

**ESTUDIO SOBRE EL EMPLEO DEL FIQUE
EN LA PRODUCCIÓN DE MEZCLA SMA**

**YOHANA FABIOLA AGUILAR VARGAS
LUZ MERY LEON RIVEROS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2010**



**ESTUDIO SOBRE EL EMPLEO DEL FIQUE
EN LA PRODUCCIÓN DE MEZCLA SMA**

YOHANA FABIOLA AGUILAR VARGAS

LUZ MERY LEON RIVEROS

Tesis de Grado como requisito para optar el título de Ingeniera Civil

Director

Ing. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2010



A Dios, porque sin Él no tendría el privilegio de estar aquí; a **Wilson Cepeda**, mi esposo, por ser el precursor de este logro, por impulsarme a conseguirlo y por su apoyo económico incondicional. A mis hijos, para que no olviden que por más difíciles que parezcan las cosas, aunque tengamos que sacrificar algunas otras para lograrlo, siempre que tengamos un gran sueño, a pesar de los inconvenientes, lo podemos alcanzar.

A mis amigos que siempre me apoyaron y me hicieron sentir más fuerte de lo que en realidad soy; porque muchas veces sentí su admiración debido a mis condiciones familiares y me dieron fuerzas para continuar, porque valoraron mi esfuerzo aunque otros no lo vieran.

A todos ellos MIL GRACIAS.

Luz Mery León Riveros

A Dios, por darme la fortaleza de seguir siempre adelante, a mi hijo Andrés Felipe el gran motivo de mi vida, a mis padres Hermes y Margarita por su amor incondicional y a mis hermanos Lida, Pilar y Andrés por toda la confianza que siempre tuvieron en mí, a todos ellos gracias por contribuir a lograr este sueño.

Yohana Aguilar Vargas

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan su gratitud a:

DIOS

Ing. Eduardo Castañeda

PAVIANDI

Ing. William García

Shell Colombia

Ing. Jorge Sánchez

Ing. Cristina Rivero

A sus amigos, compañeros y familiares.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	1
1. STONE MATRIX ASPHALT	3
1.1. RESEÑA HISTORICA.....	4
1.2. GENERALIDADES.....	5
1.3. PRINCIPIOS DE STONE MATRIX ASPHALT	6
1.4. COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA.....	6
1.5. VENTAJAS.....	11
1.6. APLICACIÓN	12
1.7. REQUISITOS DE LA MEZCLA	14
1.8. BENEFICIOS ECONOMICOS	15
2. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO.....	17
2.1. DESCRIPCIÓN.....	17
2.1.1. Documentación.	17
2.1.2. Caracterización de materiales.	17
2.1.3. Diseño y fabricación de mezclas y probetas.....	18
2.1.4. Ensayos.	18
2.2. MATERIALES EMPLEADOS.....	18
2.2.1. Agregado mineral.	19
2.2.2. Asfalto modificado.	20
2.2.3. Aditivos espesantes.....	20
2.3. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS.....	27
2.3.1. Granulometrías recomendadas.	27
2.3.2. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto.....	28
2.3.3. Metodología usada para fabricación de probetas.....	30

2.4.	MÉTODO MARSHALL PARA ELABORACIÓN DE PROBETAS.....	31
2.5.	ENSAYOS	35
2.5.1.	<i>Análisis de escurrimiento del asfalto.</i>	35
2.5.2.	<i>Medición de la densidad Bulk.</i>	41
2.5.3.	<i>Determinación del módulo elástico a 7.5 °C.</i>	44
2.5.4.	<i>Ensayo Creep sin confinar a 60° C (Carga estática).</i>	48
2.5.5.	<i>Estabilidad y flujo.</i>	51
2.5.6.	<i>Cálculo de porcentaje de vacíos.</i>	53
3.	RESULTADOS DE LABORATORIO.....	55
3.1.	AGREGADOS.....	55
3.1.1.	<i>Caracterización de los agregados..</i>	55
3.1.2.	<i>Petrología mineral de los agregados.....</i>	56
3.2.	ASFALTO	57
3.2.1.	<i>Características Reológicas del Asfalto.:</i>	57
3.3.	FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	57
3.3.1.	<i>Granulometría utilizada.</i>	57
3.3.2.	<i>Porcentaje de asfalto utilizado.</i>	58
3.4.	CARACTERIZACION DE LAS PROBETAS.....	59
3.4.1.	<i>Nomenclatura..</i>	59
3.4.2.	<i>Geometría.</i>	59
3.5.	CONTROL DE ESCURRIMIENTO.....	59
3.6.	ANALISIS DE DENSIDAD Y VACIOS	61
3.6.1.	<i>Densidad Bulk.</i>	61
3.6.2.	<i>Vacíos con aire.</i>	62
3.6.3.	<i>Vacíos en el agregado mineral.</i>	64
3.6.4.	<i>Vacíos llenos de asfalto.....</i>	65
3.7.	EVALUACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO	67

3.7.1.	<i>Mezcla SMA con fique. Curva esfuerzo Vs. deformación unitaria</i>	68
3.8.	DEFORMACIÓN EN EL TIEMPO A 60 °C (ENSAYO CREEP SIN CONFINAR)	70
3.8.1.	<i>Gráfico deformación unitaria Vs. tiempo (MDC – 2)..</i>	70
3.8.2.	<i>Gráfico deformación unitaria Vs. tiempo (SMA).</i>	71
3.9.	ESTABILIDAD MARSHALL	72
3.9.1.	<i>Relación estabilidad - porcentaje de asfalto mezcla MDC – 2.</i>	72
3.10.	FLUJO MARSHALL	73
3.10.1.	<i>Relación flujo - Porcentaje de asfalto mezcla MDC – 2.....</i>	74
3.10.2.	<i>Relación flujo - Porcentaje de asfalto mezcla SMA..</i>	74
4.	ANALISIS COMPARATIVO DE MEZCLAS	75
4.1.	DESCRIPCION	75
4.2.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	75
4.2.1.	<i>Control de escurrimiento.....</i>	75
4.2.2.	<i>Densidad Bulk.</i>	76
4.2.3.	<i>Vacíos en el agregado mineral (VAM).</i>	77
4.2.4.	<i>Vacíos con aire (Va).</i>	77
4.2.5.	<i>Vacíos llenos de asfalto (VAF)..</i>	78
4.2.6.	<i>Módulo elástico a 7.5 °C.</i>	79
4.2.7.	<i>Creep sin confinar a 60°C.</i>	80
4.2.8.	<i>Estabilidad Marshall.</i>	80
4.2.9.	<i>Flujo Marshall.</i>	80
	RECOMENDACIONES.....	82
	CONCLUSIONES	83
	BIBLIOGRAFÍA	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagen transversal de una mezcla SMA (Izq.) y tradicional (der.).....	10
Figura 2. Relación de agregados mezcla discontinua.....	10
Figura 3. SMA construido en el terreno	13
Figura 4. Probeta de mezcla SMA	14
Figura 5. Planta de fique	23
Figura 6. Instrumentos para medir resistencia a tensión	25
Figura 7. Instrumento para medir diámetro de la fibra	25
Figura 8. Granulometría MDC - 2.....	28
Figura 9. Mezcla lista para compactar	33
Figura 10. Pesado de la mezcla.....	34
Figura 11. Proceso de compactación.....	34
Figura 12. Probeta tipo SMA.....	35
Figura 13. Tamaño de fibra inadecuado	39
Figura 14. Vaciado de la mezcla.....	39
Figura 15. Escurrimiento de la mezcla.....	40
Figura 16. Probeta pesada al aire.....	42
Figura 17. Probetas parafinadas.....	43
Figura 18. Probeta parafinada pesada.....	43
Figura 19. Pesado probeta sumergida.....	44
Figura 20. Probeta sumergida en agua a 7.5°C.....	47
Figura 21. Ensayo módulo elástico	47
Figura 22. Calentamiento probetas a 60 °C	50
Figura 23. Ensayo Creep sin confinar (60°C).....	50
Figura 24. Ensayo Estabilidad y Flujo	52
Figura 25. Probeta fallada.....	52
Figura 26. Extracción de aire de la mezcla	54

Figura 27. Relación % de Esgurrimiento - % de Figue (del peso total de mezcla)	60
Figura 28. Densidad Bulk mezclas SMA-Figue; MDC-2.....	62
Figura 29. Contenido de vacíos con aire.....	63
Figura 30. Vacíos en el agregado mineral	64
Figura 31. Vacíos llenos de asfalto	66
Figura 32. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria MDC - 2	67
Figura 33. Relación Esfuerzo - Deformación unitaria SMA	69
Figura 34. Módulos elásticos de la mezcla SMA Vs % de asfalto	69
Figura 35. Relación Deformación unitaria - tiempo para MDC – 2.....	70
Figura 36. Deformación unitaria Vs. tiempo para SMA	71
Figura 37. Relación Deformación total - % asfalto	72
Figura 38. Relación Estabilidad - % de asfalto mezcla MDC-2	73
Figura 39. Flujo Vs. % de asfalto mezcla MDC-2.....	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rangos granulométricos del SMA.....	11
Tabla 2. Requisitos de una mezcla SMA	15
Tabla 3. Cálculo de la densidad del fique	26
Tabla 4. Cálculo de la densidad real.....	26
Tabla 5. Comparación de porcentajes en peso para las diferentes fibras	26
Tabla 6. Granulometría del fique.....	26
Tabla 7. Porcentaje óptimo de asfalto.....	30
Tabla 8. Nivel de compactación de la mezcla	31
Tabla 9. Caracterización de agregados pétreos	56
Tabla 10. Composición mineralógica de los agregados.....	56
Tabla 11. Propiedades reológicas del asfalto	57
Tabla 12. Gradación empleada SMA y MDC-2	58
Tabla 13. Porcentajes de asfalto empleados	58
Tabla 14. Relación Fique / Asfalto	60
Tabla 15. Resultados de escurrimiento.....	61
Tabla 16. Resultados contenido de vacíos SMA-Fique	63
Tabla 17. Resultados contenido de vacíos MDC-2	63
Tabla 18. Resultados VAM en SMA – Fique.....	65
Tabla 19. Resultados VAM MDC-2	65
Tabla 20. Resultado vacíos llenos de asfalto, mezcla SMA.....	66
Tabla 21. Resultado vacíos llenos de asfalto, mezcla MDC-2	66
Tabla 22. Módulos elásticos de las mezclas MDC - 2.....	68
Tabla 23. Módulos Elásticos mezcla SMA	70
Tabla 24. Resultados deformación total MDC - 2	71
Tabla 25. Resultados deformación total SMA	72
Tabla 26. Resultado escurrimiento mezcla MDC – 2	75

Tabla 27. Densidad Bulk mezcla SMA	76
Tabla 28 . Vacíos en el agregado mineral	77
Tabla 29. Vacíos con aire mezcla SMA	77
Tabla 30. Vacíos llenos de asfalto SMA	78
Tabla 31. Comparación máximos módulos elásticos SMA; MDC-2	79
Tabla 32. Comparación mínima deformación Creep SMA; MDC-2.....	80
Tabla 33. Comparación máxima estabilidad SMA; MDC-2	80
Tabla 34. Comparación máximo flujo SMA; MDC-2.....	81

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. CARACTERIZACIÒN DE LOS AGREGADOS.....	87
ANEXO B. CARACTERIZACIÒN DE LAS PROBETAS.....	97
ANEXO C. DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR MARSHALL	103
ANEXO D. ENSAYO DE MÒDULO DE ELASTICIDAD	106
ANEXO E. ENSAYO CREEP.....	109
ANEXO F. CARACTERIZACIÓN REOLÒGICA DEL ASFALTO.....	114

RESUMEN

TITULO

ESTUDIO SOBRE EL EMPLEO DEL FIQUE EN LA PRODUCCIÓN DE MEZCLA SMA.*

AUTORES

AGUILAR VARGAS YOHANA FABIOLA
LEÓN RIVEROS LUZ MERY**

PALABRAS CLAVES

STONE MATRIX ASPHALT
DEFORMACIÓN PERMANENTE
FIBRA DE FIQUE

DESCRIPCIÓN

Uno de los principales problemas de los pavimentos utilizados en las diferentes carreteras de nuestro país, es la baja resistencia a la deformación permanente que estas capas de rodadura presentan al momento de aplicarle las cargas de tránsito, situación que a lo largo del tiempo, conlleva al deterioro de las mismas.

Al ver los inconvenientes que están presentando las mezclas convencionales, es muy necesario evaluar otro tipo, que ayude a controlar este problema sin que se eleven los costos de construcción y mantenimiento.

Otros países han encontrado que la solución a este problema son las mezclas discontinuas tipo SMA, mezclas que garantizan la resistencia al desgaste, provocado por el alto tráfico en las vías, entre muchas otras cualidades.

Éste proyecto está encaminado a estudiar la posibilidad de utilizar la fibra de fique como aditivo de una mezcla SMA (Stone Matrix Asphalt), con el fin de controlar el escurrimiento de asfalto, pues este es el inconveniente a solucionar en este tipo de mezclas, y ya que esta, por su granulometría discontinua y su alto contenido de asfalto, con una adición de celulosa, es una mezcla que asegura una vida útil prolongada, es la solución a los problemas de deterioro en las vías, ocasionado por el alto tráfico en nuestro país.

* Tesis de grado

** Facultad de Ingenierías Físico mecánicas. Ingeniería Civil. Ing. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON

ABSTRACT

TITLE

A STUDY ON THE USE OF THE FIQUE IN THE PRODUCTION OF MIXTURE SMA.*

AUTHORS

AGUILAR VARGAS YOHANA FABIOLA
LEÓN RIVEROS LUZ MERY**

KEY WORDS

STONE MATRIX ASPHALT
PERMANENT STRAIN
FIQUE FIBER

DESCRIPTION

One of the principal problems of the pavements used in the different roads of our country, is the low resistance to the permanent deformation that these layers of tread present to the moment to apply the loads of traffic to them, situation that throughout the time, leads to the deterioration of the same ones.

When seeing the disadvantages that are displaying the conventional mixtures, it is very necessary to evaluate another type of mixture, which helps to control this problem without the costs of construction and maintenance rise.

Other countries have found the solution to this problem are discontinuous type SMA mixtures, mixtures that ensure resistance to wear caused by high traffic on the roads, among many other qualities.

This one project is directed to study the possibility of using the fiber of fique as additive of a mixture SMA (Stone Matrix Asphalt), in order to control the draining of asphalt, since this one is the problem to solving in this type of mixtures, and since this one, for its discontinuous grain size and its high asphalt content of asphalt, with an addition of cellulose, is a mixture that assures a long useful life, is the solution to the problems of deterioration in the roads, caused by the high traffic in our country.

* Thesis of degree.

** Faculty of Physical Mechanical Engineering. Civil engineering. Eng. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZON

INTRODUCCIÓN

La construcción de vías en Colombia con alguna protección superficial, comenzó hace no muchas décadas, por las mismas rutas de los ya transitados caminos de herradura de, como respuesta a la necesidad de los comerciantes de mejorar y agilizar la movilidad de sus productos, que entonces sustentaban la economía del país, además de la necesidad de movilizar los vehículos automotor que comenzaban a llegar al país.

Desde entonces, se busca solucionar los problemas que se presentan con relación a los materiales para la construcción de las vías, que, con el aumento del tráfico se han “quedado cortos” para suplir la demanda. Cada elemento con el que trabaja el ser humano, debe mejorar al ritmo en que aumenta la necesidad y hoy día vemos que es necesario “evolucionar”, en cuanto a los materiales que se utilizan en la construcción y rehabilitación de carreteras, para que brinden una mejor solución al problema del tráfico.

Este trabajo, junto con los que ya se han realizado como tesis de grado en la Universidad Industrial de Santander sobre este mismo tema; busca poner un grano de arena en la implementación de un material que cumpla con los nuevos requerimientos de tráfico pesado en nuestro país. Para ello se ha tomado como base, una mezcla asfáltica de origen alemán y de uso muy amplio en varios países, con normativa que regula su diseño; caracterizada por alcanzar un tiempo de vida útil muy largo, comparada con mezclas convencionales; bajo costo de construcción debido a los menores espesores que requiere, pero sobre todo los bajos costos de mantenimiento debido a su larga resistencia al desgaste, además de un sinnúmero de características que la colocan en estos países como la mejor

mezcla encontrada hasta ahora para satisfacer las necesidades del tráfico pesado que manejan.

La mezcla SMA (sigla de su nombre en inglés **Stone Mastic Asphalt**) se caracteriza, entre otras cosas, por un alto contenido de asfalto modificado con polímeros (entre 6.5 % y 8 %), un esqueleto pétreo que garantiza alta capacidad de carga y el contenido de fibras que controlan la exudación del ligante; punto de control importante para el presente proyecto. Siendo así, esta investigación junto con las ya realizadas en años anteriores por algunos compañeros, pretende reemplazar las fibras espesantes que usan aquellos países y fabricadas explícitamente para este fin, por una de amplio uso y fácil consecución en nuestro país, que haga económicamente viable el diseño de dicha mezcla, para ser usada en nuestras carreteras, después de controlar el escurrimiento del asfalto, hasta los valores permitidos (0.3 % del peso de mezcla), además de verificar que se mantengan los diferentes valores que la caracterizan.

Anteriormente fueron probados como espesantes, la fibra Cellosize QP 52000h, cenizas provenientes de alto horno y caucho de llantas reciclado; sin arrojar los resultados esperados.

Durante esta investigación utilizaremos como fibra espesante, el fique; esperando que con sus características, logremos controlar el escurrimiento, mantener los diferentes valores que caracterizan la mezcla SMA a altas y bajas temperaturas y por ende podamos, sin pretender que este estudio sea suficiente, dar una luz para continuar la realización de estudios que permitan algún día, poder normalizar esta mezcla de una forma económicamente factible en nuestro país, ya que, siendo de tan amplio uso en países con más tráfico que el nuestro, son los costos la razón que no permite la utilización de ésta en Colombia.

1. STONE MATRIX ASPHALT

La capa de rodamiento constituye la parte superior de la estructura de un pavimento y como su nombre y ubicación lo indican, sobre ellas van a rodar las cargas de tránsito y deben estar constituidas por materiales capaces de soportar adecuadamente, tanto los esfuerzos producidos por dichas cargas, como la acción de los agentes climáticos. Una capa de rodadura debe brindar seguridad, permitiendo la adherencia de los neumáticos en cualquier situación; ser impermeable, impidiendo la penetración del agua superficial que destruye las capas inferiores, cómoda para ser circulada, es decir, bajo ruido y contar con buena visibilidad nocturna y en situaciones de lluvia; entre otras.

Se pueden diseñar buscando funciones específicas de resistencia a agentes especiales como disolventes o situaciones de carga estática exigiéndole por punzonamiento, resistencia a las deformaciones plásticas, envejecimiento, resistencia a la desintegración por la acción del agua o el hielo, entre otras.

Una estructura de pavimento está compuesta por varias capas de material. Cada capa recibe las cargas desde la parte superior, extendiéndolas en sus dos direcciones hasta transmitir las a las capas inferiores. Esto quiere decir, que la capa más baja de la estructura del pavimento es la que recibe menos carga. Con el fin de aprovechar al máximo esta distribución de esfuerzos, las capas son generalmente dispuestas en forma descendente de capacidad, así que la capa superior es la que posee mayor capacidad de carga siendo la de más costo y la capa más inferior será de menor capacidad de carga y por ende más económica.

Una estructura construida con mezcla tipo SMA (Stone Matrix Asphalt), esta clasificada como una estructura de pavimento flexible, por tanto cuenta con todas las anteriores características y consta descendentemente de las siguientes capas:

Capa Superficial:	Capa superior que entra en contacto con el tráfico. Puede estar compuesta por una o varias capas asfálticas.
Base	Esta capa se encuentra directamente debajo de la superficial y se compone de agregados (puede ser estabilizada o sin estabilizar).
Sub-base	Capa o capas bajo la base; esta no siempre es necesaria.

Cuanto mayor sea el módulo que se añada a la capacidad estructural de las capas de pavimento, la carga se distribuye a lo largo de un área más amplia de la sub-base o suelo de apoyo.

1.1. RESEÑA HISTORICA

La designación SMA corresponde a las iniciales de su nombre en idioma inglés: **Stone Matrix Asphalt**, las cuales indican que se trata de una mezcla asfáltica formada por partículas de piedra acomodadas en una matriz asfáltica.

Este tipo de mezcla para pavimentos fue desarrollada en Alemania a finales de los años 60's. 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. Rettenmaier, desarrolló la mezcla SMA Después de la prohibición del uso de neumáticos de clavos, se verificó que el pavimento SMA aseguraba pavimentos durables que exhibían una muy elevada resistencia al desgaste en las rutas de alto tránsito. Como consecuencia de ello, en 1984 se normalizó el sistema SMA en Alemania.

Luego comenzó a ser utilizado en otros países de Europa, Estados Unidos y Asia. Algunos países han establecido sus propias normas para SMA y la CEN (Comisión de Estándares Europeos) está en proceso de fijar una norma europea estandarizada. Asimismo, en Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda, China, Corea del Sur, Taiwán y otros países asiáticos, el SMA está ganando rápidamente la aceptación de las autoridades viales y la industria del asfalto.

1.2. GENERALIDADES

La particularidad de esta mezcla asfáltica, cuyo prototipo se denomina “Mastimasc”, consiste en el hecho de revestir y aglutinar con un mortero rico en ligante, una cantidad elevada de gravilla triturada, de bajo desgaste y a prueba de impacto. Las grandes cantidades de asfalto líquido empleado, del orden de 6.5% a 8% en peso, que aseguran una vida útil muy prolongada de este tipo de construcción requieren de la adición de un sustrato fibroso, para evitar la segregación del material y el drenaje del asfalto en la mezcla puesta en terreno.

El SMA es una mezcla que requiere poco espesor en la capa de rodadura y una granulometría discontinua, es decir, que en ella aparecen partículas en su mayoría distribuidas entre dos tamaños extremos (generalmente 3/8” y N°4), con una proporción relativamente baja de los otros tamaños, excepto de filler. Se prepara en caliente y consiste de dos partes: un agregado grueso de alta calidad y un mastic a base de arenas, filler, fibras de celulosa y cemento asfáltico, con o sin aditivos modificadores. “Tiene una vida útil normal de treinta (30) años”¹

Aspectos esenciales como la consistencia del esqueleto mineral y el mastic bituminoso, y consecuentemente la textura de la superficie y estabilidad de la mezcla, están ampliamente relacionados con la gradación escogida y la cantidad y tipo de filler y celulosa empleados.

¹ Pagina de Internet www.e-asfalto.com

1.3. PRINCIPIOS DE STONE MATRIX ASPHALT

La construcción de pavimentos con el sistema SMA con FIBRA DE CELULOSA aumenta la productividad en la construcción y una reducción muy significativa de los trabajos de mantenimiento. Contratistas de Alemania, Suecia, Dinamarca, Italia, Francia y Gran Bretaña entre otros, terminan la construcción de la carpeta asfáltica de 30 a 50 % más rápido de acuerdo al comité de la American Association of State Highway and Transportation Officials según reporte en el International Herald Tribune y publicado por los diarios The New York Times y el Washington Post.

Este tipo de asfalto es conocido por su alto contenido en áridos gruesos y su distribución en un esqueleto de estructura controlada. Los vacíos de la matriz estructural están llenados por un asfalto modificado con polímeros de alta viscosidad. El elevado contenido de agregados, de por lo menos el 70%, asegura un contacto perfecto entre las partículas después de la compactación.

Los principios del SMA fueron rápidamente adoptados y desarrollados por países en los que el desgaste debido a neumáticos claveteados representaba un gran problema en las carreteras.

En los últimos años se ha optado por utilizar asfaltos modificados con polímeros con el fin de aumentar la resistencia de las mezclas, dado que las fabricadas con asfaltos convencionales ya no son suficientes para soportar el alto tráfico en las carreteras, siendo que las mezclas tipo SMA contienen un alto contenido de asfalto comparado con las mezclas tradicionales, se ve la necesidad de agregar fibras espesantes que contrarresten el drenaje provocada por el alto contenido del ligante.

1.4. COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA

La mezcla está compuesta por una serie de porcentajes de agregados minerales, cemento asfáltico, llenante mineral y fibras de celulosa; los cuales se estiman a través de estudios de laboratorio para generar la mezcla óptima que brinde las mejores condiciones de estabilidad en la marcha.

En este proyecto, al igual que en la norma INVIAS se denomina agregado grueso a la fracción de roca retenida en el tamiz N° 4, filler mineral al material que pasa por el tamiz N° 200 y agregado fino al material comprendido entre estos.

Conociendo que en cada país existen normas que regulan los diseños de mezclas y que para cada uno existen parámetros más importantes que otros, presentamos una estimación de los requisitos que debe cumplir los agregados pétreos para garantizar el buen funcionamiento en la mezcla:

Tasa de trituración:	Al menos 100% una cara y mínimo 90% dos caras.
Forma:	Índice de lajas menor del 25% (NLT354791).
Resistencia:	Desgaste de los ángeles <30% (AASHTO T-96).
Pulido:	Coeficiente de pulimiento acelerado mayor a 0.5 (NLT174772).
Limpieza:	Equivalente de arena de la fracción que pasa el tamiz N° 4 mayor a 50% (ASTM D2419).
Durabilidad:	En sulfato de sodio menor al 15% (ASTM C88).
Adhesividad:	Mayor 95% (ASTM D3625-96).
Absorción del agua:	Menor al 2% (ASTM C127 y ASTM C128).

- **Agregado Grueso**

“Debe provenir de minerales tales como el Granito, Grabo, Diabasa y Basalto extraído de la marisma y lechos de ríos. En su totalidad debe ser gravilla triturada, no absorbente, con un 20% máximo de partículas planas y alargadas y resistencia

al intemperismo acelerado no menor al 15%, si se usa N_2SO_4 . Generalmente se dosifica en cantidades cercanas al 70% del peso total de la mezcla”²

- **Agregado Fino**

Este debe ser material 100% triturado, arena o una mezcla de las dos. Su intemperismo acelerado en sulfato de sodio no debe exceder el 15% y su límite líquido debe ser menor a 25. Comúnmente constituye el 15% del peso total de la mezcla.

- **Filler Mineral**

Puede ser polvo de piedras calizas o cualquier otro material disponible; al momento de usarlo debe estar suficientemente seco para fluir libremente sin formar aglomeraciones, carecer de impurezas orgánicas y tener un índice de plasticidad menor a 4. Se dosifica típicamente en cantidades del orden del 10% del peso total de la mezcla.

- **Cemento Asfáltico**

El SMA contiene ligante en cantidades que varían entre el 6% y el 8% del peso total, razón por la cual requieren la adición de un sustrato fibroso, comúnmente a base de celulosa, que disminuye el riesgo de exudación. Su temperatura de mezcla varía normalmente entre 155°C y 163°C y se recomienda que no supere los 177°C, esta cantidad elevada de betún, da una vida útil prolongada al pavimento.

² Tesis de grado: Análisis comparativo de propiedades de deformación en las mezclas MDC-2, MDC-3, m1 y Stone Mastic Asphalt.

El escurrimiento y envejecimiento en mezclas asfálticas ha disminuido en los últimos años, al difundirse el uso de asfalto modificado con polímeros. Estos tienen el valor agregado de mejorar la adherencia y disminuir la susceptibilidad térmica y pueden ser incluidos en el diseño SMA.

- **Fibras Espesantes**

“Las fibras son aplicadas en proporciones entre el 0,3% y 0,5% del peso total. Deben añadirse poco antes de la mezcla, sin calentarse previamente para evitar su deterioro, esparciéndoles uniformemente. No modifica químicamente el asfalto, pero intervienen en las propiedades físicas de la mixtura, permitiendo incrementar el contenido del mismo. Tienden a espesar el betún, manteniendo estable el esqueleto pétreo durante el proceso de la mezcla, almacenaje intermedio, pavimentación y evitando el drenaje de asfalto antes de compactar”³

- **Granulometría recomendada para fibras espesantes de una mezcla SMA**

Método A – Alpine Sieve: Longitud de la fibra, 6mm. Máx.

Pasa malla 150µm (Nº100), 70% (±10%)

Método B- Por mallas

Long. De la fibra, 6mm. Máx.

Pasa Nº 200 (850 µm), 65% (±10%)

Pasa Nº 400 (450 µm), 65% (±10%)

Pasa Nº 400 (106 µm) 30% (±10%)

Contenido de cenizas 18% (±5%) no volátiles

Ph 7.5 (±1.0)

³ Tesis de grado: Aditivos para producir mezclas asfálticas de alta resistencia a la deformación permanente.

Absorción de aceite 5%(±1.0) del peso de la fibra
Contenido de humedad 5% en peso

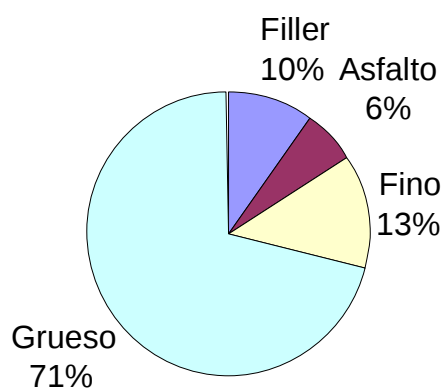
- **Granulometría Pétreo**

Figura 1. Imagen transversal de una mezcla SMA (Izq.) y tradicional (der.)



Fuente: <http://www.e-asfalto.com.ar/sma/index.9.jpg>

Figura 2. Relación de agregados mezcla discontinua.



La gradación discontinua del SMA es un factor determinante en su diseño, ya que su estabilidad y resistencia, están ampliamente relacionadas con la calidad y composición del esqueleto pétreo. Debe ser seleccionada de acuerdo al espesor de la carpeta compactada, pero en forma general se adapta a los siguientes rangos.

Tabla 1. Rangos granulométricos del SMA

TAMIZ N°	% QUE PASA
3/4	100
1/2	85 - 95
3/8	75 máx.
N° 4	20 - 28
N° 8	16 - 24
N° 30	12 - 16
N° 50	12 - 15
N° 200	8 - 10

Fuente: Arenas Emilio. Análisis comparativo de propiedades de deformación en las mezclas MDC=2, MDC=3, M1 y Stone Matrix Asphalt. Universidad industrial de Santander.

1.5. VENTAJAS

- **Estabilidad a elevadas temperaturas:** La mezcla 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.
- **Flexibilidad a bajas temperaturas:** La mezcla SMA utiliza un mastic rico en asfalto que ofrece propiedades superiores a las de un concreto denso en caliente en sus características de resistencia al fisuramiento térmico.

- **Elevada resistencia al desgaste:** La mezcla SMA tiene bajo contenido de vacíos con 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:** Las mezclas SMA tiene 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 entre los áridos.
- **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 su textura superficial hay menos salpicado de agua y en la noche es menor el reflejo de la superficie mejorando la visibilidad de las demarcaciones del camino.
- **Menos ruido de tráfico:** La mezcla SMA presenta generalmente disminución de ruidos debidos a las propiedades de textura conseguidos. Ello lo hace sumamente útil en áreas residenciales o zonas donde se requiere silencio.

1.6. APLICACIÓN

La SMA debe ser colocada a temperaturas mayores a las de mezclas tradicionales, ya que el entrelazado de partículas se rigidiza en exceso, a causa del alto contenido de asfalto. Antes de extenderla, la superficie de aplicación debe estar seca y libre de cualquier material suelto y la temperatura ambiente debe estar por encima de los 10 ° C. La capa delgada de SMA debe colocarse sobre una superficie renivelada, donde los baches hayan sido tapados con mezclas en caliente o en frío.

Figura 3. SMA construido en el terreno



Fuente: <http://www.vialidad.gov.ar>

Las características de este tipo de mezclas las hacen propicias para su extendido sobre pavimentos de hormigón o en refuerzos en superficies sometidas a condiciones exigentes de tráfico. El inconveniente que puede presentar es la dificultad para su compactación debido al bajo espesor de capa.

Figura 4. Probeta de mezcla SMA



Fuente: GARNICA, Paul. Aspectos del Diseño Volumetrico de Mezclas Asfálticas, Sanfaldila, 2004.
<URL:<http://www.imt.mx/Espanol/publicaciones/pubtec/pt246.pdf>>

1.7. REQUISITOS DE LA MEZCLA

Para garantizar el correcto funcionamiento de la mezcla SMA, esta debe cumplir con unas características mínimas que corresponden a las siguientes pruebas: NCAT (de acuerdo a National Center for Asphalt Technology) Y NAPA (National Asphalt Pavement Association)

Tabla 2. Requisitos de una mezcla SMA

Propiedad	Valor	Método
Vacíos en la mezcla total	3-4%	Basado en AASHTO T166, T209 y T269 dmáx. (AASHTO T209)
Contenido de asfalto basado en el peso total de la mezcla	6.0% min.	
Estabilidad Marshall*	635 kg. min	ASSHTO T245
Flujo, 0.25 mm	8 - 16	
Drene, %	0.3 máx. (lectura a 1 hr.).	Método propuesto por la NCAT
Vacíos en la mezcla asfáltica (VAM).	17%	

FUENTE: BIO – D Latinoamérica, S.A. de C.V. SMA en México. Disponible en Internet <URL: <http://www.biolatino.com/index.html>>

1.8. BENEFICIOS ECONOMICOS

Los siguientes beneficios son los que, empresas Mexicanas afirman tener, la construcción de carreteras con mezcla SMA:

- Construcción de carreteras nuevas a menor costo con mayor duración y menor costo de mantenimiento.
- Repavimentación de carreteras existentes para aumentar su resistencia y años de uso.

- Reducción en el costo de mantenimiento del Sistema Nacional de Carreteras ya que disminuye grandemente la frecuencia de reparación, permitiendo además que con los mismos recursos se de mantenimiento a mas kilómetros de carreteras.
- Costos menores hasta con un 20% por ejemplo; se tiene una sobre carpeta de asfalto convencional de 5cms de espesor con un costo de \$13500/m², mientras que con una carpeta tipo S.M.A. con fibra de celulosa de 3cms de espesor se tiene un costo de \$10.905 /m². (a Noviembre de 2009).
- Los costos de mantenimiento para una carpeta convencional son del 25% del costo de inversión inicial por año (según datos de S.C.T.) mientras que una S.M.A. puede durar hasta mas de ocho años sin mantenimiento, esto es, en seis años una carpeta convencional cuesta \$33.750/m² mientras que el S.M.A. se mantiene en los mismos \$10.950 /m².
- Alemania comprobó que se pueden tener carreteras con 30 años de vida sin haber necesitado ninguna reparación.

NOTA: Costos suministrados por BIO-D, Pavimentos SMA, México.

2. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

2.1. DESCRIPCIÓN

Para el desarrollo de este estudio, se trabajó de la siguiente forma:

2.1.1. Documentación. Durante la etapa previa al trabajo de laboratorio, se buscó información acerca de los estudios que se han realizado buscando los mismos objetivos u objetivos similares a los de esta investigación; como son los realizados en años anteriores por los entonces estudiantes: Emilio Arenas Romero y Andrés Julián Serrano en su tesis: ANALISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN EN LAS MEZCLAS MDC-2,MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT; Jorge Eduardo Serrano y José Willington Ortiz en su tesis: ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE; Néstor Javier Contreras y Jaime Eduardo Granados en su tesis: ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA DEFORMACION PERMANENTE, CONTROLANDO EL ESCURRIMIENTO DE ASFALTO: STONE MATRIX ASPHALT CON ADICIÓN DE FIBRAS DE CAUCHO RECICLADO.

También se encontró información, que ayudó como soporte al cuerpo teórico de este trabajo, en algunas páginas de Internet de empresas Mexicanas que trabajan con este tipo de mezclas.

2.1.2. Caracterización de materiales. Ya que se emplearon los mismos agregados minerales que los proyectos mencionados, se tomó la información de caracterización de materiales realizada por estos grupos,

con el fin de dedicarle más tiempo y darle la especial importancia a la realización de los ensayos propios de la investigación.

2.1.3. Diseño y fabricación de mezclas y probetas. Inicialmente y con el fin de controlar el escurrimiento de asfalto de la mezcla tipo SMA, se realizaron mezclas para determinar por observación el tamaño de fibra a utilizar. Luego, con este tamaño se hicieron mezclas hasta encontrar una curva de relación % fibra Vs. % escurrimiento, para obtener la cantidad óptima de fique que controlara la exudación hasta los límites permitidos. Finalmente se fabricaron las probetas para verificar si estas cumplían con los requerimientos de la mezcla SMA, siguiendo el método Marshall.

2.1.4. Ensayos. Se aplicaron los mismos ensayos a las probetas que los realizados por los trabajos anteriores.

Aunque si bien, no se pueden comparar los resultados del todo, al no utilizar el mismo tipo de asfalto, si se pudo observar cual podría ser el mejor aditivo espesante y el mejor asfalto a utilizar.

2.1.5. Análisis de resultados. Para poder concluir acerca de los resultados del estudio, se realizaron los análisis pertinentes a cada prueba realizada.

2.2. MATERIALES EMPLEADOS

2.2.1. Agregado mineral.

- **Procedencia:**

Todos los ensayos fueron realizados con material triturado proveniente del río Chicamocha, extraído del sector denominado Pescadero.

- **Tamaño máximo nominal:**

Este se denomina al tamaño de abertura del tamiz inmediatamente inferior a aquel en el cual se retiene una cantidad mayor o igual al 10% del peso total del material. En este caso se tiene el valor es de $\frac{1}{2}$ ".

- **Ensayos realizados al agregado:**

Los ensayos realizados al material granular y las correspondientes normas seguidas fueron:

- Granulometría (INV E-213)
- Petrología mineral
- Desgaste en la máquina de los ángeles (INV E-219)
- Sanidad frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio (INV E-220)
- Equivalente De arena (INV E-133)
- Índice de aplanamiento y alargamiento (INV E-230)
- Porcentaje de caras fracturadas (INV E-217)
- Peso específico del agregado grueso, fino y filler mineral (INV E-222,223)
- Porcentaje de absorción del agregado grueso, fino y filler mineral (INV E-232, 233)

Nota: En la prueba de Desgaste en la máquina de los Ángeles, fueron ensayadas por separado las muestras de rocas metamórficas e ígneas.

2.2.2. Asfalto modificado. Los asfaltos convencionales utilizados hasta ahora en vías colombianas han soportado las condiciones de tráfico hasta hace un tiempo, pero con el incremento del volumen de tráfico y el aumento de las cargas transportadas, sobre todo en algunas vías del país, se hizo necesario buscar nuevas alternativas para mejorar las capas de rodadura y para esto se llegó a la fabricación de asfaltos modificados.

La modificación del asfalto con aditivos, es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo del ligante en la pavimentación de las vías. Consiste en la adición de polímeros al asfalto convencional con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores de tránsito y clima.

El principal objetivo del polímero es obtener un ligante más viscoso y de mejor adhesión.

Aunque este trabajo pretendía ser la continuación de los anteriores estudios, no fue posible obtener el mismo asfalto que estos, debido a que éste ya fue mejorado en algunas características, ahora se denomina CARIPHALTE PM - Tipo III, producido por la planta Shell Colombia S.A., por tanto este es el asfalto utilizado para este estudio.

2.2.3. Aditivos espesantes. La mezcla denominada SMA, se caracteriza por el alto contenido de asfalto, por lo que se incurre en un problema de exudación que debe ser controlado. Esto se ha logrado en países que producen dicha mezcla, con fibras de celulosa, que no modifican químicamente el bitumen pero intervienen en las propiedades físicas permitiendo incrementar el contenido del mismo sin inconvenientes.

La fibra ayuda a la adhesión del ligante al agregado mineral, evitando que este drene de la mezcla durante el tiempo transcurrido desde que se produce hasta que es colocada y compactada en el sitio.

- **Antecedentes**

Año 2006:

La celulosa añadida a la mezcla SMA, fue CELLOSIZE QP 52000H, esta no es producida específicamente para esta aplicación, como ocurre en países como Alemania, España, México y Estados Unidos, donde existen empresas dedicadas a la producción de fibra especialmente para mezclas SMA. Tiene una textura granular fina y fue dosificada en una cantidad del 0.4% en peso total, agregada un instante antes de la mezcla y si calentarse previamente. Esta fue inadecuada para este propósito al presentar comportamiento inapropiado ante la acción de agua convirtiéndose en gel.

Año 2007

En este estudio fueron utilizadas cenizas volantes, proveniente de una central termoeléctrica. Aunque esta ha sido utilizada para estabilizar bases granulares en el hormigón, se encontró que aporta resistencia a la mezcla, pero no evita la exudación. El porcentaje de ceniza agregado fue el mismo en volumen empleado por la celulosa, es decir 1.5% en peso.

Año 2008

Para el estudio realizado en este año fue utilizado caucho molido reciclado. Fue dosificado en una proporción del 1.3% del peso de la mezcla. Se encontró que los granos de caucho no permiten la fricción entre partículas y transmisión de esfuerzos entre las mismas, disminuyendo la resistencia y aumentando el flujo de la mezcla comparada con las características típicas de una mezcla SMA.

2.2.4. Fique. El fique es una planta originaria de América Tropical, se cultivó de manera particular en las zonas andinas de Colombia, Venezuela y Ecuador; en nuestro país su siembra se realiza en la parte alta de la sierra templada y fría. Su cultivo es óptimo en climas templados y secos, en temperaturas que oscilan entre los 19° y 32° centígrados, con una humedad relativa entre 70 y 90%, y una pluviosidad de 300 a 1600 mm. anuales, a una altitud entre 1300 y 2800 m.s.n.m. De acuerdo al reporte de las URPAS y UMATAS, en el año 2002, la participación departamental de la producción nacional ubicó a Cauca, como el primer productor de fique en el país, al señalar una participación de 39.9% sobre el total producido, seguidos de los departamentos de Santander, Nariño y Antioquia, como los más representativos.

En Colombia las especias cultivadas y aprovechadas como textiles son Furcracea Macrophylla, Furcracea Cabuya, Furcracea Castilla. Desde hace varios siglos se ha extraído la fibra de fique, con el fin de emplearla en la elaboración de productos artesanales. Sin embargo la rentabilidad de estos cultivos sigue siendo poco atractiva para el agricultor, por esta razón se hace necesario adelantar proyectos de investigación que estén orientados a mejorar los frentes de producción y aprovechamiento del fique.

Figura 5. Planta de fique



FUENTE: <http://www.colombia.travel/es/images>

- **La fibra de fique**

Las fibras vegetales están constituidas por ligamentos fibrosos, que a su vez se componen de micro fibrillas dispuestas en capas de diferentes espesores y ángulos de orientación, las cuales son ricas en celulosa. Las diversas células que componen una fibra se encuentran aglomeradas por la mela intercelular, compuesta por hemicelulosa, peptina y principalmente lignina. La región central de la fibra también puede presentar una cavidad denominada lacuna. Las lacunas y los lúmenes son responsables de la gran incidencia de poros permeables en las fibras, ya que absorben una cantidad elevada de agua.

Las fibra de fique son duras, pues provienen de los haces vasculares, principalmente del xilema. Los haces mecánicos del fique están constituidos de fibras elementales o fibrillas, soldadas entre si como una cera o goma. Las

extremidades de estas fibrillas se superponen para formar unos largos filamentos multicelulares a lo largo de la hoja; dichos filamentos pluricelulares son la “fibra”.

Las fibras de fique son llamadas “fibras estructurales” porque su principal función es sostener y dar rigidez a las hojas. Cuando se extraen, se presentan en forma de ejes de más o menos largos (0.50 a 0.30m) y de espesor variable ($1/10$ a $1/13$ mm. de diámetro), la sección transversal de la fibra en un mismo hilo es variable y por lo tanto siempre que se trate de señalar un diámetro, debe hablarse de diámetro promedio.

- **Modulo de elasticidad del fique**

“Para determinar el módulo de elasticidad de la fibra de fique fueron realizadas algunas pruebas tomando lecturas (carga, elongación) entre el inicio de la aplicación de la carga y la carga última. Estas pruebas se realizaron en el laboratorio de control de calidad de la empresa EXTRUCOL S.A., donde se cuenta con una máquina universal de pruebas TINIUS OLSEN serie 10000, esta máquina permite realizar algunas medidas (carga, elongación) antes de que ocurra la falla, pues registra las mediciones digitalmente. Para este ensayo la longitud de la fibra utilizada en el montaje fue de 10 cm”⁴

⁴ RAMIREZ, Jorge. Utilización de la fibra de fique como agregado en la fabricación de productos aglomerados. EN: Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander.

Figura 6. Instrumentos para medir resistencia a tensión



FUENTE: PARRA, Andrés. Comportamiento del concreto hidráulico con adiciones de fibra.

Figura 7. Instrumento para medir diámetro de la fibra



FUENTE: PARRA, Andrés. Comportamiento del concreto hidráulico con adiciones de fibra.

- **Densidad real**

Para el cálculo de estas se tienen los siguientes datos y resultados:

Tabla 3. Calculo de la densidad del fique

		Muestra (g)
A	Peso Picnómetro + Etanol	268,650
B	Peso de la muestra en condición saturada	3,066
C	Peso del Fique + Picnómetro +Etanol	270,265
D	Peso de la muestra en seco	2,820

Tabla 4. Cálculo de la densidad real.

		Muestra (g)
Gravedad Especifica Real	$D/(A-C+B)$	0.831

Tabla 5. Comparación de porcentajes en peso para las diferentes fibras

	Celulosa	Ceniza	Caucho	Fique
Densidad (g/cm ³)	0,61	2,30	0,77	0,83
% Peso	0,40	1,51	1,30	0,27
Peso (g)	4,80	18,10	15,60	3,20
Volumen (cm ³)	7,87	7,87	20,26	3,85

Tabla 6. Granulometría del fique

Característica	Valor
Diámetro Prom.(mm)	0,2318
Longitud (mm)	5
Densidad (g/cm ³)	0,83
% Absorción	8,7
Res. tracción (ton/cm ²) *	3,85 - 7,0

* FUENTE: RAMIREZ, Jorge. Utilización de la fibra de fique como agregado en la fabricación de productos aglomerados. EN: Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander.

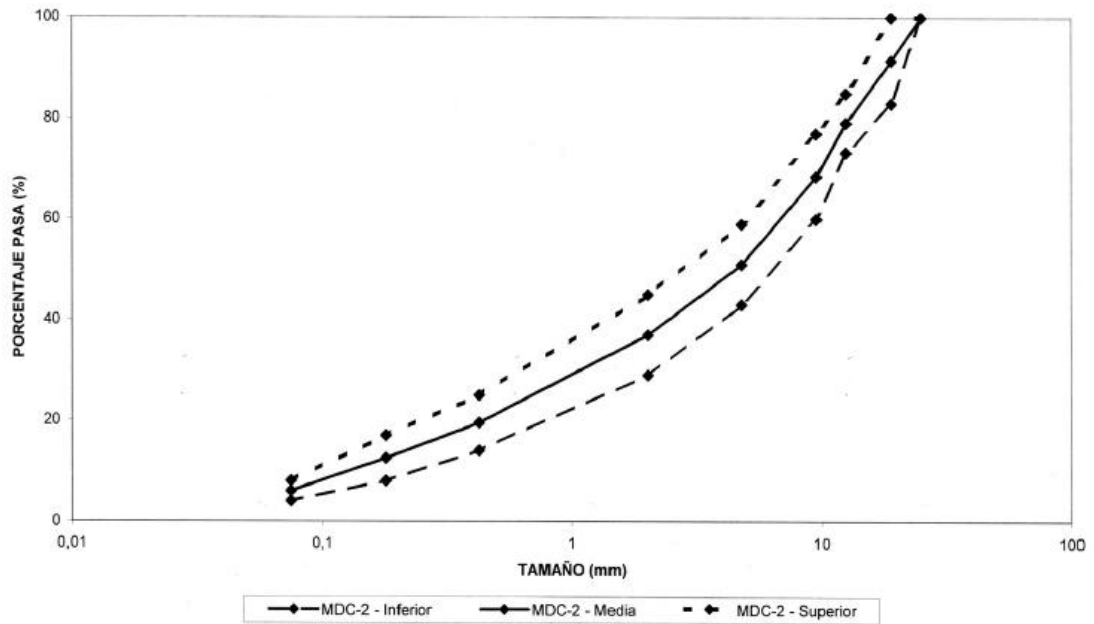
2.3. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS.

2.3.1. Granulometrías recomendadas.

- **Gradación S.M.A.:** La norma Alemana ZTV Asphalt define la granulometría del SMA en función del espesor de la capa de rodadura compactada, que debe medir entre 1.5 y 4 cm.; por lo general, este grosor es de 2.5 a 3 veces el tamaño máximo nominal del árido. Las curvas granulométricas extraídas de esta norma, son clasificadas en los siguientes rangos de ancho de capa: 3.5 – 4cm., 3 – 4cm., 2.5 – 3.5cm. y 1.5 - 2.5cm. El agregado empleado en este diseño tiene un TMN de 1/2 “, es decir, que el espesor de la capa compactada debe estar entre 1.25 y 1.5” (3.18 y 3.81cm.); por lo tanto hemos empleado la granulometría que corresponde al rango de 3 – 4cm., que hace referencia a la mezcla llamada 0/8s.
- **Gradación MDC – 2**

Los límites granulométricos exigidos por el INVIAS para este tipo de mezcla se encuentra en el artículo 450 – 02.

Figura 8. Granulometría MDC - 2



Fuente: Norma colombiana, Instituto Nacional de Vías, INVIAS.

2.3.2. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto. El ensayo Marshall permite seleccionar el contenido óptimo de asfalto promediando los valores correspondientes a la densidad y estabilidad máxima y el valor medio del porcentaje de vacíos con aire permitido en las especificaciones; sin embargo, antes de fabricar las probetas, este puede calcularse por medio de ecuaciones empíricas, facilitando la selección de las cantidades de asfalto que serán analizadas.

Este valor se determina para elaborar probetas con porcentajes de asfalto por debajo y por encima de este, (al menos dos por debajo y dos por encima), para obtener el comportamiento de las mezclas elaboradas similar al real.

- **Ecuación de Duriez.**

La ecuación de duriez permite calcular el porcentaje óptimo de asfalto respecto al peso total de la mezcla, principalmente con base en su gradación, mediante la siguiente ecuación:

$$\%asfalto = K * \alpha * S^{\frac{1}{5}}$$

El valor de α corresponde al módulo de riqueza, una constante proporcional a la película de betún que recubre el árido que se elige de acuerdo al tipo de mezcla, sin tener en cuenta su gradación.

$$100 * Sa = \frac{G}{4} + 2.2g + 12A + 150F$$

En donde:

Sa: superficie específica del agregado.

G: % pasa tamiz $\frac{1}{4}$.

g: % pasa tamiz $\frac{1}{4}$ -% retenido tamiz N° 60.

A: % pasa tamiz N° 60-% retenido tamiz N° 200.

F: %pasa N° 200.

- **Porcentaje óptimo de asfalto en las mezclas.**

La cantidad óptima de asfalto, sirve de referencia para su dosificación en el diseño.

Para una mezcla SMA, del estudio en proceso, el porcentaje óptimo de, según la ecuación de Duriez, es 6.55.

Tabla 7. Porcentaje óptimo de asfalto

TIPO DE MEZCLA	K	α	% OPTIMO DURIEZ
MDC - 2	3,2	1	5,25
SMA	3,7	1	6,56

FUENTE: SERRANO, Jorge. Aditivos para producir mezclas asfálticas de alta resistencia a la deformación permanente. EN: Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander

2.3.3. Metodología usada para fabricación de probetas. Las probetas fueron fabricadas según la metodología Marshall (INV E-748) con un peso total de la mezcla de 1200 gramos. Este método fue planteado por Bruce Marshall en el departamento de carreteras de Mississippi y permite determinar la proporción adecuada de asfalto en una mixtura de granulometría dada, para darle suficiente estabilidad y trabajabilidad; solo puede emplearse en el diseño de mezclas en caliente con agregado de tamaño máximo de 1”.

- **Número de probetas fabricadas.**

Las norma de INVIAS recomienda fabricar para cada mezcla 3 muestras por contenido de asfalto. Generalmente se diseñan probetas para 5 contenidos diferentes con incrementos del 0.5% del peso total, con el fin de evaluar detalladamente su comportamiento y omitir resultados incoherentes, que reflejen errores ocasionado durante el proceso de fabricación y medición.

En este estudio fueron fabricadas tres probetas por contenido de asfalto y analizados cuatro contenidos con incrementos de 0.5% en peso, más tres probetas sin adición de fibra, para un total de 15 probetas.

- **Temperatura de mezcla y compactación**

Las probetas fueron fabricadas garantizando una temperatura de mezcla y compactación de 160°C y 150°C respectivamente, de acuerdo a las recomendaciones del productor del asfalto empleado.

- **Nivel de compactación de probetas**

Depende de número de golpes por cara que se aplique durante el ensayo, entre mayor sea más altas serán las densidades obtenidas y menores los contenidos óptimos de asfalto necesario.

Tabla 8. Nivel de compactación de la mezcla

MEZCLA	Golpes por cara
MDC - 2	75
SMA	50

2.4. MÉTODO MARSHALL PARA ELABORACIÓN DE PROBETAS

- **Selección de los materiales**

La granulometría mineral y el porcentaje de fibra a emplear en la fabricación de las probetas SMA lo recomienda la norma como se indica en la tabla 1 para agregado mineral y tabla 6 para granulometría de la fibra.

- **Calentar Materiales**

Tanto el asfalto como los agregados se calientan en una estufa a 160°C, a la temperatura recomendada para la mezcla. La fibra de fique no se calienta previamente.

- **Preparación de los moldes**

Antes de realizar la mezcla de materiales, los moldes deben estar debidamente engrasados y calentados a temperatura de mezcla, para poder compactar la misma, con los filtros de papel para que esta no se adhiera a los moldes.

- **Mezcla de los materiales**

Una vez alcanzada la temperatura adecuada (160°C), a la mezcla se le incorpora rápidamente la fibra de fique del tamaño seleccionado, mezclando constantemente hasta obtener un producto visiblemente homogéneo; finalmente se adiciona el ligante modificado y se mezcla hasta que todas las partículas queden cubiertas.

- **Compactación**

Se introduce la mezcla en los moldes y se compactan con ayuda del martillo según se indica en la tabla 8.

- **Extracción de la probeta**

Una vez realizada la compactación se debe dejar enfriar la probeta garantizando la adherencia de la mezcla y evitando de la deformación de la misma al momento

de la extracción, esto lleva alrededor de un día, luego con la ayuda de un gato hidráulico se extrae del molde.

Figura 9. Mezcla lista para compactar

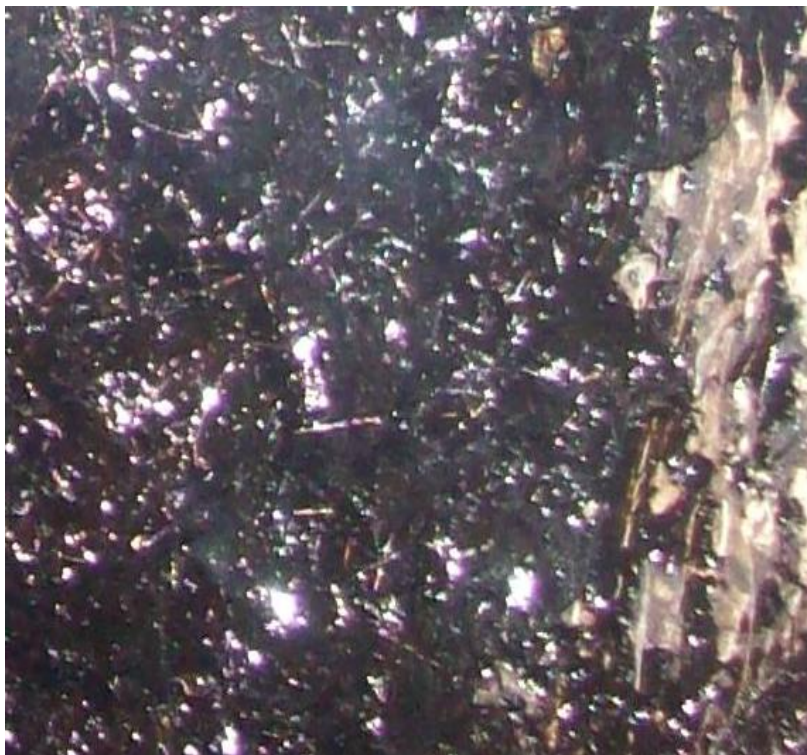


Figura 10. Pesado de la mezcla



Figura 11. Proceso de compactación



Figura 12. Probeta tipo SMA



2.5. ENSAYOS

El diseño de pavimentos por métodos mecánico-empíricos, al igual que el de otras estructuras de la ingeniería civil, se basa en determinar el comportamiento de las mismas ante los posibles esfuerzos críticos a que puedan estar sometidas, mediante diferentes ensayos realizado a una serie de probetas que representen la estructura real. Como resultado de estos ensayos se toma la decisión de utilizar o modificar el diseño de las estructuras.

De este modo para evaluar la resistencia de la mezcla SMA se realizaron los siguientes ensayos:

2.5.1. Análisis de escurrimiento del asfalto. Está demostrado que el uso de mezclas en caliente discontinuas ofrece una mayor duración, estabilidad, flexibilidad, resistencia al deslizamiento, disminución del

salpicado de agua y menos ruido en la vía, además del bajo costo comparado con mezclas convencionales.

A pesar de las anteriores ventajas, hay un inconveniente a superar, que es el escurrimiento de asfalto del agregado mineral que se produce por el alto contenido de este, necesario para lograr las ventajas mencionadas.

Los países que ya utilizan esta mezcla, solucionaron este problema agregándole fibras de celulosa producidas especialmente para ello. Solución que en Colombia sería muy costosa, pues no se producen las fibras para este fin. En aras de reemplazar estas fibras con otras que nos resulten más económicas, la Universidad Industrial de Santander ha hecho una serie de estudios con diferentes fibras, como son la Cellocize QP 52000H, ceniza volante, caucho reciclado y ahora en este estudio, el fique.

El primer parámetro que se seleccionó para el control del escurrimiento del asfalto en la mezcla, fue la longitud de la fibra de fique, aunque atendiendo a las recomendaciones para el tamaño de las fibras, que es aproximadamente 6mm, se escogió el criterio según observación, utilizar un tamaño tal que al realizar el mezclado, la fibra quedara en lo posible adherida en toda su longitud al agregado y no se observaran puntas sueltas; esto debido a que esta no es del todo flexible e iba a adherirse solo sobre las caras planas del agregado, además de esto, debía ser corta para que no se formaran grumos de fibra al momento de la mezcla con la espátula. Se realizaron mezclas con tamaño de fibra de 3, 5, 7, y 9mm, y siguiendo este criterio se optó por trabajar con una longitud de fibra de 5mm.

Luego se realizaron 3 mezclas sin compactar por cada contenido de fibra iniciando con una cantidad de fibra de 1g. y se fue incrementando cada gramo hasta llegar a 5g, además tres mezclas sin fibra, para un total de 18 mezclas.

Luego, para fabricar las probetas con los diferentes contenidos de asfalto, se decidió hallar la relación en volumen del fique – asfalto, teniendo en cuenta la densidad de estos dos.

En este estudio se utilizó el método de Schellenberg, para la evaluación del escurrimiento, método que ha sido estandarizado y normalizado hace algún tiempo por la unión europea en la norma Aglomerado drenante: escurrimiento de asfalto – mezclas bituminosas UNE-EN-12697-18 y su procedimiento es el siguiente:

- Se prepara la mezcla asfáltica de 1000 g o si es método Marshall 1200 g.
- Se introduce los 1000 g de mezcla en un vaso de precipitado pesado a la décima de gramo.
- Tapar el vaso donde se coloca la mezcla y se introduce durante una hora en un horno a la temperatura de mezcla (160 grados)
- Sacar del horno e inmediatamente voltearlo sobre un recipiente durante 10 segundos.
- Pesar el material depositado en el vaso de precipitado.
- Sacar el porcentaje de mezcla que quedó depositado en el vaso de precipitado, si este es menor que el 0.3 % se concluye que el escurrimiento es aceptable.

- Si el escurrimiento es mayor al 0.3 % se lava el vaso de precipitado con gasolina para disolver el ligante y el material restante se filtra sobre un tamiz de 1 mm.
- El material que queda en el tamiz se seca y se pesa.
- Este material se suma al depositado en el vaso y se vuelven a calcular porcentajes para decidir si es aceptable o no el escurrimiento de la mezcla.

NOTA:

- La probeta a fabricar para el control de escurrimiento fue de 1000 g y no de 1200 como lo requiere el método Marshall, pudiendo considerar el resultado como aceptable.
- Las dimensiones del vaso de precipitado usado son 98 mm de diámetro por 136 mm de alto para un volumen nominal de 850 ml.
- Al voltear el vaso de precipitado, no se debe agitar, ni utilizar utensilios para retirar el material.
- El porcentaje de escurrimiento máximo permitido es del 0.3 % del peso de la mezcla.
- En este ensayo no se utilizó la segunda opción de lavar y pesar el material granular adherido al vaso ya que este era menor a 1 mm.

Figura 13. Tamaño de fibra inadecuado

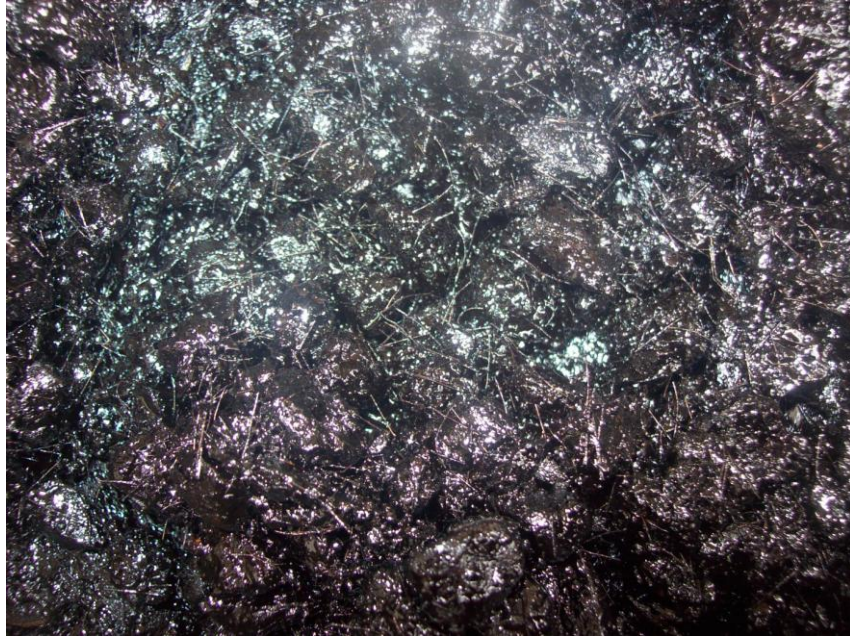


Figura 14. Vaciado de la mezcla



Figura 15. Escurrimiento de la mezcla



Para determinar si la dosificación de la fibra de fique fue adecuada se realizó nuevamente el ensayo de escurrimiento a las probetas, esto indica si es correcto dosificar el fique con relación al porcentaje de asfalto. Para esto se aplicó nuevamente el método de Schellenberg, aunque utilizando una muestra de mezcla de 700 g.

2.5.2. Medición de la densidad Bulk. Otro ensayo importante para el diseño de mezclas es la determinación de la gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica compactada.

Este ensayo es útil para calcular el porcentaje de vacíos de aire en el diseño Marshall. Los especímenes utilizados para este ensayo fueron las mismas probetas fabricadas para realizar los demás ensayos.

El ensayo se encuentra contemplado en la norma INV E – 734 – 07, y contiene el cálculo de la gravedad específica y densidad bulk para muestras de asfalto parafinadas. Ya que la mezcla SMA es de textura superficial abierta esta densidad fue calculada considerando que su volumen se determina por la diferencia entre su peso en el aire y su peso sumergida en el agua previamente parafinada.

El contenido de vacíos con aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VAF) de las probetas compactadas, fue determinado de acuerdo al método Marshall para diseño de mezclas de agregados con cemento asfáltico.

El siguiente es el proceso resumido para la determinación de la densidad bulk:

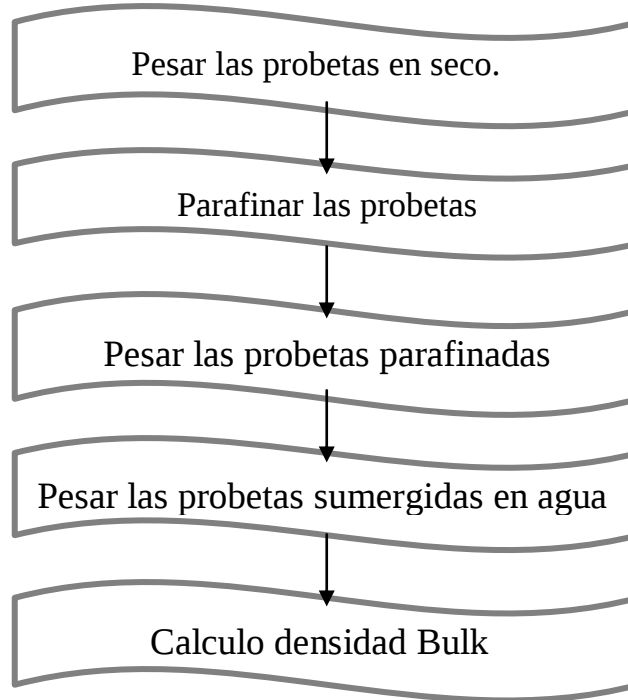


Figura 16. Probeta pesada al aire



Figura 17. Probetas parafinadas



Figura 18. Probeta parafinada pesada



Figura 19. Pesado probeta sumergida



2.5.3. Determinación del módulo elástico a 7.5 °C. El modulo elástico o módulo de Young es el parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica la fuerza. Para un material elástico lineal e isótropo, el modulo de Young tiene el mismo valor para la tracción que para la compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo limite elástico, y es siempre mayor que cero.

Una de las principales limitantes del ensayo Marshall, una de las pruebas más recurridas en América para el diseño de mezclas asfálticas para pavimentos es que los parámetros obtenidos, esto es, estabilidad y flujo, no pueden ser utilizados directamente como parámetros para un diseño

estructural de pavimentos, sino solo a través de correlaciones. Las especificaciones de diseño para mezclas asfálticas contemplan límites para estos parámetros por separado y en recurrentes oportunidades el diseñador se encuentra con la realidad de que la mezcla cumple con la estabilidad pero no con el flujo. En el trabajo se desarrolla y aplica una solución teórico-experimental para obtener un modulo de elasticidad de una mezcla asfáltica compactada a partir del ensayo Marshall, con lo que se resuelve la limitante de este difundido ensayo, y sus resultados se pueden usar directamente en el diseño y revisión de estructuras de pavimento.⁵

Este ensayo pretende determinar el comportamiento de la mezcla a bajas temperaturas, aplicando una deformación controlada que garantice que esta se encuentra dentro del rango elástico. El límite de deformación empleado en este ensayo, se fijo en 0.5 mm.

NOTA:

- La velocidad con que se aplicó la carga se fijo en 0.05 pulg./min.
- La lectura de deformación debe ser tomada cada línea, hasta la máxima carga de aplicación para el ensayo.
- Para garantizar que las lecturas tomadas corresponden a los valores reales de las probetas, se aplicó carga varias veces antes de tomar al menos dos

⁵ SERRANO, Jorge. Aditivos par producir mezclas asfálticas de alta resistencia a la deformación permanente. EN: Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, 2007.

lecturas muy similares; esto con el fin de que después de lograr cierto acomodamiento de las partículas, se tenga la lectura real del valor.

El siguiente es el proceso resumido para la determinación del módulo elástico a 7.5 °C:

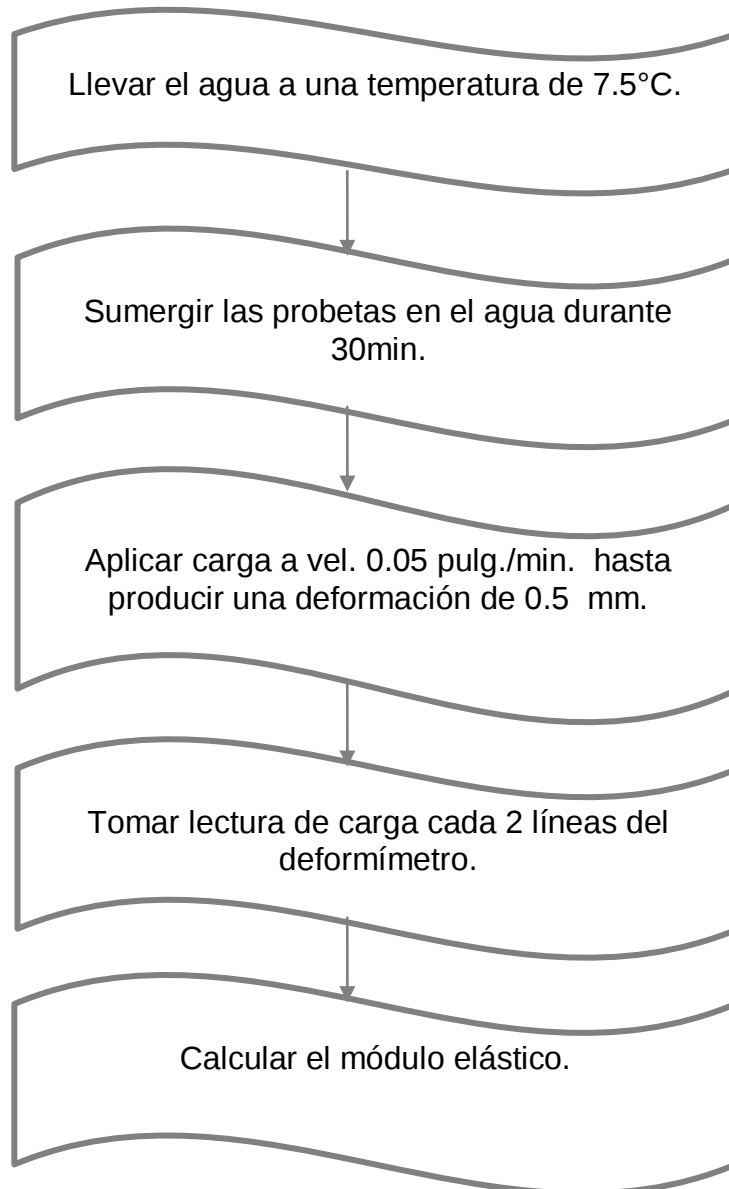


Figura 20. Probeta sumergida en agua a 7.5°C



Figura 21. Ensayo módulo elástico



2.5.4. Ensayo Creep sin confinar a 60° C (Carga estática). Las mezclas asfálticas son materiales visco elásticos cuyas propiedades, dependientes de la temperatura y la frecuencia de aplicación de las cargas, condicionan su posterior comportamiento en servicio. El ensayo Creep con o sin confinamiento lateral y con carga estática ha sido muy utilizado para evaluar las características de las mezclas asfálticas y sus resultados fueron usados en varios métodos de predicción del ahuellamiento.

Es de los ensayos más ampliamente utilizados debido a su simplicidad. Sus resultados expresan la evolución de la deformación específica permanente en función del tiempo, para una carga aplicada a la temperatura del ensayo. Se someten las probetas a un ensayo de compresión vertical con carga estática, sin confinamiento lateral para condiciones prefijadas de carga y temperatura. Los resultados encontrados solo permiten comparar el comportamiento de la mezcla ante la deformación acumulada.

NOTA

- Para garantizar la veracidad del ensayo (60 °C), se mantuvo la temperatura durante este, cambiando continuamente el agua con ayuda de mangueras.
- La carga debe ser constante y se fijo en 10 líneas en el deformímetro de carga, para un equivalente a 101.25 libras.
- Como el cambio más notorio en este ensayo ocurre en los primeros 2 minutos, se tomaron lecturas cada 10 segundos durante el primer minuto, cada 15 segundos en el segundo minuto y luego lecturas cada 2 minutos hasta completar una hora.

El siguiente es el proceso resumido para realizar el ensayo Creep sin confinar a 60 °C:

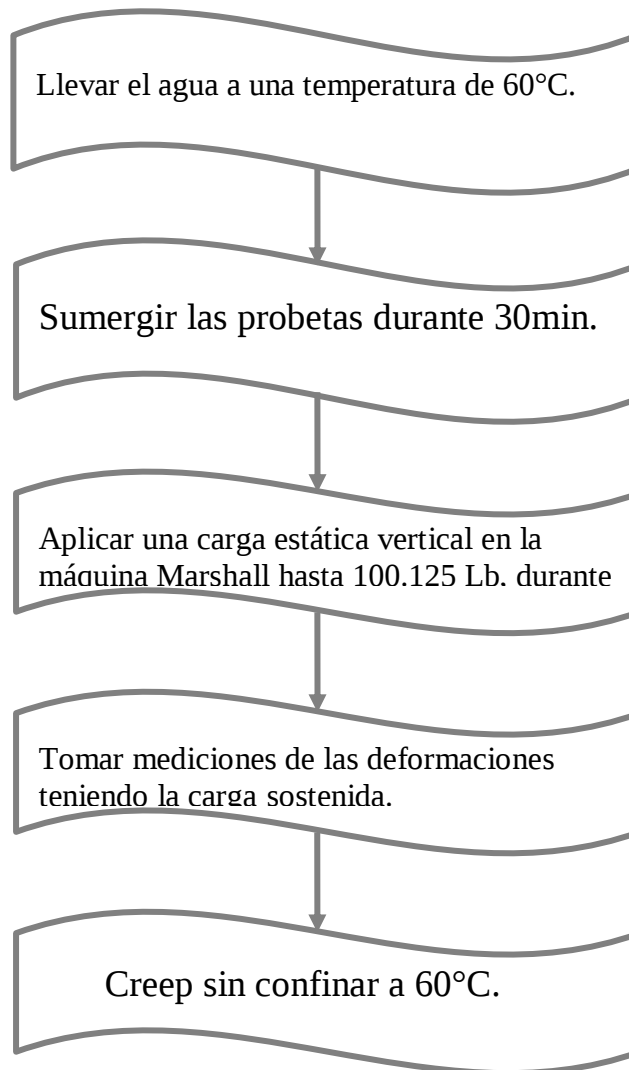


Figura 22. Calentamiento probetas a 60 °C



Figura 23. Ensayo Creep sin confinar (60°C)



2.5.5. Estabilidad y flujo. Este ensayo indica la resistencia máxima que puede soportar la mezcla compactada da una idea de su comportamiento al ser aplicada la carga. La norma INV – E- 748 – 07, describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas para pavimentación, empleando el aparato Marshall. El procedimiento es utilizado tanto para muestras de laboratorio como de campo. Es aplicable a mezclas elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos con tamaño máximo menor o igual a 1”.La máxima lectura expresada en libras que se obtiene en el ensayo, corresponde a la máxima carga que soportará la mezcla si es aplicada en una capa de rodadura y el flujo asociado a esta carga es la deformación máxima que sufrirá al soportar esta carga.

Para realizar el ensayo, las probeta fueron llevadas a un baño de agua a 60 °C durante media hora y luego se aplicó sobre ellas, por medio de la maquina Marshall, carga a una velocidad de 2 Pulg/min hasta producir la falla. La estabilidad indica la máxima carga que soporta la probeta justo antes de producirse la fractura y el flujo indica la máxima de formación que produce esta carga.

NOTA:

La velocidad de la máquina Marshall de la Universidad Industrial De Santander es de 2pulg. /min.

Figura 24. Ensayo Estabilidad y Flujo



Figura 25. Probeta fallada



2.5.6. Cálculo de porcentaje de vacíos. Los vacíos del agregado mineral (VMA), los vacíos llenos de aire (Va) y vacíos llenos de asfalto (VFA) que contenga una mezcla, deben tener un valor determinado dependiendo del diseño de la misma, pues proporciona diferente comportamiento a la carpeta asfáltica; de ahí que sea muy importante calcularlos y controlarlos. Para poder calcular estos datos es necesario conocer la Gmm (Gravedad específica máxima teórica) contemplada en INV – 735 – 07.

Después de realizar los ensayos de estabilidad y flujo, se realizaron los ensayos de densidad y vacíos para cada una de las probetas, contemplados en la norma INV – 736 – 07. Se determina la gravedad específica máxima para todos los contenidos de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calcula con estos valores.

Utilizando las diferentes gravedades del material granular, de las mezclas y gravedad específica del asfalto, se calcula el porcentaje en peso de asfalto absorbido por el agregado seco, porcentaje de vacíos (Va), porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

Este ensayo junto con los demás permite evaluar si la granulometría utilizada es adecuada o no, y a su vez permite, dependiendo de los demás resultados, tomar la decisión de modificar algunos aspectos de la granulometría para obtener una mezcla que se ajuste a las características deseadas.

NOTA:

- Las probetas que se van a utilizar para calcular porcentaje de vacíos, se deben calentar lo suficiente para que permita separarlas en fracciones muy pequeñas.

Figura 26. Extracción de aire de la mezcla



3. RESULTADOS DE LABORATORIO

En este capítulo se presentan los valores promedio de las pruebas realizadas en el laboratorio, las características físicas de los materiales utilizados y las características mecánicas obtenidas de las probetas fabricadas.

3.1. AGREGADOS

3.1.1. Caracterización de los agregados. Los ensayos y resultados que se mencionan aquí establecen las características físicas y de resistencia de los materiales utilizados. El detalle de las pruebas, se puede observar en la sección de anexos.

Aquí podemos ver el resumen de todos los ensayos a los que fueron sometidos los materiales utilizados en la fabricación de las probetas SMA y MDC-2.

Tabla 9. Caracterización de agregados pétreos

ENSAYO	NORMA	ESPEC. (INV. Art. 400)		METODO		Mezcla SMA	VALOR
		Mezcla densa en caliente	mezcla discont. en caliente				
	INV			AASHTO	ASTM		
Granulometría	E - 213	-	-			-	-
Ind. Alargamiento	E - 230	30% Máx.	25% Máx.		D4791	20 % Máx.	17,7%
Ind. Aplanamiento	E - 230	30% Máx.	25% Máx.		D4792	20 % Máx.	24,6%
Desgaste Los Ángeles	E - 219	25% Máx.	25% Máx.	T 96		30 % Máx.	24,0%
% caras fracturadas	E - 227	75% Min.	75% Min.			90 % Máx.	90,9%
Solidez	E - 220	12% Máx.	12% Máx.	T 104		15 % Máx.	0,8%
Equivalente de arena	E - 133	50% Min.	50% Min.			-	93,8%
Peso específico grueso	E - 223	-	-			-	2,7%
Peso específico fino	E - 222	-	-			-	2,7%
Peso específico filler	E - 222	-	-			-	2,5%
% absorción grueso	E - 223	-	-	T 85		2 % Máx.	0,7%
% absorción fino	E - 222		-	T 85		2 % Máx.	1,8%
% absorción filler	E - 222	-	-	T 85		2 % Máx.	0,5%

3.1.2. Petrología mineral de los agregados

Tabla 10. Composición mineralógica de los agregados

TIPO DE ROCA		
IGNEAS	METAMORFICAS	MIN. SUELTOS
65%	35%	5%

Fuente: Arenas Emilio. Análisis comparativo de propiedades de deformación en las mezclas MDC-2, MDC-3, M1 y Stone Matrix Asphalt. Universidad industrial de Santander, 2006.

3.2. ASFALTO

3.2.1. Características Reológicas del Asfalto. La caracterización reológica del asfalto modificado utilizado para este estudio, fue realizada por la planta Shell de Mosquera, Cundinamarca, según las normas ASTM / NLT. Los resultados son:

Tabla 11. Propiedades reológicas del asfalto

ENSAYO	METODO	ESPECIFICACION			RESULTADO
		MIN		MAX	
Penetración, 25°C, 5s, 100 g (mm/10)	ASTM D - 5	55		70	62
Punto de ablandamiento (°C)	ASTM D - 36	65			77
Ductilidad, 5 °c, 5 cm/min (cm)	ASTM D - 113	15			33,5
Recuperación elástica por torsión a 25 °C (%)	NLT - 329/91	70			70
Estabilidad al almacenamiento (Diferencia en					
el punto de ablandamiento) °c	E - 726 y E - 712			5	2,5
Punto de Chispa (°C)	ASTM D - 92	230			295
Contenido de agua (%)	ASTM D - 95			0,2	0
Peso específico a 25 °c	ASTM D - 71	Reportar			1,012
Temperatura de mezcla * (°c)	ASTM D - 1559		Reportar		160 - 165
Temperatura de compactación * (°c)	ASTM D - 1559		Reportar		150 - 155
ENSAYO EN HORNO DE PELICULA EN MOVIMIENTO, RTFOT, 85 min., 163 °c ASTM D-2872					
Perdida de masa (%)	ASTM D - 2872			1	0,1177
Penetración retenida (%)	ASTM D - 5	65			70
Ductilidad, 5 °c, 5 cm/min (cm)	ASTM D - 113	8			14

3.3. FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.3.1. Granulometría utilizada. La gradación seleccionada corresponde a un valor dentro de los rangos señalados en la norma ZTV Asphalt – StB

2001, indicado en la tabla 1, como rangos permitidos y se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 12. Gradación empleada SMA y MDC-2

TAMIZ N°	% QUE PASA	
	SMA	MDC – 2
3/4"		100
1/2 "	100	90
3/8"	75	79
No. 4	25	57
No. 8	20	
No. 10		37
No. 30	14	
No. 40		19,5
No. 50	12	
No. 80		12,5
No. 200	10	6

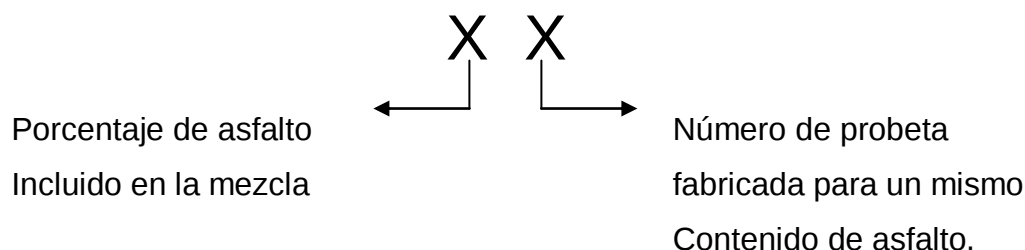
3.3.2. Porcentaje de asfalto utilizado. Con base en el porcentaje óptimo calculado por el método de Duriez, se utilizaron las siguientes cantidades de asfalto, adicionando valores por encima y por debajo de este:

Tabla 13. Porcentajes de asfalto empleados

MEZCLA	% DE ASFALTO EMPLEADO				TIPO DE ASFALTO
SMA	6,0	6,5	7,0	7,5	Cariphalte Tipo III
MDC	4,5	5	5,5	6	60 - 70

3.4. CARACTERIZACION DE LAS PROBETAS

3.4.1. Nomenclatura. Cada probeta fue identificada mediante dos caracteres, el primero indica el porcentaje de asfalto que contiene cada una, en forma creciente, 1 para 5.66% sin fique, 2 para 5.66% con fique, 3 para 6.5 % con fique, 4 para 7.0 % con fique y 5 para 7.5 % de asfalto. El segundo carácter varía entre 1, 2 y 3, y corresponde al número de probeta con el mismo contenido de asfalto.



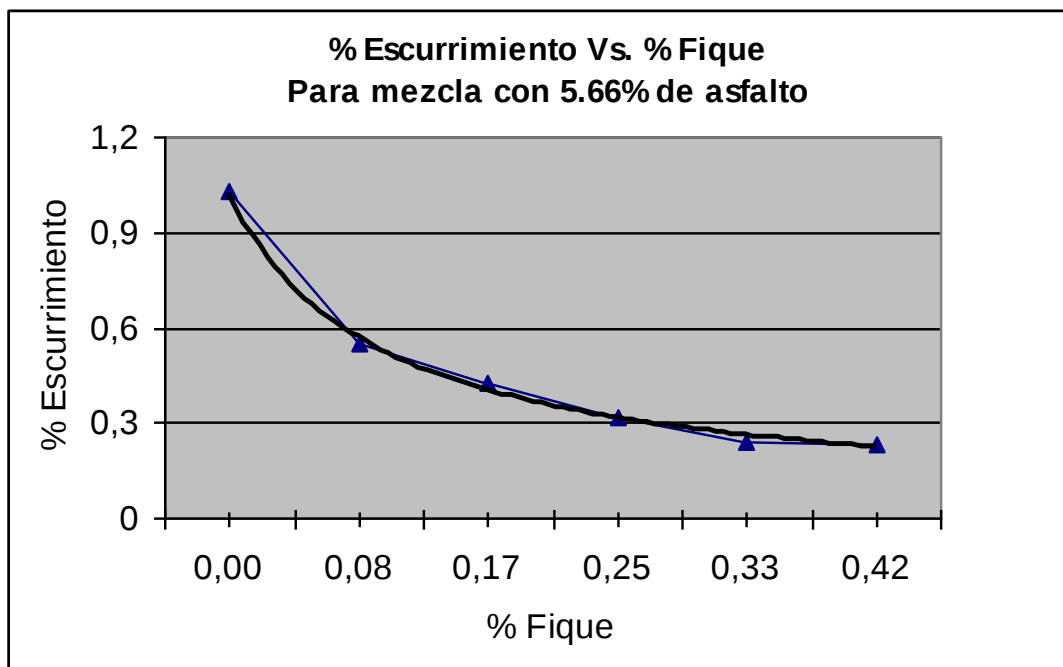
3.4.2. Geometría. La geometría de las probetas compactadas, que incluye su diámetro y altura ha sido medida tomando tres lecturas en cada una de ellas. El valor promedio de estos parámetros, puede observarse en el anexo B1

3.5. CONTROL DE ESCURRIMIENTO

Mediante el método Schellenberg, y con ayuda de la gráfica de % escurrimiento Vs. % de fique, se decidió el porcentaje óptimo de fibra, con el que se logra un escurrimiento no mayor del 0.3% del peso total de mezcla.

A continuación se observa la grafica de porcentaje de escurrimiento Vs. porcentaje de fique para un contenido de asfalto del 5.66% del peso total de mezcla:

Figura 27. Relación % de Ecurrimiento - % de Fique (del peso total de mezcla)



Después de encontrar la cantidad adecuada de fique que controla el escurrimiento de una mezcla con 5.66 % asfalto, se dosificó el fique en un valor de 5.41 % en volumen del asfalto, es decir un 4.44 % en peso, para fabricar las probetas con los diferentes incrementos de asfalto.

La relación en volumen y peso de la fibra de fique y el asfalto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 14. Relación Fique / Asfalto

% ASFALTO	ASFALTO		FIQUE	
	PESO (g)	VOLUMEN (cm ³)	(4,44%) PESO (g)	(5.41%) VOL. (cm ³)
5,66	72	71,15	3,20	3,85
6,5	78	77,08	3,46	4,17
7	84	83,00	3,73	4,49
7,5	90	88,93	4,00	4,81

Después de realizar las pruebas de escurrimiento a las probetas fabricadas con las cantidades de fibra de la tabla 14, se encontró que el escurrimiento de asfalto de las probetas fue igual a:

Tabla 15. Resultados de escurrimiento

PROBETA	% ESCURR.	PROM. % ESCUR.	EVALUACION
2-1	0,29	0,30	Cumple
2-2	0,30		
2-3	0,30		
3-2	0,32	0,32	No cumple
3-2	0,33		
3-3	0,32		
4-1	0,36	0,35	No cumple
4-2	0,35		
4-3	0,35		
5-1	0,36	0,36	No cumple
5-2	0,35		
5-3	0,38		

Con lo anterior se deduce que la relación asfalto/fique hallada para un contenido de asfalto de 5.66 %, no se puede generalizar para cualquier contenido de ligante.

Se debe hallar el porcentaje óptimo de fibra para cada contenido de asfalto, para garantizar que el escurrimiento no sobrepase el límite permitido; o de lo contrario incrementar en un poco el porcentaje óptimo de fibra, para que cumpla el escurrimiento con los diferentes contenidos de asfalto.

3.6. ANALISIS DE DENSIDAD Y VACIOS

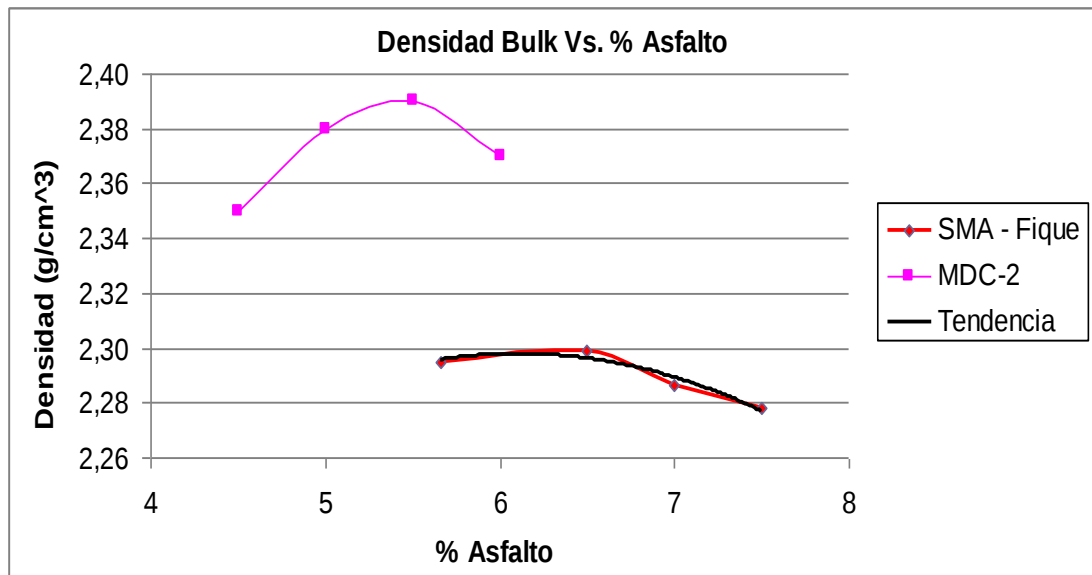
3.6.1. Densidad Bulk. Se define como la masa (peso en el aire) de un volumen dado de material a determinada temperatura, generalmente a 25

°C para mezclas asfálticas, y la masa de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

- **Curva peso específico Vs. porcentaje de asfalto.**

En la siguiente grafica se aprecia la variación del peso específico de las mezclas, de acuerdo al contenido de asfalto contenido en cada una de ellas.

Figura 28. Densidad Bulk mezclas SMA-Figue; MDC-2



3.6.2. Vacíos con aire. Estos vacíos están definidos como el volumen total de aire existente entre las partículas cubiertas de agregado, se expresa como porcentaje del volumen neto de la mezcla compactada. Generan en la mezcla una reserva de espacio que impide la exudación y pérdidas de estabilidad al producirse una pequeña compactación adicional, debida a las cargas del tráfico.

- **Curva de porcentaje de vacíos con aire Vs. porcentaje de asfalto**

La siguiente gráfica muestra la relación que existe entre el porcentaje de asfalto contenido en las mezclas y los vacíos que esta contiene.

Figura 29. Contenido de vacíos con aire

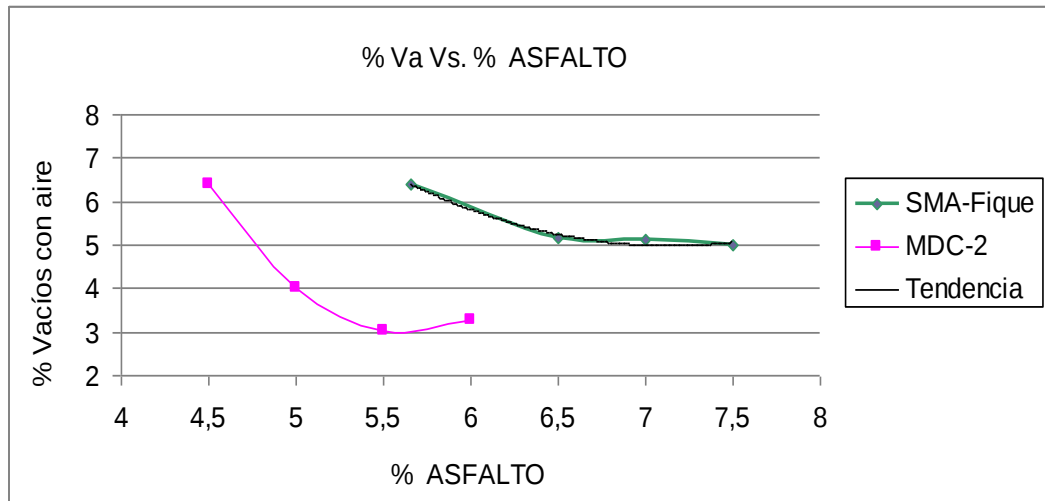


Tabla 16. Resultados contenido de vacíos SMA-Figue

% ASFALTO	%Va
5,66	6,41
6,5	5,15
7	5,12
7,5	5,02

Tabla 17. Resultados contenido de vacíos MDC-2

% ASFALTO	Va
4,5	6,4
5	4,032
5,5	3,017
6	3,273

El contenido de vacíos no puede superar el 4% del peso de mezcla, según las especificaciones para una mezcla SMA.

El contenido de vacíos de la mezcla SMA se encuentra por encima del límite permitidos, lo que indica que las probetas no cumplen con el contenido máximo de vacíos para una mezcla SMA.

3.6.3. Vacíos en el agregado mineral. Se define como el volumen de vacío intergranular entre las partículas del agregado; incluyen los vacíos con aire y el asfalto efectivo y se expresan como un porcentaje del volumen total de muestra.

- **Curva VAM Vs. porcentaje de asfalto**

Esta grafica muestra la variación de los vacíos en el agregado mineral, para cada una de las muestras, con los diferentes contenidos de asfalto.

Figura 30. Vacíos en el agregado mineral

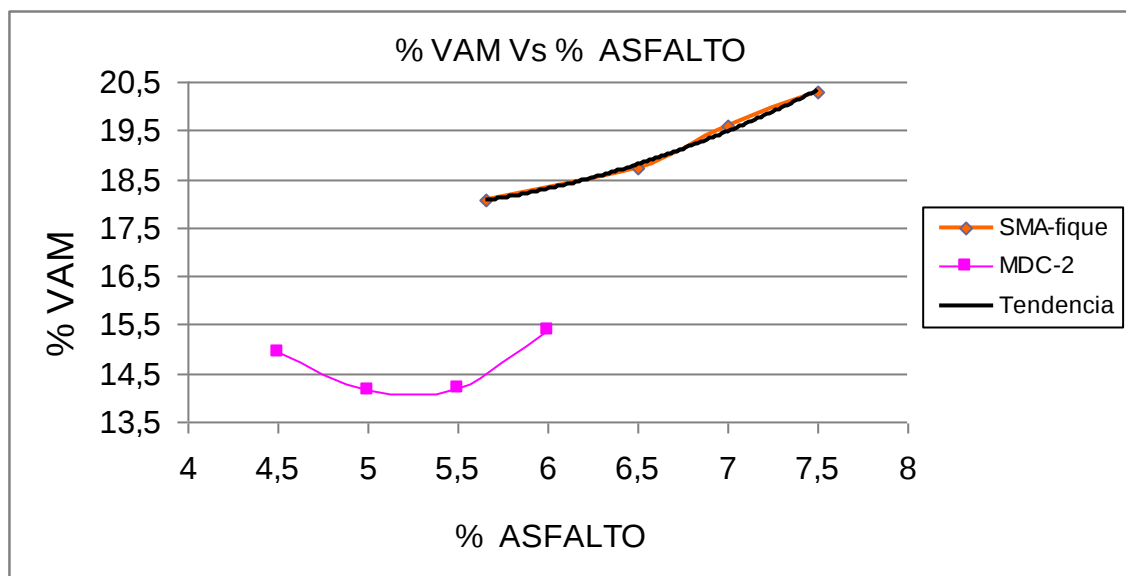


Tabla 18. Resultados VAM en SMA – Figue

% ASFALTO	VAM
5,66	18,07
6,5	18,71
7	19,58
7,5	20,29

Tabla 19. Resultados VAM MDC-2

% ASFALTO	VAM
4,5	14,922
5	14,142
5,5	14,197
6	15,398

Los resultados de la mezcla SMA en cuanto a vacíos en el agregado mineral, muestran un valor superior al especificado por las normas ASSTHO de 17%, Por tanto las probetas tienen un valor adecuado de vacíos en el agregado mineral.

3.6.4. Vacíos llenos de asfalto. Se definen como la porción del VAM, que está ocupada por el ligante efectivo de cada mezcla.

- **Curva VAF Vs. porcentaje de asfalto**

En la siguiente grafica se muestra la variación del porcentaje de vacios llenos de asfalto con el porcentaje de asfalto contenido en cada mezcla.

Figura 31. Vacíos llenos de asfalto

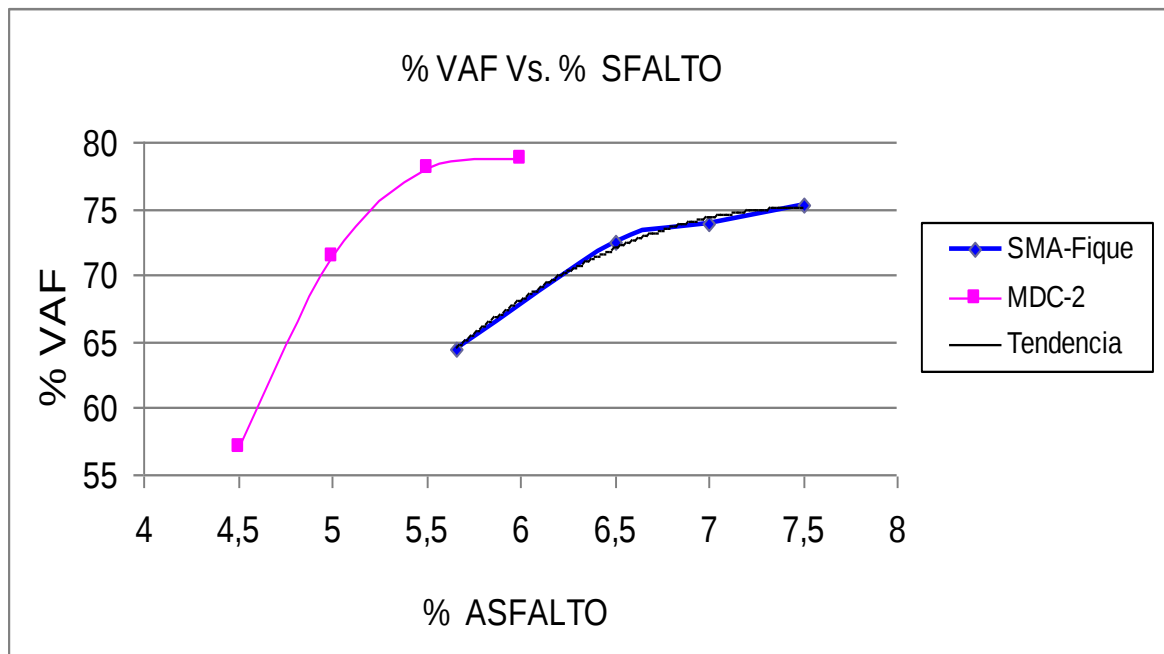


Tabla 20. Resultado vacíos llenos de asfalto, mezcla SMA

% ASFALTO	VAF
5,66	64,52
6,5	72,48
7	73,83
7,5	75,29

Tabla 21. Resultado vacíos llenos de asfalto, mezcla MDC-2

% ASFALTO	VAF
4,5	57,114
5	71,492
5,5	78,113
6	78,744

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto para mezclas SMA se encuentra por debajo del rango permitido para estas; entre 75% y 80%, encontrando que solo un contenido de 7,5% de asfalto cumple con esta condición.

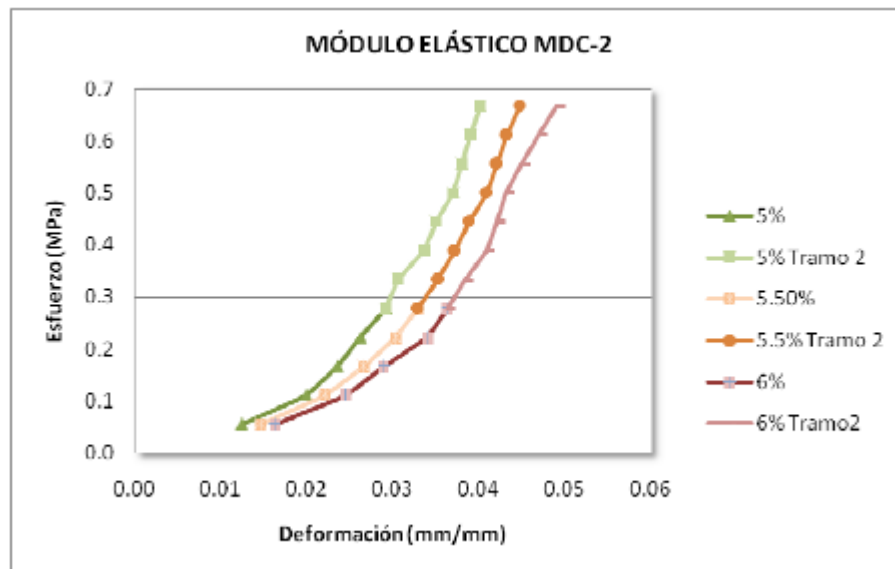
3.7. EVALUACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO

El módulo elástico o módulo de Young, está definido como la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria que experimenta un material ante la acción de una carga externa.

Durante el ensayo de las probetas SMA, se aplicó carga hasta lograr una deformación de 0.5 mm, con el fin de garantizar estar dentro de la zona elástica.

- **Mezcla MDC – 2. Curva esfuerzo Vs. deformación**

Figura 32. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria MDC - 2



Fuente: CONTRERAS, Néstor. Aditivos para producir mezcla asfálticas de alta resistencia a la deformación permanente, controlando el escurrimiento de asfalto, Universidad Industrial de Santander, 2008

- **Módulos de elasticidad**

Los módulos de elasticidad, calculados con base en las pendientes de las curvas obtenidas a partir de la relación esfuerzo / deformación, para los diferentes contenidos de asfalto son:

Tabla 22. Módulos elásticos de las mezclas MDC - 2

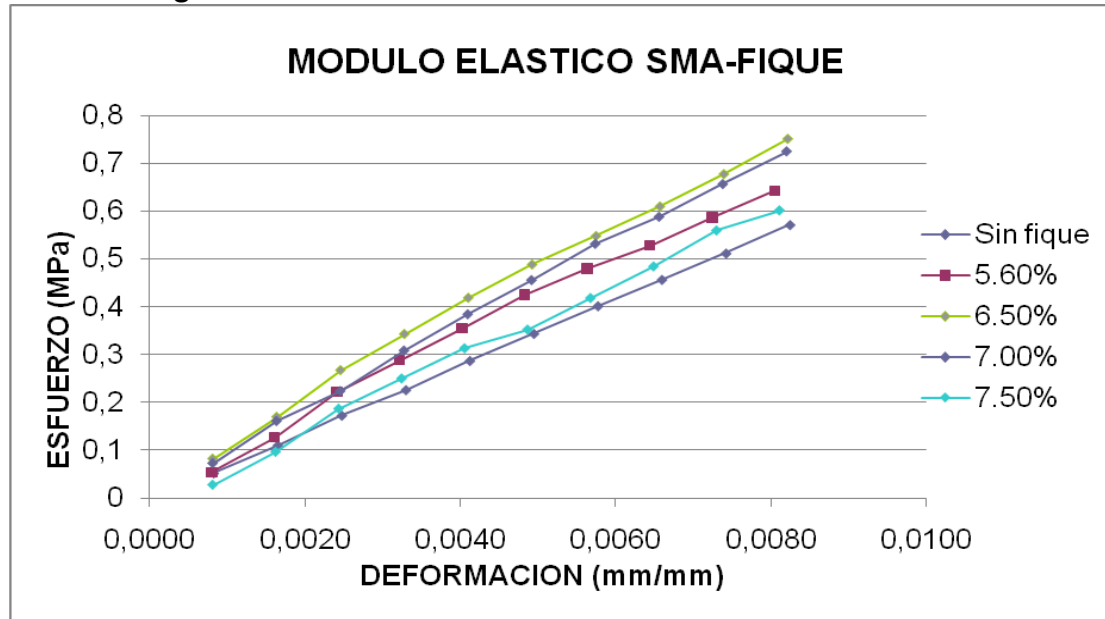
% Asfalto	Módulo Elástico (MPa)	
	Tramo 1	Tramo 2
5.0 %	13,25	33,64
5.5 %	11,967	32.90
6.0 %	10.8	31,90

NOTA: El tramo 1 corresponde al primer tramo en la grafica, seccionada en dos partes por presentar una curvatura muy grande.

3.7.1. Mezcla SMA con fique. Curva esfuerzo Vs. deformación unitaria

La variación de la deformación con respecto al incremento del esfuerzo, para cada uno de los porcentajes de asfalto añadido a las mezclas, puede observarse en la siguiente grafica, notando que la mezcla sin fibra de fique posee un módulo más bajo que una con fibra para un mismo contenido de asfalto.

Figura 33. Relación Esfuerzo - Deformación unitaria SMA



- **Módulos de elasticidad**

Los módulos de elasticidad calculados con base en las anteriores curvas se pueden resumir en la siguiente gráfica y tabla:

Figura 34. Módulos elásticos de la mezcla SMA Vs % de asfalto

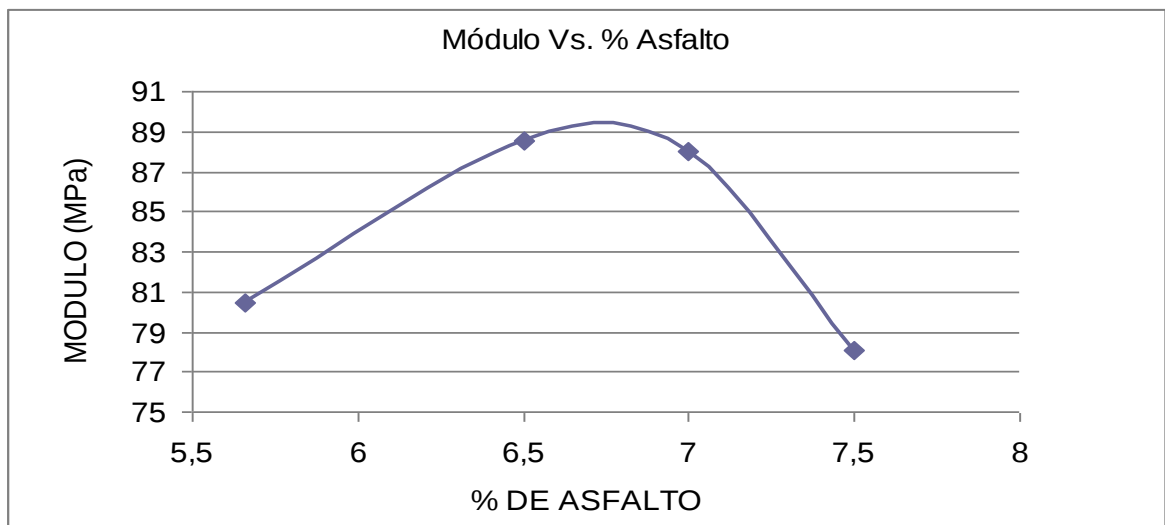


Tabla 23. Módulos Elásticos mezcla SMA

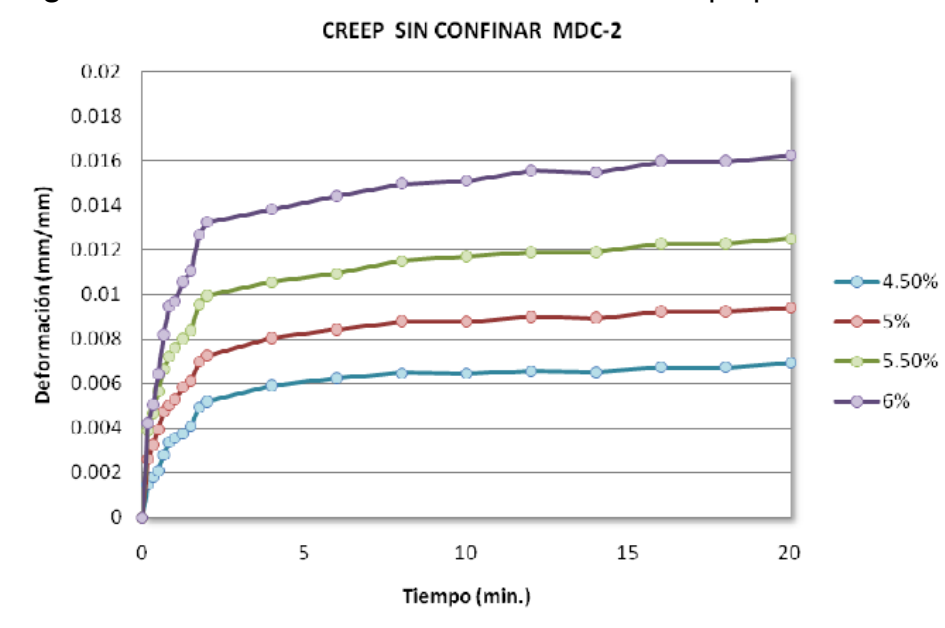
% ASFALTO	MÓDULO ELÁSTICO
5,66	80,49
6,5	88,52
7,0	88,01
7,5	78,07

3.8. DEFORMACIÓN EN EL TIEMPO A 60 °C (Ensayo Creep sin confinar)

Este ensayo fue realizado durante una hora, encontrando que la mayor deformación se logra en los dos primeros minutos, siguiendo casi constante

3.8.1. Gráfico deformación unitaria Vs. tiempo (MDC – 2). Para este ensayo solo fueron graficados los primeros 20 minutos, debido a que después la deformación se vuelve casi constante.

Figura 35. Relación Deformación unitaria - tiempo para MDC – 2



Fuente: CONTRERAS, Néstor. Aditivos para producir mezcla asfálticas de alta resistencia a la deformación permanente, controlando el escurrimiento de asfalto.

Tabla 24. Resultados deformación total MDC - 2

% ASFALTO	DEFORMACION FINAL (mm/mm)
4,5	0,00736
5.0	0,00992
5.5	0,01329
6.0	0,01721

3.8.2. Gráfico deformación unitaria Vs. tiempo (SMA). La variación de la deformación en el tiempo para la mezcla SMA, se muestra en la siguiente grafica:

Figura 36. Deformación unitaria Vs. tiempo para SMA

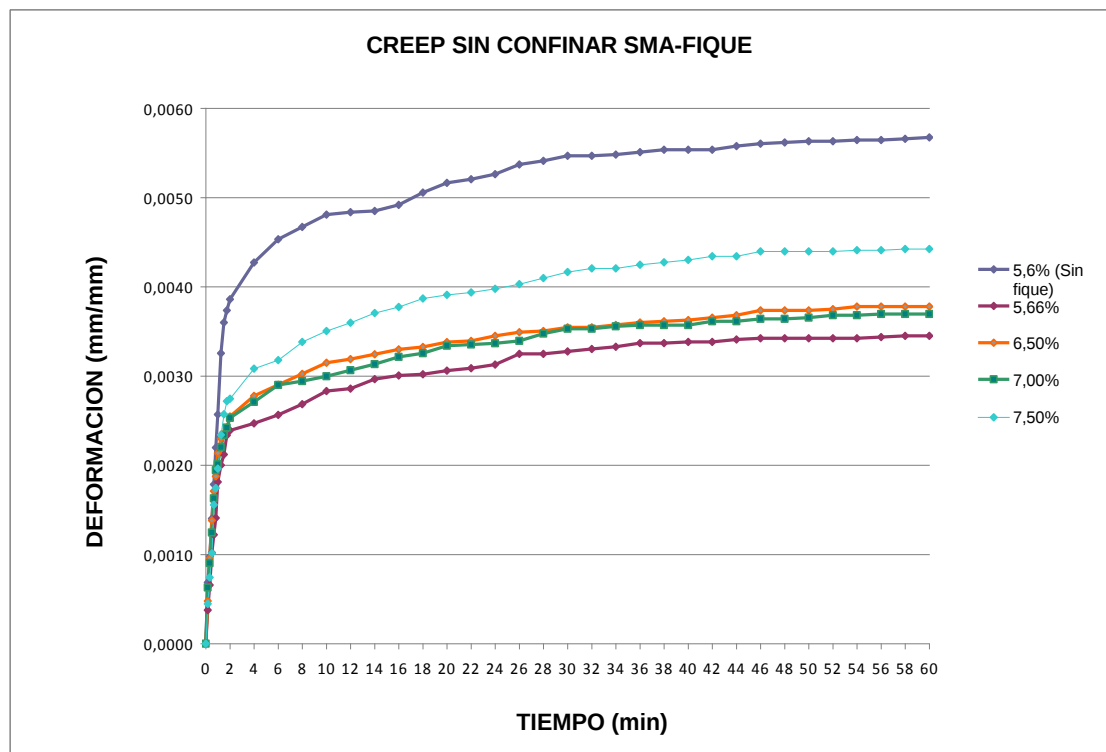


Figura 37. Relación Deformación total - % asfalto

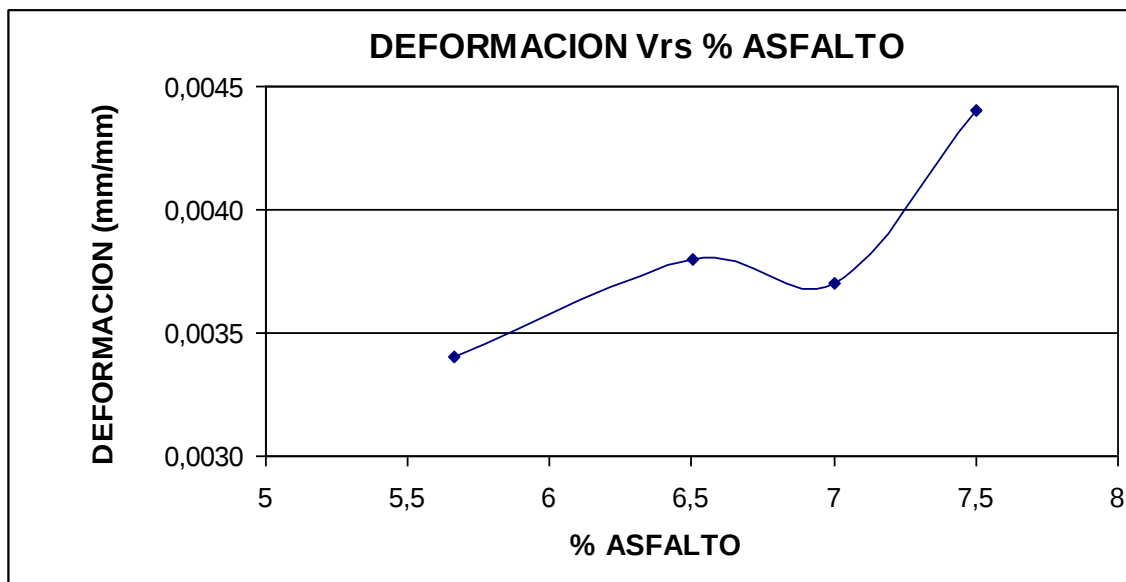


Tabla 25. Resultados deformación total SMA

% ASFALTO	DEFORMACIÓN TOTAL (mm/mm)
5,66	0,0034
6,5	0,0038
7	0,0037
7,5	0,0044

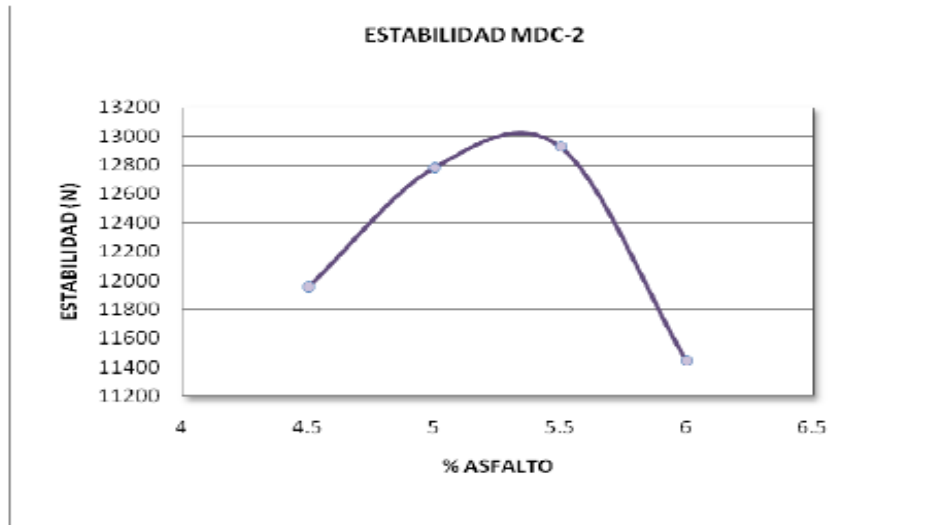
3.9. ESTABILIDAD MARSHALL

Es el ensayo que mide la máxima carga que pueden soportar las probetas justo antes del momento en que se presenta la falla, como consecuencia de la aplicación de esta.

3.9.1. Relación estabilidad - porcentaje de asfalto mezcla MDC – 2. En la siguiente gráfica, se muestran las cargas máximas soportadas por las

probetas, para cada uno de los contenidos de asfalto, en una mezcla MDC-2:

Figura 38. Relación Estabilidad - % de asfalto mezcla MDC-2



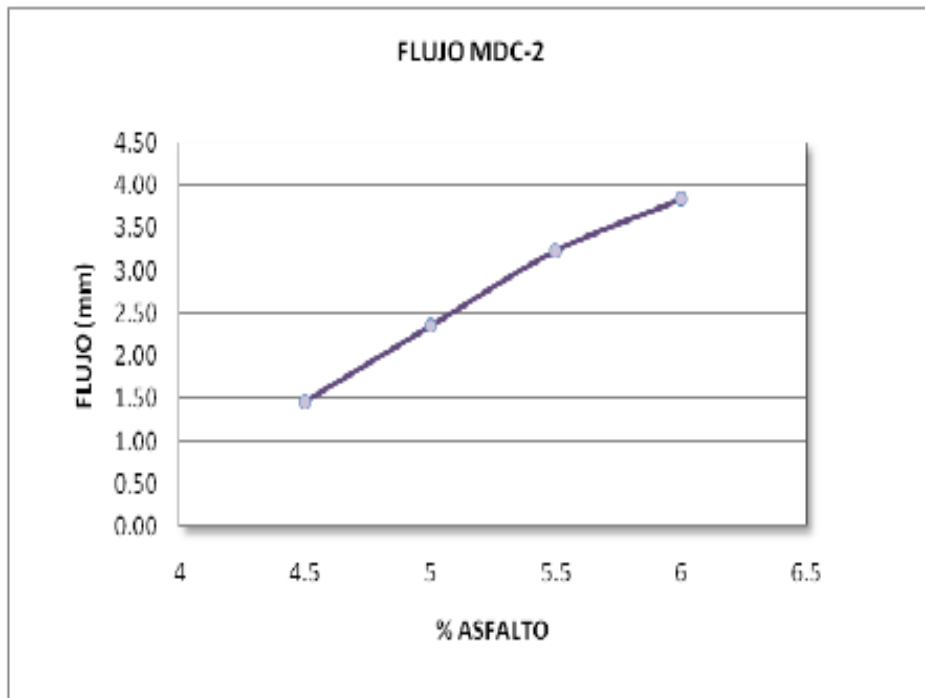
3.9.2. Relación estabilidad - porcentaje de asfalto mezcla SMA. Para medir este parámetro a la mezcla SMA, fueron fabricadas dos nuevas probetas, con un contenido de asfalto igual a 6.5%, ya que las probetas con este contenido presentaron el mayor valor de módulo elástico, por tanto se consideran con el contenido óptimo de asfalto; esto, con el fin de obtener un valor real, es decir, sin que hayan sido afectadas por cargas aplicadas para otras pruebas. La máxima carga que resistieron dichas probetas fue de 14.470 Newton.

3.10. FLUJO MARSHALL

Este ensayo mide la máxima deformación producida desde la aplicación de una carga cero hasta la máxima carga que soportan las probetas justo antes de producirse la falla:

3.10.1. Relación flujo - Porcentaje de asfalto mezcla MDC – 2. A continuación se presenta la gráfica de comportamiento de la deformación, de las probetas con los diferentes contenidos de asfalto, frente a la aplicación de la carga máxima:

Figura 39. Flujo Vs. % de asfalto mezcla MDC-2



3.10.2. Relación flujo - Porcentaje de asfalto mezcla SMA. Al igual que para la estabilidad, se midió el flujo de las probetas adicionales fabricadas con un contenido de asfalto igual a 6.5% y se encontró que este fue de 8.92 mm, un valor muy elevado para esta mezcla.

4. ANALISIS COMPARATIVO DE MEZCLAS

4.1. DESCRIPCION

A continuación se presenta el análisis comparativo de las características físicas y el comportamiento estructural de la mezclas en estudio.

4.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.2.1. Control de escurrimiento. Ya que, el escurrimiento se controló solo para una cantidad de asfalto y la fibra de fique fue dosificada proporcionalmente a este para la fabricación de las probetas, se ve según resultados de la tabla 15, que esta dosificación no fue correcta, debido a que, al incrementar el asfalto, se aumenta el espesor de la película de ligante adherida al agregado mineral, y debido a esto se presenta un escurrimiento mayor al deseado.

Por ello se considera necesario que el estudio para la dosificación de la fibra se haga para cada contenido de asfalto separadamente o se aumente un poco el porcentaje óptimo de fibra obtenido aquí, para que al incrementar el asfalto se mantenga el escurrimiento por debajo del 0.3% del peso de mezcla.

Tabla 26. Resultado escurrimiento mezcla MDC – 2

MDC – 2							
% Asfalto	W inicial	W vac.	% Inicial Escur.	W final	% Escur.	Promedio	Condición
5.5 %	993.0	992.3	<0.2 % No tam.	0,7	0,08	0,04	Cumple
	996.7	995.9	<0.2 % No tam.	0.8			

Los resultados de escurrimiento para la mezcla SMA-Fique se observan en la tabla 15.

- **Confiabilidad del ensayo**

Aunque el método utilizado durante este estudio para controlar el escurrimiento no es conocido en Colombia, se adopta como un método confiable, ya que al calcular el escurrimiento de la mezcla SMA, deja ver claramente que el escurrimiento disminuye con la adición de las fibras, como se espera que ocurra.

4.2.2. Densidad Bulk. De las graficas obtenidas de densidad se puede identificar que hay un valor máximo, obtenido con una cantidad de asfalto igual a 5.3% aproximadamente para mezcla MDC – 2 y 6,0% para mezcla SMA, esto indica la cantidad de asfalto con la que se logra la mayor densidad de las mezclas.

Tabla 27. Densidad Bulk mezcla SMA

% Asfalto	Densidad Bulk (SMA)
5,66	2,29
6,5	2,29
7.0	2,28
7,5	2,27

La mezcla SMA tiene un valor de densidad bajo, comparado con el recomendado por la norma para este parámetro.

4.2.3. Vacíos en el agregado mineral (VAM). Los vacios en el agregado mineral son inversamente proporcionales a la densidad de la mezcla, por eso que las mezclas densas posean un contenido más bajo de VAM que las mezclas discontinuas.

La norma AASTHO recomienda valores superiores al 17% para este parámetro, y en este ensayo se lograron valores superiores al 18%, con todos los contenidos de asfalto, lo que nos muestra que la mezcla esta cumpliendo con este requerimiento.

Tabla 28 . Vacios en el agregado mineral

% Asfalto	VAM (SMA)
5,66	18,07
6,5	18,71
7	19,58
7,5	20,29

4.2.4. Vacíos con aire (Va). Los requerimientos del porcentaje de vacios con aire permitidos para mezclas tipo SMA, están por encima del 4% del peso total de mezcla, de acuerdo con esto las probetas no cumplen con el máximo permitido de vacíos.

Tabla 29. Vacíos con aire mezcla SMA

% Asfalto	Va (SMA)
5,66	6,41
6,5	5,15
7.0	5,12
7,5	5,02

Las mezclas SMA poseen partículas de gran tamaño que permiten la formación de grandes cavidades, las cuales van desapareciendo en la medida que el asfalto se incrementa, de ahí, que a mayor cantidad de asfalto se tengan menos vacíos en la mezcla⁶, aunque los resultados de este ensayo significan que el contenido de asfalto no es suficiente para reducir los vacíos llenos de aire, a los valores recomendados por la norma.

4.2.5. Vacíos llenos de asfalto (VAF). Estos dependen del contenido de VAM y V_a , en una mezcla asfáltica cualquiera. Los contenidos de vacíos llenos de aire de la mezcla SMA no cumplen con la recomendación que debe ser superior al 75%.

Tabla 30. Vacíos llenos de asfalto SMA

% Asfalto	VAF (SMA)
5,66	64,52
6,5	72,48
7	73,83
7,5	75,29

⁶ CONTRERAS, Néstor. Aditivos para producir mezcla asfálticas de alta resistencia a la deformación permanente, controlando el escurrimiento de asfalto.

4.2.6. Módulo elástico a 7.5 °C. La relación entre la deformación unitaria y el esfuerzo aplicado a una probeta, considerado el módulo de elasticidad, se midió con el fin de comparar la rigidez de la dos mezclas en estudio.

Después de observar los resultados de las figuras 33 y 34, se puede afirmar que la mezcla SMA con fique posee una rigidez mayor a la de la mezcla convencional.

Además, como ya se dijo anteriormente, para un mismo contenido de asfalto, una mezcla con fibra de fique tiene un módulo de elasticidad más alto que otra mezcla sin fibra. Esto significa que el fique le está aportando cierta rigidez lo que se debe a que este posee una alta resistencia, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 31. Comparación máximos módulos elásticos SMA; MDC-2

. MÓDULOS ELÁSTICOS MÁXIMOS (MPa)		
MEZCLA	VALOR 1	VALOR 2
SMA – FIQUE 6,5%	88,52	88,52
MDC – 2 5 5,3%	15,53	34,46

4.2.7. Creep sin confinar a 60°C. La siguiente tabla muestra el valor de deformación total de las mezclas al cabo de una hora; claramente se puede notar que la mezcla SMA – Figue, presenta una menor deformación, que la alcanzada por la mezcla convencional, ante la aplicación de la misma carga.

Tabla 32. Comparación mínima deformación Creep SMA; MDC-2

MEZCLA	DEFORMACION TOTAL (mm/mm)
MDC – 2 5 5,3%	0.0119
SMA – FIQUE 6.5%	0,0038

4.2.8. Estabilidad Marshall. La mezcla MDC – 2 logra una máxima estabilidad con un contenido aproximado de asfalto de 5,3%, que comparada con la soportada por las probetas SMA de 6.5% de asfalto, es superior en la mezcla SMA.

Tabla 33. Comparación máxima estabilidad SMA; MDC-2

MEZCLA	ESTABILIDAD (Newton)
MDC – 2 5,5%	13.000
SMA – FIQUE 6,5%	14.470

4.2.9. Flujo Marshall. Los resultados de flujo de las probetas SMA, son superiores a los permitidos para este tipo de mezclas y es, además,

visiblemente mayor que el de las mezclas MDC – 2, lo que representa un problema para el pavimento, por las cargas a las cuales estarán sometidos.

Tabla 34. Comparación máximo flujo SMA; MDC-2

MEZCLA	FLUJO (mm)
MDC - 2 5,3%	2,8
SMA - FIQUE 6,5%	8,92

RECOMENDACIONES

- Principalmente se recomienda la realización de un estudio más detallado y preciso con esta misma fibra, puesto que los resultados obtenidos en el presente estudio, aunque no todos, ofrecen argumentos sólidos para pensar que con esta fibra se pueden obtener mejores comportamientos.
- Para encontrar el porcentaje óptimo de fibra para cada contenido de asfalto, es necesario que el método de escurrimiento se aplique a cada uno de ellos.
- Se recomienda para posteriores estudios, la fabricación de probetas para cada ensayo por separado, pues aunque algunos como estabilidad y creep se consideren teóricamente no destructivos, estos van acumulando una pequeña deformación que al final afecta la resistencia de la probeta.

CONCLUSIONES

- La fibra de fique utilizada en este estudio, influyó positivamente en el comportamiento mecánico de la mezcla, comparada con otros estudios realizados anteriormente por estudiantes de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, utilizando otros aditivos espesantes para mezclas SMA; encontrando además que la mezcla SMA soportó una carga superior a la soportada por una mezcla convencional, lo que la hace conveniente para su uso.
- Ya que algunos parámetros especificados para este tipo de mezcla, no cumplieron, es necesario ahondar en estudios en aras de corregir las fallas que se presentaron; como es el caso de los valores de vacíos que, debido a la granulometría discontinua de la mezcla, le genera a esta un alto porcentaje de porosidad, lo que haría incrementar la cantidad de asfalto necesario.
- Aunque el valor del flujo Marshall de la mezcla discontinua mostró estar por encima del permitido, el resultado que arrojó el ensayo Creep, indica que la mezcla posee una deformación en el tiempo baja con cargas pequeñas, por lo que se hace necesario corroborar estos resultados con otros métodos, como la construcción de un tramo experimental de carretera para medir la deformación, con aplicación de cargas de tráfico.

- El valor de módulo elástico de la mezcla SMA, es muy superior al calculado para la mezcla MDC, lo que significa que la primera posee una elevada rigidez si se compara con una mezcla convencional.
- El escurrimiento no se logró controlar hasta el valor esperado, para todos los contenidos de asfalto, aunque se hizo evidente que el error estuvo en la dosificación y no en la selección de la fibra, por ello se hace necesario realizar el ensayo de escurrimiento de Schellenberg, a mezclas con los diferentes contenidos de asfalto.

BIBLIOGRAFÍA

CONTRERAS, Néstor; GRANADOS, Jaime. Aditivos para producir mezcla asfálticas de alta resistencia a la deformación permanente, controlando el escurrimiento de asfalto: Stone Matrix Asphalt con adición de de fibras de caucho reciclado, Universidad Industrial de Santander, Colombia, (2008)

SERRANO, Jorge; ORTIZ, José; Aditivos para producir mezclas asfálticas de alta resistencia a la deformación permanente, Universidad Industrial de Santander, Colombia, (2007)

ARENAS , Emilio; SERRANO, Andrés; Análisis comparativo de propiedades de deformación en las mezclas MDC-2, MDC-3 M1 y Stone Matrix Asphalt, Universidad Industrial de Santander, Colombia, (2006)

ZTV Asphalt – StB Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt. Forschungsgesellschaft für Strassen – und Verkehrswesen. Köln, Alemania. (2001)

E – ASFALTO.COM; Stone Matrix Asphalt (SMA), tecnología de pavimentos para el Nuevo milenio; [en línea], <http://www.e-asfalto.com/index1/index.html>

AGUILA, Marcelo; Estudio y evaluación preliminar de la mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA) mediante un tramo de prueba, [en línea]. Chile. Disponible en Internet:http://www.vialidad.cl/areasde_vialidad/laboratorio_nacional/boletintecnico/StoneMasticAsphalt.PDF

F. J. MORRIS, L. R. Adkins; Specific Gravity of Paraffin Wax. Disponible en internet:<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50206a040>

REYES, Oscar; CAMACHO, Javier; Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas, Colombia, 2008. Disponible en Intenet:http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/23/3_%20Influencia%20de%20la%20Granulometria.pdf

Bio – D, Pavimentos SMA, S.A. de C.V., México, [en línea], www.biolatino.com

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO A.1 ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS GUESOS Y FINOS. (INV E213).

FECHA: MAYO DE 2006

PROYECTO: SMA.

LOCALIZACION: PESCADERO – RIO CHICAMOCHA.

PESO INICIAL DE LA MUESTRA (g): 3500

PESO DESPUES DE LAVADO (g): 3301.1

PORCENTAJE DE ERROR (%): 0.04

MALLA Nº	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA	MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA
	mm	g	%			mm	g	%	%
2"	50,8			100	10	2	364,5	10,41	28,59
1 1/2"	36,1	150	4,29	95,71	20	0,84	251,2	7,18	21,41
1"	25,4	185	5,29	90,43	40	0,42	197,8	5,65	15,76
3/4"	19,05	355	10,14	80,29	60	0,25	138	3,94	11,81
1/2"	12,7	535	15,29	65	100	0,149	115,6	3,3	8,51
3/8"	9,52	325	9,29	55,71	200	0,074	98,2	2,81	5,71
No 4	4,75	585	16,71	39	Pasa 200		198,3	5,67	0,04
Σ		2135	61,01		Σ		1363,6	100	
TOTAL							3498,6		

ANEXO A.2 EQUIVALENTE DE ARENA. (INV E133).

FECHA: MAYO DE 2006

PROYECTO: SMA.

LOCALIZACION: PESCADERO – RIO CHICAMOCHA.

TRITURADORA: SAENZ.

MODO DE PREPARACION MUESTRA MATERIAL PASA No 4 TEMPERATURA: 25 °C	1	2	3	Total
ALTURA DE LA ARCILLA H1	3,3	3,2	3,2	
ALTURA DE LA ARCILLA H2	3	3,1	3	
AQUIVALENTE DE ARENA % (H2/H1)	90,9	96,9	93,8	93,8

ANEXO A.3 PESO ESPECÍFICO Y % DE ABSORCION DE AGREGADO GRUESO (INV E223).

FECHA: MAYO DE 2006
PROYECTO: SMA.
LOCALIZACION: PESCADERO – RIO CHICAMUCHA.
TRITURADORA: SAENZ.

DATOS:

A= Peso de la muestra en condiciones S.S.S. al aire	5000 g
Pa= Peso canasta sumergida en agua	1800 g
Pb= Peso canasta + muestra S.S.S. sumergida en agua	4925 g
B= Peso de la muestra sumergida en agua (Pb-Pa)	3125 g
C= Peso de la muestra seca en horno	4965 g

CALCULOS:

Gravedad específica real	$C/(C-B)$	2,7
Gravedad específica aparente	$C/(A-B)$	2,65
Gravedad específica aparente S.S.S.	$A/(A-B)$	2,67

% De Absorción

0.70%



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO A.4 PESO ESPECÍFICO Y % DE ABSORCION DE AGREGADO FINO (INV E222).

FECHA:
PROYECTO: SMA.
LOCALIZACION: PESCADERO – RIO CHICAMOCHA.
TRITURADORA: SAENZ.

DATOS:

A= Peso frasco + agua hasta la marca al aire	665,6 g
B= Peso de la muestra en condiciones S.S.S. al aire	500 g
C= Peso de la muestra, frasco y agua agregada hasta la marca al aire	974 g
D= Peso de la muestra seca al horno	494,7 g

CALCULOS:

Gravedad específica real	$D/(A-C+D)$	2,66
Gravedad específica aparente	$D/(A+B-C)$	2,58
Gravedad específica aparente S.S.S.	$B/(A+B-C)$	2,61

% De Absorción

0.64%

ANEXO A.5 PESO ESPECÍFICO Y % DE ABSORCION DE FILLER MINERAL (INV E222).

FECHA: MAYO DE 2006

PROYECTO: SMA.

LOCALIZACION: PESCADERO – RIO CHICAMOCHA.

TRITURADORA: SAENZ.

DATOS:

A=Peso frasco + agua hasta la marca de aire	659 g
B= Peso de la muestra en condiciones S.S.S. al aire	200 g
C= Peso de la muestra, frasco y agua agregada hasta la marca de aire	772,3 g
D= Peso de la muestra seca al horno	185,9 g

CALCULOS:

Gravedad específica real	$D/(A-C+D)$	2,56
Gravedad específica aparente	$D/(A+B-C)$	2,14
Gravedad específica aparente S.S.S.	$B/(A+B-C)$	2,31

% De Absorción

1.83%

ANEXO A.6 RESISTENCIA AL DESGASTE POR MEDIO DE LA MAQUINA DE LOS ANGELES
(INV E219).

FECHA: MAYO DE 2006

PROYECTO: SMA.

LOCALIZACION: PESCADERO – RIO CHICAMUCHA.

TRITURADORA: SAENZ.

DATOS SOBRE GRADACION, CARGA ABRASIVA Y
REVOLUCIONES

TAMAÑO		PESO Y GRADACION DE LA MUESTRA						
PESO	RETENIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	2"					2500		
2"	1 1/2"					2500	5000	
1 1/2"	1"	1250					5000	5000
1"	3/4"	1250						5000
3/4"	1/2"	1250	2500					
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	1/4"			2500				
1/4"	No 4			2500				
No 4	No 8				5000			
No de esferas		12	11	8	6	12	12	12

PRUEBAS		R. IGNEAS	R. METAMORFICAS
Gradación usada		F	F
No De Esferas		12	12
No De Revoluciones		1000	1000
Pa= Muestra seca antes del ensayo (g)		10000	10000
Pb= Peso muestra seca después de ensayo después de lavar sobre tamiz No 12(g)		7720	7325
Pérdida de material (Pa-Pb) (g)		2280	2675
% Desgaste [(Pa-Pb)/Pa]*100		22,8	26,75
Especificación		INV E -219	INV E - 219
% Desgaste Total		23,985	

ANEXO A.7 ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO (INV E230).

FECHA: MAYO DE 2006

PROYECTO: SMA.

LOCALIZACION: PESCADERO – RIO CHICAMOCHA.

TRITURADORA: SAENZ.

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO

TAMAÑO DE TAMICES		PESO MUESTRA (g)	PESO MATERIAL RETENIDO EN EL CALIBRADOR (g)	% RETENIDO EN EL CALIBRADOR	% RETENIDO GRADACION ORIGINAL	[% RET. CALIB.] [% RET. GRAD. ORIG.]
PASANTE	RETENIDO					
1"	3/4"	1395	102,86	7,37	13,95	1,03
3/4"	1/2"	1188,27	193,37	16,27	34,1	5,55
1/2"	3/8"	413,57	69,17	16,73	21,55	3,6
3/8"	1/4"	268,03	73,8	27,53	21,75	5,99
Σ=		3264,87	439,2	67,91	91,35	16,17

ÍNDICE DE APLANAMIENTO

TAMAÑO DE TAMICES		PESO MUESTRA (g)	PESO MATERIAL RETENIDO EN EL CALIBRADOR (g)	% RETENIDO EN EL CALIBRADOR	% RETENIDO GRADACION ORIGINAL	[% RET. CALIB.] [% RET. GRAD. ORIG.]
PASANTE	RETENIDO					
1"	3/4"	1395	312,5	22,4	13,95	3,13
3/4"	1/2"	1188,27	282,7	23,79	34,1	8,11
1/2"	3/8"	413,57	106,1	25,65	21,55	5,53
3/8"	1/4"	268,03	70,49	26,3	21,75	5,72
Σ=		3264,87	771,79	98,15	91,35	22,49

ÍNDICE DE APLANAMIENTO: 17.70 %

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO: 24.62 %

ANEXO A.8 PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS (INV E227).

FECHA: MAYO DE 2006

PROYECTO: SMA.

LOCALIZACION: PESCADERO – RIO CHICAMOCHA.

TRITURADORA: SAENZ.

TAMAÑO	A	B	C	D	E
(11/2" A 1")	2000	1967,48	98,37	2580	2538
(1" A 3/4")	1500	1300,49	86,7	3190	2765,7
(3/4" A 1/2")	1200	1083,47	90,29	2495	2252,7
(1/2" A 3/8")	300	257,82	85,94	900	773,5
Σ=	5000	4609,26	361,3025	9165	8329,93260

% DE CARAS FRACTURADAS $[E/D] = 90.89 \%$

A= Peso de la muestra (g)

B= Peso caras fracturadas (g)

C= % Caras fracturadas

D= Granulometría de la gradación original

E= C*D

ANEXO A9 .SANIDAD DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCION DE LAS SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO (INV E220).

FECHA: MAYO DE 2006

PROYECTO: SMA.

LOCALIZACION: PESCADERO – RIO CHICAMOCHA.

TRITURADORA: SAENZ.

MATERIAL			PESO (g)
DE	A		
No 4	3/8"		330 ± 5
3/8"	3/4"		1000 ± 10
3/8"	1/2"	33%	330 ± 5
1/2"	3/4"	67%	670 ± 10
3/4"	1 1/2"		1500 ± 50
3/4"	1"	33%	500 ± 30
1"	1 1/2"	67%	1000 ± 50
1 1/2"	2 1/2"		5000 ± 300

Tamices	3/8"	1/2"	3/4"
Peso Inicial (Wi) (g)	333	673,4	1512,7
Peso Final (Wf) (g)	326,9	670,1	1511,9
Diferencia (Wi-Wf) (g)	6,1	3,3	0,8
% Solidez en Sulfato de sodio	1,83	0,49	0,05
% Promedio de Solidez en sulfato de sodio	0,79		

Pérdida por ensayo de solidez= 0.79

ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS

ANEXO B1. GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS FABRICADAS EN LABORATORIO.

MEZCLA SMA		
PROBETA	DIÁMETRO (cm)	ALTURA (cm)
1-1	10,377	6,123
1-2	10,333	6,407
1-3	10,197	5,963
2-1	10,200	6,433
2-2	10,233	6,247
2-3	10,237	6,247
3-1	10,247	6,260
3-2	10,367	6,050
3-3	10,200	6,250
4-1	10,377	6,100
4-2	10,350	6,103
4-3	10,170	6,363
5-1	10,240	6,243
5-2	10,257	6,190
5-3	10,240	6,347

ANEXO B2.PESO ESPECÍFICO TEÓRICO MÁXIMO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (INV E-735).

Gmm: Peso específico máximo de una mezcla asfáltica

A: Peso de la muestra en el aire (gr)

D: Peso del picnómetro + agua a 25°C

E: Peso de la muestra sin vacíos + picnómetro + agua

	% ASFALTO	W PICNÓMETRO	A	D	E	Gmm
MEZCLA MDC- 2	4,5	915,2	800	1962,4	2441,2	2,49
	5,0		800	1962,4	2433,4	2,43
	5,5		800	1962,4	2428,1	2,39
	6,0		800	1962,4	2425,9	2,38

	% ASFALTO	W PICNÓMETRO	A	D	E	Gmm
MEZCLA SMA-FIQUE	5,6 (Sin Fique)	915,2	700	1962,6	2377,500	2.455
	5,60%		700	1962,6	2377,266	2.453
	6,50%		700	1962,6	2373,733	2.423
	7%		700	1962,6	2373,800	2.424
	7,50%		700	1962,6	2370,733	2.398

ANEXO B3.PESO ESPECÍFICO APARENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS (INV E-733).

Gb Peso específico aparente de una mezcla asfáltica

Wa Peso de la probeta en el aire (gr)

Ws Peso de la probeta saturada en el aire (gr)

Ww Peso de la probeta en el agua (gr)

MDC - 2				
PROBETA	Wa	Ws	Ww	Gb
A11	1116,9	1120,6	635,2	2,300
A12	1191,3	1193,7	683,3	2,330
A13	1184,6	1185,9	684,4	2,360
A21	1180,7	1185,2	690,1	2,380
A22	1180,9	1185,2	688,9	2,380
A23	1184,0	1185,9	678,0	2,330
A31	1176,3	1176,6	686,1	2,400
A32	1179,5	1179,9	686,0	2,390
A33	1187,4	1187,8	709,0	2,480
A41	1176,0	1176,8	681,8	2,380
A42	1188,6	1188,4	686,6	2,370
A43	1187,4	1187,6	692,8	2,400

MEZCLA MDC - 2	% ASFALTO	Gb Prom.
	4,5	2,35
	5	2,38
	5,5	2,39
	6	2,37

ANEXO B4.PESO ESPECÍFICO APARENTE DE MEZCLA SMA-FIQUE.

PROBETA	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
ESPESOR MUESTRA (cm)	6,12	6,41	5,96	6,43	6,25	6,25	6,26	6,05	6,25
PESO MUESTRA AL AIRE (g)	1105,30	1118,70	1014,10	1149,10	1116,20	1117,60	1116,40	1117,00	1114,30
PESO PROBETA PARAFINADA AL AIRE (g)	1143,00	1142,50	1035,30	1180,30	1143,90	1147,50	1132,10	1130,50	1129,30
PESO PARAFINA	37,70	23,80	21,20	31,20	27,70	29,90	15,70	13,50	15,00
VOLUMEN PARAFINA (cm ³)	42,36	26,74	23,82	35,06	31,12	33,60	17,64	15,17	16,85
PESO PROBETA PARAFINADA EN AGUA (g)	612,30	620,50	566,20	648,20	632,10	613,60	625,70	625,00	630,70
VOLUMEN MUESTRA PARAFINADA (cm ³)	530,70	522,00	469,10	532,10	511,80	533,90	506,40	505,50	498,60
VOLUMEN MUESTRA (cm ³)	488,34	495,26	445,28	497,04	480,68	500,30	488,76	490,33	481,75
DENSIDAD PROMEDIO (g/cm ³)	2,26	2,26	2,28	2,31	2,32	2,23	2,28	2,28	2,31

PROBETA	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	5-3
ESPESOR MUESTRA (cm)	6,10	6,10	6,36	6,24	6,19	6,35
PESO MUESTRA AL AIRE (g)	1124,80	1119,40	1129,30	1120,20	1116,90	1120,10
PESO PROBETA PARAFINADA AL AIRE (g)	1141,20	1138,20	1148,20	1138,20	1131,50	1149,70
PESO PARAFINA	16,40	18,80	18,90	18,00	14,60	29,60
VOLUMEN PARAFINA (cm ³)	18,43	21,12	21,24	20,22	16,40	33,26
PESO PROBETA PARAFINADA EN AGUA (g)	633,50	628,30	624,90	631,20	626,10	613,90
VOLUMEN MUESTRA PARAFINADA (cm ³)	507,70	509,90	523,30	507,00	505,40	535,80
VOLUMEN MUESTRA (cm ³)	489,27	488,78	502,06	486,78	489,00	502,54

ANEXO B5. PESO ESPECÍFICO TOTAL DEL AGREGADO DE LA MEZCLA.

$$G_{ag} = \frac{100}{\left[\frac{\% \text{ peso Agreg. Grueso}}{\text{Peso Espec. Agreg. Grueso}} \right] + \left[\frac{\% \text{ Peso Agreg. Fino}}{\text{Peso Espec. Agreg. Fino}} \right] + \left[\frac{\% \text{ Peso Filler}}{\text{Peso Espec. Filler}} \right]}$$

MDC-2	% En Peso Por Material Total De La Mezcla	Peso Espacío (g/cm ³)
Agre. Grueso	43	2,694
Agreg. Fino	51	2,655
Filler	6	2,144
G Agregado		2,636

MEZCLA MDC-2	
No TAMIZ	% PASA
4	57
200	6

SMA	% En Peso Por Material Total De La Mezcla	Peso Espacío (g/cm ³)
Agre. Grueso	66	2,698
Agreg. Fino	23,1	2,655
Filler	10,9	2,144
G Agregado		2,615

MEZCLA SMA	
No TAMIZ	% PASA
4	34
200	10,9

ANEXO C. DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR MARSHALL

ANEXO C1.DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR EL MÉTODO MARSHALL.

PROYECTO: MDC-2

PROCEDENCIA DE LOS AGREGADOS: CHICAMOCHA

PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO: 1.006

MEZCLA No	% DE ASFALTO	ESPESOR (pulg.)	PESO ESPECIFICO			% ASFALTO ABSORBIDO	VOL. % TOTAL DE LA PROBETA			% DE VACIOS AGREGADO MINERAL	% ASFALTO EFECTIVO	% VACIOS LLENOS DE ASFALTO	PESO UNITARIO (Lb/pulg.^2)
			BULK	MAX. TEORICO	MAX. MEDIDO		AGREGADOS	VACIOS CON AIRE	ASFALTO				
A2	4,5	2,45	2,334										
A3	4,5	2,51	2,362										
prom.			2,348	2,457	2,509	0,883	85,078	6,4	8,523	14,922	3,656	57,114	146,52
B2	5	2,41	2,385										
B3	5	2,41	2,379										
prom.			2,382	2,438	2,482	0,764	85,858	4,032	10,11	14,142	4,274	71,492	148,642
C1	5,5	2,43	2,398										
C2	5,5	2,5	2,388										
prom.			2,393	2,42	2,47	0,882	85,803	3,107	11,09	14,197	4,667	78,113	149,333
D1	6	2,38	2,376										
D2	6	2,44	2,369										
prom.			2,372	2,402	2,452	0,907	84,602	3,273	12,125	15,398	5,147	78,744	148,026

ANEXO C2.DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR EL MÉTODO MARSHALL.

PROYECTO: SMA-FIQUE

PROCEDENCIA DE LOS AGREGADOS: CHICAMOCHA

PESO ESPECÍFICO DEL ASFALTO: 1.012

MEZCLA No	% DE ASFALTO	ESPESOR (pulg.)	PESO ESPECIFICO			% ASFALTO ABSORBIDO	VOL. % TOTAL DE LA PROBETA			% DE VACIOS AGREGADO MINERAL	% ASFALTO EFECTIVO	% VACIOS LLENOS DE ASFALTO	PESO UNITARIO (Lb/pulg.^2)
			BULK	MAX. TEORICO	MAX. MEDIDO		AGREGADOS	VACIOS CON AIRE	ASFALTO				
1-1	5-6%	2.41	2.26										
1-2	5-6%	2.52	2.26										
1-3	5-6%	2.35	2.28										
prom.			2.27	2.455				7.42		18.88		60.73	
2-1	5-6%	2.53	2.31										
2-2	5-6%	2.46	2.32										
2-3	5-6%	2.46	2.23										
prom.			2.29	2.453				6.41		18.07		60.52	
3-1	6.5%	2.46	2.28										
3-2	6.5%	2.38	2.28										
3-3	6.5%	2.46	2.31										
prom.			2.29	2.423				5.15		18.71		72.48	
4-1	7.0%	2.40	2.30										
4-2	7.0%	2.40	2.29										
4-3	7.0%	2.51	2.35										
prom.			2.28	2.424				5.12		19.58		73.83	
5-1	7.5%	2.46	2.30										
5-2	7.5%	2.44	2.28										
5-3	7.5%	2.50	2.23										
prom.			2.27	2.398				5.02		20.29		75.29	

ANEXO D. ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD

ANEXO D1. ENSAYOS DEL MÓDULO ELÁSTICO.
VALORES DE DEFLEXIÓN Y ESFUERZO TOMADAS PARA MEZCLA SMA-FIQUE

CONSTANTE DEL DEFORMÍMETRO: 0.001"

CONSTANTE DEL ANILLO: 10.125 Lb

PROBETAS 5,6% (SIN FIQUE)						PROBETA 5,6%					
	1-1	1-2	1-3	Prom.	Esf (Mpa)		2-1	2-2	2-3	Prom.	Esf (Mpa)
Def (mm/mm)	Carga	Carga	Carga			Def (mm/mm)	Carga	Carga	Carga		
0,0008	6,5	11	11	8,75	0,052123	0,0008	10	9	8	9,00	0,054442
0,0016	16	27	21	18,5	0,110204	0,0016	20	20	23	21	0,127031
0,0025	28	47	30	29	0,172752	0,0024	39	35	36	36,67	0,2218
0,0033	37	66	39	38	0,226364	0,0032	50	44	49	47,67	0,288341
0,0041	47,5	82	49	48,25	0,287423	0,0040	62	56	58	58,67	0,354881
0,0049	59,5	96	56	57,75	0,344014	0,0048	75	70	66	70,33	0,425453
0,0058	69	111	66	67,5	0,402094	0,0056	80	81	77	79,33	0,479895
0,0066	78,5	124	75	76,75	0,457196	0,0064	87	92	83	87,33	0,528288
0,0074	87	136	85	86	0,512298	0,0072	98	100	93	97,00	0,586763
0,0082	97	146	95	96	0,571868	0,0081	105	115	99	106,33	0,643221

NOTA: Para el promedio solo se tuvieron en cuenta los valores con menor desviación

ANEXO D1-1. ENSAYOS DEL MÓDULO ELÁSTICO.
VALORES DE DEFLEXIÓN Y ESFUERZO TOMADAS PARA MEZCLA SMA-FIQUE

CONSTANTE DEL DEFORMÍMETRO: 0.001"

CONSTANTE DEL ANILLO: 10.125 Lb

PROBETA 6,5%						PROBETA 7,0%						PROBETA 7,5%					
	3-1	3-2	3-3	Prom.	Esf (Mpa)		4-1	4-2	4-3	Prom.	Esf (Mpa)		5-1	5-2	5-3	Prom.	Esf (Mpa)
Def (mm/mm)	Carga	Carga	Carga			Def (mm/mm)	Carga	Carga	Carga			Def (mm/mm)	Carga	Carga	Carga		
0,0008	15	12	14	13,67	0,081775	0,0008	10,33	14	1,5	12,17	0,07251	0,0008	4,5	4,5	1,5	4,50	0,02709
0,0016	33	26	26	28,33	0,169533	0,0016	26	28	9,5	27,00	0,160934	0,0016	17	15	3	16,00	0,09632
0,0025	51	43	40	44,67	0,267263	0,0025	39	36	22,5	37,50	0,22352	0,0024	26	36	8	31,00	0,18661
0,0033	61	56	55	57,333	0,34305	0,0033	51	52,5	36	51,75	0,308457	0,0032	35	48	20	41,50	0,24982
0,0041	76	69	65	70,00	0,418846	0,0041	63	66	45	64,50	0,384454	0,0041	50	54	38,5	52,00	0,31303
0,0049	87	84	74	81,67	0,488653	0,0049	75	78	50,5	76,50	0,45598	0,0049	58	59	56	58,50	0,35216
0,0057	98	95	82	91,67	0,548488	0,0057	89	89,5	54,5	89,25	0,531977	0,0057	70	69	84,5	69,50	0,41837
0,0066	110	103	93	102,00	0,610318	0,0066	101	96,5	63	98,75	0,588602	0,0065	80	81	115	80,50	0,48459
0,0074	117	118	105	113,33	0,678131	0,0074	118	102,5	70	110,25	0,657148	0,0073	91	95	132,5	93,00	0,55984
0,0082	128	132	117	125,67	0,751928	0,0082	131	112,5	75,5	121,75	0,725694	0,0081	101	99	146	100,00	0,60198

NOTA: Para el promedio solo se tuvieron en cuenta los valores con menor desviación

ANEXO E. ENSAYO CREEP

ANEXO E1. ENSAYO CREEP SIN CONFINAR.

Unidad de carga constante
Constante del anillo: 10.125 Lb.
Constante del deformímetro: 0.001"

MEZCLA SMA-FIQUE
LECTURAS TOMADAS DEL DEFORMÍMETRO

% de ASFALTO

TIEMPO (min)	5,6% (Sin fique)			5,6%			6,5%			7,0%			7,5%		
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	5-3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,166666667	1,4	1,5	2,1	1,1	0,9	0,8	1,1	1,4	1	2,1	1,1	1,4	1	1,1	1,2
0,333333333	2	2	3,1	2	1,5	1,4	3,1	2,4	1,5	2,8	2,1	1,7	2	1,8	1,7
0,5	3,1	3	4,1	3	2,4	2,2	4,7	3,4	2	3,7	3,1	2,3	3	2,2	2,3
0,666666667	4	4	5	3,2	3,2	2,7	5,6	4,4	2,5	5	4,1	2,8	4	3,8	3,7
0,833333333	5	5	6	3,5	3,9	3,1	5,8	4,8	3,1	5,9	4,9	3,4	5	4	3,9
1	5,9	6	6,8	4	5	4,5	6,1	5,6	3,9	6	5	3,7	5,4	4,5	4,6
1,25	8	8	7,7	4,5	5,5	4,9	6,3	6,5	4	6,3	5,3	4,5	7	5,1	5,2
1,5	8,8	8,8	8,6	4,7	6	5,1	6,6	6,6	4	6,5	5,6	5	7,5	5,7	5,8
1,75	9	9,1	9,1	5	6,1	6,3	6,7	6,8	4,1	6,7	5,7	5,3	8	6	6,1
2	9,2	9,3	9,6	5,1	6,3	6,4	7,1	7,2	4,3	6,9	5,8	5,8	8,1	6	6,2
4	10,5	10,5	10,1	5,3	6,5	6,6	7,5	7,9	4,9	7,1	6,3	6,4	8,9	7	6,9
6	11	11,5	10,5	5,4	6,9	6,8	7,7	8,5	5	7,9	6,8	6,5	9	7,2	7,3
8	11,5	11,9	10,6	5,7	7,1	7,2	7,9	9	5,2	8	7	6,5	9,7	7,7	7,6
10	12,1	12,1	10,8	5,8	7,7	7,6	8,5	9,3	5,2	8,2	7,1	6,6	10	8	7,9
12	12,1	12,1	11	5,8	7,8	7,7	8,5	9,4	5,4	8,3	7,5	6,6	10,3	8,1	8,2
14	12,1	12,1	11,1	5,9	8	8,2	8,6	9,5	5,6	8,5	7,5	6,9	10,5	8,5	8,4
16	12,3	12,2	11,3	6	8,1	8,3	8,8	9,6	5,7	8,8	7,6	7,1	10,8	8,6	8,5
18	12,6	12,7	11,5	6,1	8,1	8,3	8,8	9,7	5,8	8,9	7,8	7,1	11,1	8,8	8,7
20	12,8	12,9	11,9	6,1	8,3	8,4	9,1	9,7	5,9	8,9	8	7,5	11,1	8,8	9
22	12,8	12,9	12,2	6,1	8,4	8,5	9,1	9,8	5,9	9	8	7,5	11,2	8,9	9
24	12,8	12,9	12,6	6,1	8,6	8,6	9,2	10	6	9	8	7,6	11,3	9	9,1
26	12,9	13	13,2	6,1	9	9,1	9,3	10,2	6	9,2	8	7,6	11,6	9,1	9,1
28	12,9	13	13,5	6,1	9	9,1	9,4	10,2	6	9,7	8,1	7,6	11,8	9,3	9,2
30	13	13	13,8	6,1	9,1	9,2	9,5	10,3	6,1	10,1	8,1	7,6	11,9	9,5	9,4
32	13	13	13,8	6,1	9,2	9,3	9,5	10,3	6,1	10,1	8,1	7,6	12	9,6	9,5
34	13	13	13,8	6,1	9,2	9,4	9,6	10,4	6,1	10,1	8,2	7,7	12	9,6	9,5

ANEXO E1-1. ENSAYO CREEP SIN CONFINAR.

Unidad de carga constante

Constante del anillo: 10.125 Lb.

Constante del deformímetro: 0.001"

MEZCLA SMA-FIQUE
LECTURAS TOMADAS DEL DEFORMÍMETRO

% de ASFALTO

TIEMPO (min)	5,6% (Sin fique)			5,6%			6,5%			7,0%			7,5%		
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	5-3
36	13	13,1	14	6,2	9,3	9,6	9,7	10,5	6,1	10,2	8,2	7,7	12,1	9,7	9,6
38	13,2	13,1	14	6,2	9,3	9,6	9,7	10,5	6,2	10,2	8,2	7,7	12,1	9,8	9,7
40	13,1	13,2	14	6,2	9,4	9,6	9,7	10,6	6,2	10,2	8,2	7,7	12,2	9,8	9,8
42	13,1	13,2	14	6,2	9,4	9,6	9,9	10,6	6,2	10,3	8,3	7,8	12,2	9,9	10
44	13,3	13,3	14	6,3	9,4	9,7	10	10,6	6,3	10,3	8,3	7,8	12,2	9,9	10
46	13,3	13,4	14,1	6,3	9,5	9,7	10,3	10,7	6,3	10,4	8,3	7,9	12,3	10,1	10,1
48	13,4	13,4	14,1	6,3	9,5	9,7	10,3	10,7	6,3	10,4	8,3	7,9	12,3	10,1	10,1
50	13,5	13,4	14,1	6,3	9,5	9,7	10,3	10,7	6,3	10,4	8,3	8	12,3	10,1	10,1
52	13,5	13,4	14,1	6,3	9,5	9,7	10,3	10,7	6,4	10,4	8,4	8,1	12,3	10,1	10,1
54	13,5	13,5	14,1	6,3	9,5	9,7	10,4	10,8	6,4	10,4	8,4	8,1	12,3	10,1	10,2
56	13,5	13,5	14,1	6,3	9,5	9,8	10,4	10,8	6,4	10,5	8,4	8,1	12,3	10,1	10,2
58	13,5	13,5	14,2	6,3	9,6	9,8	10,4	10,8	6,4	10,5	8,4	8,1	12,3	10,2	10,2
60	13,6	13,5	14,2	6,3	9,6	9,8	10,4	10,8	6,4	10,5	8,4	8,1	12,3	10,2	10,2



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS



ANEXO E2. ENSAYO CREEP SIN CONFINAR.

Unidad de carga constante
Constante del anillo: 10.125 Lb.
Constante del deformímetro: 0.001"

DEFLEXION UNITARIA PROMEDIO (mm/mm)

TIEMPO (min)	5,6% (Sin fique)	5,66%	6,50%	7,00%	7,50%
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,16666667	0,0007	0,0004	0,0005	0,0006	0,0004
0,33333333	0,0010	0,0007	0,0010	0,0009	0,0007
0,5	0,0014	0,0010	0,0014	0,0012	0,0010
0,66666667	0,0018	0,0012	0,0017	0,0016	0,0016
0,83333333	0,0022	0,0014	0,0019	0,0019	0,0017
1	0,0026	0,0018	0,0021	0,0020	0,0020
1,25	0,0033	0,0020	0,0023	0,0022	0,0023
1,5	0,0036	0,0021	0,0024	0,0023	0,0026
1,75	0,0037	0,0023	0,0024	0,0024	0,0027
2	0,0039	0,0024	0,0025	0,0025	0,0027
4	0,0043	0,0025	0,0028	0,0027	0,0031
6	0,0045	0,0026	0,0029	0,0029	0,0032
8	0,0047	0,0027	0,0030	0,0029	0,0034
10	0,0048	0,0028	0,0031	0,0030	0,0035
12	0,0048	0,0029	0,0032	0,0031	0,0036
14	0,0048	0,0030	0,0032	0,0031	0,0037
16	0,0049	0,0030	0,0033	0,0032	0,0038
18	0,0051	0,0030	0,0033	0,0033	0,0039
20	0,0052	0,0031	0,0034	0,0033	0,0039
22	0,0052	0,0031	0,0034	0,0034	0,0039
24	0,0053	0,0031	0,0034	0,0034	0,0040
26	0,0054	0,0032	0,0035	0,0034	0,0040
28	0,0054	0,0032	0,0035	0,0035	0,0041
30	0,0055	0,0033	0,0035	0,0035	0,0042
32	0,0055	0,0033	0,0035	0,0035	0,0042
34	0,0055	0,0033	0,0036	0,0036	0,0042

ANEXO E2-2. ENSAYO CREEP SIN CONFINAR.

Unidad de carga constante

Constante del anillo: 10.125 Lb.

Constante del deformímetro: 0.001"

DEFLEXION UNITARIA PROMEDIO (mm/mm)

TIEMPO (min)	5,6% (Sin fique)	5,66%	6,50%	7,00%	7,50%
36	0,0055	0,0034	0,0036	0,0036	0,0042
38	0,0055	0,0034	0,0036	0,0036	0,0043
40	0,0055	0,0034	0,0036	0,0036	0,0043
42	0,0055	0,0034	0,0037	0,0036	0,0043
44	0,0056	0,0034	0,0037	0,0036	0,0043
46	0,0056	0,0034	0,0037	0,0036	0,0044
48	0,0056	0,0034	0,0037	0,0036	0,0044
50	0,0056	0,0034	0,0037	0,0037	0,0044
52	0,0056	0,0034	0,0037	0,0037	0,0044
54	0,0056	0,0034	0,0038	0,0037	0,0044
56	0,0056	0,0034	0,0038	0,0037	0,0044
58	0,0057	0,0034	0,0038	0,0037	0,0044
60	0,0057	0,0034	0,0038	0,0037	0,0044

ANEXO F. CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DEL ASFALTO



Shell Bitumen

Certificado de Análisis

CARIPHALTE PM – Tipo III

CLIENTE: ING LUZ MERY LEON
DOCUMENTO: Muestra
PLACAS: Muestra

Nro FACTURA: Muestra
LOTE: Muestra
FECHA: Enero 20 de 2010

ENSAYO	MÉTODO	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO
		Min.	Máx.	
Penetración, 25°C, 5s, 100g (mm/10)	ASTM D-5	55	70	62
Punto de Ablandamiento (°C)	ASTM D-36	65		77.0
Ductilidad, 5°C, 5 cm/min (cm)	ASTM D-113	15		33.5
Recuperación Elástica por Torsión a 25°C (%)	NLT-329/91	70		70.0
Estabilidad al Almacenamiento (Diferencia en el Punto de Ablandamiento) °C	E-726 y E-712		5	2.5
Punto de Chispa (°)	ASTM D-92	230		295
Contenido de Agua (%)	ASTM D-95		0.2	0.0
Peso específico a 25°C	ASTM D-71	Reportar		1.012
Temperatura de Mezcla * (°C)	ASTM D-1559	Reportar		160-165
Temperatura de Compactación * (°C)	ASTM D-1559	Reportar		150-155
ENSAYO EN HORNO DE PELÍCULA FINA EN MOVIMIENTO, RTFOT, 85 min, 163°C				
ASTM D-2872				
Pérdida de Masa (%)	ASTM D-2872		1.0	0.1177
Penetración Retenida (%)	ASTM D-5	65		70
Ductilidad, 5°C, 5 cm/min (cm)	ASTM D-113	8		14.0

* Temperatura de Mezcla y Compactación recomendada para el diseño Marshall.

■ Temperatura de cargue: 170°C

SE ENVIA CONTRAMUESTRA SELLADA, ABRIR SI ES NECESARIO SOLAMENTE EN PRESENCIA DE UN FUNCIONARIO DE SHELL BITUMEN.

Aprobado por:


CESAR ANDRES ALBA GARZON
Analista de Bitumen
Tarjeta Profesional No. 2549

Shell Colombia S.A.
Km. 18.5 Via Facativá
Mosquera - Colombia
Tel (573) 1-640 4000 Ext. 3401
Fax (573) 1-8292966