PLC) para lograr las densidades y los vacíos totales en la mezcla deseados. También cuenta con un sistema de vibración que mejora el acomodamiento de las partículas y la compactación. Su principal función es elaborar las probetas para fallarlas en el equipo de deformación plástica (Wheel Tracker).

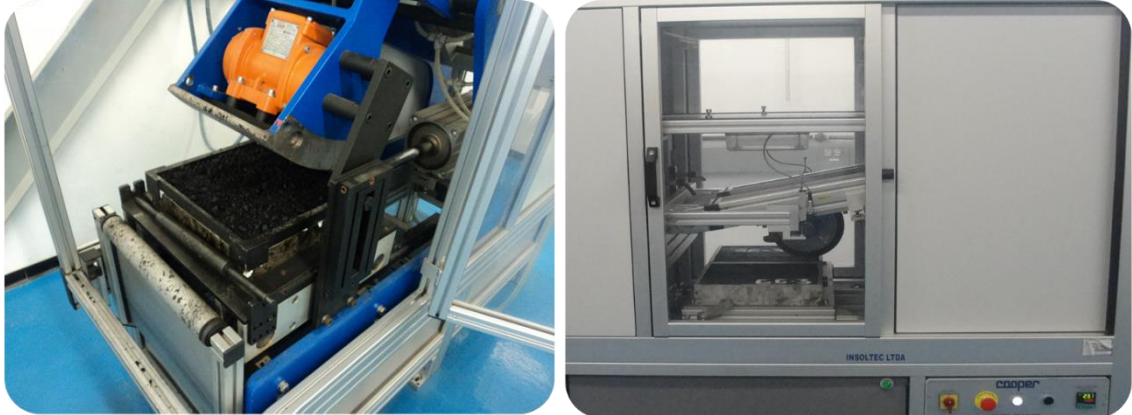


Figura 3. Roller Compactor y Wheel Tracker Tester – fuente propia

6.4.1 Velocidad de deformación media

Sirve para determinar la velocidad de deformación de la probeta durante y al final del ensayo de deformación plástica en el intervalo de 105-120 minutos. La velocidad de deformación, según el artículo particular INV-467-13, no deberá ser mayor de **12 $\mu\text{m}/\text{minuto}$** para zonas donde la temperatura media anual sea superior de 24 °C, ni superior a **15 $\mu\text{m}/\text{minuto}$** para zonas donde la temperatura media anual sea inferiores a 24 °C.

$$V_{t_2/t_1} = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{t_2 - t_1} \text{ (}\mu\text{m/minuto)}$$

Dónde:

V_{t_2/t_1} = Velocidad de deformación media correspondiente al intervalo $t_2 - t_1$, $\mu\text{m}/\text{minuto}$

d_{t_1} y d_{t_2} = Deformaciones correspondientes a t_1 y t_2 , respectivamente, μm

t_2 y t_1 = Tiempos en que las especificaciones recomiendan registrar la velocidad de Deformación.



La descripción de la realización del ensayo de resistencia a la deformación plástica de la mezcla y los resultados obtenidos, se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 13. Condiciones para la realización del ensayo de resistencia a la deformación plástica a 60°C. – fuente propia

<i>Tipo de Mezcla</i>	<i>Método de Compactación</i>	<i>Duración del Ensayo</i>	<i>Asfalto (%)</i>	<i>Vacío (%)</i>	<i>Densidad Bulk</i>	<i>Gmm Rice</i>	<i>Temperatura realización del ensayo</i>
<i>M-SMA Tipo B</i>	<i>Amasado utilizando placas deslizantes (Roller Compactor)</i>	<i>Hasta completar 2520 ciclos (ida y vuelta) o 20 mm de deformación</i>	<i>7.1</i>	<i>3.5</i>	<i>2.338</i>	<i>2.424</i>	<i>60 °C</i>
				<i>3.4</i>	<i>2.342</i>	<i>2.424</i>	
				<i>3.8</i>	<i>2.333</i>	<i>2.424</i>	

Tabla 14. Resultado del ensayo de deformación plástica de la mezcla asfáltica tipo SMA. – fuente propia

<i>Tipo de Mezcla</i>	<i>Asfalto</i>	<i>Velocidad de Deformación media</i> <i>V₃₀₋₄₅</i>	<i>Velocidad de Deformación media</i> <i>V₇₅₋₉₀</i>	<i>Velocidad de Deformación media</i> <i>V₁₀₅₋₁₂₀</i>	<i>Deformación total al final del ensayo</i>
	<i>%</i>	<i>µm/minuto</i>	<i>µm/minuto</i>	<i>µm/minuto</i>	<i>(mm)</i>
<i>M-SMA Tipo B</i>	<i>7.1</i>	<i>5,80</i>	<i>3.67</i>	<i>2.27</i>	<i>1.67</i>
		<i>6.00</i>	<i>2.50</i>	<i>1.93</i>	<i>1.38</i>
		<i>5.73</i>	<i>3.67</i>	<i>2.00</i>	<i>1.43</i>

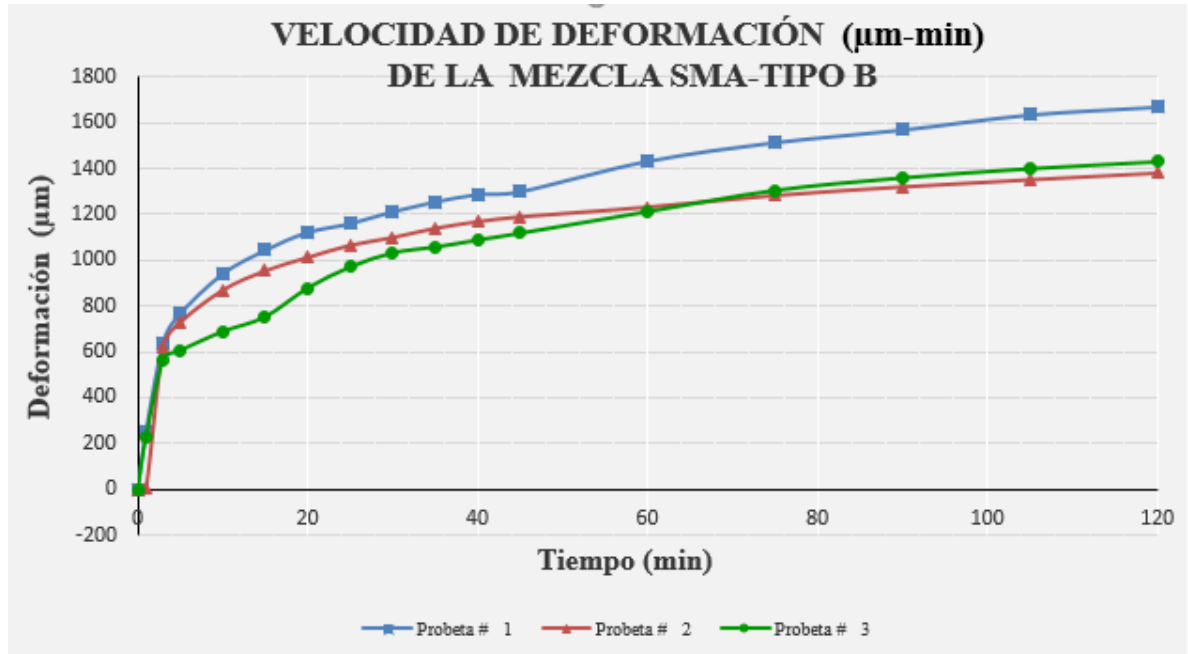


Figura 4. Variación de la velocidad de deformación media V105-120. – fuente propia

6.5 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR TRACCIÓN POR TRACCIÓN INDIRECTA EN PROBETAS CILINDRICAS EN-12697-26

Para los especímenes seleccionados, los módulos dinámicos se realizaron a una frecuencia (**10Hz**) y a tres temperaturas (**5,0°C, 20°C y 40°C**) en el equipo NAT HYD25-II de Laboratorios MPI LTDA, realizando mediciones en dos caras de cada probeta, para obtener un resultado promedio. En la Tabla 15 se presenta en resumen los módulos dinámicos de la mezcla producida a escala laboratorio.

Tabla 15. Módulos dinámicos de la mezcla asfáltica tipo SMA. – fuente propia

<i>Resultados Módulos de rigidez (Sm) mezcla SMA</i>			
<i>Frecuencia: 10Hz</i>			
<i>Temperatura</i>	<i>5°C</i>	<i>20°C</i>	<i>40°C</i>
<i>Espécimen 1. (MPa)</i>	<i>7311</i>	<i>2150</i>	<i>315</i>
<i>Espécimen 2. (MPa)</i>	<i>6154</i>	<i>2172</i>	<i>333</i>
<i>Espécimen 3. (MPa)</i>	<i>6850</i>	<i>2151</i>	<i>327</i>
<i>Promedio Sm (MPa)</i>	<i>6772</i>	<i>2158</i>	<i>325</i>

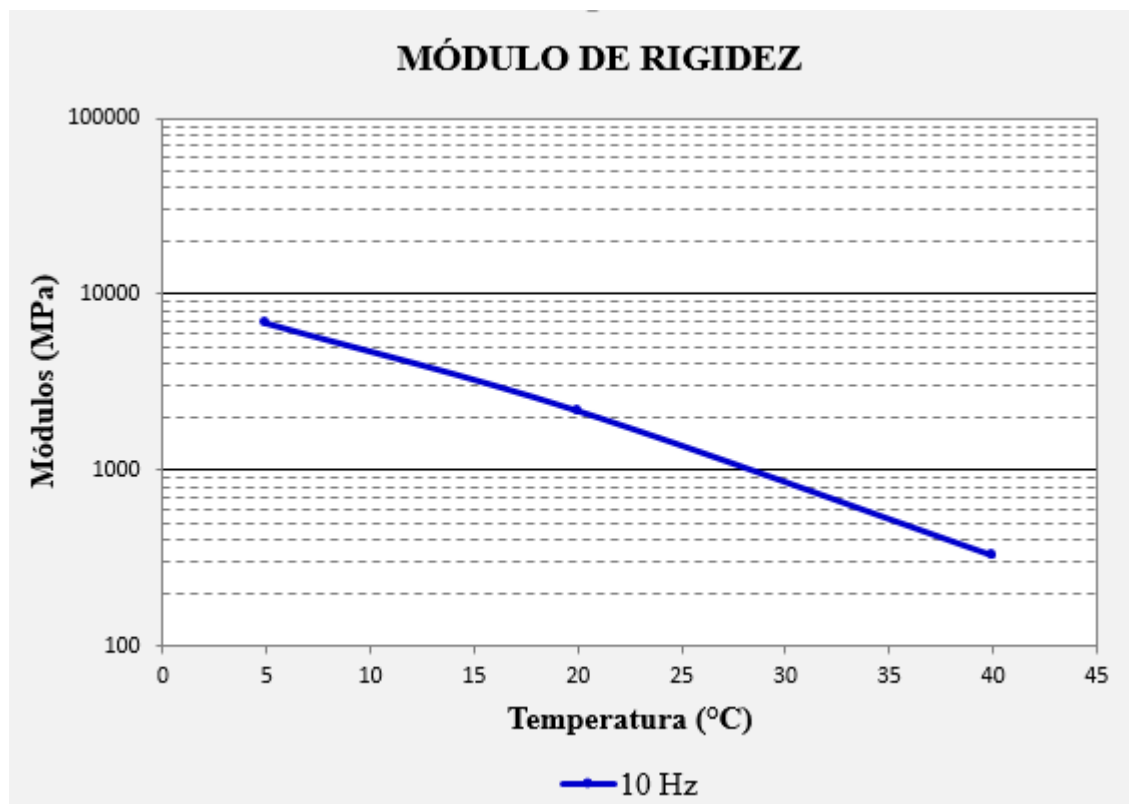


Figura 5. Variación del Módulo dinámico con la temperatura. – fuente propia

6.6 RESISTENCIA A LA FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS ENSAYO DE FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS SOBRE PROBETAS PRISMÁTICAS EN 12697-24 ANEXO D

Mediante el ensayo se caracterizó el comportamiento de la mezcla asfáltica sometida a carga de fatiga en el equipo de flexión en cuatro puntos del NAT HYD25-II del Laboratorio de MPI LTDA, donde se apoya la muestra recibiendo la carga en los dos puntos centrales y en los otros dos hay una restricción vertical del movimiento que hace que la muestra presente flexión.

Se utilizaron probetas prismáticas fabricadas en laboratorio y se ensayaron a tres niveles de deformación (deformación controlada), de tal manera que se pudiera ver la influencia de la repetición de carga en la resistencia del material.

Con los resultados se obtuvo la ecuación de la ley de fatiga y se estimó el valor de la deformación inicial ϵ^6 correspondiente a una vida hasta la fatiga de 10^6 ciclos para el criterio de falla y las condiciones de ensayo elegidas. La evaluación se realizó en condiciones de temperatura de 20°C y frecuencia de 30Hz .



Figura 6. Equipo de flexión en cuatro puntos del NAT HYD25-II – fuente propia

Tabla 16. Resultados del análisis de ley de fatiga. – fuente propia

<i>Probeta</i>	<i>Masa</i>	<i>Longitud</i>	<i>Espesor</i>	<i>Altura</i>	<i>Deformación</i>	<i>Módulo inicial promedio</i>	<i>Ciclo de falla promedio</i>
(#)	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(μs)	(MPa)	(#)
1	2857,1	382,0	61,3	51,5	300	2942	1717358
2	2989,5	382,0	61,0	52,2			
3	2809,0	381,0	61,4	50,9			
4	2988,7	382,0	60,8	52,5	350	2920	287302
5	2808,2	382,0	61,5	49,9			
6	2971,2	381,0	61,1	51,1			
7	2892,1	382,0	60,9	49,8	400	2895	45116
8	2788,3	382,0	61,2	50,7			

Con los datos obtenidos en la Tabla 16, se generó la gráfica correspondiente a la ley de fatiga de la mezcla ensayada, como se presenta a continuación en la Figura 7:

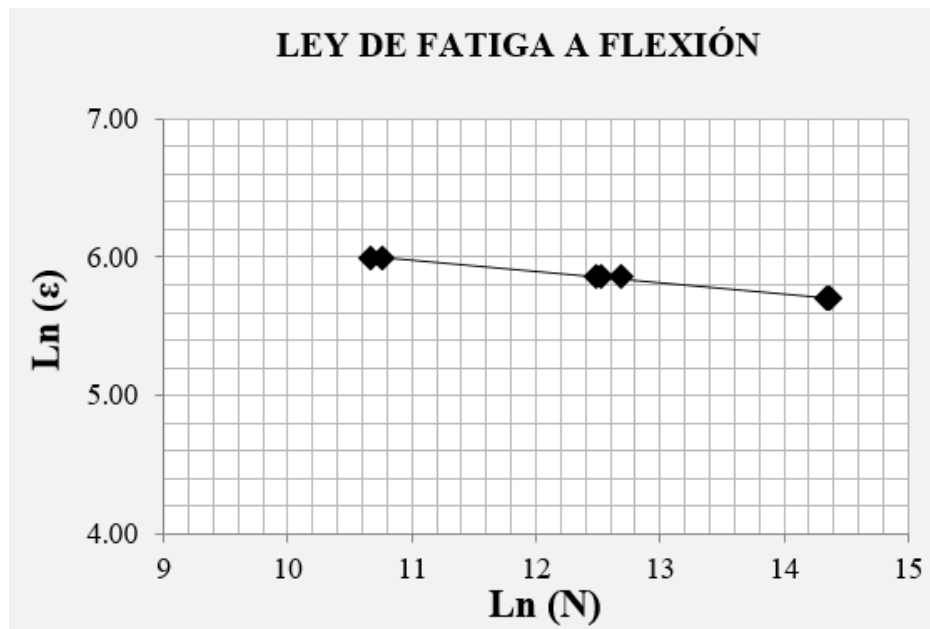


Figura 7. Fatiga a deformación controlada. – fuente propia

Tabla 17. Constantes de regresión lineal de datos de Ley de Fatiga. – fuente propia

<i>A₁, Pendiente (p)</i>	<i>A₀, Estimación (q)</i>	<i>Coefficiente de Correlación (R²)</i>
-0,0790	6,8420	0,9975

En la tabla anterior, se presentan los resultados de la regresión lineal de los datos de la ley de fatiga para el material, que corresponden a la ecuación de la ley de fatiga representada de la siguiente forma:

$$\ln(\varepsilon_i) = A_0 + A_1 \ln(N_{i,j,k})$$

Dónde:

$N_{i,j,k}$ = Ciclos de falla (vida útil para el criterio de falla j y las condiciones de ensayo k).

ε_i = Deformación Unitaria - Strain (μs)

i = Número de la Probeta

j = Criterio de falla

k = Condiciones de ensayo

Para la mezcla evaluada, se tiene entonces la ecuación de la Ley de Fatiga:

$$\ln(E) = -0,0790 * \ln(N) + 6,8420$$

Donde la deformación inicial ε_0 estimada es de **314 μs** , correspondiente a una vida hasta la fatiga de 10^6 ciclos para el criterio de falla y las condiciones de ensayo elegidas.

6.7 TRAMO DE PRUEBA

El tramo de prueba está localizado en la Avenida Carabobo entre calles 44 y 41 a un costado del centro administrativo la Alpujarra. En la Figura 8 se presenta la ubicación geográfica del tramo de prueba realizado.

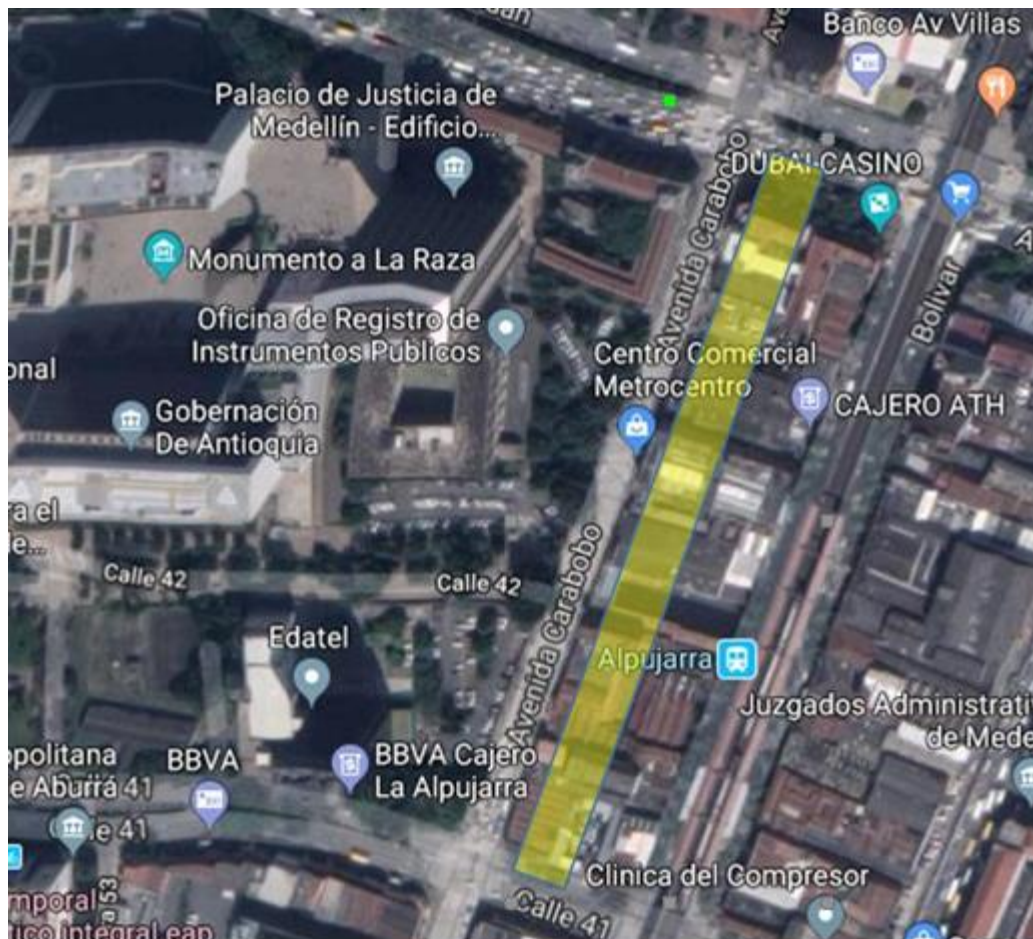


Figura 8. Ubicación geográfica del tramo de prueba realizado. – fuente propia

El proceso constructivo del tramo de prueba fue el siguiente:

- Previa a la instalación de la mezcla asfáltica en caliente tipo SMA, inspección del pavimento existente, constituido por losas de concreto, las cuales se encontraban en un estado regular a bueno, razón por la cual se propuso como refuerzo la extensión de una mezcla asfáltica de bajo espesor.
- Reparación puntual con mezcla asfáltica convencional donde había rotura de las losas.
- Aplicación de emulsión asfáltica CRR-2m como riego de liga sobre el pavimento existente, con la finalidad de lograr una buena adherencia entre capas
- Producción, extensión y compactación de la mezcla asfáltica en caliente tipo SMA. En la Tabla 18 se presentan generalidades de esta etapa del proceso constructivo.

Tabla 18. Generalidades de la producción industrial de la mezcla SMA. – fuente propia

<i>Generalidades</i>	
<i>Cantidad de mezcla producida</i>	<i>480 Toneladas</i>
<i>Temperatura de Asfalto</i>	<i>158°C</i>
<i>Temperatura de la mezcla</i>	<i>165°C</i>
<i>Temperatura de extensión</i>	<i>160°C – 166°C</i>
<i>Temperatura de compactación</i>	<i>150°C – 155°C</i>
<i>Tipo de compactación</i>	<i>Estática</i>
<i>Número de ciclos de compactación</i>	<i>3</i>
<i>Espesor final</i>	<i>5cm</i>
<i>Geometría del tramo</i>	<i>296m x 14m x 0.05m</i>

A continuación, se presenta un registro fotográfico del proceso constructivo de la producción industrial de la mezcla asfáltica en caliente tipo SMA.



Figura 9. Registro fotográfico del proceso constructivo del tramo de prueba.



Finalmente, el tramo de prueba, puesto en servicio el 24 de febrero del presente año, donde el diseño de mezcla asfáltica en caliente tipo SMA fue similar al realizado en el presente documento, busca validar el desempeño mecánico de este tipo de mezcla hacia futuro con ensayos de laboratorio tales como: resistencia a la deformación plástica y resistencia a la fatiga.

Los resultados de los ensayos mencionados anteriormente de la producción industrial se muestran a continuación en las tablas 19, 20.

Tabla 19. Resultado del ensayo de deformación plástica de la mezcla asfáltica producida a escala industrial – fuente propia

<i>Tipo de Mezcla</i>	<i>Probeta #</i>	<i>Velocidad de Deformación media</i> <i>V₃₀₋₄₅</i>	<i>Velocidad de Deformación media</i> <i>V₇₅₋₉₀</i>	<i>Velocidad de Deformación n media</i> <i>V₁₀₅₋₁₂₀</i>	<i>Deformación total al final del ensayo (mm)</i>
<i>%</i>		<i>µm/minuto</i>	<i>µm/minuto</i>	<i>µm/minuto</i>	<i>(mm)</i>
<i>Mezcla SMA</i>	<i>1</i>	<i>7,73</i>	<i>4,20</i>	<i>2,60</i>	<i>1,51</i>
	<i>2</i>	<i>7,80</i>	<i>3,87</i>	<i>2,60</i>	<i>1,61</i>
	<i>3</i>	<i>9,07</i>	<i>4,20</i>	<i>2,67</i>	<i>2,53</i>
	<i>Promedio</i>	<i>8,20</i>	<i>4,09</i>	<i>2,62</i>	<i>1,88</i>

Tabla 20. Resultado del análisis de la ley de fatiga de la mezcla asfáltica producida a escala industrial. – fuente propia

<i>Probeta</i>	<i>Masa</i>	<i>Longitud</i>	<i>Espesor</i>	<i>Altura</i>	<i>Deformación</i>	<i>Módulo inicial promedio</i>	<i>Ciclos de falla promedio</i>
(#)	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(μs)	(MPa)	(#)
1	3247,0	381,0	61,3	52,1	300	2980	1594.491
7	3117,3	382,0	60,9	50,9			
8	3151,2	382,0	61,2	51,3			
4	3087,9	382,0	60,4	50,9	350	3163	266.304
5	3203,8	381,0	61,1	51,3			
6	2929,7	381,0	61,2	51,0			
3	3020,2	382,0	61,5	50,5	400	2991	39.592
9	3141,0	381,0	60,8	51,4			
2	3117,0	381,0	61,6	51,1	500	2791	30.802
10	3100,2	381,0	61,1	51,2			

Con los datos obtenidos en la tabla 20 se generó la gráfica correspondiente a la ley de fatiga de la mezcla ensayada, como se presenta a continuación en la figura 10:

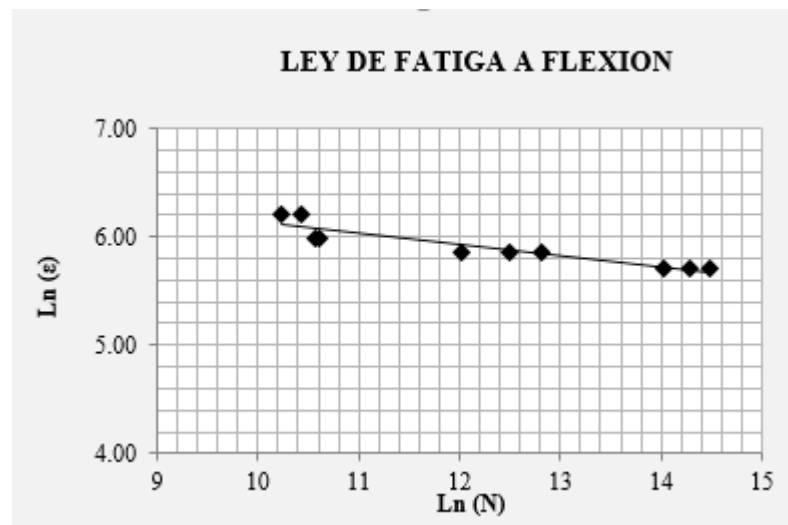


Figura 10. Fatiga a deformación controlada mezcla tramo de prueba – fuente propia

Tabla 21. Constantes de regresión lineal de datos de Ley de Fatiga mezcla tramo de prueba. – fuente propia

<i>A₁, Pendiente</i> (<i>p</i>)	<i>A₀, Estimación</i> (<i>q</i>)	<i>Coefficiente de Correlación</i> (<i>R²</i>)
-0,1061	7,2031	0,8614

Para la mezcla evaluada, se tiene entonces la ecuación de la Ley de Fatiga:

$$\ln (E) = -0,1061 * \ln (N) + 7,2031$$

Donde la deformación inicial ϵ^6 estimada es de **310 μ s**, correspondiente a una vida hasta la fatiga de 10^6 ciclos para el criterio de falla y las condiciones de ensayo elegidas.

6.8 MEZCLAS CONVENCIONALES PARA CARPETAS DE RODADURA.

Para realizar una comparación del desempeño mecánico entre la mezcla asfáltica en caliente tipo SMA y una mezcla convencional utilizada en Colombia como carpeta de rodadura de alto tránsito, seleccionamos dos mezclas densas en caliente 19 (MDC-19) una con asfalto modificado con polímero tipos SBS y la otra con asfalto convencional de penetración 60-70 mm/10.

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a la deformación plástica, módulos dinámicos y resistencia a la fatiga que dan un indicio del desempeño mecánico que presenta cada una de ellas a futuro.



Tabla 22. Resultado del ensayo de Deformación Plástica de las mezclas MDC-19 seleccionadas – fuente propia

N° Muestra	Deformación total al final del ensayo (mm) Mezcla MDC-19 con Asfalto Modificado con polímero SBS	Deformación total al final del ensayo (mm) Mezcla MDC-19 con Asfalto convencional de Penetración:60/70 mm/10
	(mm)	(mm)
#1	2.29	5,07
#2	2,38	3,79
Promedio	2.33	4,43

Tabla 23. Resumen módulos dinámicos de la mezcla MDC-19 con asfalto modificado con polímero SBS – fuente propia

Módulo de rigidez (Sm) de mezcla MDC-19 con Asfalto Modificado con polímero SBS			
Temperatura	5°C	25°C	40°C
Frecuencia 10 HZ			
Promedio Sm (MPa)	13181	3035	804
Frecuencia 5,0 HZ			
Promedio Sm (MPa)	11835	2350	613
Frecuencia 2,5 HZ			
Promedio Sm (MPa)	10412	1823	497



Tabla 24. Resumen módulos dinámicos de la mezcla MDC-19 con Asfalto convencional de Penetración:60/70 mm/10 – fuente propia

<i>Módulo de rigidez (Sm) de mezcla MDC-19 con Asfalto convencional de P:60/70 mm/10</i>			
<i>Temperatura</i>	<i>10°C</i>	<i>25°C</i>	<i>40°C</i>
<i>Frecuencia 10 HZ</i>			
<i>Promedio Sm (MPa)</i>	8808	2860	665
<i>Frecuencia 5,0 HZ</i>			
<i>Promedio Sm (MPa)</i>	7758	2304	492
<i>Frecuencia 2,5 HZ</i>			
<i>Promedio Sm (MPa)</i>	6758	1778	372

Tabla 25. Resultados del análisis de ley de fatiga. de la mezcla MDC-19 con asfalto modificado con polímero SBS– fuente propia

<i>PROBETA (#)</i>	<i>MASA (g)</i>	<i>LONGITUD (mm)</i>	<i>ESPELOR (mm)</i>	<i>ALTURA (mm)</i>	<i>DEFORMACION (µs)</i>	<i>MÓDULO INICIAL (MPa)</i>	<i>CICLOS DE FALLA (#)</i>
1	2717.7	382.0	60.6	51.2	120	5239	1631403
2	2756.2	381.0	59.5	50.9	150	4639	1550873
3	2818.9	383.0	62.7	51.6	150	4873	1476456
4	2940.9	380.0	61.6	53.1	250	3003	495102
5	2917.6	381.0	61.5	51.8	250	5090	436216
6	2841.9	381.0	61.5	52.1	250	4743	459876
7	2735.4	382.0	60.5	52.9	300	4822	157867
8	2932.6	381.0	61.4	52.1	300	4303	154783
9	2821.9	383.0	60.6	51.4	300	5090	196325

Donde la deformación inicial ϵ^6 estimada es de **171 µs**, correspondiente a una vida hasta la fatiga de 10^6 ciclos para el criterio de falla y las condiciones de ensayo elegidas.

Tabla 26. Resultados del análisis de ley de fatiga. de la mezcla MDC-19 con asfalto convencional de penetración:60/70 mm/10 – fuente propia

<i>Probeta</i>	<i>Masa</i>	<i>Longitud</i>	<i>Espesor</i>	<i>Altura</i>	<i>Deformación</i>	<i>Módulo inicial promedio</i>	<i>Ciclos de falla promedio</i>
<i>(#)</i>	<i>(g)</i>	<i>(mm)</i>	<i>(mm)</i>	<i>(mm)</i>	<i>(μs)</i>	<i>(MPa)</i>	<i>(#)</i>
1	2631,7	380,0	61,4	51,8	150	3931	936937
2	2580,7	380,0	59,6	50,4			
3	2578,9	382,0	61,1	49,4			
6	2544,4	380,0	61,0	49,5	200	3409	136143
8	2897,6	381,0	66,0	52,7			
9	2777,9	380,0	62,3	51,3			
10	2707,2	381,0	62,6	52,2			
4	2600,3	381,0	60,5	50,2	300	3516	31796
5	2628,1	381,0	60,6	50,7			
7	2652,6	380,0	61,2	50,8			

Donde la deformación inicial ϵ^6 estimada es de **143 μ s**, correspondiente a una vida hasta la fatiga de 10^6 ciclos para el criterio de falla y las condiciones de ensayo elegidas.

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se realiza un análisis del desempeño mecánico de la mezcla asfáltica tipo SMA en comparación con las mezclas de uso convencional en Colombia seleccionadas, para uso en carpeta de rodadura.

7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULOS DINÁMICOS

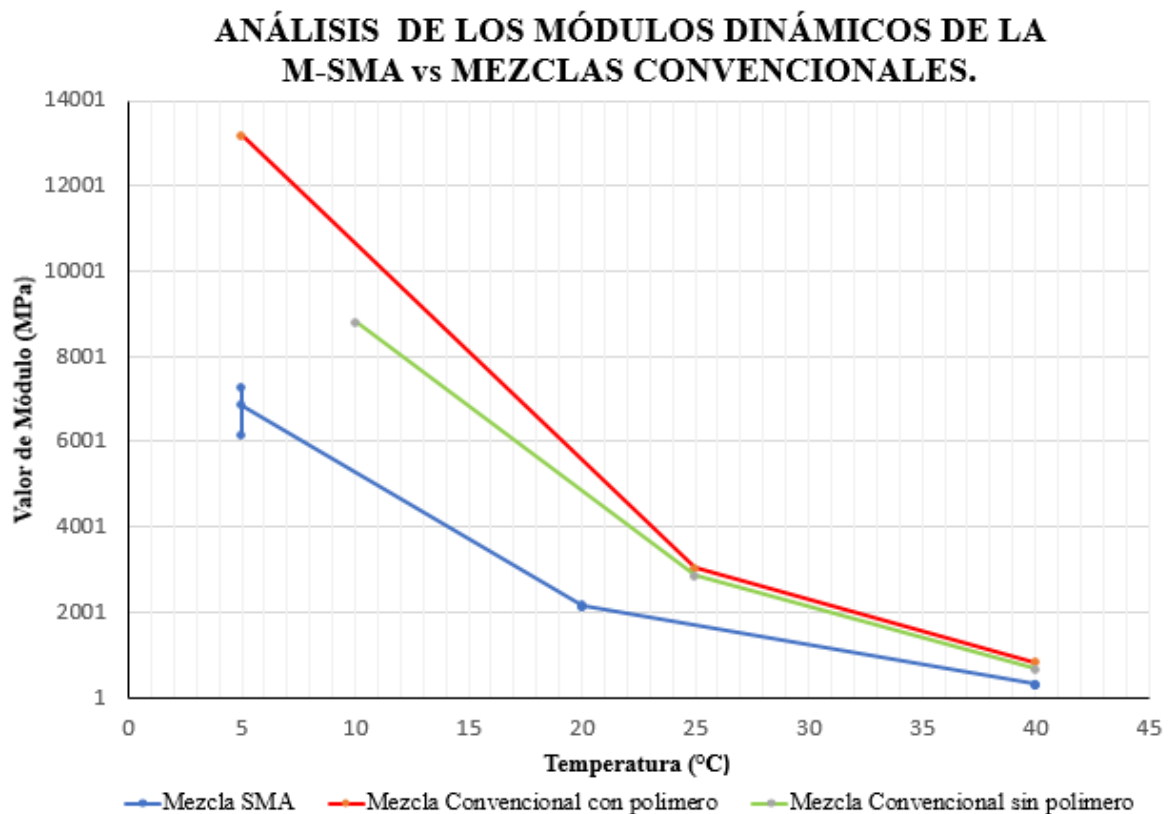


Figura 11. Análisis de la variación de los módulos dinámicos de la mezcla SMA vs mezclas convencionales – fuente propia

- De la figura 11 podemos analizar que los módulos que presenta la mezcla asfáltica en caliente tipo SMA son más bajos en comparación con los módulos de las mezclas convencionales, lo cual señala que esta mezcla es más flexible.
- Se espera que, en el ensayo de resistencia a la fatiga, la mezcla tipo SMA soporte más ciclos que las mezclas convencionales para un mismo nivel de deformación.

7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FATIGA

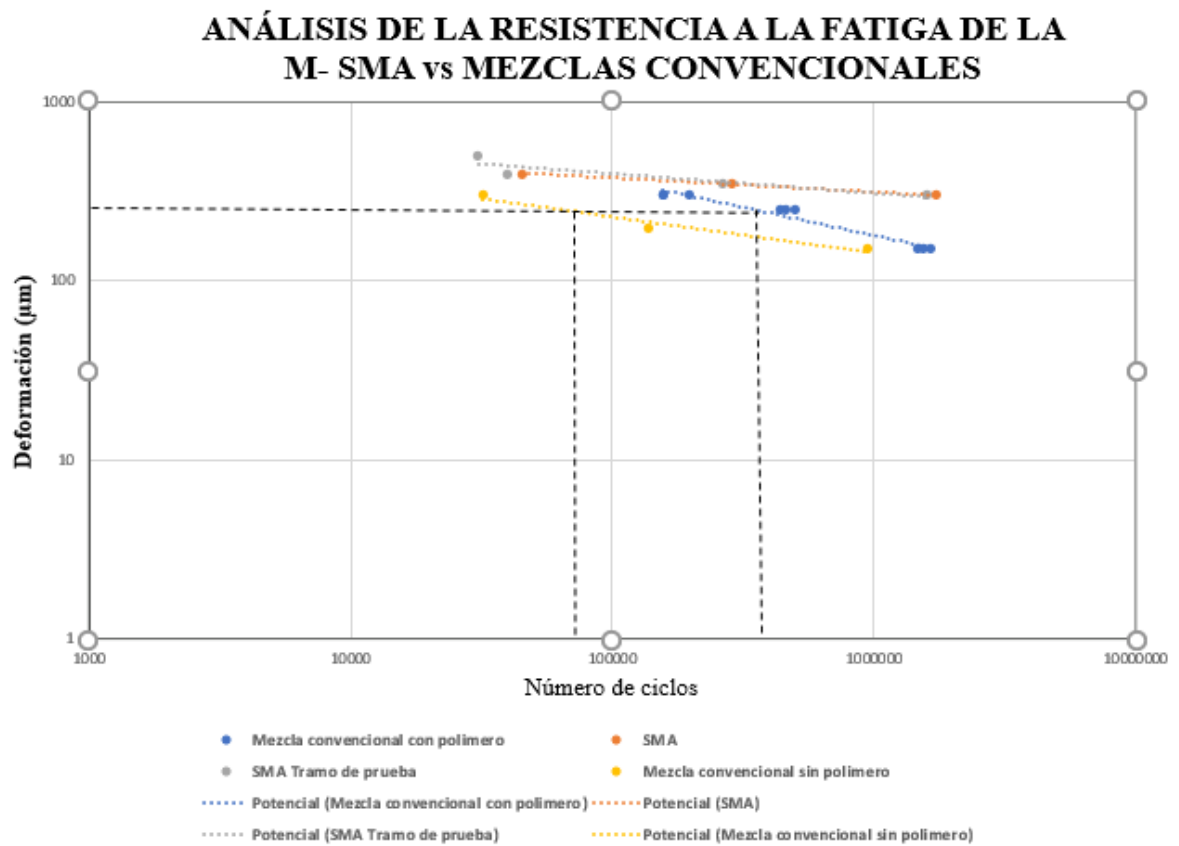


Figura 12. Análisis de la resistencia a la fatiga de la mezcla SMA vs mezclas convencionales – fuente propia

- De la figura 12 podemos analizar que la mezcla asfáltica en caliente tipo SMA presenta un mejor comportamiento a la fatiga en comparación con los módulos de las mezclas convencionales.

- Se esperaría que la mezcla asfáltica tipo SMA al ser más flexible y tener mejor comportamiento a la fatiga, presente una mayor deformación (Ahuellamiento).
- A pesar de que la mezcla asfáltica convencional MDC-19 con asfalto modificado con polímero tipo SBS presenta un mayor módulo dinámico en relación con la mezcla MDC-19 con asfalto convencional con penetración 60/70 mm/10, esta presenta mejor comportamiento a la resistencia a la fatiga, comportamiento generado por la presencia de polímero en el asfalto.

7.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA.

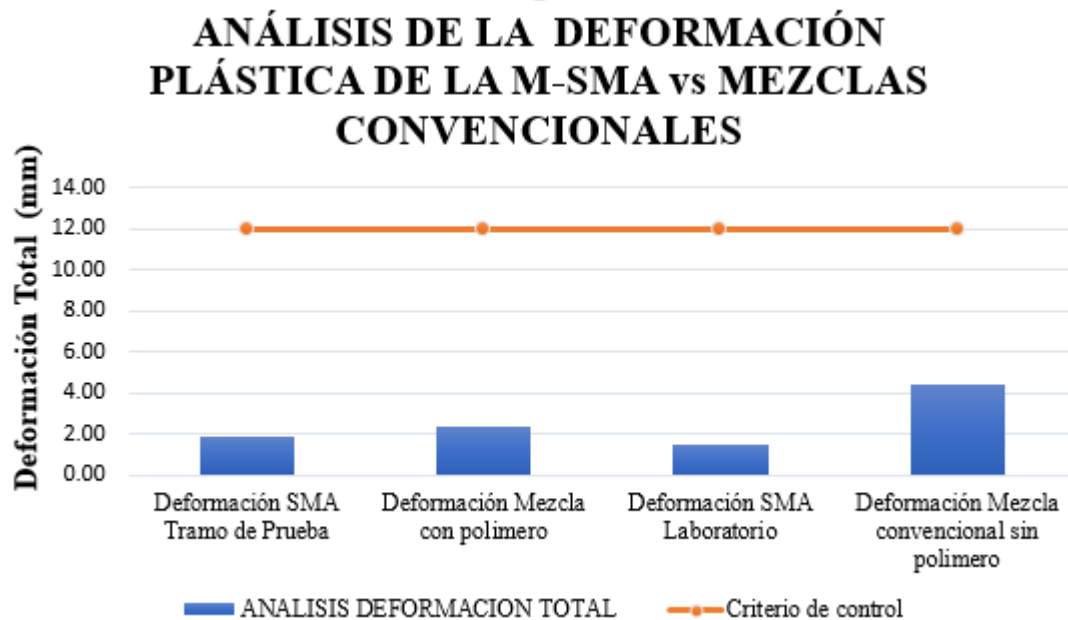


Figura 13. Análisis de la resistencia a la deformación plástica de la mezcla SMA vs mezclas convencionales – fuente propia

- Se observa que aun cuando las mezclas asfálticas en caliente tipo SMA presentan menor módulo dinámico y mejor comportamiento a la resistencia a la fatiga en comparación con las mezclas convencionales, la mezcla SMA presenta mejor comportamiento a la deformación plástica.

- En la figura 13 se observa que, en la deformación plástica el esqueleto granulométrico incide en el resultado final, sin embargo, es el tipo de asfalto la variable que impacta en mayor magnitud.

8 CONCLUSIONES

- La combinación de los agregados propuesta, se ajusta al huso granulométrico para una mezcla SMA- Tipo B del protocolo AAMAC PA-CR 04/2015, para su uso con Asfalto modificado con polímero tipo SBS.
- Las propiedades de dureza, limpieza y forma de los agregados pétreos satisfacen los requerimientos mínimos de calidad para este tipo de mezclas.
- Del análisis del diseño Marshall se determinó un porcentaje óptimo de ligante para la mezcla de **7,1%** con el que se satisfacen tanto los requerimientos volumétricos como los mecánicos para este tipo de mezcla.
- Para la evaluación de la resistencia a la deformación plástica, de acuerdo a los lineamientos de la Especificación, en el intervalo de deformación de 105 a 120 minutos, se concluye que la mezcla **cumple** con lo requerido para tener un buen comportamiento en climas con temperaturas medias anuales inferiores y superiores a **24°C**, en el rango óptimo de asfalto.
- La mezcla asfáltica compactada en la prueba de tracción indirecta (T.S.R.) indica que la mezcla asfáltica, **presenta baja susceptibilidad a los daños** producidos por el agua, ya que presenta un valor de T.S.R del **83,9%**, el cual cumple con las especificaciones establecidas en el protocolo **AAMAC PA-CR 04/2015** (min. 80%), en el valor óptimo de asfalto encontrado.
- La mezcla asfáltica en caliente tipo SMA soporta más ciclos a un mismo nivel de deformación que las mezclas convencionales de uso convencional en Colombia en carpetas de rodadura.
- Se obtienen resultados de resistencia a la fatiga y resistencia a la deformación plástica similares en la mezcla SMA producida a escala industrial y de laboratorio.
- Con base en los resultados satisfactorios de desempeño mecánico de las mezclas asfálticas en caliente tipo SMA producidas a escala industrial y de laboratorio, se corrobora que estas son adecuadas para ser aplicadas como carpeta de rodadura en pavimentos de alto volumen de tránsito en Colombia.



9 BIBLIOGRAFÍA

- CINCIRE Victor . “CAPAS DELGADAS DE RODADURA EN CALIENTE, EXPERIENCIA EN MEXICO: El reto del cambio del estado de la práctica actual al estado del arte“. SemMaterials. México 2011. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible en internet:
http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/7cma_2011/21.pdf
- Definiciones ABC. Vía. [En línea]. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible en internet: <http://www.definicionabc.com/general/via.php>.
- e-asfalto.com. Stone Mastic Asphalt (SMA) Asphalt Machineries and Equipment. Tecnología de pavimentos para el nuevo milenio. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible en internet: <http://www.e-asfalto.com/sma/>
- Grupo Surfax S.A. Mezclas SMA: calidad, seguridad y ahorro. [En línea]. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible en internet:
http://www.surfax.com.mx/new_site/admin/descargas/Mezclas-SMA.pdf
libro-pavimentos.blogspot.com. “Características de la subrasante. Bloques en cemento” . 2011. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible en internet:
<http://libro-pavimentos.blogspot.com/2011/03/caracteristicas-de-la-subrasante.html>MIRANDA, R., Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos (Tesis de pregrado). Universidad austral de Chile, Valdivia, Chile. 2010
- NUÑEZ Jairo, DELGADO Eduardo, GARRO Julio y VALERIN Mario. Prezi. Rehabilitación de pavimento. [En línea]. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible en internet : <https://prezi.com/okz6hm6dd-l3/procesos-de-rehabilitacion-de-pavimentos-flexibles/>.
- RIASCOS C., MARTIN Hernesto y ZAMIR P. Hiovann. Índice de condición del pavimento de la vía Los Hongos – San Francisco, Tunja. Usando las metodologías VIZIR y PCI. L’esprit Ingénieur [En línea]. 15 octubre 2012, vol. 3, [fecha de consulta: 15 octubre 2016].
- ROCA, Amanda. y VISBAL, Ivan. Ahuellamiento en pavimentos asfálticos. Universidad de Cartagena. Facultad de Ingeniería. Especialización en Ingeniería de Vías Terrestres. 2013. [En línea]. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/188408153/AHUELLAMIENTO-EN-PAVIMENTOS-ASFALTICOS>.
- Scrib, Método evaluación de carreteras vizir [En línea]. 2015. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/57943562/pavimento-rigido> [fecha de consulta: 11 mayo 2016].
- SCT. Secretaria de Comunicaciones y Transporte, Guía de procedimientos y técnicas para la conservación de carreteras, 2014 [fecha de consulta: 15 octubre 2016].
- Universidad Tecnológica Nacional. Pavimento. [En línea]. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible. en internet:

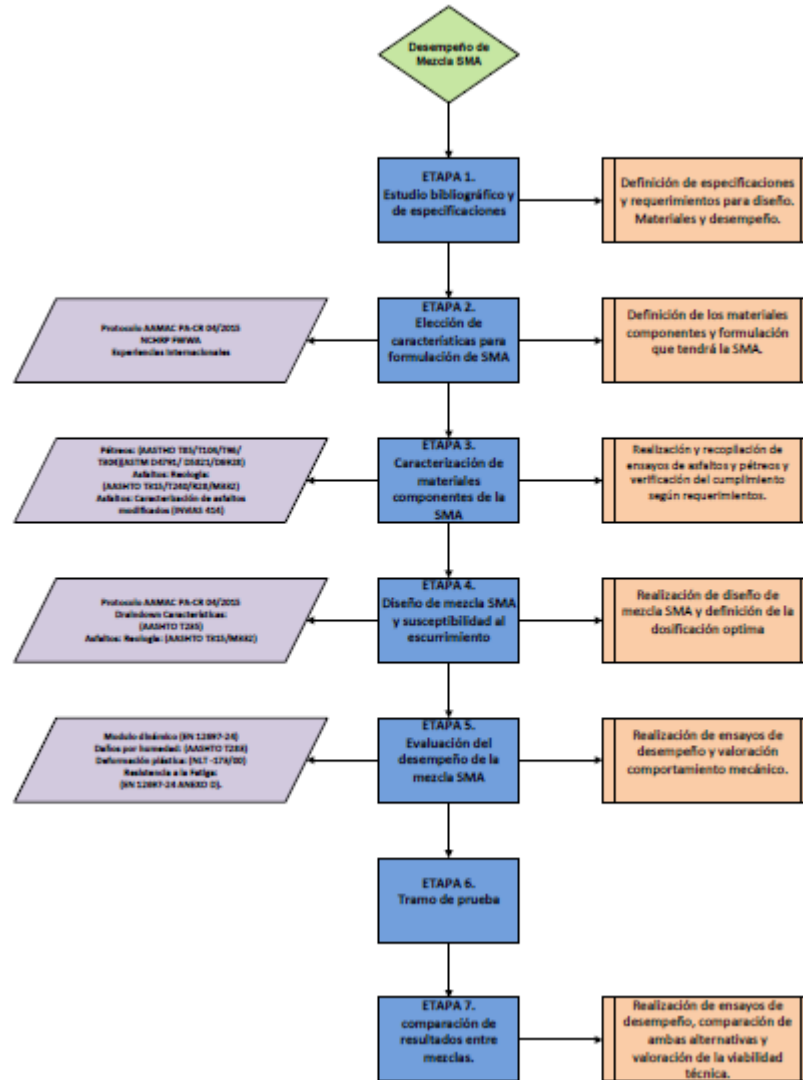
https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC%20I-Pavimentos.pdf.

- Urbanismo.com. Pavimento flexible. [En línea]. Día de acceso 15 de octubre de 2016. Disponible en internet: <http://www.urbanismo.com/pavimentos-flexibles/>.

ANEXOS



ANEXO A. DIAGRAMA DE FLUJO





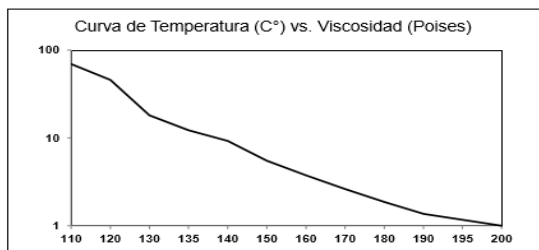
ANEXO B. CERTIFICADOS DE CALIDAD DEL CEMENTO ASFALTICO

 Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. <small>Especialistas en Asfaltos</small>	R DT 88	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS E INSTRUCTIVOS
	N.R: 8 2019-01-11	REPORTE DE CALIDAD DE ASFALTOS MODIFICADOS CON POLIMEROS

FECHA : MARZO 28 DE 2019 LOTE No. N.A
 CLIENTE : Ing. ESTEPHANIA AMAYA - PROYECTO DESPACHO No. N.A
 TIPO DE ASFALTO: MODIFICADO TIPO III TEMPERATURA DEL ASFALTO : 185°C

PROPIEDAD	NORMA DE REFERENCIA I.N.V.	ESPECIFICACION		REPORTE DE CONTROL DE CALIDAD	FRECUENCIA DE ENSAYO
		MIN	MAX		
Penetración @ 25°C, 100 gr, 5 s, (0,1mm)	E-706	55	70	57	LOTE
Punto de ablandamiento, (°C).	E-712	65	-----	87	LOTE
Viscosidad Rotacional Brookfield @ 135 ° C. (F)	E-717	-----	-----	N.A	LOTE
Estabilidad al almacenamiento, 5 días, 165° C.	E-726 E-712	-----	5	5	SEMANTAL
Ductilidad @ 5°C. 5 cm / min. (cm).	E-702	15	-----	33	QUINCENAL
Punto de ignición mediante la copa abierta cleveland, (°C)	E-709	230	-----	288	LOTE
Recuperación elástica por torsión ¹ @ 25°C. (%).	E-727	70	-----	71.1	LOTE
Contenido de agua, (%).	E-704	-----	0.2	0	TRIMESTRAL
Peso Especifico	E-707	-----	-----	1.016	MENSUAL
Pérdida por calentamiento Película Delgada en mov. a 103°C, 85 min (%).	E-720	-----	1	0.23	SEMANTAL
Penetración del residuo después del ensayo RTFOT @ 25°C, % de la penetración original).	E-708	65	-----	70.1	SEMANTAL
Ductilidad al residuo @ 5°C. 5 cm / min. (cm).	E-702	8	-----	16	QUINCENAL
Incremento en el punto de ablandamiento (°C)	E-712	-----	10	5	SEMANTAL
Grado de desempeño PG	AASHTO M-320	REPORTAR		78-28	MENSUAL

CURVA REOLOGICA




Temperaturas determinadas por estudio reológico previo

Temperaturas	Mínimo	Máximo
Temperatura del Asfalto en Tanque, °C	N.A	N.A
Temperatura del Agregado, °C	N.A	N.A
Temperatura de Mezclado, °C	163	171
Temperatura de Compactación ° C	150	155

Jorge Luis Quintana

Director Técnico



 Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. Bitumen Specialists	R DT 54	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS E INSTRUCTIVOS MANUAL OF PROCEDURE AND INSTRUCTIVE
	N.R-5	DETERMINACION GRADO DE DESEMPEÑO LIGANTES ASFALTICOS AASHTO M 320
	2015-12-04	DETERMINATION OF THE ASPHALT BINDERS PERFORMANCE GRADED (PG) AASHTO M 320

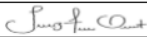
FECHA: DATE:	MARZO 28 DE 2019	LOTE No. BATCH No	N.A
CLIENTE : CUSTOMER:	Ing. ESTEPHANIA AMAYA - PROYECTO	DESPACHO No. DESPATCH No	N.A
CODIGO MUESTRA: SAMPLE CODE:	ASFALTO MOD. TIPO III		

ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO EQUIPMENT SPECIFICATIONS						
FABRICANTE: MANUFACTURER:			CONTROL DE TEMPERATURA: E.T.C TEMPERATURE CONTROL: E.T.C			
MODELO: MODEL:			Environmental Test Chamber			
DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS MEDIANTE REOMETRO DE CORTE DINAMICO DSR (AASHTO T 315) RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ASPHALT BINDER USING A DYNAMIC SHEAR RHEOMETER DSR (AASHTO T 315)						
ASFALTO ORIGINAL ORIGINAL BINDER						
DIAMETRO GEOMETRIA: GEOMETRY DIAMETER			GAP:			
25,0 mm			1000 µm			
CRITERIO STANDARD			G ^o /sin (Delta) ≥ 1,00kPa			
TEMPERATURA °C TEMPERATURE °C	FRECUENCIA ANGULAR rad/s ANGULAR FREQUENCY rad/s	STRAIN %	G* kPa	Delta ° (δ)	G ^o /sin (Delta) kPa	Temperatura de Falla °C Failure Temperature °C
70	10	12.1	2.72	64	3.03	81.7
76	10	12	1.58	67.6	1.71	
82	10	12	0.922	70.2	0.98	
ASFALTO ENVEJECIDO EN LAMINA DE PELICULA DELGADA EN MOVIMIENTO RTFOT AGED ASPHALT IN ROLLING THIN FILM (RTFOT)						
DIAMETRO GEOMETRIA: GEOMETRY DIAMETER			GAP:			
25,0 mm			1000 µm			
CRITERIO STANDARD			G ^o /sin (Delta) ≥ 2,20kPa			
TEMPERATURA °C TEMPERATURE °C	FRECUENCIA ANGULAR rad/s ANGULAR FREQUENCY rad/s	STRAIN %	G* kPa	Delta ° (δ)	G ^o /sin (Delta) kPa	Temperatura de Falla °C Failure Temperature °C
70	10	10	5.01	57.9	5.91	81.5
76	10	10	3	58.8	3.51	
82	10	10	1.84	59.9	2.13	
ENVEJECIMIENTO ACCELERADO UTILIZANDO UNA CAMARA DE ENVEJECIMIENTO A PRESION PAV (AASHTO R-28) ACCELERATED AGING OF ASPHALT BINDER USING A PRESSURIZED AGING VESSEL PAV (AASHTO R-28)						
ASFALTO ENVEJECIDO EN EL PAV AGED ASPHALT IN PAV (BBR)						
DIAMETRO GEOMETRIA: GEOMETRY DIAMETER			GAP:			
8,0 mm			2000 µm			
CRITERIO STANDARD			G ^o .sin (Delta) ≤ 5000 kPa			
TEMPERATURA °C TEMPERATURE °C	FRECUENCIA ANGULAR rad/s ANGULAR FREQUENCY rad/s	STRAIN %	G* kPa	Delta ° (δ)	G ^o .sin (Delta) kPa	Temperatura de Falla °C Failure Temperature °C
19	10	1	4540	42.2	3050	14.3
16	10	1	6740	40.1	4340	
13	10	1	8730	39.7	5580	
RIGIDEZ EN FLUENCIA POR FLEXION A BAJAS TEMPERATURAS MEDIANTE EL REOMETRO DE VIGA DE FLEXION BBR (AASHTO T-313) FLEXURAL CREEP STIFFNESS OF ASPHALT BINDER USING THE BENDING BEAM RHEOMETER BBR (AASHTO T-313)						
ASFALTO ENVEJECIDO EN EL PAV BBR AGED ASPHALT IN PAV (BBR)						
CRITERIO STANDARD			m ≥ 0,300		S ≤ 300 MPa	
(-12)° C			(-18)° C		(-24)° C	
m	S (MPa)	m	S (MPa)	m	S (MPa)	Temperatura aceptable de la rigidez (s) y de la pendiente de rigidez (m) Acceptable temperature for the Stiffness (s) and the Stiffness slope (m)
0.362	73.595	0.317	145.648	0.26	299.569	-18


GRADO DE DESEMPEÑO
PERFORMANCE GRADED

PG 76 - 28

ING. LAB.





 Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. Bitumen Specialists	R DT 115	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS E INSTRUCTIVOS MANUAL OF PROCEDURE AND INSTRUCTIVE
	N.R:0	RECUPERACIÓN Y FLUENCIA DEL ASFALTO A ESFUERZOS REPETITIVOS MEDIANTE REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO (MSCR) ASTM D 7405
	2018-10-12	MULTIPLE STRESS CREEP AND RECOVERY (MSCR) OF ASPHALT BINDER USING A DYNAMIC SHEAR RHEOMETER ASTM D 7405

FECHA: _____ DATE: MARZO 28 DE 2019 LOTE No. _____ BATCH No. N.A
 CLIENTE: _____ CUSTOMER: Ing. ESTEPHANIA AMAYA - PROYECTO DESPACHO No. _____ DESPATCH No. N.A
 CODIGO MUESTRA: _____
 SAMPLE CODE: ASFALTO MOD CON POLIMERO TIPO III

ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO EQUIPMENT SPECIFICATIONS	
FABRICANTE: MANUFACTURER: <u>TA Instruments</u>	CONTROL DE TEMPERATURA: E.T.C TEMPERATURE CONTROL: E.T.C Environmental Test Chamber
MODELO: MODEL: <u>DHR1</u>	

ASFALTO ENVEJECIDO EN LAMINA DE PELICULA DELGADA EN MOVIMIENTO RTFOT AGED ASPHALT IN ROLLING THIN FILM (RTFOT)			
DIAMETRO GEOMETRIA: GEOMETRY DIAMETER	<u>25,0 mm</u>	GAP:	<u>1000 μm</u>
TEMPERATURA DE ENSAYO °C: TEST TEMPERATURE °C:			<u>76</u>
R _{0,1} - PROMEDIO DE PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN A 0,1 kPa (%) R _{0,1} - AVERAGE PERCENT RECOVERY AT 0,1 kPa (%)			<u>81.29</u>
R _{3,2} - PROMEDIO DE PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN A 3,2 kPa (%) R _{3,2} - AVERAGE PERCENT RECOVERY AT 3,2 kPa (%)			<u>65.52</u>
R _{diff} - DIFERENCIA ENTRE EL PROMEDIO DE PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN A 0,1 kPa Y 3,2 kPa (%) R _{diff} - PERCENT DIFFERENCE BETWEEN AVERAGE RECOVERY AT 0,1kPa AND 3,2 kPa. (%)			<u>19.40</u>
J _{nr0,1} - FLUENCIA AL CORTANTE NO RECUPERABLE A 0,1 kPa (kPa ⁻¹) J _{nr0,1} - NON-RECOVERABLE CREEP COMPLIANCE AT 0,1 kPa (kPa ⁻¹)			<u>0.29</u>
J _{nr3,2} - FLUENCIA AL CORTANTE NO RECUPERABLE A 3,2 kPa (kPa ⁻¹) J _{nr3,2} - NON-RECOVERABLE CREEP COMPLIANCE AT 3,2 kPa (kPa ⁻¹)			<u>0.585</u>
J _{nr, diff} - DIFERENCIA ENTRE LA FLUENCIA AL CORTANTE NO RECUPERABLE A 0,1 kPa Y 3,2 kPa (%) J _{nr, diff} - PERCENT DIFFERENCE BETWEEN NON- RECOVERABLE CREEP COMPLIANCE AT 0,1 kPa AND 3,2 kPa (%)			<u>102.13</u>

ING. LAB.

Jorge Luis Quintana

ANEXO C. DEL MÉTODO MARSHALL

DISEÑO MARSHALL DE MEZCLAS ASFÁLTICAS HOJA DE CÁLCULO DE PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS PARA CONTENIDO ÓPTIMO DE LIGANTE

PESOS ESPECÍFICOS		X FRACCIÓN EN COMBINACIÓN
GRANESOS	2.720	65.0%
FINOS	2.663	25.7%
LIGANTE	2.706	9.3%
Total [G _{total}]	2.704	100%
ASFALTO	1.020	

PROBETA #	X ASP.	ESPESOR PROMEDIO [mm]	FACTOR DE CORRECCIÓN	PESO SECO, g	PESO SUMERGIDO, g	PESO S.S.S., g	PESO ESP. DBL.	GMM	GRAT. ESPEC. DBL. AGREG.	GRAVEDAD ESP. EFECT. DEL AGREG.	X ABSORCIÓN DE LIGANTE	X VACÍOS CON AIRE	X V.A.H.	X V.F.A.	ESTABILIDAD MEDIDA, g	FLUJO, mm	LIGANTE EFECTIVO	RELACION DE POLVO	ESTABILIDAD CORREGIDA [g]				
1	6.0	62.8	1.019	1118.9	641.6	1126.8	2.306	2.463	2.704	2.707	0.05				13183	6.05	5.95	1.57	13433				
2		63.3	1.005	1134.5	648.6	1143.4	2.293													12649	9.46	1.57	12712
3		63.1	1.011	1136.8	651.5	1143.7	2.310													12576	6.02	1.57	12714
PROMEDIO							2.303					6.5	19.9	67.4	12803	7.18		1.57	12953				
1	6.5	62.6	1.024	1132.5	646.1	1136.8	2.308	2.445	2.704	2.707	0.05				13889	6.55	6.45	1.44	14222				
2		62.5	1.027	1132.7	646.2	1136.9	2.308													13893	6.58	1.44	14268
3		62.4	1.029	1127.6	645.3	1134.2	2.306													12815	7.02	1.44	13187
PROMEDIO							2.307					5.6	20.2	72.2	13532	6.72		1.44	13727				
1	7.0	62.4	1.029	1130.7	646.2	1134.7	2.315	2.426	2.704	2.707	0.05				13108	7.75	6.95	1.34	13488				
2		62.5	1.027	1139.0	649.4	1141.1	2.316													12707	8.97	1.34	13050
3		62.4	1.029	1134.9	649.1	1138.0	2.321													13308	8.48	1.34	13694
PROMEDIO							2.317					4.5	20.3	77.9	13041	8.40		1.34	13411				
1	7.5	62.0	1.040	1119.5	641.0	1120.4	2.335	2.409	2.704	2.707	0.05				12093	9.86	7.45	1.25	12577				
2		61.0	1.071	1110.5	635.8	1112.0	2.332													11544	9.92	1.25	12364
3		62.1	1.037	1133.3	649.2	1134.7	2.334													12097	8.64	1.25	12545
PROMEDIO							2.334					3.1	20.1	84.6	11911	9.47		1.25	12495				
1	8.0	60.9	1.074	1115.9	640.3	1117.1	2.340	2.391	2.704	2.707	0.05				11282	10.16	7.95	1.17	12117				
2		61.2	1.065	1132.6	648.5	1133.4	2.336													11035	9.66	1.17	11752
3		61.1	1.068	1130.9	648.5	1132.0	2.339													10925	10.02	1.17	11668
PROMEDIO							2.338					2.2	20.4	89.2	11081	9.95		1.17	11846				



ANEXO D. GRAFICAS ANÁLISIS DISEÑO MARSHALL

