

**ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFÁLTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA
DEFORMACIÓN PERMANENTE, CONTROLANDO EL ESCURRIMEINTO DE
ASFALTO: STONE MATRIX (MASTIC) ASPHALT CON ADICIÓN DE FIBRAS DE
CAUCHO RECICLADO**

**NESTOR JAVIER CONTRERAS PINTO
JAIME EDUARDO GRANADOS RUEDA**



**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

Bucaramanga, 2008



**ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFÁLTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA
DEFORMACIÓN PERMANENTE, CONTROLANDO EL ESCURRIMEINTO DE
ASFALTO: STONE MATRIX (MASTIC) ASPHALT CON ADICIÓN DE FIBRAS DE
CAUCHO RECICLADO**

**TESIS DE GRADO
MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN**

**AUTORES
NESTOR JAVIER CONTRERAS PINTO
Código 2030381
JAIME EDUARDO GRANADOS RUEDA
Código 2030372**

Tesis de Grado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

**DIRECTOR DE PROYECTO
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
Ingeniero Civil, M. Sc. Ph D**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

Bucaramanga, Octubre de 2008

A Dios, quien puso en cada uno de mis seres queridos ese amor y ayuda incondicional, a todos los instrumentos que utilizó para regalarme lo que hoy soy; a mis padres por creer siempre en mí y brindarme ese apoyo fraternal; a mi hermana por tantos años de compañía y preocupación; a toda mi familia y amigos, que de alguna manera participaron en este proceso de formación.

Nestor Javier Contreras Pinto

A Dios, a mis padres, a mis hermanos, a mi gran familia y amigos, a los que ya no están pero no por eso dejan de serlo, a mis maestros. Por su apoyo, credibilidad, enseñanza y dulzura. Gratitud eterna.

Jaime Eduardo Granados Rueda

AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan su gratitud a:

DIOS

Ing. Eduardo Castañeda

Germán Hernández y Jairo Hernández

Ing. Juan Camilo Ospina

Jorge Niño

Ing. Diego Merchán

Corasfaltos

Shell Colombia

Compañeros de laboratorio

Familiares

Amigos de siempre

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	22
1. CAPAS DE RODAMIENTO.....	25
1.1. PAVIMENTOS FLEXIBLES	25
1.2. STONE MATRIX ASPHALT	26
1.2.1. Reseña histórica	26
1.2.2. Generalidades	27
1.2.3. Composición de la mezcla.....	27
1.2.4 Principios del Stone Matrix Asphalt	32
1.2.5 Ventajas	33
1.2.6 Aplicación.....	34
1.2.7 Requisitos de la mezcla	35
1.3 MEZCLAS MDC-2 Y MDC-3	36
1.3.1 Generalidades	36
1.3.2 Composición de la mezcla.....	36
1.4 COMPARACIÓN DE GRADACIÓN Densa Y DISCONTINUA	38
1.5 BENEFICIOS ECONÓMICOS (SMA – MEZCLA CONVENCIONAL)	38
2. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	40
2.1 DESCRIPCIÓN.....	40
2.2 MATERIALES EMPLEADOS.....	41
2.2.1 Agregado mineral.....	41

2.2.2 Asfalto Modificado	42
2.2.3 Fibra de Celulosa	43
2.3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS	50
2.3.1 Granulometrías Recomendadas	50
2.3.2 Granulometrías de Mezclas Estudiadas	51
2.3.3 Determinación del Porcentaje Óptimo de Asfalto	51
2.3.4 Metodología usada para la fabricación de probetas	53
2.4. MÉTODO MARSHALL PARA LA ELABORACIÓN DE PROBETAS	55
2.5 ENSAYOS	58
2.5.1 ANALISIS DEL ESCURRIMIENTO DE ASFALTO	59
2.5.2 Medición de la densidad Bulk	64
2.5.3 Determinación del módulo elástico a 7.5 °C	68
2.5.4 Ensayo Creep sin Confinar a 60 ° C (Carga Estática)	71
2.5.5 Estabilidad y flujo	72
2.5.6 Análisis de porcentaje de vacíos	75
3. RESULTADOS DE LABORATORIO	78
3.1 AGREGADOS	78
3.1.1 Caracterización de los agregados	78
3.1.2 Petrología mineral de los agregados	79
3.2 ASFALTO	80
3.2.1 Características Reológicas del Asfalto	80
3.3 CONFORMACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	80
3.3.1 Granulometría utilizada	80
3.3.2 Porcentaje de Asfalto Utilizado	81

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS.....	82
3.4.1 Nomenclatura	82
3.4.2 Geometría	82
3.5 CONTROL DEL ESCURRIMIENTO.....	82
3.5.1 Determinación del Número de probetas a elaborar.....	82
3.5.2 Gráficas de escurrimiento Vs porcentaje de caucho	83
3.5.3 Comportamiento para mezclas con 6.0 % de Asfalto	83
3.5.4 Comportamiento para mezclas con 6.5 % de Asfalto	84
3.5.5 Comportamiento para mezclas con 7.0% de Asfalto	86
3.6 ANALISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS.....	87
3.6.1 Densidad Bulk.....	87
3.6.2 Vacíos con Aire.....	88
3.6.3 Vacíos en el agregado mineral	89
3.6.4 Vacíos llenos de asfalto.....	90
3.7 EVALUACIÓN DEL MÓDULO ELÁSTICO	91
3.7.1 Mezcla MDC-2.....	91
3.7.2 Mezcla SMA - CAUCHO	93
3.8 DEFORMACIÓN A 60 °C (ENSAYO CREEP SIN CONFINAR).....	94
3.8.1 Gráficos Deformación Vs. Tiempo (MDC-2)	94
3.8.2 Gráfico Deformación Vs. Tiempo (SMA- CAUCHO).....	95
3.9 ESTABILIDAD MARSHALL.....	96
3.9.1 Grafico estabilidad vs porcentaje de asfalto MDC-2.....	96
3.9.2 Grafico estabilidad vs porcentaje de asfalto SMA-CAUCHO	97
3.10 FLUJO MARSHALL.....	97

3.10.1 Grafico Flujo vs porcentaje de asfalto MDC-2	97
3.10.2 Grafico Flujo vs porcentaje de asfalto SMA-CAUCHO.....	98
4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE MEZCLAS	99
4.1 DESCRIPCION.....	99
4.2 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	99
4.2.1 Control del escurrimiento	99
4.2.2 Densidad Bulk.....	101
4.2.3 Vacíos con aire	102
4.2.4 Vacíos en el agregado mineral	103
4.2.5 Vacíos llenos de asfalto.....	104
4.2.6 Módulo Elástico a 7.5 °C	105
4.2.7 Creep sin Confinar a 60 °C.....	106
4.2.8 Estabilidad Marshall.....	107
4.2.9 Flujo Marshall.....	108
RECOMENDACIONES.....	110
CONCLUSIONES	111
BIBLIOGRAFIA.....	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rangos granulométricos del SMA.....	31
Tabla 2. Requisitos de una mezcla SMA	35
Tabla 3. Cálculo de la densidad del caucho molido.	49
Tabla 4. Cálculo de la densidad aparente.....	49
Tabla 5. Granulometría empleada de caucho.....	50
Tabla 6. Comparación volumétrica para las diferentes fibras.....	50
Tabla 7. Porcentaje óptimo de asfalto.	53
Tabla 8. Nivel de compactación de la mezcla.....	55
Tabla 9. Caracterización de los agregados pétreos.....	79
Tabla 10. Composición mineralógica de los agregados.....	79
Tabla 11. Propiedades reológicas del asfalto	80
Tabla 12. Gradaciones empleadas MDC-2 y SMA.	81
Tabla 13. Porcentajes de asfalto empleados.....	81
Tabla 14. Resultados de Ecurrimiento para un contenido de 6% de Asfalto.	83
Tabla 15. Resultados de escurrimiento para un contenido de 6.5% de Asfalto.....	85
Tabla 16. Resultados de Ecurrimiento para un contenido de 7.0% de Asfalto	86
Tabla 17. Módulos Elásticos para la mezcla MDC-2.....	92
Tabla 18. Módulos elásticos de las mezclas SMA-CAUCHO.....	93
Tabla 19. Deformación final creep MDC-2.....	95
Tabla 20. Deformación final Creep SMA-CAUCHO.	96
Tabla 21. Valores óptimos de fibra de caucho.....	100

Tabla 22. Resultado de análisis de escurrimiento para una MDC-2.	101
Tabla 23. Valores promedio del módulo Elástico. Mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2	106
Tabla 24. Valores Promedio de la deformacion final. Mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2107	

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Imagen transversal de una mezcla SMA (Izquierda) y tradicional (derecha)	31
Figura 2. Mezcla SMA y mezcla tradicional.....	33
Figura 3. SMA construido en el terreno.....	34
Figura 4. Probeta de una mezcla SMA.....	35
Figura 5. Mezcla densa y discontinua en caliente.	38
Figura 6. Incorporación del GCR en las mezclas asfálticas, proceso seco.....	46
Figura 7. Incorporación del GCR en las mezclas asfálticas, proceso húmedo.	47
Figura 8. Gradación típica de la mezcla	51
Figura 9. Proceso de calentamiento de agregados	56
Figura 10. Proceso de mezclado de agregados.	57
Figura 11. Proceso de compactacion de la probeta.	57
Figura 12. Resultado: probeta tipo SMA	58
Figura 13. Vaciado de la mezcla tras salir del horno.	62
Figura 14. Escurrimiento de la mezcla.	62
Figura 15. Escurrimiento producido en presencia de fibras de caucho.....	63
Figura 16. Peso de la muestra seca al aire.	66
Figura 17. Probetas parafinadas.	66
Figura 18. Peso de las probetas parafinadas.	67
Figura 19. Peso de las probetas parafinadas sumergidas en agua.	67
Figura 20. Probetas sumergidas en agua a 7.5 °C.....	70
Figura 21. Ensayo módulo elástico.	70

Figura 22. Cambio de agua.....	72
Figura 23. Probetas en agua a 60°C.	Figura 24. Ubicación de la probeta... 74
Figura 25. Ensayo Estabilidad y Flujo.	Figura 26. Probeta fallada. 74
Figura 27. Ensayo de porcentaje de vacíos.	77
Figura 28. Muestra de mezcla a ensayar.	77
Figura 29. Porcentaje de escurrimiento vs porcentaje de caucho para 6% de Asfalto.....	84
Figura 30. Porcentaje de escurrimiento vs porcentaje de caucho para 6.5% de Asfalto..	85
Figura 31. Porcentaje de escurrimiento vs porcentaje de caucho para 7%.	87
Figura 32. Peso específico compactado vs porcentaje de asfalto.	88
Figura 33. Porcentaje de vacíos con aire.	89
Figura 34. VAM Vs Porcentaje de asfalto.....	90
Figura 35. VAF Vs Porcentaje de Asfalto.	91
Figura 36. Esfuerzo Vs Deformacion MDC-2.	92
Figura 37. Esfuerzo Vs Deformacion SMA-CAUCHO.....	93
Figura 38. Deformación Vs Tiempo para MDC-2.....	94
Figura 39. Deformación Vs Tiempo SMA-CAUCHO.....	95
Figura 40. Estabilidad vs porcentaje de asfalto mezcla MDC-2.....	96
Figura 41. Estabilidad Vs porcentaje de asfalto SMA-CAUCHO.	97
Figura 42. Flujo vs porcentaje de asfalto para mezcla MDC-2.	98
Figura 43. Flujo vs porcentaje asfalto mezcla SMA-CAUCHO.	98
Figura 44. Líneas de tendencia del escurrimiento, en presencia de caucho.....	99
Figura 45. Porcentaje de asfalto vs porcentaje de fibras de caucho.....	100
Figura 46. Comparación de resultados densidad Bulk.	102
Figura 47. Comparacion porcentaje de vacíos con aire, mezcla SMA-CAUCHO y MDC-2.	103
Figura 48. Comparacion VAM, Mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2.	104

Figura 49. Comparacion VAF, Mezcla SMA-CAUCHO y MDC-2.....	105
Figura 50. Comparacion módulo elástico mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2	106
Figura 51. Comparacion Creep sin confinar mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2.	107
Figura 52. Comparación estabilidad mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2.	108
Figura 53. Comparación Flujo mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2	109

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	116
ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS	126
ANEXO C. DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR MARSHALL	132
ANEXO D. ENSAYOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD	135
ANEXO E. ENSAYO CREEP	138
ANEXO F. ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO	141
ANEXO H. CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DEL ASFALTO	143

RESUMEN

TÍTULO

ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFÁLTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE, CONTROLANDO EL ESCURRIMIENTO DE ASFALTO: STONE MATRIX (MASTIC) ASPHALT CON ADICIÓN DE FIBRAS DE CAUCHO RECICLADO.*

AUTORES

CONTRERAS PINTO NESTOR JAVIER
GRANADOS RUEDA JAIME EDUARDO**

PALABRAS CLAVES:

MEZCLA DENSA EN CALIENTE
MEZCLA DISCONTINUA EN CALIENTE
STONE MATRIX ASPHALT
FIBRAS DE CAUCHO
ESCURRIMIENTO DE ASFALTO

DESCRIPCIÓN:

Durante años, las mezclas densas en caliente (entre las que se incluyen la MDC-2 y MDC-3) se han empleado en Colombia como capas de rodadura. El principal problema al que se han enfrentado, ha sido su limitada resistencia a la deformación permanente. Por esta razón, surge la necesidad de evaluar otros tipos de mezclas, capaces de resistir las cargas producidas por el aumento en el nivel del tráfico sin permitir altas deformaciones. Como una alternativa para ello, han sido ideados los micro aglomerados discontinuos en caliente, de los que hacen parte, las mezclas SMA (Stone Matrix Asphalt).

Estas mezclas especiales, de excelente comportamiento en varios países, no han sido implementadas en nuestro medio, debido al costo económico que demanda la implementación de fibras que controlen el escurrimiento de asfalto.

La Universidad Industrial de Santander ha venido experimentando este tipo de mezclas, usando materiales de fácil acceso y bajo costo; por ello, este trabajo consiste en remplazar el uso de la celulosa patentada y diseñada para la fabricación de mezclas SMA en otros países, por fibras de otro tipo.

Se buscará experimentar con materiales que aporten en la conservación del medio ambiente y a su vez mantengan las propiedades típicas de una mezcla SMA. Se usarán fibras de caucho de llantas recicladas como instrumento para controlar el escurrimiento, experimentando así una nueva mezcla, la SMA-CAUCHO.

* Tesis de Grado

* * Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Ingeniería Civil. ING. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN

ABSTRACT

TITTLE

ADDITIVES TO PRODUCE ASPHALTIC MIXTURES OF HIGH RESISTANCE TO THE PERMANENT DEFORMATION CONTROLLING RUNOFF FROM ASPHALT: STONE MATRIX (MASTIC) ASPHALT WITH ADDITION OF FIBER ON RECYCLED RUBBER*

AUTHORS:

CONTRERAS PINTO, Néstor Javier
GRANADOS RUEDA, Jaime Eduardo **

KEY WORDS:

HOT DENSE MIXTURE
RUNOFF FROM ASPHALT
RUBBER FIBERS
STONE MATRIX ASPHALT
DISCONTINUOUS DENSE MIXTURES

DESCRIPTION

Across the years, the hot dense mixtures (which can be including the MDC-2 and MDC-3) have been used in Colombia as layers of tread. The main problem we have faced has been its limited resistance to permanent deformation. For this reason, there arises the need to evaluate other types of mixtures, capable of withstanding the loads produced by the increase in the level of traffic without allowing high deformations. As an alternative thereto, have been designed micro discontinuous hot briquettes, which are part, mixtures SMA (Stone Matrix Asphalt).

These special mixtures of excellent behavior in several countries have not been implemented in our environment due to economic cost to demand the implementation of fibers that control runoff from asphalt.

The Universidad Industrial de Santander has been experiencing this type of materials using mixes easily accessible and affordable, so this work is to replace the use of cellulose designed and patented for the manufacture of SMA mixtures in other countries, for fiber otherwise.

Will look to experiment with materials that contribute to environmental conservation and in turn keep the properties of a typical SMA mixture. Fibers will be used recycled rubber tires as a tool for controlling runoff, experimenting with a new mix, the SMA-RUBBER.

* DEGREE Thesis

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

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto, no solo busca involucrar aspectos técnicos relacionados con la construcción de pavimentos en Colombia y en el mundo, es propósito de los autores inquietar con este documento sobre los diferentes tipos de mezclas no convencionales que pueden ser usadas en nuestro país, la conveniencia de su uso, algunas deficiencias, los costos económicos y lo más importante: hacer un pequeño aporte a la investigación en la rama de los pavimentos y fomento en general, para todos los campos de la Ingeniería en Santander.

Este trabajo se ha realizado en los laboratorios de pavimentos de la Universidad Industrial de Santander, cumpliendo con las normativas que rigen la construcción y ensayo de probetas de pavimentos en Colombia y siguiendo parámetros similares a los tenidos en cuenta por proyectos anteriores del mismo tipo: los pavimentos SMA (Stone Matrix Asphalt).

Se pretende entregar a la Universidad Industrial de Santander y a la comunidad en general, un trabajo que permita reflexionar sobre el uso de nuevos pavimentos que acaben o al menos reduzcan la problemática que genera el continuo mantenimiento de los pavimentos flexibles, mostrando las características, cualidades y viabilidad del uso de las mezclas SMA en las carreteras Colombianas, mejorando las condiciones del flujo y el buen estado de los corredores viales.

Se denomina corrientemente como falla, todo tipo de deterioro que se presenta en el pavimento y que afecte o pueda llegar a afectar la circulación cómoda de los vehículos. La experiencia ha demostrado que los pavimentos flexibles presentan una gama más amplia de deterioro comparados con los pavimentos rígidos, hecho que puede atribuirse por un lado a la mayor variedad en los diseños y procesos constructivos y por otro a un nivel más

bajo de inversión empleado en los pavimentos flexibles, presentando estructuras económicas en tiempo corto pero de alto costo por la durabilidad que ofrecen.

La presencia de fallas de los pavimentos flexibles generan un gasto adicional en mantenimiento que a futuro puede hacer de este tipo de superficie una estructura de elevado costo; de aquí surge la necesidad de implementar nuevas mezclas que permitan un costo más bajo a corto, mediano y largo plazo; es decir, económica construcción, bajo costo de mantenimiento y extensa vida útil, características de los pavimentos STONE MATRIX ASPHALT (SMA).

Las mezclas SMA, llamadas así por sus singlas en Inglés, que hacen referencia a su "MATRIZ DE PIEDRA" característica de las mezclas de granulometría abierta, han suplido necesidades de servicio en varios países a lo largo del mundo (Europa, Estados Unidos, México, Argentina, entre otros), donde las condiciones del tránsito son exigentes y continuas. Se construyen en carpetas de poco espesor, con una granulometría discontinua, considerable contenido de asfalto y aditivos que le permitan estabilizar el flujo de ligante, este último, punto de control en este proyecto.

Su estructura interna a modo de "esqueleto pétreo", hace que los esfuerzos generados por el tránsito se transmitan mejor debido al alto porcentaje de agregado pétreo grueso, esto ha permitido menor espesor de las carpetas con más capacidad de carga y una deformación permisible. El tamaño y contenido de agregado grueso hace que el contenido de ligante sea mayor, permitiendo mayor recubrimiento de las partículas, menor desgaste y a su vez mayor vida útil comparado con carpetas asfálticas tradicionales sometidas a los mismos esfuerzos.

Actualmente la Universidad Industrial de Santander ha venido adelantado estudios sobre mezclas SMA para producirlas con materiales encontrados en la región permitiendo bajos costos, especialmente las fibras espesantes que controlan el escurrimiento del ligante, de alto costo en otros países.

Fibras como la celulosa "Cellosize QP 52000h" y el uso de "Cenizas volantes" ha sido el tema de estudio en los últimos dos años, presentando muy buenos valores de resistencia pero sin controlar algunos otros inconvenientes. El primero de ellos, la celulosa, al reaccionar con el agua dejaba su estado sólido para convertirse en gel, lo cual impediría

el normal tránsito vehicular. El segundo, con el uso de cenizas volantes de Termo-Tasajero, presentó un comportamiento estructural incluso mejor que el anterior, soluciona el problema de la presencia de agua en la mezcla pero se generan serios problemas de escurrimiento de ligante que impiden un correcto proceso constructivo.

Intentando controlar el problema de escurrimiento, el presente proyecto reemplaza el uso de la celulosa y las cenizas volantes para incorporar y estudiar la influencia de las fibras de caucho molido de llantas recicladas o grano de caucho como también es llamado, en la estructura de una mezcla SMA. Se pretende controlar los problemas presentados en los proyectos anteriores y realizar un análisis comparativo de algunos parámetros de resistencia respecto a una mezcla densa en caliente tipo II (MDC-2).

1. CAPAS DE RODAMIENTO

Constituyen 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 impermeables impidiendo la penetración del agua superficial que destruye las capas inferiores; cómoda para ser circulada, es decir de buen tamaño y 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 exigiéndose por punzonamiento, resistencia a las deformaciones plásticas, envejecimiento, resistencia a la desintegración por la acción del agua ó el hielo, entre otras.

1.1. PAVIMENTOS FLEXIBLES

Una estructura de pavimento flexible está compuesta por varias capas de material. Cada capa recibe las cargas desde la parte superior, extendiéndolas en sus dos direcciones hasta transmitirla a las capas inferiores. Esto quiere decir, que la capa de más abajo en 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 orden 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 menos capacidad de carga y por tanto más económica.

La típica estructura de un pavimento flexible consta de las siguientes capas:

Capa superficial:	Capa superior y la capa que entra en contacto con el tráfico. Puede estar compuesta por uno o varias capas asfálticas.
Base:	Esta es la capa que se encuentra directamente debajo de la capa superficial, se compone de agregados (ya sea estabilizado o sin estabilizar).
Capa Sub-base:	Esta es la capa (o capas), bajo la base. La Sub-base 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.

1.2. STONE MATRIX ASPHALT

1.2.1. Reseña histórica

La designación S.M.A., corresponde a las iniciales de las palabras en idioma inglés: Stone Matrix Asphalt, las cuales significan que se trata de una mezcla asfáltica formada por partículas de piedra acomodadas en una matriz asfáltica.

Este tipo de mezcla para pavimento fue desarrollada en Alemania a finales de los años 60. Se deseaba obtener un pavimento de máxima resistencia al desgaste y deterioro causado por los neumáticos de clavos en las rutas europeas. “Una empresa de pavimentos, STRABAG, con la colaboración de J. Rettenmaier (líder en Tecnología de Fibras) 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 Pacífica”. Muchos 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 grandes países asiáticos, el SMA está ganando rápidamente la aceptación de las autoridades viales y la industria del asfalto.

1.2.2. Generalidades

La particularidad de esta mezcla asfáltica, cuyo prototipo se denominó “Mastimac”, 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 de poco espesor y 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. Se prepara en caliente y consiste de dos partes: un agregado grueso de alta calidad o esqueleto y un mástico a base de arenas, filler, fibras de celulosa y cemento asfáltico, con o sin aditivos modificadores. “Tiene una vida útil normal de 30 años”¹.

Es difícil precisar una guía de diseño exacta para mezclas SMA; aspectos esenciales como la consistencia del esqueleto mineral y el mástico 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.

1.2.3. 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

¹ Página de internet www.e-asfalto.com

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 llamará agregado grueso a la fracción de roca retenida en el tamiz N ° 4, filler mineral al polvo que pasa por el tamiz N ° 200 y agregado fino al material comprendido entre ellos.

Conociendo que de acuerdo al país existen normas que regulan los diseños de este tipo de mezclas y que para cada cual existen parámetros más importantes que otros, aquí presentamos una estimación de los requisitos que deben cumplir los agregados pétreos para garantizar su buen funcionamiento en la mezcla.

Tasa de trituración:	100% al menos una cara y mínimo 90 % dos caras.
Forma:	Índice de lajas menor del 25% (NLT 354/91)
Resistencia:	Desgaste de los Angeles, menor del 30% (AASHTO T-96).
Pulido:	Coefficiente de pulimiento acelerado mayor de 0,50 (NLT 174/72)
Limpieza:	Equivalente de arena de la fracción que pasa el tamiz N° 4 mayor del 50% (ASTM D2419).
Durabilidad:	En Sulfato de Sodio menor del 15% (ASTM C88)
Adhesividad:	Mayor del 95% (ASTM D3625-96)
Absorción de agua:	Menor del 2% (ASTM C 127 y ASTM C128)

- **Agregado grueso**

“Debe provenir preferiblemente de minerales tales como el Granito, Gabro, Diabasa y Basalto, extraídos de la marisma y el lecho de ríos. Tiene que ser en su totalidad gravilla triturada, no absorbente, con un máximo de 20% de partículas planas y alargadas y resistencia al intemperismo acelerado no menor al 15%, si se usa Na₂SO₄. Generalmente se dosifica en cantidades cercanas al 70 % del peso total de la mezcla”².

² TESIS DE GRADO ANALISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACION EN LAS MEZCLAS MDC-2,MDC-3,M1 Y STONE MATRIX ASPHALT.

Este debe ser material 100% triturado, arena o una mezcla de los 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.

- **Agregado fino**

Este debe ser material 100% triturado, arena o una mezcla de los 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**

El filler puede ser polvo de piedras calizas u 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 porcentaje de asfalto que debe intervenir en la mezcla para que esta presente las características adecuadas, se determina mediante ensayos de laboratorio tales como el Marshall y el Hubbard Field.

El SMA contiene ligante en cantidades que varían entre el 6 y 8 % del peso total, razón por la cual requieren la adición de un sustrato fibroso, comúnmente a base de celulosa, que en este caso será reemplazado por fibras de caucho molido, en atención a los problemas presentados por fibras de (Celulosa Cellosize QP 52000h y cenizas volantes) empleadas en estudios previos por la Universidad. Su temperatura de

mezcla varía normalmente entre 155 y 163°C y se recomienda que no supere los 177°C; esta cantidad elevada de betún da una vida útil prolongada al pavimento.

El escurrimiento y envejecimiento en mezclas asfálticas ha disminuido en los últimos años, al difundirse el uso de asfaltos modificados con polímeros. Estos tienen el valor agregado de mejorar la adherencia y disminuir la susceptibilidad térmica y pueden ser incluidos en diseños SMA. En nuestro caso utilizaremos asfalto modificado Tipo II producido por la planta Shell en Bogotá.

- **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 modifican químicamente el asfalto, pero intervienen en las propiedades físicas de la mezcla, permitiendo incrementar el contenido del mismo. Tienden a espesar el betún, manteniendo estable el esqueleto pétreo durante el proceso de mezcla, almacenaje intermedio, pavimentación, y evitando el drenaje de asfalto antes de compactar”³. La fibra comercial en Colombia (Cellosize qp 52000h) presenta un comportamiento negativo ante la aplicación de agua, las cenizas volantes presentaron problemas de escurrimiento; razón por la cual se procede a utilizar fibras de caucho como estabilizantes para la mezcla SMA.

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

Método A - Alpine Sieve	Long. de la fibra, 6 mm., máx. Pasa malla 150 µm (No.100), 70%(± 10%)
Método B - Por mallas	Long. de la fibra, 6 mm., máx. Pasa No. 20 (850 µm), 85% (± 10%) Pasa No. 40 (425 µm), 65% (± 10%) No. 140 (106 µm), 30% (± 10%)

³ TESIS DE GRADO: ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFALTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA DEFORMACION PERMANENTE AÑO 2007

Contenido de Cenizas: 18% ($\pm 5\%$) no volátiles

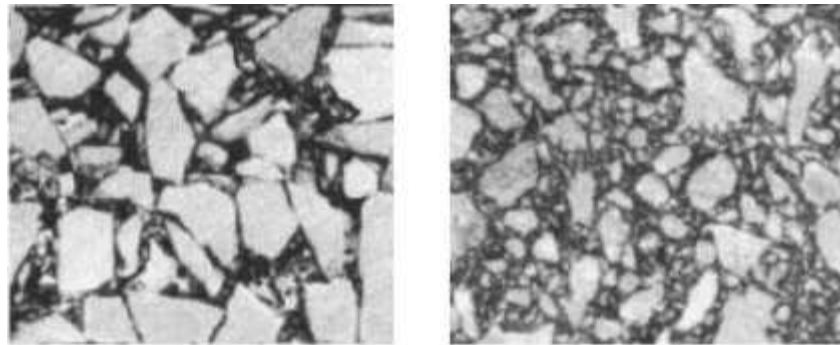
PH: 7.5 (± 1.0)

Absorción de Aceite: 5 (± 1.0) (por el peso de la fibra)

Contenido de Humedad: -5% (en peso)

- **Granulometría pétreo**

Figura 1. Imagen transversal de una mezcla SMA (Izquierda) y tradicional (derecha)



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

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
¾	100
½	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. 2006.

1.2.4 Principios del Stone Matrix Asphalt

El Splittmastixasphalt, ahora más comúnmente conocido en Europa como SMA (o Stone Mastic Asphalt), se caracteriza 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 70%”, asegura un contacto perfecto entre las partículas después de la compactación. El grado de viscosidad de la mezcla se obtiene por el agregado de arena triturada”.⁴

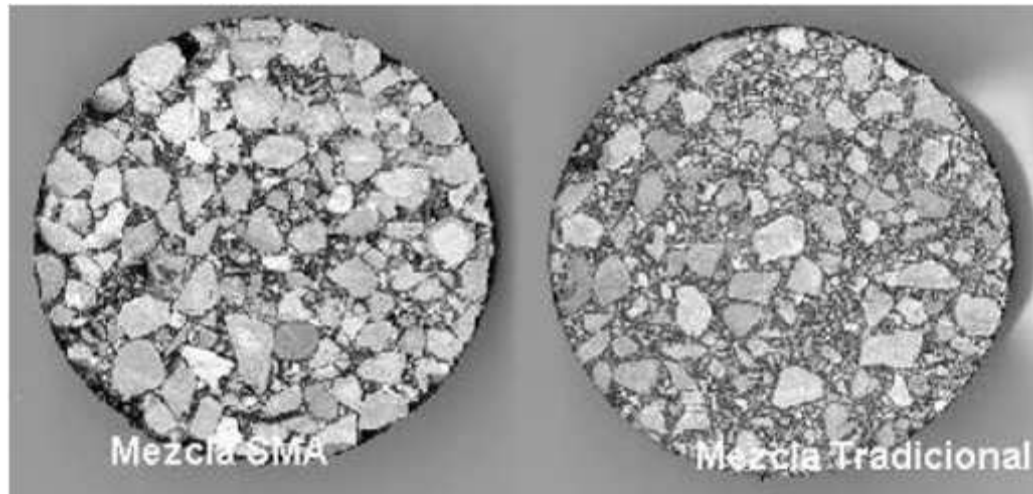
El resultado es un acabado de superficie duradero, denso y prácticamente impermeable, con una excelente resistencia a la deformación y al desgaste, y que además conlleva otras ventajas como la reducción del ruido. Los principios del SMA fueron rápidamente adoptados y desarrollados por países en los que la abrasión por neumáticos claveteados supone un verdadero problema, como es el caso de los países escandinavos.

“Tradicionalmente, se ha utilizado una fibra de celulosa para evitar el drenaje del ligante procedente de la mezcla, aunque los diseños más sofisticados de hoy en día tienden a la utilización del ligante modificado con polímeros (PMB, Polymer Modified Binder) a medida que se busca otras soluciones de valor añadido”.⁵ El ‘diseño’ de las mezclas SMA se centra principalmente en el equilibrio volumétrico de los materiales constituyentes. Las mezclas mal diseñadas, que provocan un desequilibrio en las proporciones volumétricas, se caracterizan con frecuencia por su excesiva riqueza, exudación y progresiva deformación de la superficie.

⁴ PAGINA INTERNET WWW.E-ASFALTO.COM

⁵ PAGINA DE INTERNET WWW2.NYNAS.COM

Figura 2. Mezcla SMA y mezcla tradicional.



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

1.2.5 Ventajas

- **Estabilidad a elevadas temperaturas:** La mezcla de SMA presenta un esqueleto pétreo de áridos de alta calidad que provee un incremento en la fricción interna y resistencia al corte dando así una estabilidad extremadamente elevada.
- **Flexibilidad a bajas temperaturas:** La mezcla de SMA utiliza un mástic 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 de SMA tiene bajo contenido en vacíos de aire totales que le confiere impermeabilidad y le provee buena resistencia al envejecimiento, a la humedad y eleva la durabilidad.
- **Elevada capacidad adhesiva entre los agregados y el bitumen:** Estas mezclas SMA tienen una gran cantidad de filler y asfalto, las fibras celulósicas se agregan como estabilizante. Ello se hace para absorber bitumen, espesar la película bituminosa y mejorar la adhesión bitumen / 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 textura superficial hay menos salpicado de agua y de noche es menor el reflejo de la superficie y se mejora la visibilidad de las demarcaciones del camino.
- **Menos ruido de tráfico:** SMA presenta generalmente disminución de ruidos debidos a las propiedades de textura conseguidos. Ello lo hace sumamente útil en áreas residenciales o zonas donde se requiere silencio.

1.2.6 Aplicación

La SMA debe ser colocada y compactada a temperaturas mayores a las de las 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 mantenerse arriba de los 10° C. La capa delgada del SMA debe colocarse sobre una superficie re nivelada, donde los baches hayan sido tapados con mezclas en caliente o en frío.

Figura 3. SMA construido en el terreno.



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.

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.

Figura 4. Probeta de una mezcla SMA.



Fuente: GARNICA, Paul. Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas, Sanfandila, Qro, 2004(citado en octubre de 2008). Disponible en internet: <URL: <http://www.imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt246.pdf>>

1.2.7 Requisitos de la mezcla

Para garantizar el correcto funcionamiento de la mezcla SMA, se debe cumplir con unas características mínimas correspondiente a las siguientes pruebas:

Tabla 2. Requisitos de una mezcla SMA

Propiedad	Valor	Método
Vacíos en la mezcla total	3-4%	Según 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*	635kg.,min	ASSHTO T245
Flujo, 0.25 mm	8 a 16	
Drene, %	0.3 máx. (lectura a 1 hr).	Método propuesto por la NCAT
Vacíos en la mezcla asfáltica (VAM).	17% min	

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

1.3 MEZCLAS MDC-2 Y MDC-3

1.3.1 Generalidades

La MDC-2 y MDC-3 son mezclas densas en caliente, también llamadas concreto asfáltico. Están definidas como la combinación uniformemente dosificada de agregado y asfalto, mezclados mientras se mantiene una temperatura previamente determinada en el laboratorio, que garantiza la mejor adherencia entre ellos.

A diferencia del SMA, están incluidas en la norma INVIAS, que controla los diseños de pavimentos en Colombia. No requieren la adición de fibras celulósicas que eviten la exudación, pues no poseen un elevado contenido de asfalto, y su gradación densa les confiere una mayor cantidad de huecos de aire totales. Son mezclas efectivas en condiciones de tráfico moderadas, pero presentan problemas de estabilidad ante sollicitaciones de carga exigentes. Su vida útil es pequeña en comparación con mezclas como el SMA, luego requieren grandes inversiones en gastos de reparación y mantenimiento.

Han sido empleadas durante años en diseños de pavimentos en Colombia; según el INVIAS la MDC – 2 debe emplearse en carpetas de espesor mayor a 3cm, mientras la MDC – 3 se utiliza en los demás casos.

1.3.2 Composición de la mezcla

Estas mezclas están compuestas por los siguientes elementos: agregado grueso, fino, filler mineral y cemento asfáltico.

- **Agregado mineral**

Los requerimientos de calidad del agregado, exigidos por el INVIAS para el diseño de estas mezclas, están descritos en el artículo 400 – 02 (tabla 400.1). Deben tener una

naturaleza tal, que al entrar en contacto con el asfalto se adhieran lo mayor posible a él, sin generar desprendimientos por efecto del agua y el tránsito.

“El agregado grueso se dosifica en una cantidad cercana al 35 % del peso total de la mezcla. Deberá provenir de la trituración de roca o grava; sus fragmentos han de ser limpios, durables, sin exceso de partículas planas y alargadas, blandas o desintegrables. En el momento de la mezcla estarán libres de polvo, arcilla o cualquier otro material que pueda disminuir la adhesión con el asfalto”⁶.

El agregado fino será arena natural, de trituración o una combinación de ambas. Sus granos han de ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. Al igual que en la fracción gruesa debe asegurarse la adherencia con el asfalto, garantizando que estén libres de sustancias extrañas. Generalmente constituye el 55 % del peso de la mezcla.

El llenante mineral podrá provenir de la trituración del agregado empleado en el diseño o de productos comerciales como la cal hidratada y el cemento Portland y será aplicado en una proporción del orden del 6 % del peso de la mezcla.

- **Cemento asfáltico**

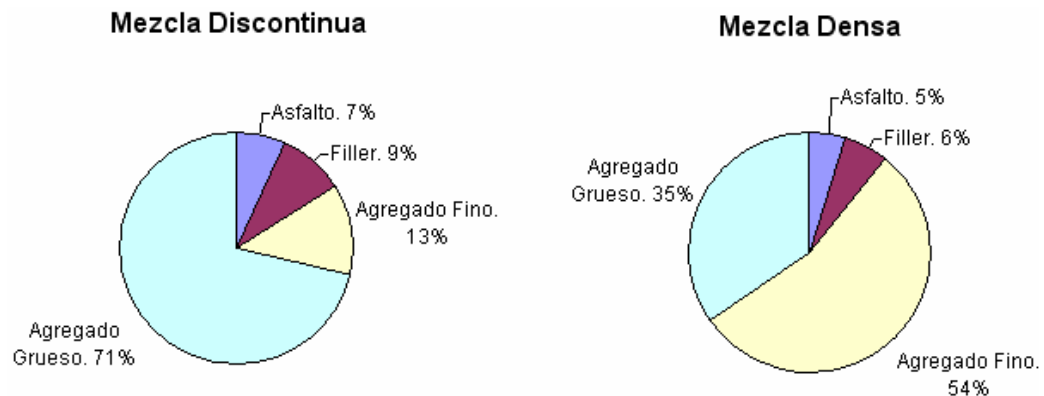
El cemento asfáltico empleado en este tipo de mezclas, según la norma INVIAS, puede ser convencional o modificado; en el primer caso, es escogido en función de las características climáticas de la región entre el asfalto 60 -70 y 80 -100 (tabla 400.2, Art. 400 – 02) y en el segundo, debe cumplir con los requerimientos señalados en el mismo artículo, en la tabla 400.4. Se aplica en una cantidad aproximada del 5 % en peso.

⁶ PAGINA EN INTERNET http://www.occovi.gov.ar/obra/pdf/2006/PETP_lic01_06.pdf

1.4 COMPARACIÓN DE GRADACIÓN DENSA Y DISCONTINUA

En la Figura 5 se aprecian las granulometrías de una mezcla densa típica, de las que hacen parte la MDC-2 y la MDC-3, y de una discontinua, como la M1 y el SMA.

Figura 5. Mezcla densa y discontinua en caliente.



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

1.5 BENEFICIOS ECONÓMICOS (SMA – MEZCLA CONVENCIONAL)

- Costos sobre la inversión inicial. La mezcla convencional tiene un costo adicional por sellos después del primer año, mientras que la SMA con fibras de celulosa, gracias a su macro textura, no requiere ningún recubrimiento durante su vida útil.
- Por cada 25,000 m² de pavimento hecho con SMA, se ahorra lo suficiente como para construir otros 3,600 m², comparado con una carpeta convencional.
- El costo inicial [por m²] de una mezcla tipo SMA es menor comparado con mezclas tradicionales gracias a los pequeños espesores de carpeta que maneja (entre 1.5 y 4 cm). La reducción puede variar entre el 15 – 20 %; por ejemplo, para una sobre

carpeta de asfalto convencional de 5 cms de espesor el costo es alrededor de 13500.00 \$/m², mientras que una carpeta SMA con fibra de celulosa de 3cms de espesor tiene un costo de aproximado de 11000.00 \$/m².

- El ahorro más significativo se encuentra en el mantenimiento. El costo de mantenimiento de una carpeta convencional equivale al 25% del costo de inversión inicial por año (según datos de S.C.T.), mientras que un S.M.A. puede durar hasta más de ocho años sin mantenimiento; es decir que en seis años una carpeta convencional cuesta 33700.00 \$/m² mientras que la SMA se mantiene en los mismos 11500.00 \$/m².
- Otro ahorro, concerniente al mantenimiento, es la vida útil de una mezcla SMA. Normalmente, su vida útil asciende a más de 30 años, mientras que las mezclas tradicionales solo presentan una vida útil de 5 años, en promedio. En países como Alemania, Estados Unidos y México la experiencia en mezclas tipo SMA lo comprueban.

NOTA: Costos tomados de “ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFÁLTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE”, convertidos de moneda Mexicana a moneda Colombiana (a Octubre de 2008).

2. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

2.1 DESCRIPCIÓN

Para la realización de esta investigación, se cumplió con las siguientes etapas:

Documentación: Etapa en la cual se realizó una consulta bibliográfica teniendo en cuenta estudios previos a nuestra investigación como lo son las tesis de grado ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFOMACIÓN EN LAS MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT del año 2006 y ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFÁLTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE del año 2007, al igual que adelantos realizados sobre el tema de las mezclas de gradación abierta, especialmente las SMA en páginas de la web alrededor del mundo.

Caracterización de materiales: Se emplearon los mismos materiales (agregados pétreos y asfalto) empleados por el proyecto de grado “ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN EN LAS MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT”, de ahí que se cuenta con los mismos resultados de caracterización incluidos en el ANEXO A. Además, se presenta un anexo de las propiedades de materiales pétreos provenientes de la cantera “Bocas”, siendo este último agregado empleado también en la fabricación de probetas para tener resultados comparativos de la influencia de los agregados en las mezclas SMA.

Diseño y fabricación de probetas: Se realizaron probetas atendiendo el concepto del método Marshall, al igual que las regulaciones formuladas por el INVIAS, AASHTO y normas de otros países para el diseño de mezclas en caliente.

Ensayos: Se llevó a cabo el desarrollo de los mismos ensayos del proyecto “ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACIÓN EN LAS MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT”, para obtener un punto de referencia y comparación. Además, se prepararon mezclas sin compactar para evaluar los porcentajes óptimos de caucho en las mezclas SMA según el contenido de asfalto, empleando la metodología para control de escurrimiento “Método de Schellenberg”.

Etapas final: Análisis de resultados

2.2 MATERIALES EMPLEADOS

2.2.1 Agregado mineral

- **Procedencia**

Se fabricaron probetas con agregado proveniente de dos canteras; el primero hace parte de la cantera de Bocas, ubicada en Rio Negro (Santander); el otro, proveniente de la cantera ubicada junto al río Chicamocha, del sector conocido como Pescadero, departamento de Santander.

- **Tamaño Máximo Nominal**

Corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor a aquel que retiene una cantidad mayor o igual al 10 % del peso total del árido. En este caso, con base en el análisis granulométrico, este valor es de ½”.

- **Ensayos Previos Realizados al Agregado**

Para cumplir los requisitos de calidad del agregado mineral, sugeridos en la norma INVIAS (aplicable al diseño de mezclas MDC-2, MDC-3 Y M1) y de la AASHTO para el caso del SMA, este fue sometido a las siguientes pruebas:

- 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-232, 233)
- 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, se ensayaron por separado las muestras de rocas metamórficas e ígneas (Ver Anexo A).

2.2.2 Asfalto Modificado

Los asfaltos convencionales poseen ciertas propiedades que a través de los años han venido siendo satisfactorias en cuanto al desempeño mecánico y las necesidades del flujo, bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito, sin embargo, el creciente incremento de volumen de vehículos movilizad y la magnitud de las cargas transportadas, hacen que estas propiedades no sean suficientes. “Por ejemplo, con los asfaltos convencionales, aun con los grados más duros, no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito canalizado (ahuellamiento), especialmente cuando se deben afrontar condiciones de alta temperatura. Además, con la simple adopción de asfaltos más duros se corre el riesgo de fisuraciones por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas”⁷.

La modificación de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo del ligante en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de

⁷ DOCUMENTO EN INTERNET

http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/23/3_%20Influencia%20de%20la%20Granulometria.pdf

polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a la deformación por factores del tránsito y climáticos.

El objetivo buscado al modificar los asfaltos con polímero, es contar con un ligante más viscoso y de mejores características adhesivas, que reduzca los problemas presentes en las capas de rodamiento por cambios de temperatura y tráfico como lo presentan los asfaltos convencionales, haciendo capas más rígidas.

El asfalto modificado empleado en la fabricación de probetas en proyectos anteriores (MDC-2, MDC-3, M1 y SMA), fue el mismo empleado en este proyecto. Su nombre y referencia es MEXPHALTE PM – Tipo II, producido por la planta Shell Colombia S.A.

2.2.3 Fibra de Celulosa

- **Generalidades**

El asfalto caliente tiende a escurrirse. Para evitarlo y mantenerlo dentro de la mezcla de forma más homogénea como lo debe ser la S.M.A., se emplea la fibra de celulosa. La utilización de fibras celulósicas no modifica químicamente al bitumen pero interviene en las propiedades físicas permitiendo incrementar el contenido del mismo. Tiende a espesar o conferir una reología al bitumen evitando que el mismo drene de la mezcla, previo a la compactación. “Las fibras de celulosa pueden utilizarse en forma de “pellets”. El VIATOP de J. Rettenmaier & Söhne es una combinación de fibras con bitumen en forma de “pellets” que puede ser utilizado con facilidad y agregado durante la preparación de la mezcla. El contenido de fibra celulósica debe ser 0.3% en peso calculado sobre mezcla total”.⁸

- **Seguimiento**

Año 2006: La celulosa añadida en la mezcla SMA, fue la CELLOSIZE QP 52000H; esta no ha sido fabricada expresamente para dicha aplicación, como sucede en países como Alemania, España, México y Estados Unidos donde existen

⁸ PAGINA INTERNET WWW.E-ASFALTO.COM

empresas dedicadas a la producción de fibra especial para diseños SMA. Tiene una textura granular fina y fue dosificada en una cantidad del 0.4 % del peso total, un instante antes de la mezcla y sin haberse calentado previamente. Esta fibra de celulosa demostró ser inadecuada para el diseño de mezclas asfálticas al presentar comportamiento inapropiado ante la acción del agua, convirtiéndose en gel.

Año 2007: La celulosa añadida en la mezcla SMA, fue la ceniza volante, la cual tampoco ha sido fabricada expresamente para dicha aplicación. Las cenizas volantes provenientes de las centrales termoeléctricas se han utilizado para estabilizar bases granulares en el hormigón, pero no para estabilizar asfaltos. Se encontró alta resistencia, pero serios problemas de escurrimiento de ligante. El porcentaje de ceniza empleado en la mezcla fue el mismo en volumen empleado por la celulosa, es decir 1.50% en peso.

- **Adición de fibras de Caucho Molido.**

- o **Intención inicial**

La disposición final de las llantas usadas por el parque automotor incrementa la problemática ambiental en Latinoamérica y en el mundo, ya que alrededor del 70% es incinerado, produciendo compuestos orgánicos volátiles e hidrocarburos aromáticos polinucleares, es decir emisiones carcinogénicas y mutagénicas.

De aquí, que corporaciones ambientales como el DAMA, el IDU y otras entidades interesadas hallan contratado estudios con prestigiosas universidades, con la firme intención de reducir el impacto ambiental, recomendando así el uso del caucho molido de llantas recicladas en el uso de mezclas asfálticas.

- o **Beneficios**

La incorporación del grano de caucho reciclado ó GCR, en las mezclas asfálticas ha tenido buena aceptación desde hace algunas décadas en muchos países por los

buenos resultados en el desempeño de los pavimentos asfálticos. Las mejoras en las propiedades mecánicas y el incremento de la vida útil del mismo hace que la relación beneficio-costos sea mayor comparada con la de un pavimento con una mezcla asfáltica convencional.

o Características de las llantas

La utilización del GCR en los pavimentos, además de ayudar a solucionar la problemática ambiental generada por las llantas desechadas, proporciona en sus compuestos caucho natural (látex) y cauchos sintéticos (SBS, SBR) que le brindan al pavimento elasticidad y mayor resistencia a la fatiga. Por otro lado, el negro de humo que estas contienen, actúa como antioxidante en el ligante, atenuando su envejecimiento y por ende prolongando la capacidad cohesiva del mismo en el tiempo. Además contienen aceites, sulfuros, resinas fenólicas, ácidos grasos, óxido de zinc activado con cadmio y dióxido de titanio, entre otros compuestos como aceros, textiles y aditivos.

o Obtención del GCR

El caucho es obtenido económicamente de llantas recicladas que deben ser molidas hasta obtener tamaños adecuados. Este proceso se realizó en Bucaramanga en la zona conocida como “chimita”, donde del proceso de reencauche de llantas se adquiere todo el caucho molido suelto de diferentes tamaños, para luego tamizarlo y servir como parte de una probeta.

o Breve descripción de la incorporación del GCR en las mezclas asfálticas

La utilización del GCR en las mezclas asfálticas puede hacerse de dos formas diferentes, estos métodos de incorporación se denominan proceso seco y proceso húmedo:

Proceso por vía seca:

El proceso seco consiste en la incorporación del GCR como árido. En este proceso el GCR sustituye parte de la fracción fina de la mezcla, en un porcentaje entre 1% y 4% respecto al peso total de los agregados.

El presente estudio realizó la incorporación del grano de caucho reciclado por vía seca, considerando que no solo es el método recomendado para ser usado en mezclas de granulometría abierta sino además es la forma más práctica de realizar las pruebas con la disposición de equipos de laboratorio. Se hace una descripción más detallada en las siguientes páginas.

Figura 6. Incorporación del GCR en las mezclas asfálticas, proceso seco.



Fuente: M. Ocampo, B. Caicedo y D. González. MEZCLAS ASFÁLTICAS CON CAUCHO MOLIDO PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS. Disponible en internet: dspace.uniandes.edu.co. Universidad de los Andes. Bogotá. Colombia.

Proceso húmedo:

Se considera necesario tener presente el proceso húmedo, ya que dadas las conclusiones de este trabajo, podría ser útil en nuevas etapas de investigación. A continuación, una breve reseña de lo que es e involucra el proceso por vía húmeda.

El GCR es directamente mezclado con el ligante para producir una mezcla asfalto-caucho que es usada de igual forma que un ligante modificado. El porcentaje de GCR utilizado está entre 14% y 20% respecto al peso total de la mezcla asfalto-caucho, y varía dependiendo del ligante.

Figura 7. Incorporación del GCR en las mezclas asfálticas, proceso húmedo.



Fuente: M. Ocampo, B. Caicedo y D. González. MEZCLAS ASFÁLTICAS CON CAUCHO MOLIDO PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS. Disponible en internet: dspace.uniandes.edu.co. Universidad de los Andes. Bogotá. Colombia.

o Proceso por vía seca

El proceso seco es cualquier método donde el GCR (Grano de caucho reciclado) se adiciona directamente a la mezcla asfáltica caliente siendo usado como un agregado fino mezclado con los áridos antes de adicionar el ligante. A diferencia del proceso húmedo, este proceso sólo requiere un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de GCR, y que pueda agregarlo en el momento indicado para que se mezcle con los áridos cuando estos alcancen cierta temperatura; normalmente el GCR es mezclado con los áridos antes de que el ligante sea adicionado. El proceso seco puede ser usado para mezclas asfálticas en caliente con granulometrías densas, abiertas o discontinuas. Por ser un proceso en el que no se modifica de manera

completa el ligante, este no puede ser usado en otro tipo de aplicaciones como mezclas en frío, sellos o tratamientos superficiales.

Las dos tecnologías más comunes en Estados Unidos para el uso del GCR por vía seca son la tecnología PlusRide y la Genérica ó sistema TAK; existe otra tecnología usada en muchos países denominada tecnología convencional, la cual fue desarrollada en España.

“Teniendo como guía la investigación realizada por la Universidad de Los Andes”⁹, se trabajó con la tecnología convencional, la cual emplea granulometrías convencionales que no implican consumos elevados de ligante, pero que aportan menos cantidad de caucho, aproximadamente 2% del peso total de los áridos.

o **Caracterización Física**

✓ **Comportamiento frente al calor**

El caucho se sometió a una prueba de calor en un horno eléctrico, se llevó a una temperatura superior a la de mezcla y compactación, sobre los 175 °C. Se comparó bajo el microscopio una muestra sin alterar contra una sometida al calor y no se encontraron cambios aparentes.

En una segunda prueba, se agregó caucho a un aceite mineral, con temperatura de ebullición (220 °C) superior a las temperaturas de mezcla y compactación, para evaluar el comportamiento del caucho, el único resultado fue desprendimiento de negro de humo.

✓ **Densidad real y aparente**

Se puede encontrar en la bibliografía que la densidad del caucho está alrededor de 0,934 g/cm³ y que puede variar según el tamaño de los granos, aumentando a medida que es menor el tamaño de las partículas.

⁹ MEZCLAS ASFÁLTICAS MEJORADAS CON CAUCHO MOLIDO PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS
M. Ocampo; B. Caicedo y D. González. Universidad de Los Andes. Colombia.

En el laboratorio, se realizó el cálculo de la densidad específica real, aparente y aparente s.s.s, empleando un picnómetro y alcohol etílico cuya densidad es 0,79 g/cm³, encontrando la siguiente información:

Tabla 3. Cálculo de la densidad del caucho molido.

		Mezcla 1	Mezcla 2	Pasa 20	Pasa 60	PROM.
A	PESO DEL FRASCO + ALCOHOL HASTA LA MARCA, EN EL AIRE	68,85	68,85	68,85	68,85	68,85
B	PESO DE LA MUESTRA EN CONDICIÓN S.S.S. EN EL AIRE	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
C	PESO DE LA MUESTRA, FRASCO Y ALCOHOL AGREGADO, EN EL AIRE	69,11	69,10	69,11	69,10	69,11
D	PESO DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO, EN EL AIRE	0,93	0,91	0,91	0,92	0,92

Tabla 4. Cálculo de la densidad aparente.

		Mezcla 1	Mezcla 2	Pasa 20	Pasa 60	PROM.
GRAVEDAD ESPECÍFICA REAL	$D/(A-C+D)$	0,79	0,76	0,75	0,78	0,77
GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE	$D/(A+B-C)$	0,87	0,86	0,85	0,87	0,87
GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE S.S.S	$B/(A+B-C)$	0,94	0,95	0,94	0,95	0,94

✓ Distribución de tamaño de grano

Siguiendo parámetros usados en otros estudios, se utilizó la granulometría propuesta por la investigación de la Universidad de Los Andes. Aunque las mezclas en estudio son diferentes, el porcentaje agregado de grano de caucho aumenta la porción fina, incrementando ligeramente (alrededor del 1%) el porcentaje de finos en la nueva mezcla SMA.

Tabla 5. Granulometría empleada de caucho.

Tamiz		% Pasa
Normal	Alternativo	
2,00 mm	No. 10	100
425 μm	No. 40	21
180 μm	No. 80	2
74 μm	No. 200	0

- **Comparación de porcentajes en peso para las diferentes fibras agregadas.**

Tabla 6. Comparación volumétrica para las diferentes fibras.

<i>W muestra</i>	<i>1200</i>		G
	Celulosa	Ceniza	Caucho
Densidad (g/cm^3)	0,61	2,3	0,77
% Peso	0,40	1,51	1,30
Peso (g)	4,80	18,10	15,60
Volumen(cm^3)	7,87	7,87	20,26

2.3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

2.3.1 Granulometrías Recomendadas

- **Gradación SMA**

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 4cm; por lo general, este grosor es 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 ½”, es decir, que el espesor de la capa

compactada debe estar entre 1.25 y 1.5" (3.18 y 3.81cm). Por esta razón en este proyecto, se utilizó la granulometría correspondiente al rango de 3 – 4cm, que hace referencia a la mezcla llamada SMA 0/8s.

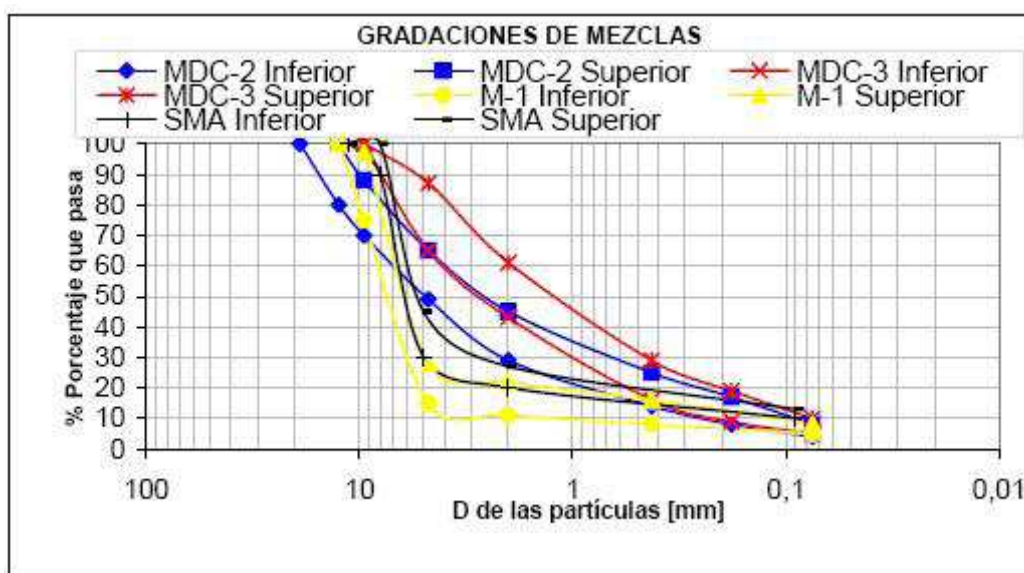
- **Gradación MDC-2 y MDC-3**

Los límites granulométricos exigidos por el INVIAS para este tipo de mezclas, están descritos en el artículo 450 – 02.

2.3.2 Granulometrías de Mezclas Estudiadas

La siguiente gráfica muestra los rangos granulométricos exigidos en las normas mencionadas con anterioridad.

Figura 8. Gradación típica de la mezcla



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.

2.3.3 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 porcentaje se evalúa para elaborar probetas con porcentaje de asfalto por de bajo y por encima de dicho valor (al menos 2 por debajo y 2 por encima), para obtener un comportamiento muy cercano al real de las mezclas elaboradas y poder tomarlos como verídicos.

- **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:

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

El valor K 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; Sa es la superficie específica del agregado calculada según la siguiente expresión y α su factor de corrección.

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

En donde,

G = % Pasa tamiz ¼"

g = % Pasa tamiz ¼" - % Retenido tamiz N °60

A = % Pasa tamiz N °60 - % Retenido tamiz N °200

F = % Pasa N °200

- **Porcentajes Óptimos de Asfalto en las Mezclas**

La cantidad óptima de asfalto, sirve de referencia para su dosificación en el diseño. En este estudio las probetas fueron fabricadas con dos cantidades de betún por encima y por debajo del valor ideal determinado.

Tabla 7. Porcentaje óptimo de asfalto.

TIPO DE MEZCLA	k	α	% OPTIMO DE DURIEZ
MDC-2	3.2	1	5.25
MDC-3	3.2	1	5.62
M1	3.7	1	5.974
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. 2007.

2.3.4 Metodología usada para la fabricación de probetas

Las probetas fueron fabricadas según la metodología Marshall (INV E-748) con un peso total de la mezcla de 1200 gramos. El concepto del método Marshall para diseño de mezclas de pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas.

“El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor”.¹⁰

“El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm (2 ½”) y 102 mm (4”) de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas de asfalto-agregado. (ASTM D1559)”.¹¹ Los dos aspectos principales del método de diseño son, la densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La estabilidad del espécimen de

¹⁰ TESIS DE GRADO ANALISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES DE DEFORMACION EN LAS MEZCLAS MDC-2, MDC-3, M1 Y STONE MATRIX ASPHALT

¹¹ DOCUMENTO EN INTERNET <http://www.imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt271.pdf>

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

Nota: Se anexa fotografías para una mejor descripción del ensayo.

- **Número de probetas fabricadas**

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

En este estudio fueron fabricadas tres probetas por contenido de asfalto y analizados cuatro contenidos por mezcla con incrementos del 0.5 % en peso, para un total de 12 muestras las cuales van a ser comparadas con las probetas de los anteriores proyectos de grado.

Además de ello se elaboraron 50 muestras sin compactar para la determinación de los porcentajes óptimos de caucho en las mezclas para evitar el escurrimiento de ligante presentado en los proyectos anteriores.

- **Temperatura de mezcla y compactación**

Las probetas fueron fabricadas garantizando una temperatura de mezcla y compactación de 153°C de acuerdo a las recomendaciones del productor del asfalto empleado, se debe tener especial cuidado de no sobrepasar esta temperatura para no estropear las propiedades estabilizantes del asfalto modificado.

- **Nivel de compactación de probetas**

Depende del 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 necesarios.

Para la mezcla SMA según la norma alemana ZTV Asphalt se aplican 50 golpes por cara.

Tabla 8. Nivel de compactación de la mezcla.

MEZCLA	Golpes por cara
MDC-2	75
MDC-3	75
M1	50
SMA	50

2.4. MÉTODO MARSHALL PARA LA ELABORACIÓN DE PROBETAS

La siguiente metodología fue la empleada para la elaboración de probetas:

- Selección de los materiales: Selección de la granulometría a emplear y el porcentaje tanto de fibras de caucho como de asfalto con el que se realizaran las probetas de 1200 gramos, como lo especifica la norma. Esta granulometría es elegida teniendo en cuenta los rangos permitidos por el Invías para mezclas SMA adjunta en la tabla 1. Los porcentajes de asfalto se estiman con la ecuación de durez (% óptimo), luego, por recomendación del Invías, se toman porcentajes incrementados en un 0.5% por arriba y por abajo del valor estimado para tener más confiabilidad en los datos. El porcentaje de fibra de caucho se calcula según los resultados del ensayo de escurrimiento.
- Calentar los materiales: Tanto los agregados como el asfalto deben calentarse en una estufa a 160°C, temperatura recomendada para la mezcla. El grano de caucho reciclado no se calienta previamente.

- Preparación de moldes: Antes de realizar la mezcla de materiales se deben tener debidamente engrasados los moldes donde se compactara la mezcla, con los filtros de papel para que esta no se adhiera a los moldes.
- Mezcla de los materiales: Una vez alcanzada la temperatura de mezclado (160 °C), a la mezcla se le incorpora rápidamente el caucho molido, mezclando constantemente hasta tener un producto visiblemente homogéneo; finalmente, se adiciona el ligante modificado y se mezcla hasta que todas las partículas queden cubiertas, alrededor de 5 minutos.
- Compactación: Se introduce la mezcla en los moldes previamente engrasados y se compactan con ayuda del martillo según las especificaciones del Invías adjuntas en la tabla No 6, para una mezcla de gradación abierta se le dan 50 golpes a una velocidad constante por ambas caras de la probeta.
- Extracción de la probeta: Una vez realizada la compactación se debe dejar enfriar la probeta garantizando la adherencia de la mezcla, alrededor de un día, luego con ayuda de un gato hidráulico se extrae del molde.

Figura 9. Proceso de calentamiento de agregados



Figura 10. Proceso de mezclado de agregados.



Figura 11. Proceso de compactacion de la probeta.



Figura 12. Resultado: probeta tipo SMA



2.5 ENSAYOS

El proceso de diseño estructural de pavimentos por métodos mecanísticos-empíricos, al igual que para otras estructuras de la ingeniería civil, se basa en la determinar el comportamiento del pavimento en zonas de posibles esfuerzos críticos que, introducidos en diferentes leyes de falla, permitan establecer la vida útil del proyecto y la confiabilidad de la prestación del servicio. Si esta condición no se comprueba, se deberán modificar los espesores de las carpetas o los materiales empleados; de ahí es que se hace necesario la evaluación de probetas a través de diferentes ensayos, como los presentados a continuación.

2.5.1 ANALISIS DEL ESCURRIMIENTO DE ASFALTO

- **Generalidades**

“Es bien sabido que el uso de mezclas en caliente (discontinuas y drenantes) con elevados contenidos en betún, confieren mas vida a estos pavimentos debido al mayor espesor de película de ligante que recubre los áridos aunque son susceptibles de deformaciones y escurrimientos del propio ligante”¹². Aspectos económicos y de seguridad son los que hoy por hoy hacen de preferencia este tipo de mezclas ya que aparte de brindar alta estabilidad, flexibilidad, resistencia al deslizamiento, disminución al salpicado de agua y menos ruido en la vía, también proporciona un ahorro económico en cuanto al mantenimiento.

Como se ha mencionado anteriormente, el principal problema presentado en este tipo de mezclas es el escurrimiento del ligante. Problema que ha sido resuelto en algunos países con la adición de fibras de celulosa diseñadas para tal fin, pero que resultarían de alto costo en nuestro medio.

- **Antecedentes**

La Universidad Industrial de Santander y especialmente la Escuela de Ingeniería Civil, en su búsqueda de mezclas que favorezcan la viabilidad de nuevos proyectos de infraestructura vial en la región, ha venido realizando estudios del comportamiento de mezclas SMA y su desempeño con materiales extraídos y obtenidos en nuestro medio. En este proceso, se ha encontrado el inconveniente generado por el escurrimiento del ligante en las mezclas de gradación discontinua como esta SMA, es así que con la adición de fibras de fácil producción como lo son las fibras de caucho de llantas recicladas se pretende acercar un poco más la fabricación y construcción de esta mezcla en forma industrial.

¹² PAGINA EN INTERNET <http://www.intercontrol.es/news/bituminosos.pdf>

Se usará un método estandarizado para evaluar el porcentaje de escurrimiento de la mezcla, pero antes se dará un vistazo al método usado en el proyecto de grado inmediatamente anterior “ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFÁLTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE”.

- **Proceso utilizado anteriormente**

El método utilizado, que no se conoce con ningún nombre, fue un método ingeniado para poder predecir de alguna manera el escurrimiento de asfalto, el cual, se basa exclusivamente en el uso de gasolina, para conocer la cantidad de asfalto asentado.

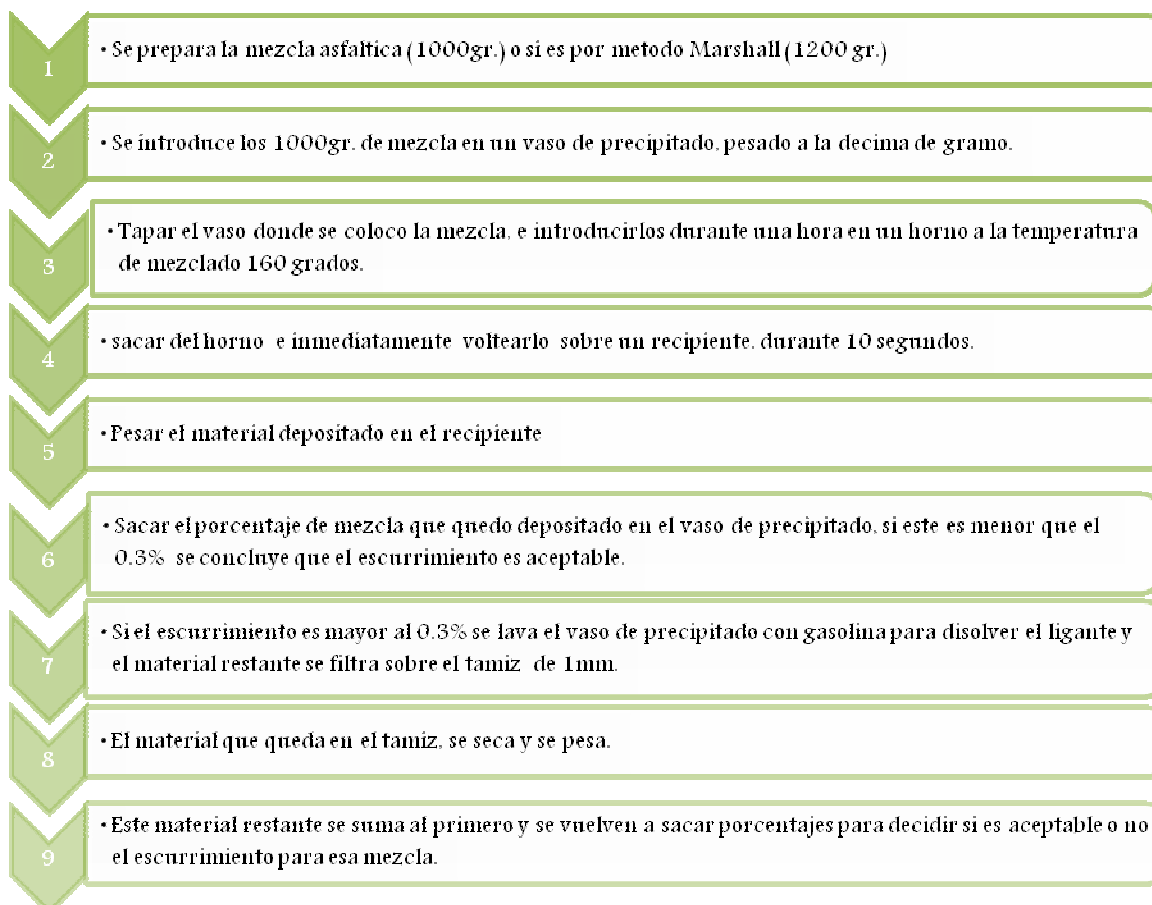
El método consiste en:

- Se elabora una muestra de 1000 gramos de mezcla para cada contenido de asfalto, cabe resaltar, que para obtener una mejor aproximación es recomendable utilizar por lo menos 3 especímenes de la misma muestra.
- Se colocan cada una en una bandeja metálica engrasada, hasta que las muestras se enfríen totalmente, las bandejas se engrasan para evitar que se peguen las muestras.
- se divide cuidadosamente la muestra en 3 capas iguales, es decir, separo la parte superior de toda la mezcla, la parte central y la parte inferior en partes iguales.
- Se pesa cada una de las capas y se saca 300 gr. De cada uno, para aplicar el ensayo.
- Se sumergen en gasolina cada capa por separado, el tiempo suficiente, hasta que se disuelva por completo el asfalto de los agregados pétreos.
- Se filtran las capas y ese material restante que se deposita en el filtro, finalmente se pesa.

- **Ensayo estandarizado. El método de Schellenberg**

Este método innovador, hasta ahora implementando en el mercado, fue estandarizado y normativizado solo hace pocos meses por la unión europea, en la norma

Aglomerado drenante: escurrimiento de asfalto - mezclas bituminosas UNE-EN-12697:18. Es un método sueco para el control del escurrimiento, Procedimiento:



NOTA:

- La probeta a fabricar para el control del escurrimiento será 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 algún método mecánico para retirar el material, simplemente dejar que este segregue solo.
- El porcentaje de escurrimiento máximo permitido es del 0.3% del peso de la mezcla.

- Si el porcentaje que queda es superior al 0.3%, se debe lavar para poder pesar el agregado grueso pegado, pues este no se considera parte del escurrimiento.

Figura 13. Vaciado de la mezcla tras salir del horno.



Figura 14. Escurrimiento de la mezcla.



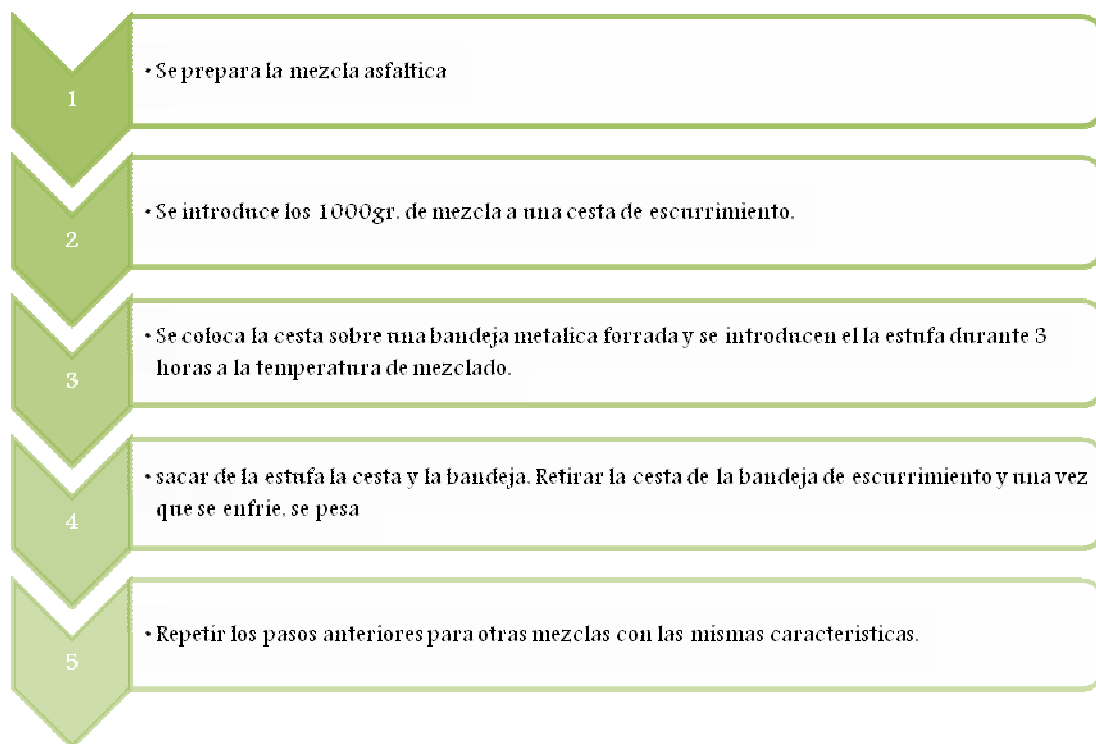
Figura 15. Esgurrimiento producido en presencia de fibras de caucho.



- **Otro método estandarizado: Método de la cesta**

Este método también para el control del escurrimiento se encuentra estandarizado en la misma norma UNE-EN-12697-35:2004+A1:2007 Mezclas bituminosas. Pero no fue de nuestro estudio en el presente proyecto de grado, sino que quiere ser mencionado para proyectos futuros.

Procedimiento:



NOTA:

- La cesta de escurrimiento es una bandeja de 100 ± 2 cm cuadrados, y contiene aberturas de 1cm distribuidas a lo ancho y largo de la bandeja.

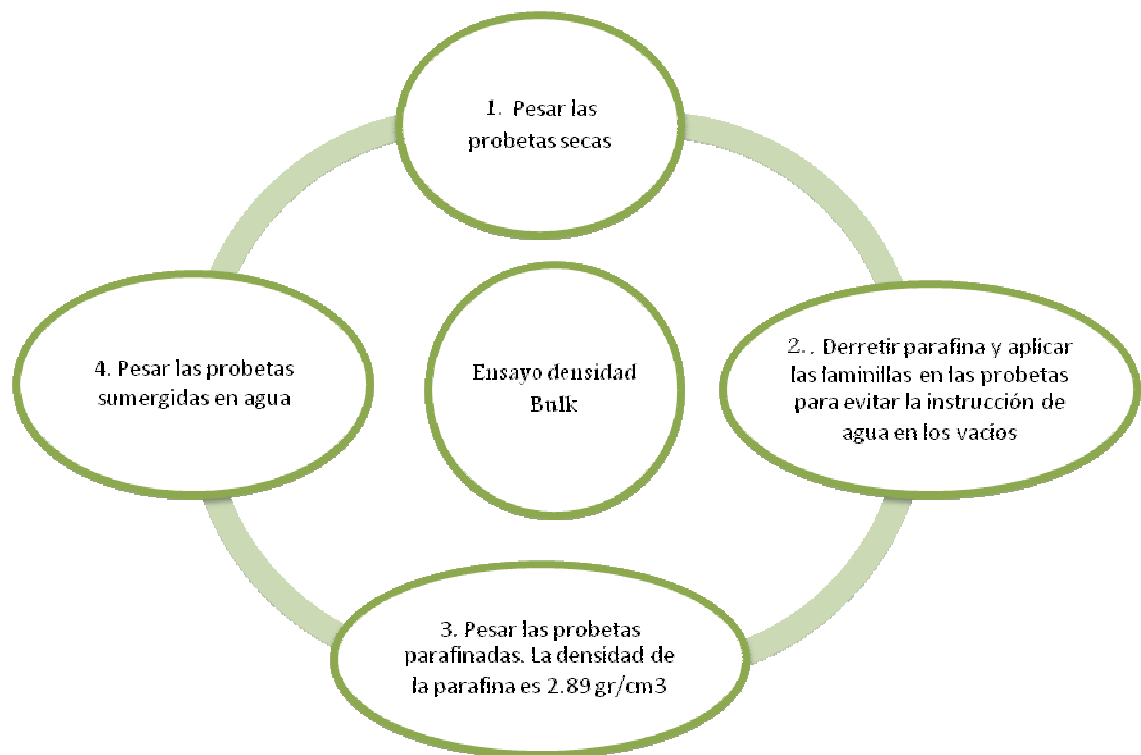
2.5.2 Medición de la densidad Bulk

Parte importante del diseño de mezclas es la determinación de la gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica compactada. Este método es útil para calcular el porcentaje de vacíos de aire en el diseño Marshall. Los especímenes utilizados en este tipo de ensayo fueron mezclas hechas en el laboratorio aunque puede realizarse también a muestras extraídas del campo.

El ensayo se encuentra contemplado en la norma I.N.V. E – 734 – 07, donde se explica el cálculo de la gravedad específica y densidad Bulk para muestras de asfalto parafinadas. Consiste en pesar la probeta seca después de haber permanecido en el aire por lo menos durante una hora a temperatura ambiente, luego se lleva a su condición saturada superficialmente seca, se sumerge en agua y se pesa. Ensayo aplicable a las mezclas densas en caliente como la MDC-2.

“En el caso de las mezclas SMA 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 en el agua estando la probeta parafinada”.¹³

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



¹³ PROYECTO DE GRADO ADITIVOS PARA PRODUCIR MEZCLAS ASFÁLTICAS DE ALTA RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE.

Figura 16. Peso de la muestra seca al aire.



Figura 17. Probetas parafinadas.



Figura 18. Peso de las probetas parafinadas.



Figura 19. Peso de las probetas parafinadas sumergidas en agua.

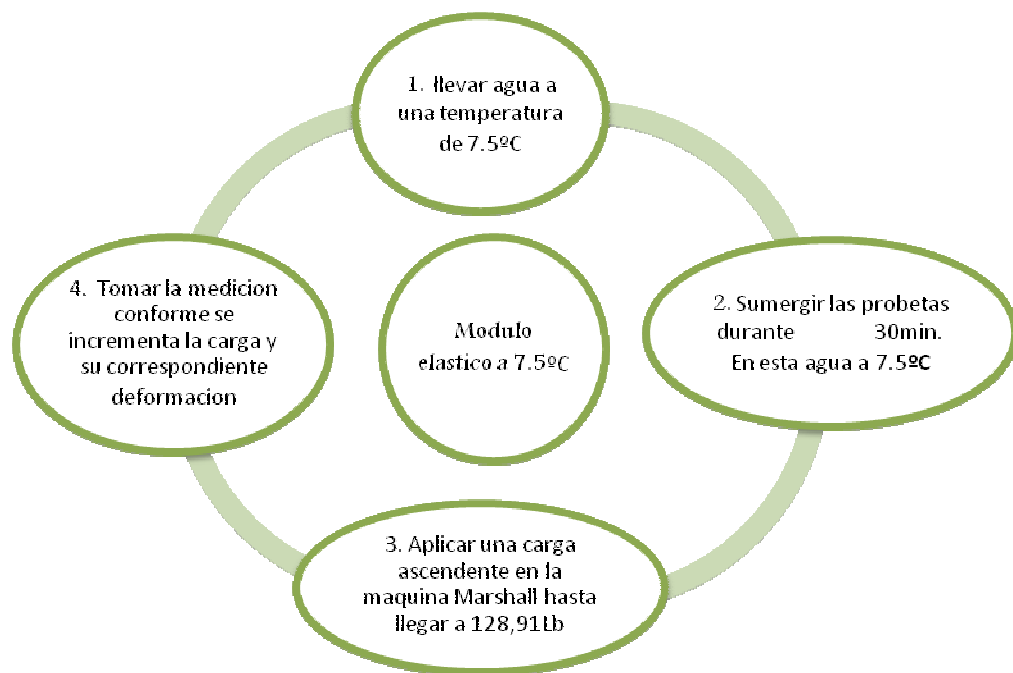


2.5.3 Determinación del módulo elástico a 7.5 °C

El módulo de elasticidad o módulo de Young es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young tiene el mismo valor para una tracción que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite 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 son propiamente mecánicos, luego estos no pueden ser utilizados directamente como parámetros de un diseño estructural de pavimentos, 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 este trabajo se desarrolla y aplica una solución teórico-experimental para obtener un módulo 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.

Este ensayo pretende determinar su comportamiento a bajas temperaturas, ante la aplicación de un esfuerzo controlado que garantice que las deformaciones resultantes estén dentro del rango elástico. El límite de carga empleado en este ensayo, se determinó fallando probetas tradicionales de granulometría densa y discontinua a temperatura ambiente, fabricadas con asfalto convencional, y corresponde al 30 % de la máxima carga que resistieron.



NOTA: Cabe resaltar:

- La temperatura del ensayo siempre debe mantenerse, aún cuando se está incrementando la carga en la maquina Marshall, para esto se debe estar adicionando agua a la temperatura indicada.
- Debe realizarse una probeta adicional para observar su carga límite; la máxima carga que se utiliza en este ensayo es el 30% de la carga límite.
- Cada raya que aparece en el indicador de carga representa 10.125 lb, de tal manera, una carga de 101.25 lb equivale a 10 rayas.
- La velocidad con que se ascienda en la maquina Marshall, debe ser la velocidad mínima, 0.5 pulg/min.
- La lectura de deformación debe ser tomada cada línea, hasta la máxima carga de aplicación del ensayo.

Figura 20. Probetas sumergidas en agua a 7.5 °C.



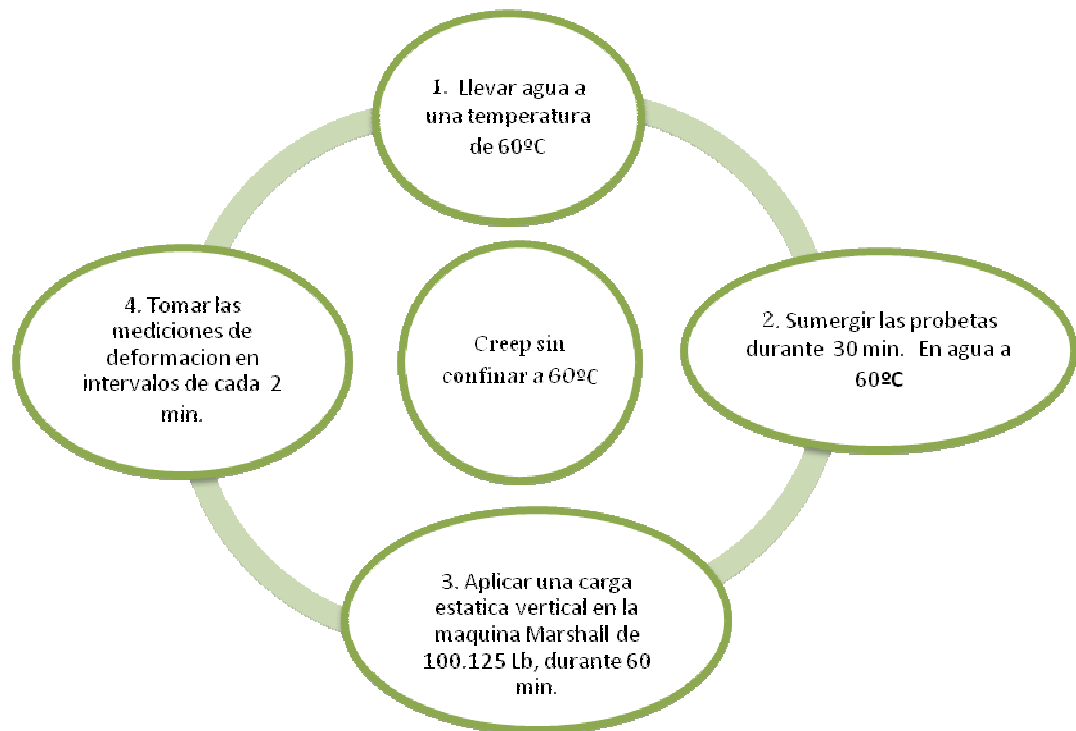
Figura 21. Ensayo módulo elástico.



2.5.4 Ensayo Creep sin Confinar a 60 °C (Carga Estática)

Las mezclas asfálticas son materiales viscoelásticos cuyas propiedades, dependientes de la temperatura y la frecuencia de aplicación de las cargas, condicionan su posterior comportamiento en servicio. El ensayo de Creep con o sin confinamiento lateral y con carga estática ha sido muy usado para evaluar las características de las mezclas asfálticas y sus resultados fueron usados en varios métodos de predicción del ahuellamiento.

Es uno de los ensayos más ampliamente utilizados debidamente a su simplicidad. Sus resultados expresan la evolución de la deformación específica permanente en función del tiempo, para una carga aplicada y temperatura de ensayo. Se somete a las probetas de tipo Marshall 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: Aspectos a tener en cuenta:

- Garantizar la repetividad del ensayo, se debe mantener la temperatura de ensayo (60°C). Se recomienda introducir la probeta en un recipiente y adicionarle agua a dicha temperatura, cada vez que vaya perdiendo calor, usando mangueras, cambiar el agua.
- La carga debe ser estable (100.125 lb).
- Como el cambio más notorio en este ensayo se encuentra en los primeros 2 minutos, tomar lecturas cada 10 segundos durante el primer minuto; lecturas cada 15 segundos durante el minuto siguiente; después lecturas cada dos minutos.

Figura 22. Cambio de agua.

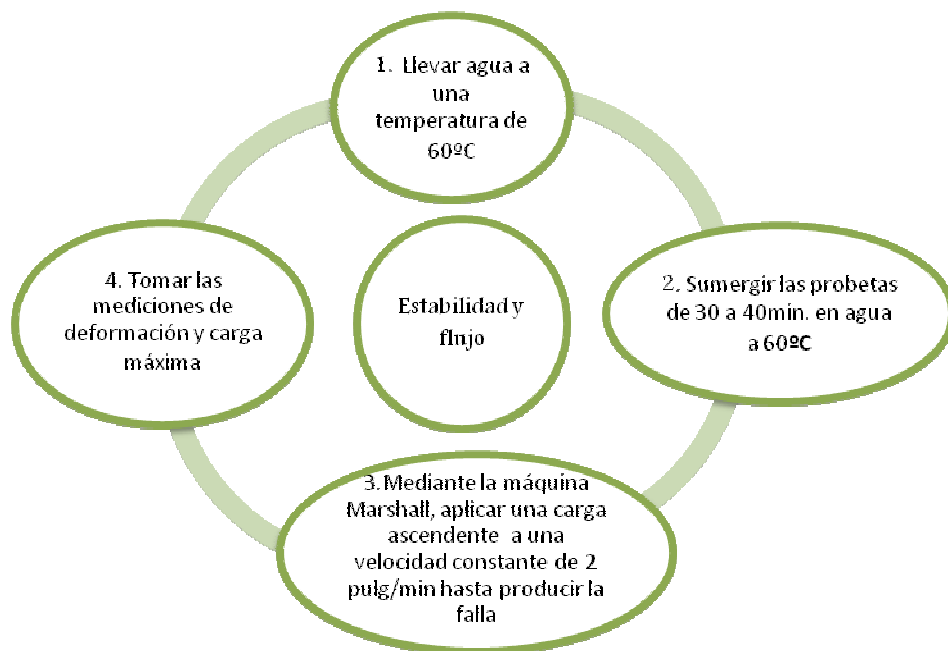


2.5.5 Estabilidad y flujo

Este ensayo es quizás, el más importante de todos, pues, es aquel que nos da la resistencia máxima de la mezcla desarrollada y nos da una idea de su comportamiento al

ser aplicada. La norma I.N.V. 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 se puede emplear tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas. El método es aplicable a mezclas elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos con tamaño máximo menor o igual a 25.4 mm (1"). La máxima lectura expresada en libras que se obtiene del ensayo, corresponde a la máxima carga que soportara la mezcla si fuese aplicada en una capa de rodadura; y el flujo asociado a esta carga es la deformación máxima que sufrirá al soportar esta carga.

Las probetas 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, una carga a una velocidad de 2 pulgadas/min hasta producir la falla. La estabilidad denota la máxima resistencia a la carga y el flujo la deformación total desde la carga 0 hasta la carga máxima.



NOTA: Antes de realizar el ensayo deben tomarse las medidas de la probeta a ensayar, como diámetro y altura. La velocidad de la máquina de la Universidad Industrial de Santander es de 2 pulg/mín.

Figura 23. Probetas en agua a 60°C.



Figura 24. Ubicación de la probeta.



Figura 25. Ensayo Estabilidad y Flujo.



Figura 26. Probeta fallada.



2.5.6 Análisis de porcentaje de vacíos

“Un factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica, es el de las proporciones volumétricas del asfalto y de los componentes del agregado, o más simplemente, parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica”¹⁴. Al respecto, las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica compactada son los vacíos de aire (V_a); vacíos en el agregado mineral (VMA); vacíos llenados con asfalto (VFA); y contenido de asfalto efectivo (P_{be}). Son los que proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica. Para poder obtener todos estos parámetros tan indispensables, en la correcta funcionalidad de la mezcla, es necesario el cálculo del Gmm (Gravedad específica máxima teórica), contemplada en el I.N.V. E – 735 – 07.

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba, ensayo que se encuentra descrito en la norma I.N.V. E – 736 – 07. Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (V_a); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

Este ensayo en conjunto con los demás, permiten inspeccionar si la granulometría empleada 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 mejor mezcla, que se ajuste a las características que deseamos.

¹⁴ DOCUMENTO EN INTERNET <http://www.imt.mx/Espanol/Publicaciones/pubtec/pt246.pdf>



NOTA: Recomendaciones para iniciar el ensayo de porcentaje de vacíos:

- La probeta que se va a ensayar debe calentarse lo suficiente, hasta poder separarla en fracciones muy pequeñas.
- Luego, dejar enfriar.
- Es importante golpear constante y suavemente el vaso de precipitado para facilitar la extracción de burbujas de aire.

Figura 27. Ensayo de porcentaje de vacíos.

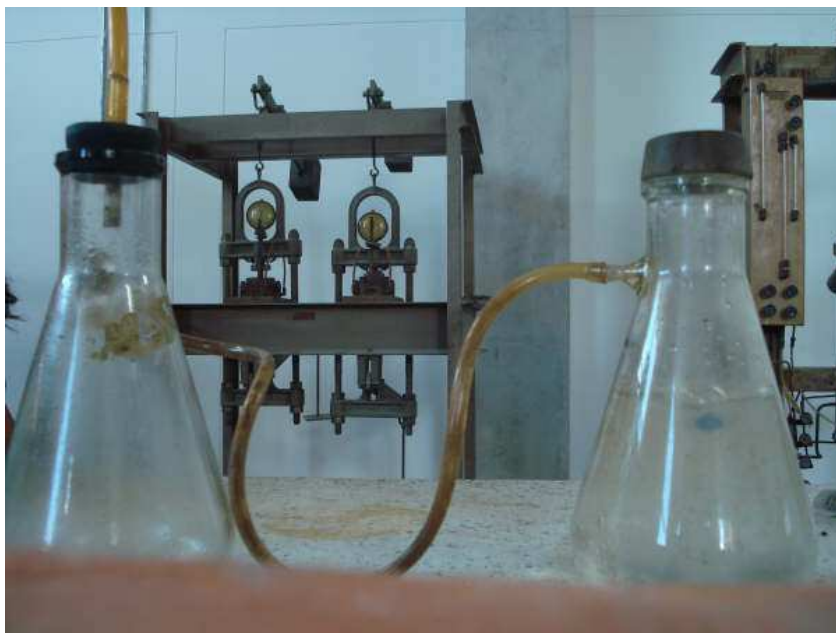


Figura 28. Muestra de mezcla a ensayar.



3. RESULTADOS DE LABORATORIO

En este capítulo se presentan los valores promedio de las pruebas realizadas en el laboratorio, las propiedades físicas de los materiales empleados y las características mecánicas obtenidas de las probetas fabricadas. Se incluye un panorama más detallado del análisis de escurrimiento. Además, se referencian las normas técnicas a tener en cuenta en la realización de los diferentes ensayos realizados.

3.1 AGREGADOS

3.1.1 Caracterización de los agregados

Los ensayos y resultados que se mencionan a continuación establecen las características físicas y de resistencia del material empleado. El detalle de estas pruebas, está disponible en la sección de anexos de esta investigación.

A continuación, una breve especificación de los diferentes ensayos a realizar y las normas que lo especifican

Tabla 9. Caracterización de los agregados pétreos.

ENSAYO	NORMA	ESPEC. (INV Art 400)		METODO		Mezcla SMA	VALOR
		Mezcla densa en caliente	Mezcla discon. en caliente				
	INV			AASHTO	ASTM		
Granulometría	E - 213	-	-			-	-
Ind. Alargamiento	E - 230	30 % Max	25 % Max		D4791	20 % Max	17.70%
Ind. Aplanamiento	E - 230	30 % Max	25 % Max		D4791	20 % Max	24.62%
Desgaste Los Ángeles	E - 219	25 % Max	25 % Max	T96		30 % Max	23.99%
% Caras Fracturadas	E - 227	75 % Min	75 % Min			90 % Min	90.89%
Solidez	E - 220	12 % Max	12 % Max	T104		15 % Max	0.79%
Equivalente de Arena	E - 133	50 % Min	50 % Min			-	93.80%
Peso Específico Grueso	E - 223	-	-			-	2.70%
Peso Específico Fino	E - 222	-	-			-	2.66%
Peso Específico Filler	E - 222	-	-			-	2.46%
% Absorción Grueso	E - 223	-	-	T85		2 % Max	0.70%
% Absorción Fino	E - 222	-	-	T85		2 % Max	1.83%
% Absorción Filler	E - 222	-	-	T85		2 % Max	0.54%

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

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 empleado en este proyecto, fue realizada por la planta SHELL de Mosquera, según las Normas ASTM / NLT. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 11. Propiedades reológicas del asfalto

ENSAYO	METODO	ESPECIFICACION			RESULTADO
		MIN		MAX	
Penetración, 25°C, 5s, 100g (mm/10)	ASTM D-5	55		70	63
Punto de Ablandamiento, (°C)	ASTM D-36	58			64
Recuperación Elástica por Torsión a 25°C (%)	NLT-329/91	40			42
Punto de chispa (°)	ASTM D-92	230			290
Peso específico a 25°C	ASTM D-71		Reportar		1.006
Temperatura de Mezcla *(°C)	ASTM D-1559		Reportar		164.138
Temperatura de compactación *(°C)	ASTM D-1559		Reportar		154.158
Ensayo en horno de película fina en movimiento, RTFOT, 85 min, 163°C (ASTM D-2872)					
Pérdida de masa (%)	ASTM D-2872			1	0.15
Penetración Retenida (%)	ASTM D-5	65			64
Variación del punto de ablandamiento	ASTM D-36		-5 a 10.		1.2

NOTA: El certificado de este análisis se puede observar en el anexo H, realizado por la planta Shell en Mosquera, Bogotá.

3.3 CONFORMACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

3.3.1 Granulometría utilizada

En las mezclas MDC-2 y SMA la gradación seleccionada corresponde a un valor dentro de los rangos señalados en la norma INVIAS (artículos 450 y 452) y ZTV Asphalt – StB

2001, como rangos permisibles y pueden observarse en la siguiente tabla. Los valores permisibles de la mezcla SMA pueden observarse en la tabla No 1 al inicio del documento.

Tabla 12. Gradaciones empleadas MDC-2 y SMA.

Tamiz No	% que pasa empleado	
	MDC-2	SMA
3/4 "	100	
1/2"	90	100
3/8 "	79	75
No 4	57	25
NO 8		20
No 10	37	
No 30		14
No 40	19.5	
No 50		12
No 80	12.5	
No 200	6	10

3.3.2 Porcentaje de Asfalto Utilizado

Con base en los porcentajes óptimos calculados, el porcentaje de asfalto añadido a las mezclas fue el siguiente.

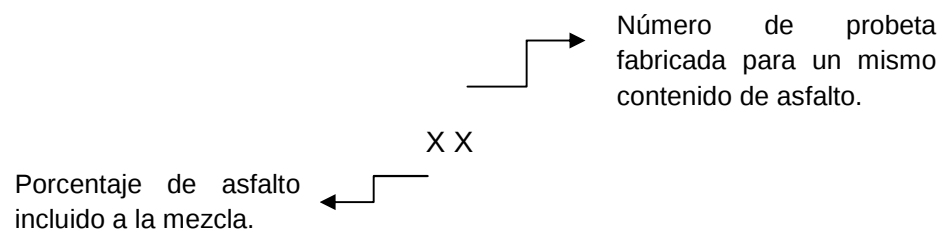
Tabla 13. Porcentajes de asfalto empleados.

MEZCLA	% PORCENTAJE DE ASFALTO EMPLEADO				TIPO DE ASFALTO
MDC-2	4.5	5	5.5	6	60-70
SMA	5.8	6.3	6.7	7.3	Mexphalte tipo II

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS

3.4.1 Nomenclatura

Cada probeta ha sido identificada mediante 2 caracteres, el carácter No.1 establece el porcentaje de asfalto incluido a la mezcla en forma ascendente: A para 5.8%, B para 6.3%, C para 6.8%, y D para 7.3%. El carácter No. 2 varía entre 1, 2,3 y corresponde, en orden a la elaboración de cada probeta para el mismo contenido de asfalto.



3.4.2 Geometría

La geometría de las probetas compactadas, que incluye su diámetro y altura, ha sido determinada realizando tres mediciones en cada una de ellas. El valor promedio de estos parámetros, puede observarse en el Anexo B1.

3.5 CONTROL DEL ESCURRIMIENTO

Con la ayuda del método Schellenberg, se pudo determinar cada uno de los porcentajes óptimos de fibra de caucho, para prevenir el escurrimiento de ligante.

3.5.1 Determinación del Número de probetas a elaborar

Aunque el método de Schellenberg es un método avalado por las normas Europeas y se asegura su confiabilidad, la estimación del número de probetas a realizar se efectúa mediante normativas nacionales como el Invías, al menos tres por contenido de asfalto.

Para cada porcentaje de asfalto y de fibras de caucho se elaboraron al menos dos probetas, si los resultados variaban en un porcentaje mayor al 5% se elaboró una tercera.

Para estimar el porcentaje óptimo de caucho, de cada uno de los 4 contenidos de asfalto, fue necesario realizar alrededor de 50 probetas. En las tablas 18, 19 y 20 se presentan los porcentajes de caucho incluido para cada una de las mezclas y el porcentaje de segregación calculada, a su vez, se presenta una elaboración grafica de la tendencia asumida por la mezcla, al aumentar el contenido de fibras.

3.5.2 Gráficas de escurrimiento Vs porcentaje de caucho

Una vez recopilados todos los datos para las diferentes cantidades de caucho adicionado a la mezcla, se procede a elaborar una grafica que representa el comportamiento de la segregación de material, con relación al porcentaje de fibra presente en ella. Esta tendencia permite obtener una ecuación exponencial que nos permite acercarnos al valor óptimo de fibra, que por ende ahorrara unos pesos en la aplicación.

3.5.3 Comportamiento para mezclas con 6.0 % de Asfalto

Cabe resaltar que aunque la representación grafica se asemeja a una recta, el verdadero comportamiento de la mezcla se ajusta a una tendencia exponencial, la cual se observa si se evalúan mucho más puntos de la grafica en forma detallada.

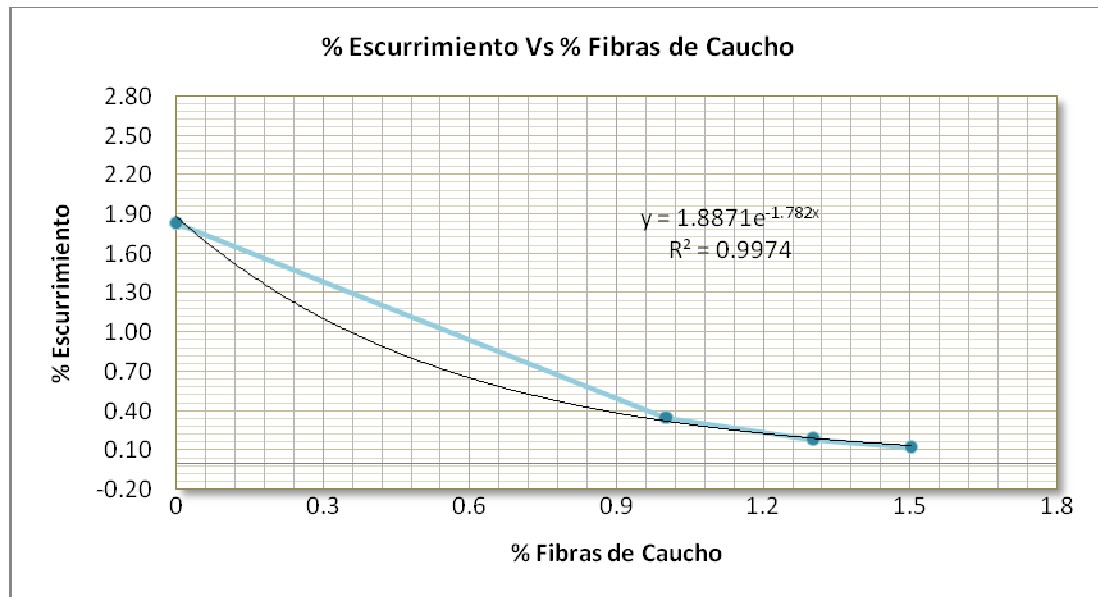
Tabla 14. Resultados de Escurrimiento para un contenido de 6% de Asfalto.

6,0% DE ASFALTO								
% Caucho	Winicial	Wvaciado	% Inicial de escurrimiento	Wretenido sobre No18	Wfinal	% Ecur	Prom	Condición
0	959.9	942.4	>0,2%,TAMIZAR	0.45	942.85	1.78	1.84	NO CUMPLE
	967.9	948.9	>0,2%,TAMIZAR	0.67	949.57	1.89		
1.0	980.9	977.4	>0,2%,TAMIZAR	0.34	977.74	0.32	0.35	NO CUMPLE
	965.3	961.5	>0,2%,TAMIZAR	0.22	961.72	0.37		
1.3	977.0	973.6	>0,2%,TAMIZAR	1.40	975.00	0.20	0.19	CUMPLE
	992.1	989.2	>0,2%,TAMIZAR	1.26	990.46	0.17		
1.5	981.1	979.9	<0,2%,NO TAMIZAR		979.90	0.12	0.12	CUMPLE
	958.4	957.2	<0,2%,NO TAMIZAR		957.20	0.13		
1.1	X				0.28	Y		

El porcentaje de fibra de caucho a emplear $X=1.1\%$, que da un escurrimiento de asfalto $Y=0.28\%$, resulta de la tendencia que genera su curva a continuación, la cual presenta su ecuación pertinente que podrá ser usada con certeza siempre que se utilice cualquier porcentaje de caucho como fibra espesante para un contenido del 6% de asfalto.

La ecuación, $y = 1.8871e^{-1.782x}$, representa la ecuación para calcular el escurrimiento con cualquier porcentaje de fibras adicionado a la mezcla. “Y” representa el porcentaje de segregación, y “X” el porcentaje de caucho adicionado. Para no sobrepasar el porcentaje óptimo de 0.3% de escurrimiento, se requieren 1.03% de fibra según dicha ecuación, aproximamos este porcentaje a 1.1 % como aparece en la tabla 18.

Figura 29. Porcentaje de escurrimiento vs porcentaje de caucho para 6% de Asfalto.



3.5.4 Comportamiento para mezclas con 6.5 % de Asfalto

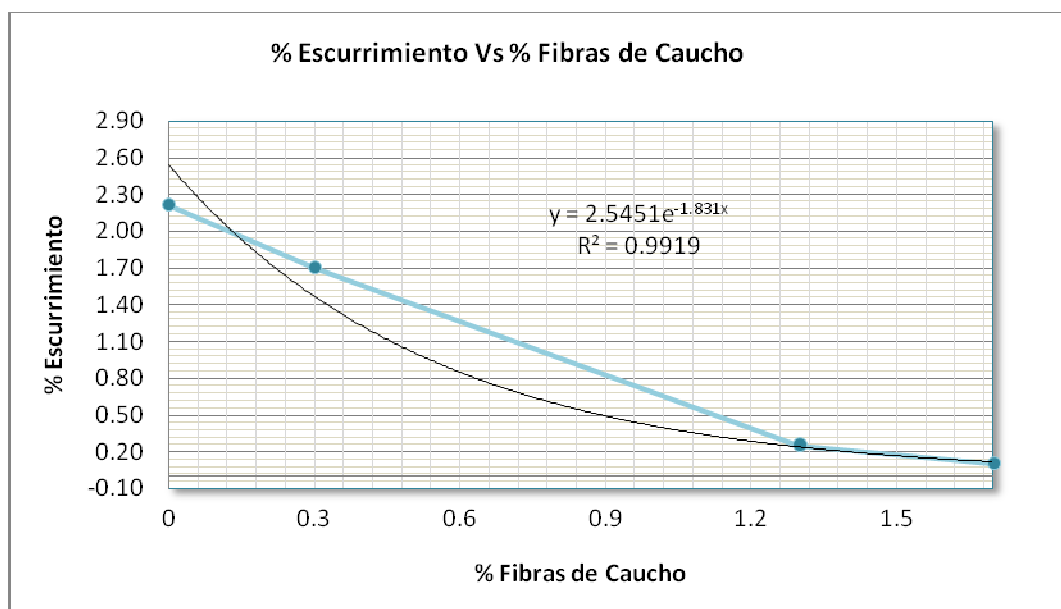
De la misma manera que el anterior porcentaje de asfalto y teniendo en cuenta las mismas consideraciones, aquí se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 15. Resultados de escurrimiento para un contenido de 6.5% de Asfalto.

6,5% DE ASFALTO								
% Caucho	Winicial	Wvaciado	% Inicial de escurrimiento	Wretenido sobre No18	Wfinal	% Escur	Prom	Condición
0	960,7	937,6	>0,2%,TAMIZAR	1,41	939,01	2,26	2,21	NO CUMPLE
	971,9	949,6	>0,2%,TAMIZAR	1,20	950,80	2,17		
0,3	986,5	967,7	>0,2%,TAMIZAR	1,52	969,22	1,75	1,70	NO CUMPLE
	986,8	968,5	>0,2%,TAMIZAR	1,94	970,44	1,66		
1,3	995,9	993,0	>0,2%,TAMIZAR	0,69	993,69	0,22	0,25	CUMPLE
	987,5	983,8	>0,2%,TAMIZAR	0,89	984,69	0,28		
1,7	974,4	973,5	<0,2%,NO TAMIZAR		973,50	0,09	0,10	CUMPLE
	994,6	993,7	<0,2%,NO TAMIZAR		993,70	0,09		
	988,7	986,6	>0,2%,TAMIZAR	0,81	987,41	0,13		
1,2	X					0,28	Y	

El porcentaje de fibra de caucho a emplear $X=1.2\%$, que da un escurrimiento de asfalto $Y=0.28\%$, resulta de la tendencia que genera su curva a continuación, la cual presenta su ecuación pertinente que podrá ser usada con certeza siempre que se utilice cualquier porcentaje de caucho como fibra espesante para un contenido del 6.5% de asfalto.

Figura 30. Porcentaje de escurrimiento vs porcentaje de caucho para 6.5% de Asfalto.



La ecuación $y=2,545e^{-1,83x}$, representa la ecuación para calcular el escurrimiento con cualquier porcentaje de fibras adicionado a la mezcla. “Y” representa el porcentaje de segregación, y “X” el porcentaje de caucho adicionado. Para no sobrepasar el porcentaje óptimo de 0.3% de escurrimiento, se requieren 1.18% de fibra según dicha ecuación aproximamos este porcentaje a 1.2% como aparece en la tabla 19.

3.5.5 Comportamiento para mezclas con 7.0% de Asfalto

De la misma manera que el primer porcentaje de asfalto y teniendo en cuenta las mismas consideraciones, aquí se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 16. Resultados de Escurrimiento para un contenido de 7.0% de Asfalto

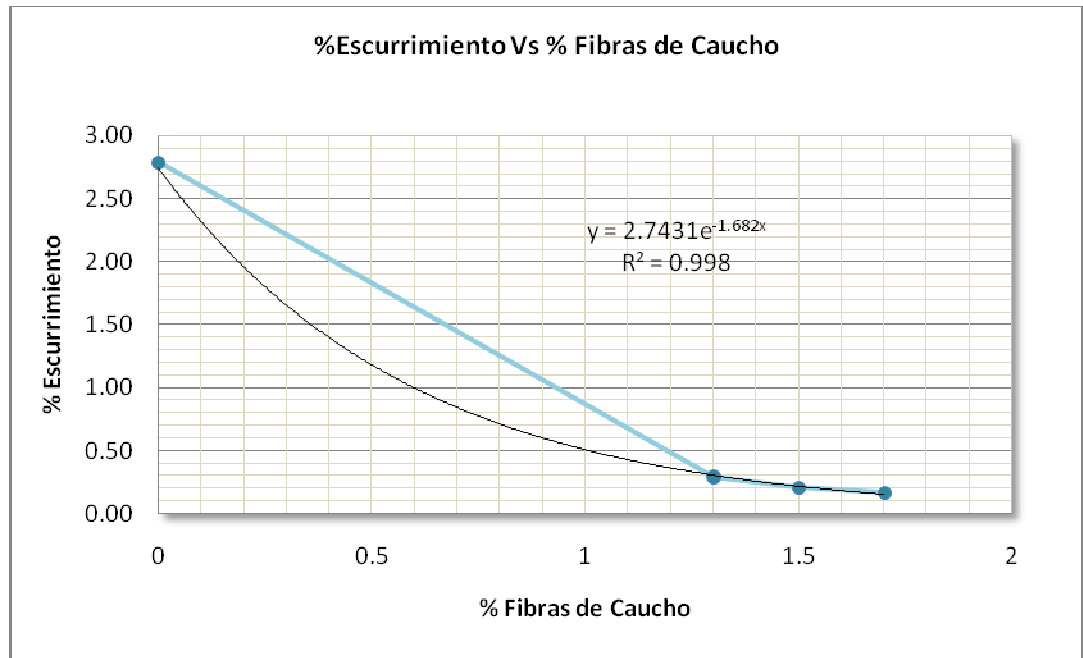
<u>7,0% DE ASFALTO</u>								
% Caucho	Winicial	Wvaciado	% Inicial de escurrimiento	Wretenido sobre No18	Wfinal	% Esur	Prom	Condición
0	971.3	945.6	>0,2%,TAMIZAR	1.21	946.81	2.52	2.79	NO
	968.2	937.4	>0,2%,TAMIZAR	1.25	938.65	3.05		CUMPLE
1.3	987.8	985.0	>0,2%,TAMIZAR	0.19	985.19	0.26	0.29	CUMPLE
	977.1	973.1	>0,2%,TAMIZAR	0.82	973.92	0.33		
1.5	978.1	976.1	>0,2%,TAMIZAR		976.10	0.20	0.21	CUMPLE
	985.2	983.0	>0,2%,TAMIZAR	0.07	983.07	0.22		
1.7	969.7	968.0	<0,2%,NO TAMIZAR		968.00	0.18	0.17	CUMPLE
	978.9	977.3	<0,2%,NO TAMIZAR		977.30	0.16		
1.3	X					0.3	Y	

El porcentaje de fibra de caucho a emplear $X=1.3\%$, que da un escurrimiento de asfalto $Y=0.30\%$, resulta de la tendencia que genera su curva a continuación, la cual presenta su ecuación pertinente que podrá ser usada con certeza siempre que se utilice cualquier porcentaje de caucho como fibra espersante para un contenido del 7.0% de asfalto.

La ecuación, $y = 2,7431e^{-1,682x}$, representa la ecuación para calcular el escurrimiento con cualquier porcentaje de fibras adicionado a la mezcla. “Y” representa el % de segregación, y “X” el % de caucho adicionado. Para no sobrepasar el porcentaje óptimo

de 0.3% de escurrimiento, se requieren 1.31% de fibra según dicha ecuación, aproximamos a 1.3% como aparece en la tabla 20.

Figura 31. Porcentaje de escurrimiento vs porcentaje de caucho para 7%.



3.6 ANALISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS

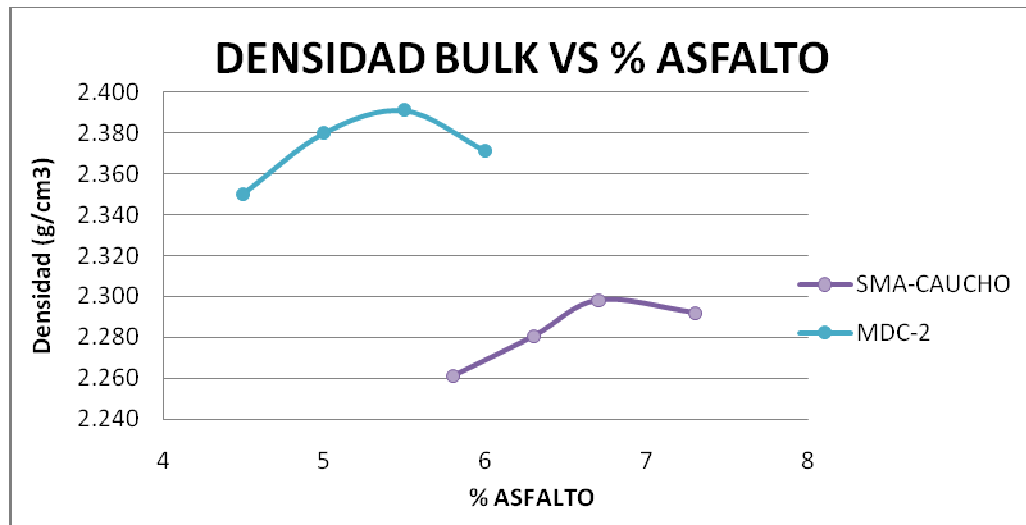
3.6.1 Densidad Bulk

Es la relación entre la masa (peso en el aire) de un volumen dado de material a una determinada temperatura, generalmente a 25°C para mezclas asfálticas, y la masa de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura.

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

En la siguiente gráfica se observa la variación del peso específico de todas las mezclas, de acuerdo a la cantidad de asfalto agregada.

Figura 32. Peso específico compactado vs porcentaje de asfalto.



3.6.2 Vacíos con Aire

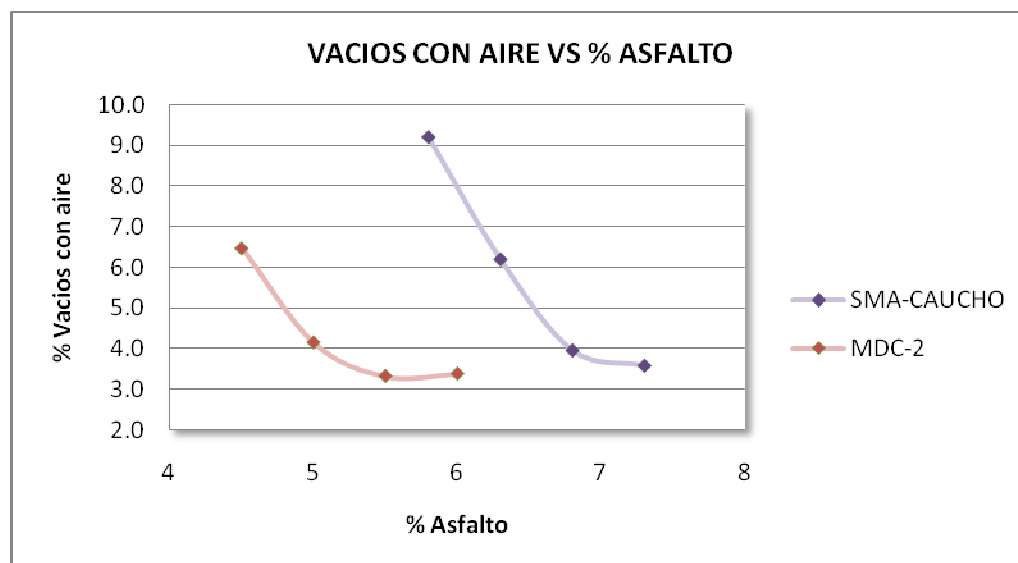
Estos vacíos están definidos como el volumen total de de aire existente entre las partículas cubiertas del agregado, se expresa como porcentaje del volumen neto de la mezcla compactada. Generan en la mezcla una reserva de espacio que impide exudaciones y pérdidas de estabilidad al producirse una pequeña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

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

La siguiente gráfica muestra el porcentaje de vacíos con aire presente en las mezclas, en relación con la cantidad de asfalto agregada.

Cabe resaltar que según las especificaciones de una mezcla SMA, esta no puede tener un porcentaje de vacios mayor del 4%, luego, para los diferentes contenidos de asfalto, los únicos que cumplen con tal condición son los porcentajes de 6.8% y 7.3%, es decir aquellos con un contenido de asfalto superior al 6.5%.

Figura 33. Porcentaje de vacíos con aire.



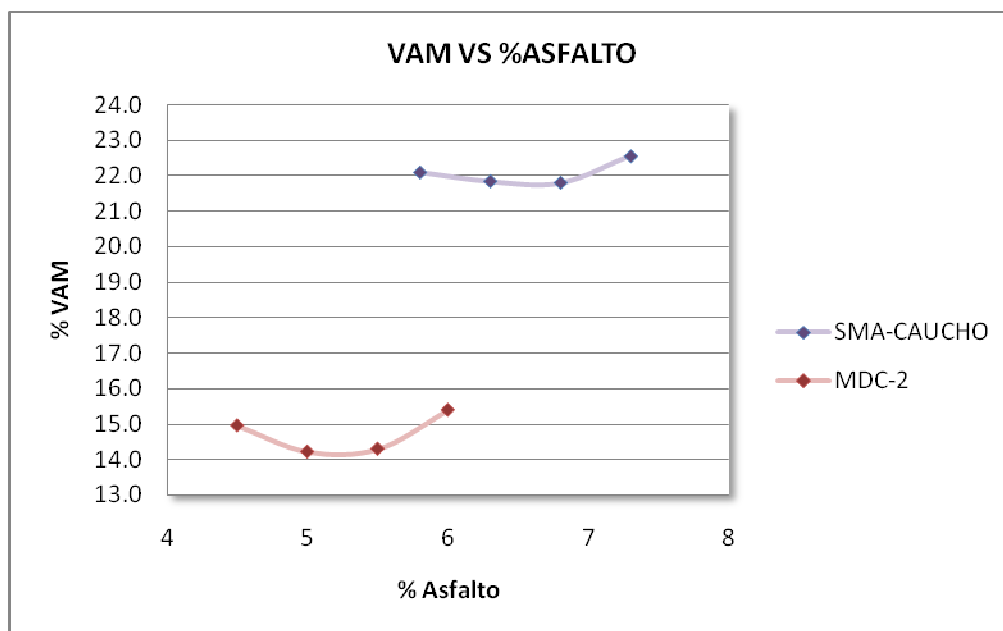
3.6.3 Vacíos en el agregado mineral

Se definen como el volumen de espacio 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 la muestra.

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

Esta gráfica muestra la variación de los vacíos en el agregado mineral de las mezclas, de acuerdo a su contenido de asfalto.

Figura 34. VAM Vs Porcentaje de asfalto.



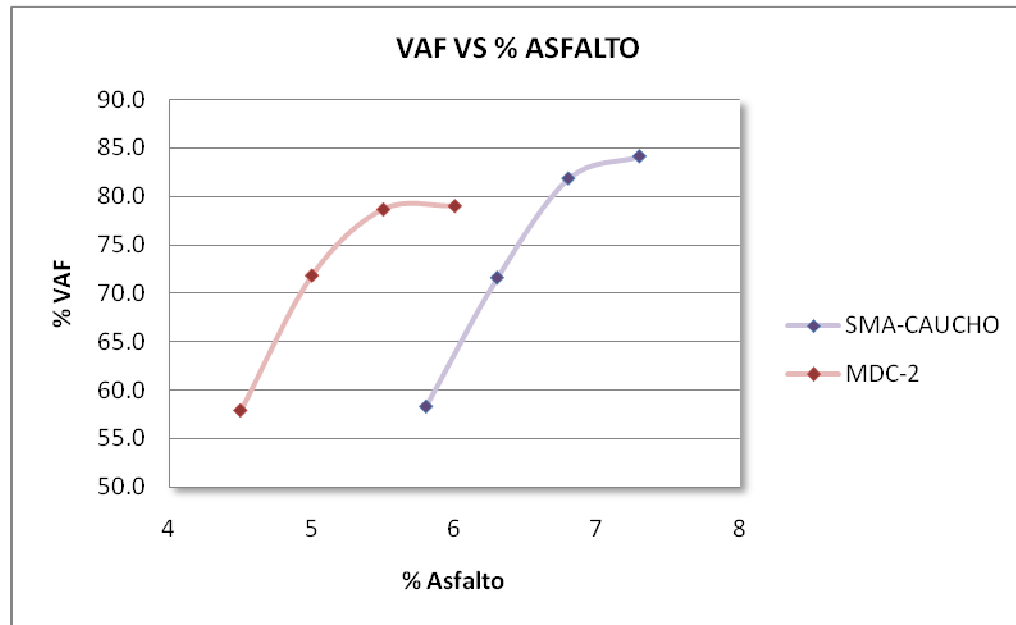
3.6.4 Vacíos llenos de asfalto

Los vacíos llenos de asfalto se definen como la porción del VAM, que es ocupada por el ligante efectivo de la mezcla.

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

En la siguiente gráfica se muestra la variación de los vacíos llenos de asfalto, de acuerdo a la cantidad de ligante añadida a cada mezcla.

Figura 35. VAF Vs Porcentaje de Asfalto.



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 objeto ante la acción de una carga externa.

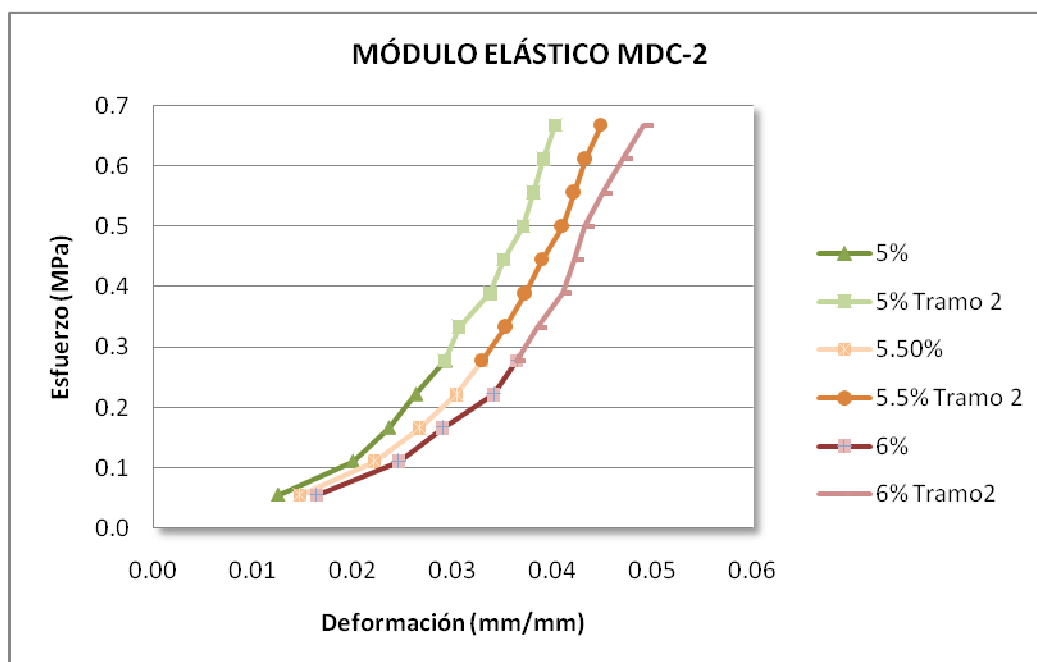
En este ensayo se aplicó sobre las probetas un esfuerzo máximo dentro del rango de esfuerzos que no provocan la rotura del material.

3.7.1 Mezcla MDC-2

- **Curva Esfuerzo Vs. Deformación**

La variación de la deformación medida respecto al incremento del esfuerzo, para cada porcentaje de asfalto añadido a las mezclas, puede observarse en la siguiente figura.

Figura 36. Esfuerzo Vs Deformacion MDC-2.



- **Módulos de Elasticidad**

Los módulos de elasticidad, calculados con base en las respectivas pendientes de las curvas obtenidas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 17. Módulos Elásticos para la mezcla MDC-2.

% Asfalto	Módulo Elástico (MPa)	
	Módulo 1	Módulo 2
5%	13.25	33.64
5.50%	11.967	32.9
6%	10.8	31.9

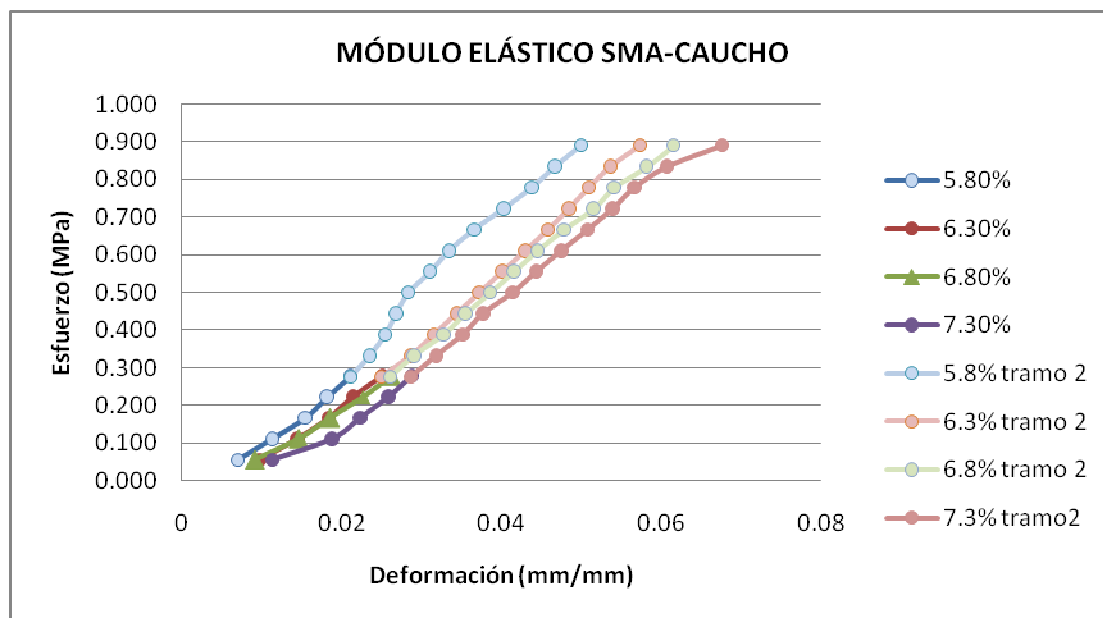
NOTA: El módulo 1 corresponde al primer tramo en la grafica, el cual presenta menos inclinación con respecto al segundo, siendo por ende menor.

3.7.2 Mezcla SMA - CAUCHO

- **Curva Esfuerzo Vs. Deformación**

La variación de la deformación medida respecto al incremento del esfuerzo, para cada porcentaje de asfalto añadido a las mezclas, puede observarse en la siguiente gráfica.

Figura 37. Esfuerzo Vs Deformacion SMA-CAUCHO.



- **Módulos de Elasticidad**

Los módulos de elasticidad calculados con base en las curvas anteriores y de acuerdo a la magnitud de las deformaciones producidas en las probetas se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 18. Módulos elásticos de las mezclas SMA-CAUCHO.

MODULOS ELASTICOS SMA-CAUCHO (MPa)		
% ASFALTO	MÓDULO 1	MODULO 2
5.80%	15.68	20.82
6.30%	14.76	19.46
6.80%	13.13	17.42
7.30%	12.73	16.57

3.8 DEFORMACIÓN A 60 °C (ENSAYO CREEP SIN CONFINAR)

En este ensayo se tomo la deformación presente en cada probeta durante una hora bajo una carga estática vertical, los intervalos de tiempo para la medición fueron de dos minutos, por lo cual, a continuación solo se presenta información de los primeros 20 minutos de ensayo, que es donde se encuentra lo más relevante del mismo; De este punto en adelante, la deformación solo se incrementa de una a tres milésimas de pulgada. El ensayo al igual que todos, se realiza para los tres ejemplares de cada muestra y lo que se presenta a continuación, es un promedio de todos los especímenes.

3.8.1 Gráficos Deformación Vs. Tiempo (MDC-2)

La variación de la deformación producida en las probetas, por la aplicación de una carga constante sobre ellas durante una hora, es la siguiente.

Figura 38. Deformación Vs Tiempo para MDC-2.

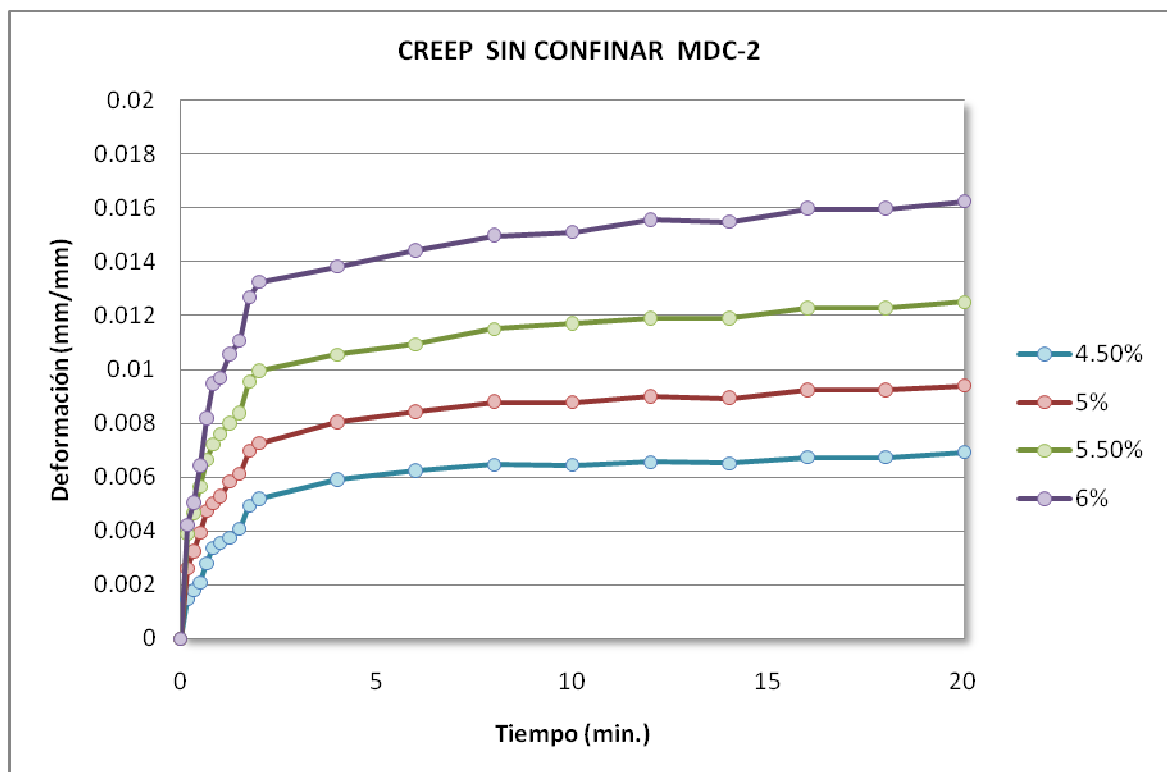


Tabla 19. Deformación final creep MDC-2.

% ASFALTO	DEFORMACION FINAL (mm/mm)
4.50%	0.00736
5%	0.00992
5.50%	0.01329
6%	0.01721

3.8.2 Gráfico Deformación Vs. Tiempo (SMA- CAUCHO)

La variación de la deformación producida en las probetas, por la aplicación de una carga constante sobre ellas durante una hora, es la siguiente.

Figura 39. Deformación Vs Tiempo SMA-CAUCHO.

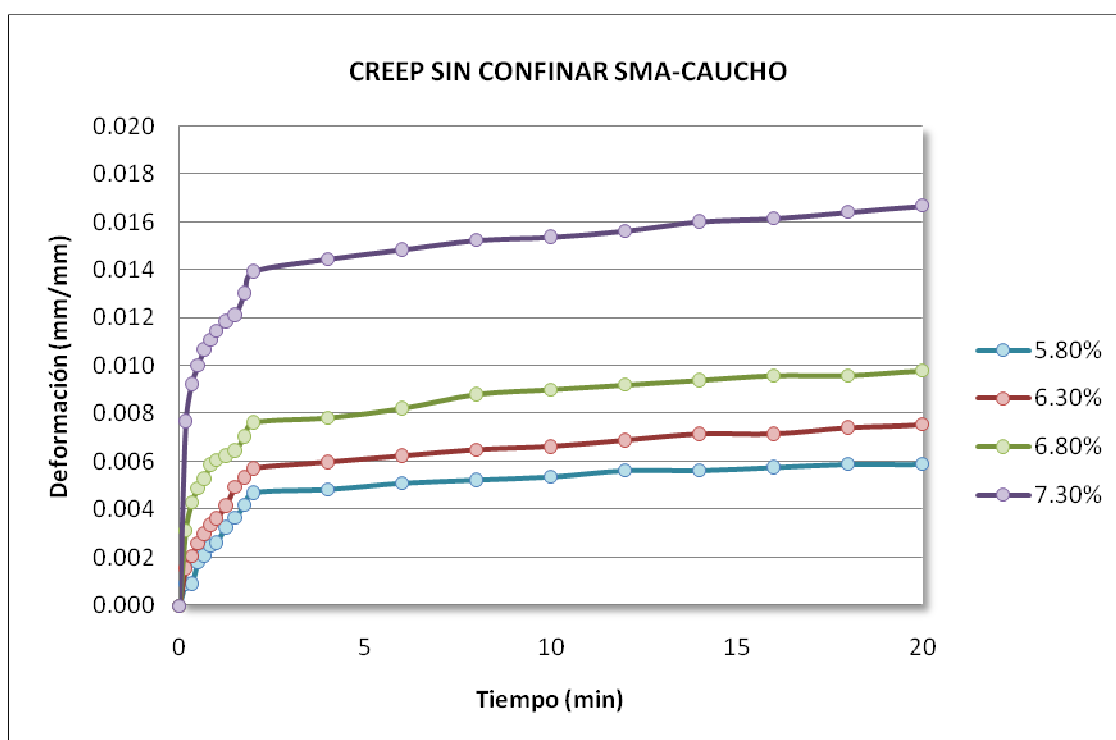


Tabla 20. Deformación final Creep SMA-CAUCHO.

% ASFALTO	DEFORMACION FINAL (mm/mm)
5.80%	0.00716
6.30%	0.00886
6.70%	0.01133
7.30%	0.01811

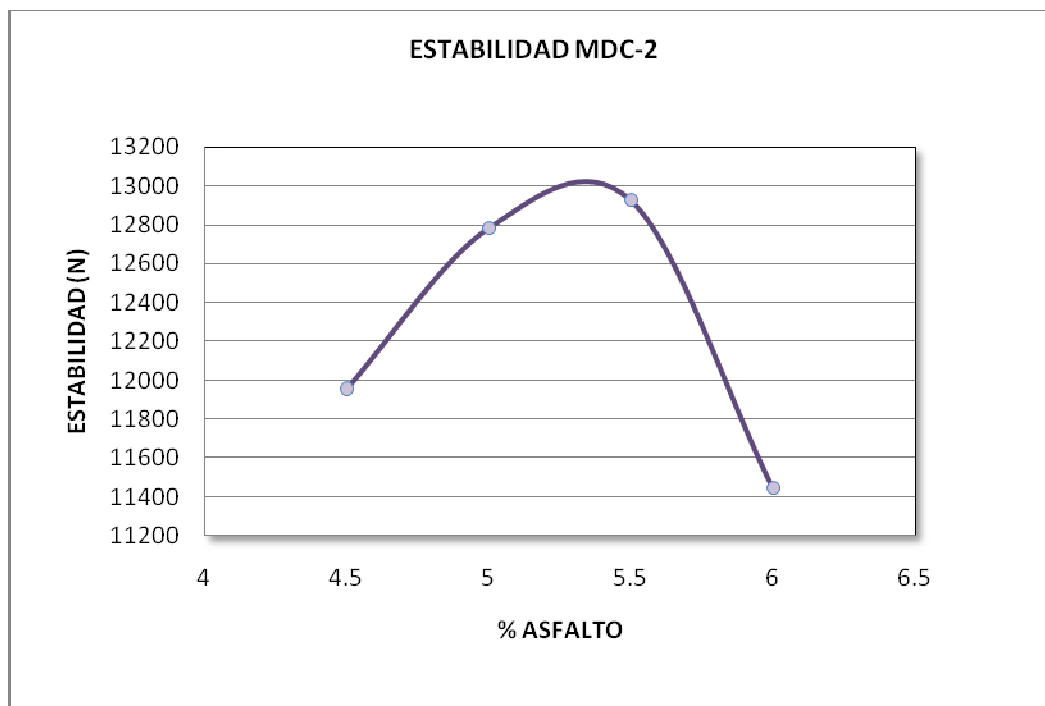
3.9 ESTABILIDAD MARSHALL

La máxima resistencia a la carga de las mezclas en estudio, de acuerdo a su contenido de asfalto, es la siguiente.

3.9.1 Grafico estabilidad vs porcentaje de asfalto MDC-2

En el grafico a continuación, se muestra el promedio de la carga máxima soportada por las probetas, para cada uno de los porcentajes de asfalto empleado.

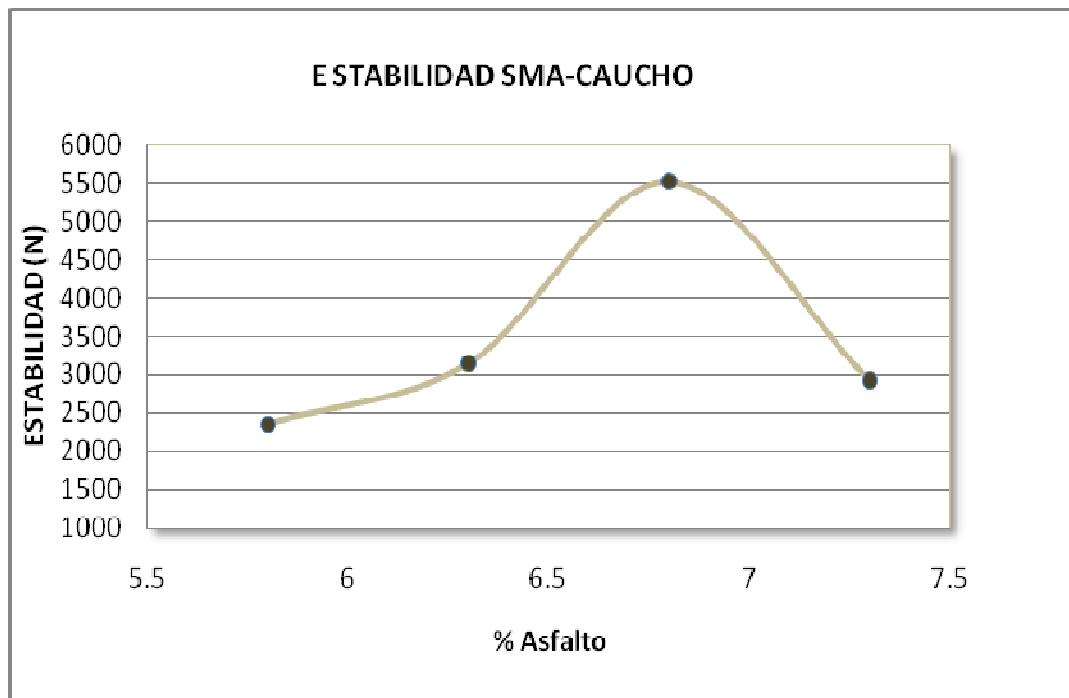
Figura 40. Estabilidad vs porcentaje de asfalto mezcla MDC-2.



3.9.2 Grafico estabilidad vs porcentaje de asfalto SMA-CAUCHO

En este grafico también se muestra el comportamiento, de la máxima carga soportada por las probetas, y permite representar una grafica para estimar valores intermedios a los que no se les realizo ningún análisis.

Figura 41. Estabilidad Vs porcentaje de asfalto SMA-CAUCHO.



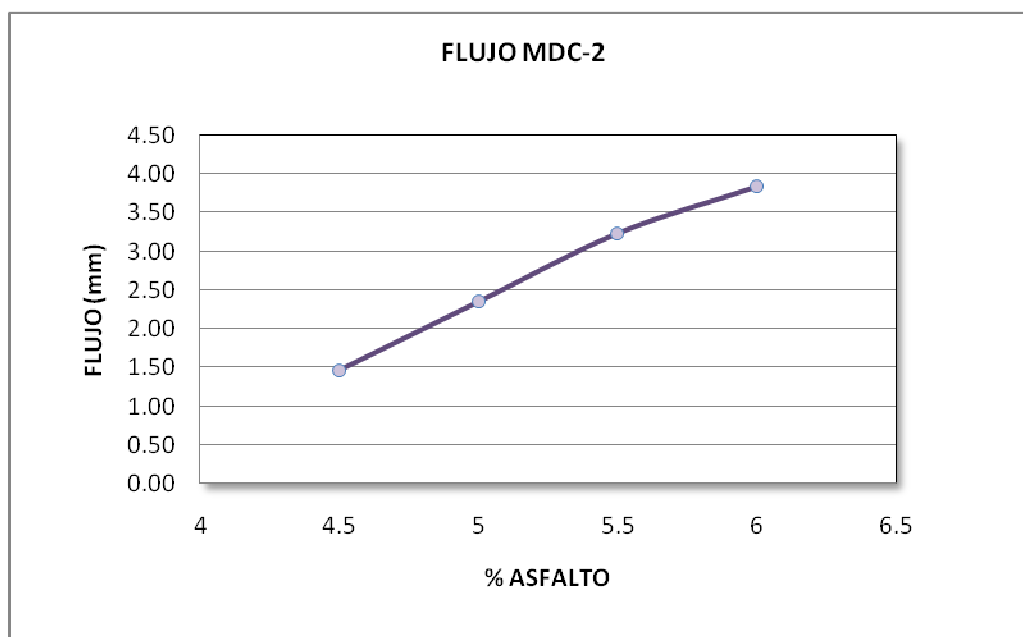
3.10 FLUJO MARSHALL

La deformación producida en las mezclas desde la carga 0 hasta la carga máxima, de acuerdo a su contenido de asfalto, es la siguiente.

3.10.1 Grafico Flujo vs porcentaje de asfalto MDC-2

En este grafico se representa la deformación de las probetas ante cada una de las cargas aplicadas en la estabilidad.

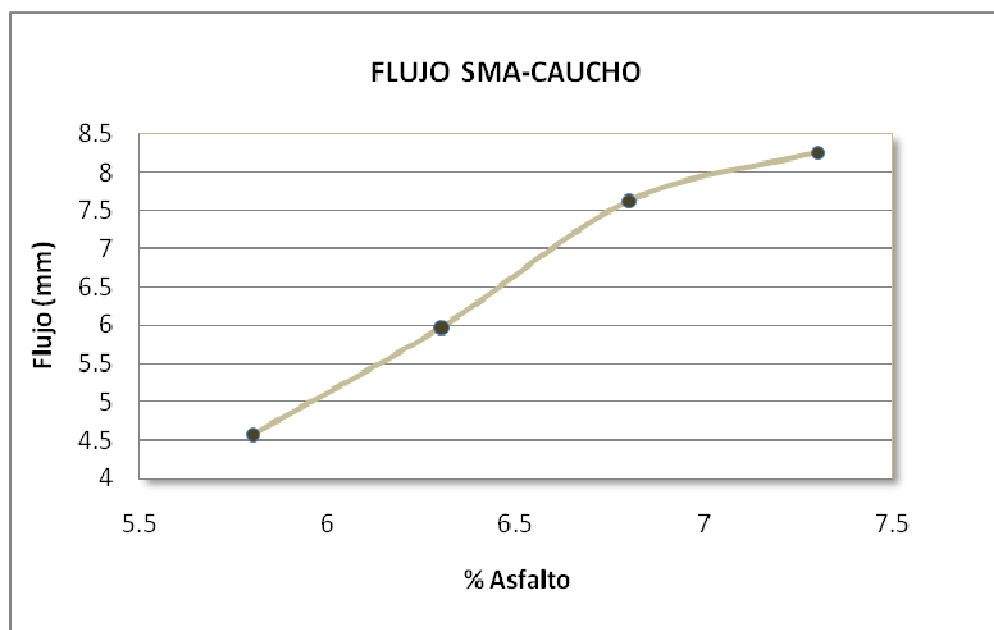
Figura 42. Flujo vs porcentaje de asfalto para mezcla MDC-2.



3.10.2 Grafico Flujo vs porcentaje de asfalto SMA-CAUCHO

Aquí se representa la deformación máxima sufrida por la probeta al momento de fallar.

Figura 43. Flujo vs porcentaje asfalto mezcla SMA-CAUCHO.



4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE MEZCLAS

4.1 DESCRIPCION

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

4.2 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.2.1 Control del escurrimiento

Una vez controlado el escurrimiento para cada uno de los porcentajes de asfalto mediante la adición de fibras de caucho, se observa la lógica tendencia que mantienen las curvas por disminuir el porcentaje de escurrimiento con el aumento de porcentaje de caucho agregado.

Figura 44. Líneas de tendencia del escurrimiento, en presencia de caucho.

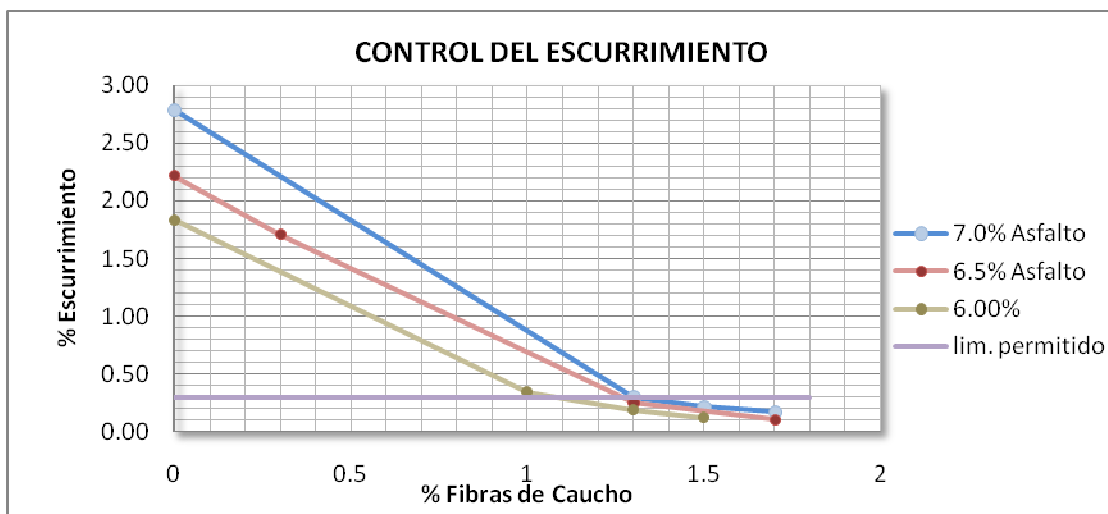


Tabla 21. Valores óptimos de fibra de caucho.

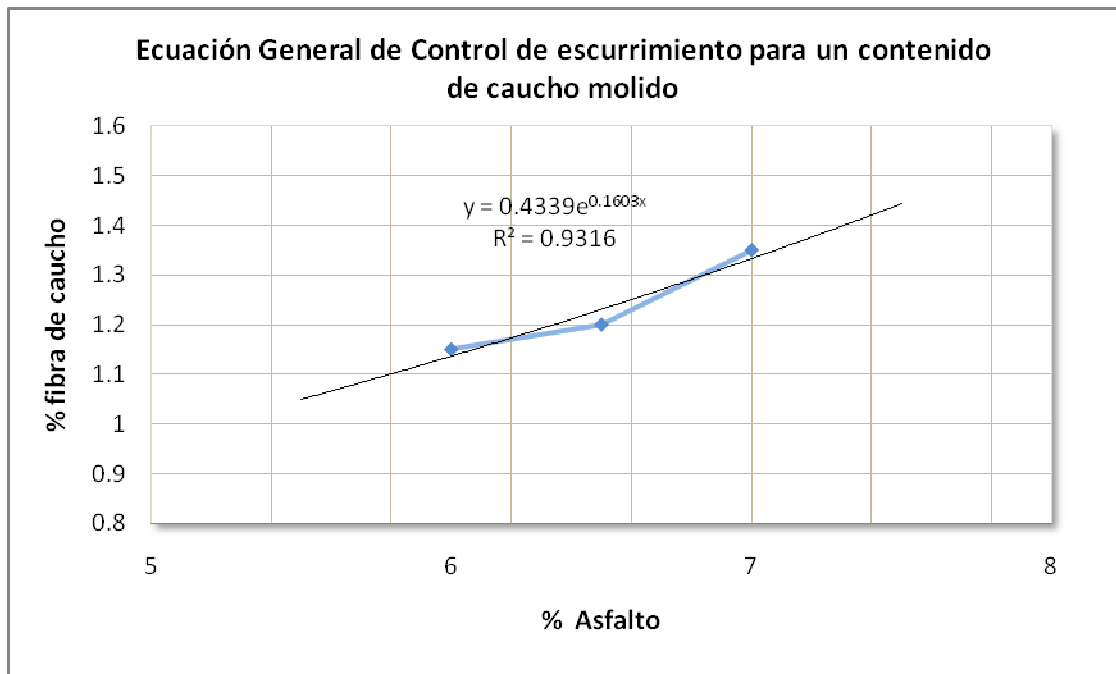
VALORES OPTIMOS DE FIBRA DE CAUCHO		
% Asfalto	% Fibras de Caucho	% Esgurrimiento
6.00%	1.03	0.3
6.50%	1.18	0.3
7.00%	1.31	0.3

- **Ecuación general porcentaje de asfalto vs porcentaje de fibra de caucho**

Una vez obtenido el porcentaje óptimo de fibras para cada contenido de asfalto, se procede a unificar la información en una sola gráfica de la cual sea posible obtener la ecuación general del contenido óptimo de caucho para cualquier contenido de asfalto, al menos dentro el rango utilizado de 5.5% - 7.5% de porcentaje de asfalto.

Pretendiendo dar un margen de confiabilidad a los resultados, se ha aumentado el contenido de caucho en porcentajes iguales de 0.5%.

Figura 45. Porcentaje de asfalto vs porcentaje de fibras de caucho.



En la gráfica se observa el resultado de la ecuación obtenida de correlacionar los datos de porcentajes óptimos de caucho con relación al contenido de asfalto, siendo esta $Y = 0.433e^{0.160(X)}$.

- **Confiabilidad del ensayo**

Aunque es un método ya estandarizado por la unión europea, no es común escuchar de él en nuestro medio, por lo cual, se compara con valores de escurrimiento obtenidos para una mezcla MDC-2, la cual debe tener un muy bajo o nulo porcentaje.

La mezcla preparada y ensayada por el método de Schellenberg, presenta valores de escurrimiento máximos del 0.08%, por lo cual es posible determinar este ensayo como válido para este estudio y referencia para los resultados futuros. Los resultados

Tabla 22. Resultado de análisis de escurrimiento para una MDC-2.

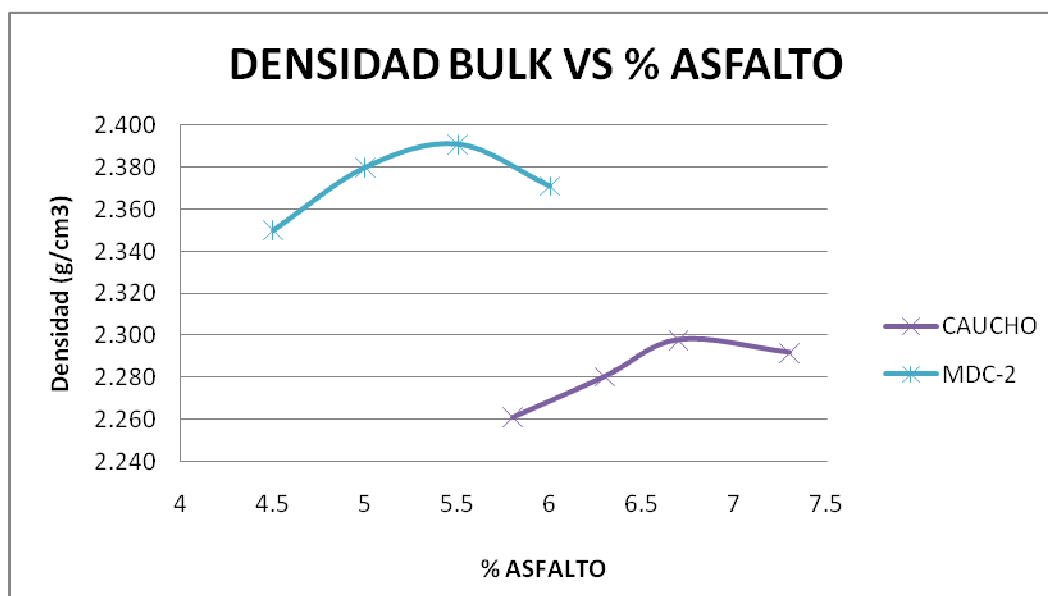
MDC-2								
% Caucho	Winicial	Wvaciado	% Inicial de escurrimiento	Wretenido sobre No18	Wfinal	% Escur	Prom	Condición
5.50%	993.0	992.3	<0,2%,NO TAMIZAR	992.30	0.07	0.08	0.04	CUMPLE
	996.7	995.9	<0,2%,NO TAMIZAR	995.90	0.08			

4.2.2 Densidad Bulk

De las gráficas obtenidas es posible identificar un tope máximo en el valor de la densidad de una mezcla asfáltica, esto producto de la relación de vacíos entre los áridos y el ligante, valores de asfalto superiores al máximo de la densidad pueden presentar problemas de exudación y/o fallas tempranas.

Las mezclas de granulometría discontinua tienen pesos específicos menores a los de las mezclas densas, a causa del más bajo número de golpes por cara con que fueron compactadas. Por otro lado, mientras las emulsiones de gradación abierta incrementan su densidad al aumentar el contenido óptimo de asfalto, en las densas ocurre lo contrario.

Figura 46. Comparación de resultados densidad Bulk.

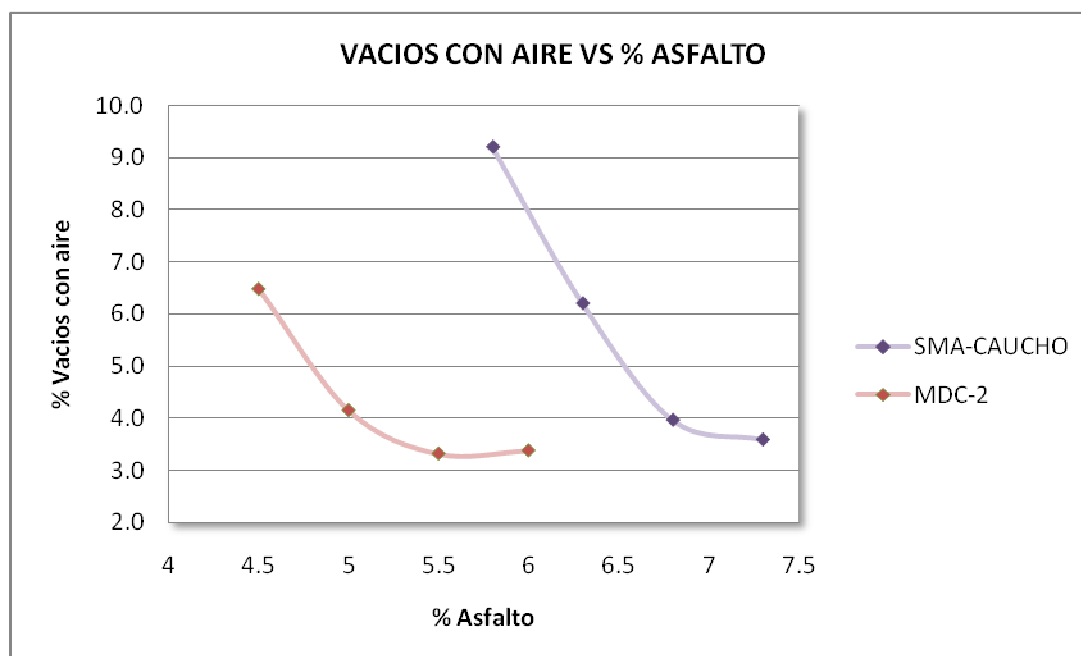


La mezcla SMA-CAUCHO, posee altos contenidos de asfalto para llenar vacíos que generan su gradación discontinua; contrario a lo que sucede con la mezcla MDC-2 de poco contenido de asfalto y bien gradada.

4.2.3 Vacíos con aire

Como se mencionó en el capítulo referente a los ensayos de laboratorio, los contenidos de asfalto que cumplen con los requerimientos de vacíos permitidos por la Comisión Permanente del Asfalto de Argentina son los pertenecientes al rango establecido para este trabajo entre 6.8% y 7.3%.

Figura 47. Comparacion porcentaje de vacíos con aire, mezcla SMA-CAUCHO y MDC-2.



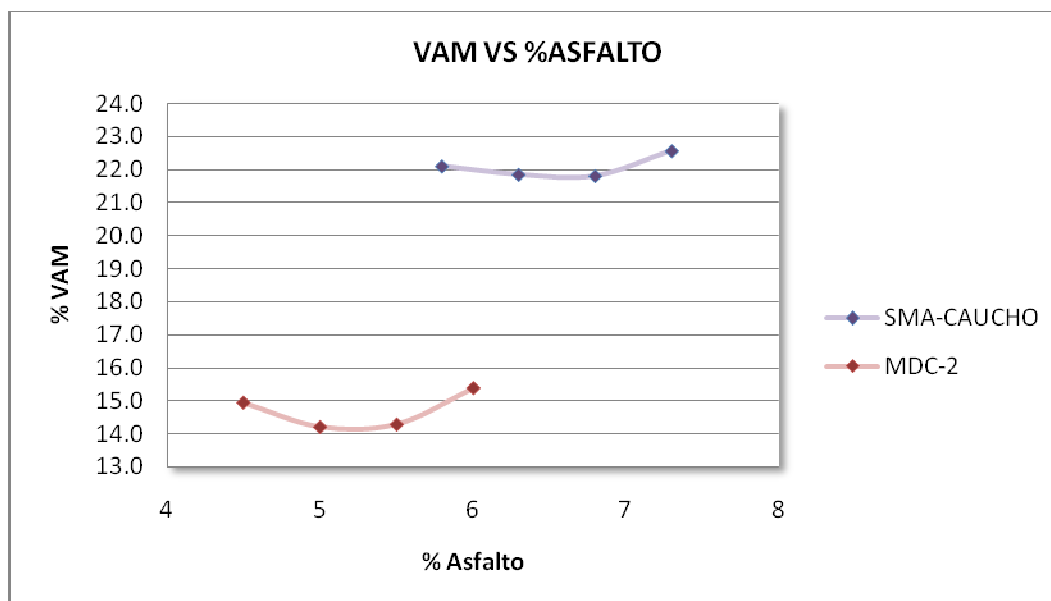
Las mezclas SMA poseen partículas de gran tamaño que permiten la formación de grandes cavidades, las cuales van desapareciendo en la medida que el asfalto se introduce en ellas, de ahí, que a mayor cantidad de asfalto disminuyan los vacíos presentes en la mezcla.

4.2.4 Vacíos en el agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral son inversamente proporcionales a la densidad de las mezclas compactadas, razón por la cual las mezclas de granulometría densa tienen un porcentaje VAM menor que el de las discontinuas.

Cabe resaltar el cumplimiento de la mezcla SMA de los estándares establecidos por normas internacionales en cuanto a vacíos en el agregado mineral se refiere. Las recomendaciones de la Comisión Permanente del Asfalto de Argentina para el Porcentaje de Vacíos del Agregado Mineral VAM en mezclas tipo SMA, establece que debe ser mayor que 18%, la AASHTO estima valores superiores al 17%, las mezclas ensayadas con caucho presentan valores superiores al 20%.

Figura 48. Comparacion VAM, Mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2.



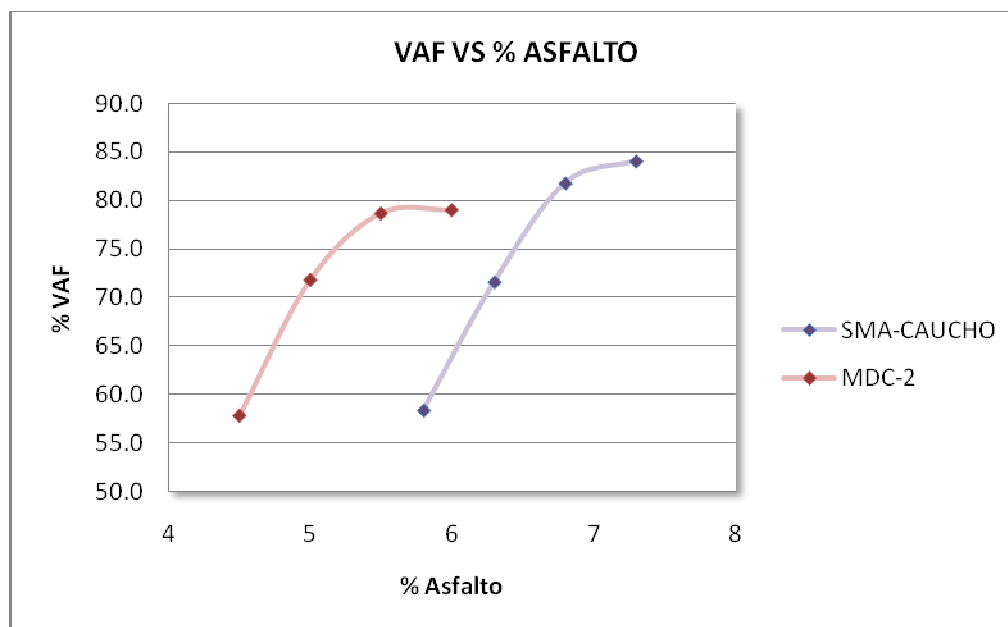
4.2.5 Vacíos llenos de asfalto

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto de una mezcla, depende del contenido de VAM y vacíos con aire. Los rangos de vacíos llenos de asfalto de la mezcla SMA-CAUCHO son similares al de una mezcla del tipo MDC-2, siendo que esta última contiene menor cantidad de asfalto.

Según las recomendaciones de la comisión permanente de asfalto de Argentina el Porcentaje de Relación Betún-Vacíos en mezcla para mezclas tipo SMA debe ser del 75% al 85% rango al cual se ajustan las probetas con contenido de asfalto entre el 6.8% y 7.3%.

Para disminuir el contenido de vacíos en la mezcla SMA-CAUCHO a los rangos permitidos por las normas internacionales, se hace necesario incrementar el contenido de asfalto a valores relativamente altos para de esta forma llenar la mayoría de vacíos presentes en la mezcla.

Figura 49. Comparacion VAF, Mezcla SMA-CAUCHO y MDC-2.



4.2.6 Módulo Elástico a 7.5 °C

La relación entre la deformación que presenta una probeta y el esfuerzo aplicado sobre ella, es decir el módulo elástico, este ensayo es usado como punto de comparación de la rigidez de las dos mezclas.

Al analizar las gráficas se observa una tendencia, incrementando el contenido de asfalto se aumenta la deformación. Las mezclas MDC-2 presentan un incremento de la deformación en menor proporción que las SMA-CAUCHO, conforme se aumenta el contenido de ligante, de ahí que las probetas con menor contenido de asfalto de una misma mezcla presentan un módulo de elasticidad más alto.

Las mezclas MDC-2 y SMA-CAUCHO, presentan valores del modulo elástico muy parecidos para esfuerzos bajos pero en la medida que se aumentan, el módulo varia notoriamente, concluyendo que la mezcla MDC-2 es más rígida que la SMA.

Figura 50. Comparacion módulo elástico mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2

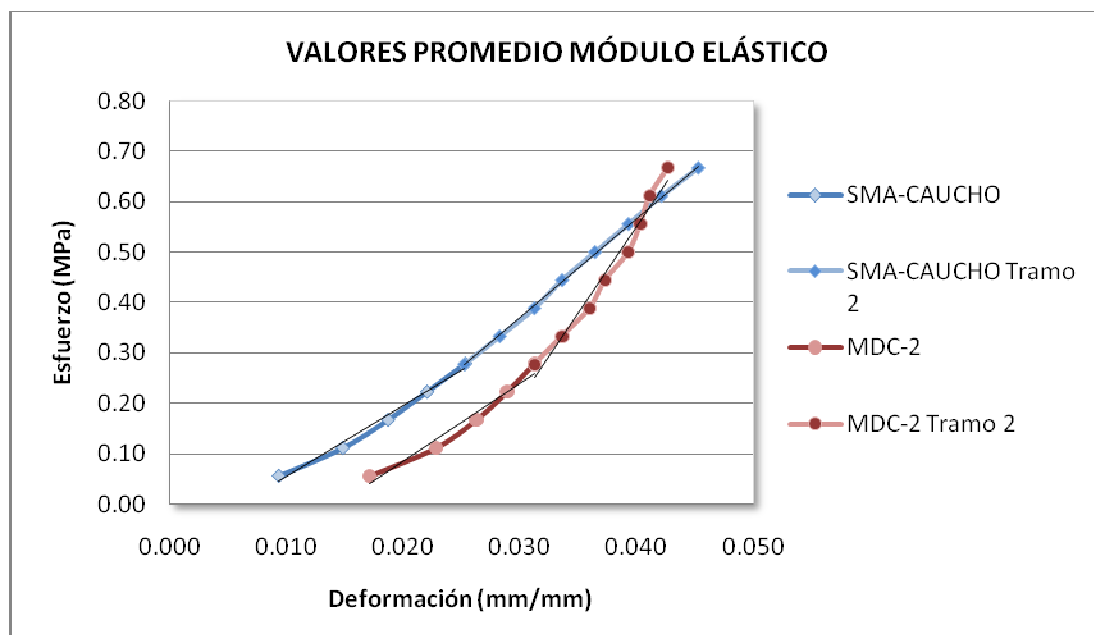


Tabla 23. Valores promedio del módulo Elástico. Mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2

MÓDULOS ELÁSTICOS PROMEDIO (MPa)		
MEZCLA	VALOR 1	VALOR 2
SMA-CAUCHO	14.03	19.74
MDC-2	15.53	34.46

4.2.7 Creep sin Confinar a 60 °C

Las gráficas muestran un comportamiento similar en cuanto a la deformación con el tiempo, pero claramente se puede notar que la mezcla SMA-CAUCHO presenta menor deformación, siendo que el contenido de asfalto es mayor que en la MDC-2, esto se da como resultado de la gradación discontinua, la cual demuestra que la distribución de esfuerzos a través de su esqueleto pétreo es mejor evitando medidas mayores de la deformación, como se da en la gradación continua.

Figura 51. Comparacion Creep sin confinar mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2.

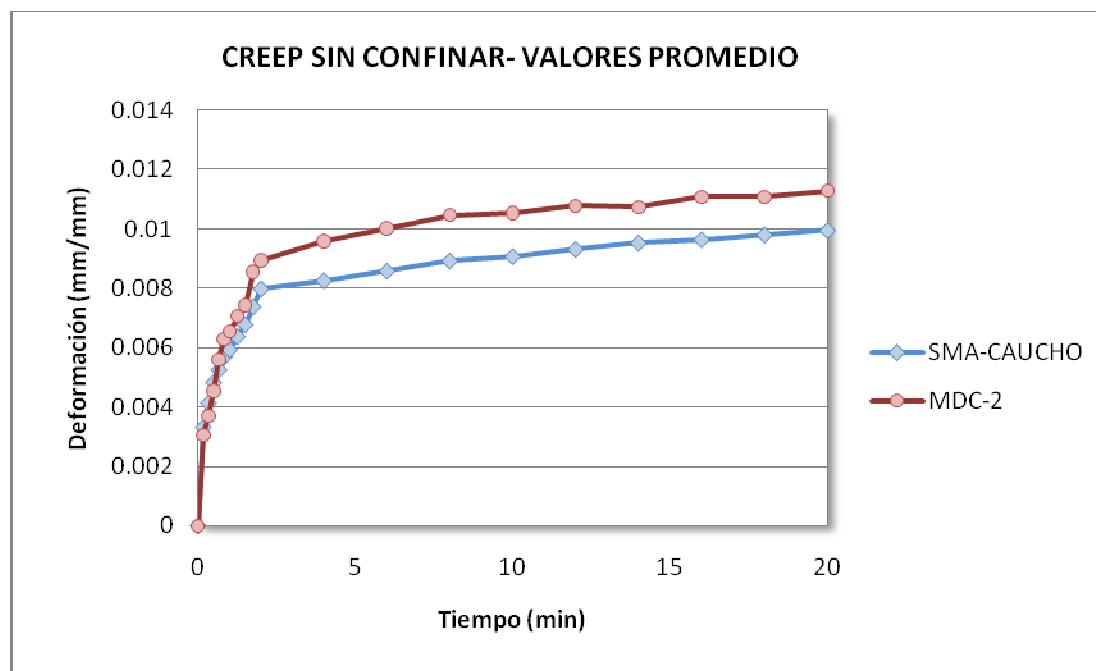


Tabla 24. Valores Promedio de la deformacion final. Mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2

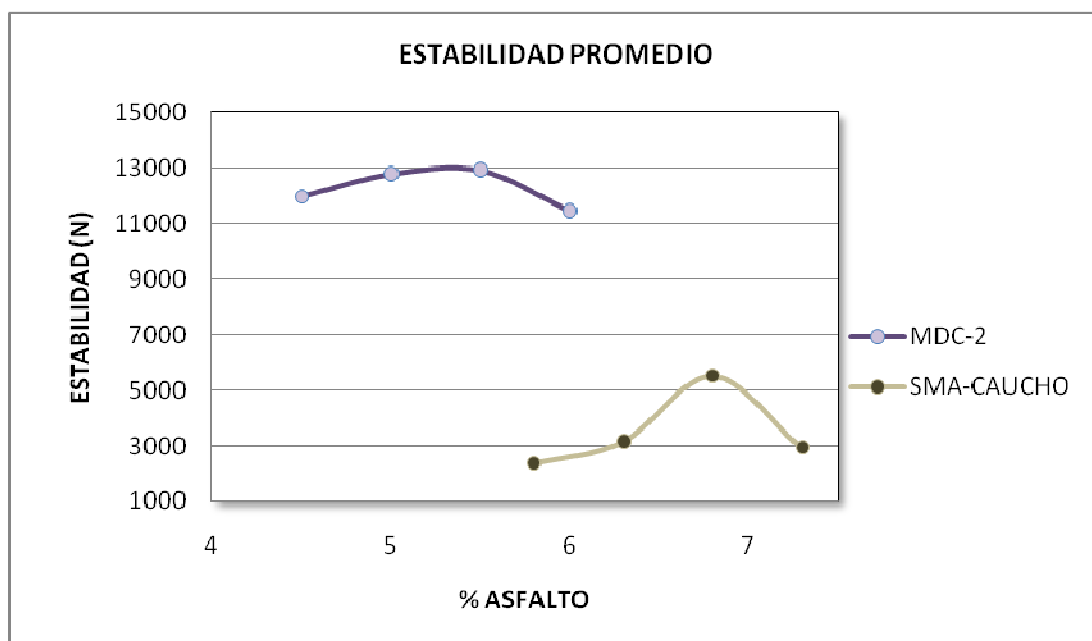
MEZCLA	DEFORMACION FINAL (mm/mm)
MDC-2	0.01194
SMA-CAUCHO	0.01136

4.2.8 Estabilidad Marshall

La mezcla MDC-2 ante esfuerzos altos presenta una estructura rígida y está bien relacionada con los valores de su módulo elástico, en cambio la mezcla SMA-CAUCHO presenta condiciones de inestabilidad altos.

Los valores obtenidos de la SMA-CAUCHO en cuanto a la resistencia por carga son desfavorables comparado con la mezcla MDC-2, a tal punto, de no poder ser recomendada en la aplicación de un pavimento.

Figura 52. Comparación estabilidad mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2.

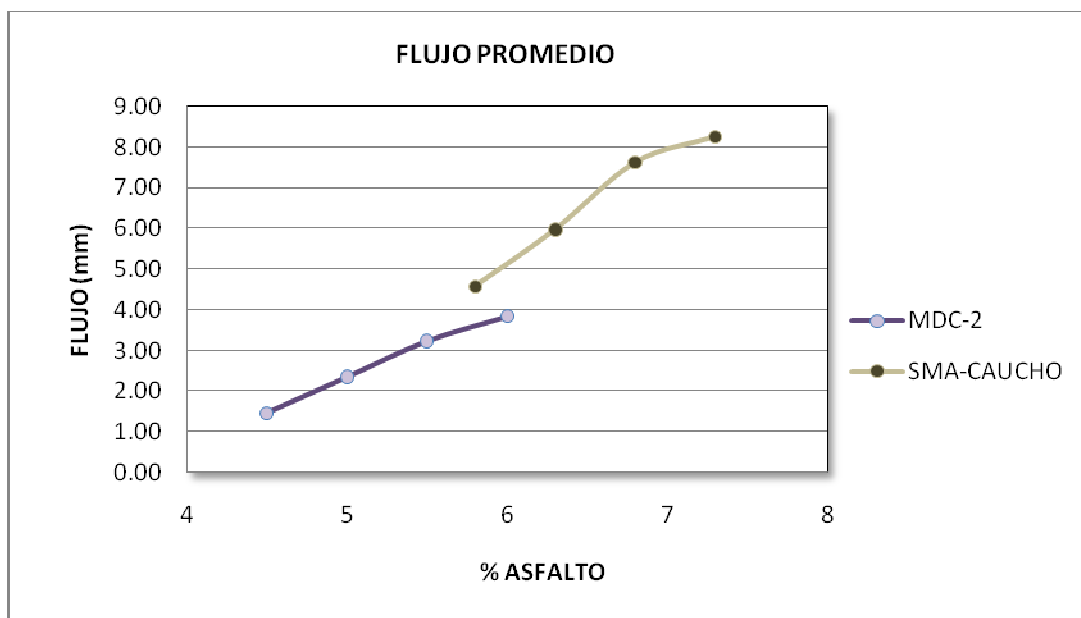


4.2.9 Flujo Marshall

El flujo o deformación de una mezcla, se relaciona en forma directa con la cantidad de asfalto contenido y la densidad de la mezcla.

Como se aprecia en la figura, para las dos mezclas, el incremento de asfalto provoca un incremento proporcional en la deformación. La SMA-CAUCHO presenta mayor deformación que la mezcla MDC-2 para iguales contenidos de asfalto, lo cual la hace una mezcla de menores cualidades estructurales que la MDC-2.

Figura 53. Comparación Flujo mezclas SMA-CAUCHO y MDC-2



RECOMENDACIONES

- Teniendo en cuenta el buen funcionamiento de las fibras de caucho en el control del escurrimiento y los buenos resultados encontrados con el uso de cenizas volantes, se recomienda realizar mezclas con diferentes porcentajes de ambos aditivos, reduciendo el volumen de caucho ocupado en la mezcla.
- Se propone la utilización de nuevas fibras de textura fina que ayuden al control del escurrimiento y que a su vez, no ocupen alto volumen como lo hace el caucho, buscando así garantizar la resistencia mínima de una mezcla tipo SMA. Se recomienda el uso de fibras como: FIQUE ó ALGODÓN, esta última especialmente por su textura fina y su capacidad de absorción.
- Continuar la implementación del método de Schellenberg para el control del escurrimiento. Descrito en el capítulo 3. Comparar los resultados obtenidos con el Método de la Canasta descrito en el mismo capítulo.
- Utilizar el mismo procedimiento de esta investigación, para la obtención del porcentaje óptimo de fibra a emplear en la mezcla, y adecuarlo a una ecuación general que relacione el porcentaje de fibra con el contenido de asfalto.
- Evaluar la influencia de los polímeros sbr, ya que éstos están presentes dentro del asfalto modificado Mexphalte PM tipo II y el caucho de llantas, pudiendo ser incompatibles. Observar el comportamiento con polímeros sbs.
- Comparar éste y los nuevos trabajos en el tema de las SMA y de agentes modificadores de las mezclas con trabajos similares desarrollados en otras instituciones educativas o relacionadas con el campo de la investigación.

CONCLUSIONES

- La mezcla SMA-CAUCHO, no cumple con las características típicas de resistencia estructural de una mezcla SMA o las mezclas densas. Esto es:

o ESTABILIDAD	Mínima requerida	6350 N
	Resultante	5511 N
o FLUJO	Máximo permitido	4.0 mm
	Resultante	7.6 mm

Valores comparativos con mezclas usadas comúnmente, como las MDC-2:

o ESTABILIDAD	Valor medio	12300 N
	Resultante	5511 N
o FLUJO	Valor medio	3.8 mm
	Resultante	7.6 mm

- Las comparaciones del módulo elástico arrojan resultados negativos de la mezcla SMA-CAUCHO siendo de menor rigidez que las mezclas típicas como la MDC-2.
- Frente a cargas estáticas, el comportamiento de la SMA-CAUCHO es mucho mejor que las mezclas densas en caliente como la MDC-2, teniendo en cuenta los contenidos mayores de asfalto presentes en la mezcla.
- Diferentes tipos de agregados no representan influencia considerable en los resultados de resistencia estructural, por lo cual se decide presentar los valores obtenidos con el material proveniente de la cantera de Bocas, ubicada en Rio Negro, Santander.

- Se controló el problema principal de este proyecto, el escurrimiento de ligante encontrado en el trabajo previo. Se obtiene la ecuación general $Y = 0.433e^{0.160(X)}$, que relaciona el porcentaje de fibras de caucho molido de llantas recicladas óptimo (Y) con el porcentaje de asfalto (X).
- Se concluye, que aspecto importante de la falla de las probetas, representada en los ensayos de estabilidad y flujo, es el alto volumen ocupado por las fibras de caucho, lo cual puede impedir la fricción y transmisión correcta de esfuerzos dentro del esqueleto pétreo.
- Se comprobó el método Schellenberg como instrumento para medir el escurrimiento del ligante.

BIBLIOGRAFIA

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)

AASHTO -American Association of State Highway and Transportation 400-R435- Stone Matrix Asphalt (SMA) Asphalt Pavements – AASHTO: 400-R-435, United States. (2005)

SANCHEZ SABOGAL, Fernando; Pavimentos Tomo II, Universidad La Gran Colombia, Bogotá. (1985)

MONTEJO ALFONSO; Ingeniería de Pavimentos en Vías Terrestres. Ediciones Universidad Católica. Bogotá, Colombia. (1999)

GARNICA, Paul; DELGADO, Horacio; SANDOVAL, Carlos; Análisis Comparativo de los Métodos Marshall y Superpave para Compactación de Mezclas Asfálticas; Instituto Mexicano del Transporte, México. (2005)

COMISIÓN PERMANENTE DEL ASFALTO; Especificaciones Técnicas de Mezclas Asfálticas en Caliente de Bajo Espesor para Carreteras de Rodamiento, República Argentina. (2005)

ALARCON, Humberto; ROMERO, Sergio; GARNICA, Paul; DELGADO, Horacio; Publicación técnica, Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas; Instituto Mexicano del Transporte, México. (2004)

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 Mastic Asphalt (SMA), Tecnología de pavimentos para el nuevo milenio; pagina web.

REYES, Oscar; CAMACHO, Javier; Influencia de la Granulometría en la Resistencia al Ahuellamiento de Mezclas Asfálticas; Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá. (2008)

LANCHAS, Santiago; HERRERO Oscar; Revista Técnica, Caracterización de Fibras en Mezclas Durables Mediante el Nuevo Ensayo Europeo de Ecurrimiento de Ligante; Universidad de la Rioja, España. (2001-2008)

INTERCONTROLES; Materiales Bituminosos Marcado CE, pagina web.

MINISTEIRO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES; Glosario de Términos de Uso Frecuente en Proyectos de Infraestructura Vial; República de Perú. (2008)

BP.COM; Asfaltos Drenantes, pagina web.

NYNAS BITUMEN MAGAZINE; Performance, Estructura del asfalto poroso. (2005)

ANEXO A: CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS



ANEXO A.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS Y GRUESOS Y FINOS (INV E-213)

Fecha: Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescader - Río Chicamoca

Peso Inicial de la Muestra (g): 3500
Peso Después 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	65,00	100	0,149	115,6	3,30	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	39,00	Pasa 200		198,3	5,67	0,04
Σ		2135			Σ		1363,6	100,0	
TOTAL							3498,6		



A.2 EQUIVALENTE DE ARENA (INV E-133)

Fecha: Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: 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	
EQUIVALENTE DE ARENA % (H2/H1)	90,9	96,9	93,8	93,8



A.3 PESO ESPECÍFICO Y % DE ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO (INV E-223)

Fecha: Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescadero - Río Chicamocha
Trituradora: SAENZ

DATOS

A = Peso de la muestra en condición 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 sumegida en agua (Pb - Pa)	3125 g
C = Peso de la muestra seca en horno	4965 g

CALCULOS

Gravedad específica real	$C / (C-B)$	2,70
Gravedad específica aparente	$C / (A-B)$	2,65
Gravedad específica aparente S.S.S	$A / (A-B)$	2,67
% de Absorción	$[(A-C)/C] * 100$	0,70%



A.4 PESO ESPECÍFICO Y % DE ABSORCIÓN DE AGREGADO FINO (INV E-222)

Fecha: Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
Trituradora: SAENZ

DATOS

A = Peso frasco + agua hasta la marca al aire	665,6 g
B = Peso de la muestra en condición 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	$[(B-D)/C] * 100$	0,54%



A.5 PESO ESPECÍFICO Y % DE ABOCIÓN DE FILLER MINERAL (E-222)

Fecha: Junio de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
Trituradora: SAENZ

DATOS

A = Peso frasco + agua hasta la marca al aire	659 g
B = Peso de la muestra en condición S.S.S al aire	200 g
C = Peso de la muestra, frasco y agua agregada hasta la marca al 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	$[(B-D)/C] * 100$	1,83%



A.6 RESISTENCIA AL DESGASTE POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (INV E - 219)

Fecha: 4 de Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
Trituradora: SAENZ

DATOS SOBRE GRADACIÓN, CARGA ABRASIVA Y REVOLUCIONES

TAMANO		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"					5000	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. Metamórficas
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
Perdida 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	



A.7 ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO (INV E-230)

Fecha: Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: 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 GRADACIÓN ORIGINAL	[% RET. CALIB.] x [% 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	3,60
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 GRADACIÓN ORIGINAL	[% RET. CALIB.] x [% RET. GRAD. ORIG.]
PASANTE	RETENIDO					
1"	3/4"	1395	312,5	22,40	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	26,30	21,75	5,72
Σ =		3264,87	771,79	98,15	91,35	22,49

Índice de Alargamiento = 17,70 %
Índice de Aplanamiento = 24,62 %



A.8 PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS (INV E-227)

Fecha: Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
Trituradora: SAENZ

Tamaño	A	B	C	D	E
(1½" a 1")	2000	1967,48	98,37	2580	2538,0
(1" a ¾")	1500	1300,49	86,7	3190	2765,7
(¾" a ½")	1200	1083,47	90,29	2495	2252,7
(½" a ⅜")	300	257,82	85,94	900	773,5
Σ =	5000	4609,26	361,3025	9165	8329,93264

$$\% \text{ Caras Fracturadas } [E / D] = 90,89\%$$

A = Peso de la muestra (g)
B = Peso caras fracturadas (g)
C = % Caras fracturadas
D = Granulometría de la gradación original
E = C x D



A,9 SANIDAD DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO (INV E-220)

Fecha: Mayo de 2006
Proyecto: SMA
Localización: Pescadero - Rio Chicamocha
Trituradora: SAENZ

MATERIAL			PESO (g)
DE	A		
No. 4	3/8"		300 ± 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		

Perdida por ensayo de solidez = 0,79

ANEXO B: CARACTERIZACION DE LAS PROBETAS



B.1. GEOMETRÍA DE LAS PROBETAS FABRICADAS EN LABORATORIO

MEZCLA SMA		
PROBETA	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)
A1	10.26	6.48
A2	10.48	6.5
A3	10.44	6.47
B1	10.21	6.66
B2	10.41	6.44
B3	10.44	6.49
C1	10.25	6.68
C2	10.26	6.58
C3	10.3	6.5
D1	10.48	6.21
D2	10.2	6.55
D3	10.24	6.44

MEZCLA MDC-2		
PROBETA	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)
A1	10.36	6.37
A2	10.38	6.22
A3	10.34	6.38
B1	10.21	6.13
B2	10.31	6.12
B3	10.44	6.34
C1	10.35	6.16
C2	10.28	6.35
C3	10.32	6.36
D1	10.3	6.04
D2	10.31	6.19
D3	10.27	6.31



B.2. 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 PICNOMETRO	A	D	E	Gmm
MEZCLA MDC-2	4.5	915.2	800	2000.5	2481.6	2.509
	5		800	2000.5	2478.2	2.482
	5.5		800	2000.5	2476.6	2.47
	6		800	2000.5	2474.3	2.452

	% ASFALTO	W PICNOMETRO	A	D	E	Gmm
MEZCLA SMA-CAUCHO	5.8	915.2	800	1962.4	2441.2	2.49
	6.3		800	1962.4	2433.4	2.43
	6.7		800	1962.4	2428.1	2.39
	7.3		800	1962.4	2425.9	2.38



B.3. 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	2,30
A12	1191,3	1193,7	683,3	2,33
A13	1184,6	1185,9	684,4	2,36
A21	1180,7	1185,2	690,1	2,38
A22	1180,9	1185,2	688,9	2,38
A23	1184,0	1185,9	678,0	2,33
A31	1176,3	1176,6	686,1	2,40
A32	1179,5	1179,9	686,0	2,39
A33	1187,4	1187,8	709,0	2,48
A41	1176,0	1176,8	681,8	2,38
A42	1188,6	1188,4	686,6	2,37
A43	1187,4	1187,6	692,8	2,40

MEZCLA MDC-2	% ASFALTO	Gb Prom
	4.5	2.35
	5	2.38
	5.5	2.39
	6	2.37



B.4 PESO ESPECÍFICO APARENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

PROBETA	A1	A2	A3	B1	B2	B3
ESPESOR MUESTRA CM.	6.479	6.501	6.47	6.659	6.43 5	6.48 4
PESO MUESTRA SOLA AL AIRE, g	1170.8	1189.3	1187	1161.6	1177 .8	1151 .6
PESO MUESTRA + PARAFINA AL AIRE, g	1220.1	1242.7	1234.7	1251.2	1250 .6	1243
PESO PARAFINA	49.3	53.4	47.7	89.6	72.8	91.4
VOLUMEN PARAFINA CM3	55.39	60.00	53.60	100.67	81.8 0	102. 70
PESO MUESTRA + PARAFINA EN EL AGUA, g	648.4	655.3	662.8	639.9	653. 7	628. 1
VOLUMEN MUESTRA + PARAFINA CM3	571.7	587.4	571.9	611.3	596. 9	614. 9
VOLUMEN MUESTRA CM3	516.31	527.40	518.30	510.63	515. 10	512. 20
DENSIDAD g/cm3	2.27	2.26	2.29	2.27	2.29	2.25
PROMEDIO	2.261			2.281		

PROBETA	C1	C2	C3	D1	D2	D3
ESPESOR MUESTRA CM.	6.677	6.583	6.504	6.208	6.54 7	6.43 8
PESO MUESTRA SOLA AL AIRE, g	1180.3	1198.9	1149.3	1170	1181 .9	1176 .8
PESO MUESTRA + PARAFINA AL AIRE, g	1219	1255.4	1231.7	1232.5	1216 .2	1219 .6
PESO PARAFINA	38.7	56.5	82.4	62.5	34.3	42.8
VOLUMEN PARAFINA CM3	43.48	63.48	92.58	70.22	38.5 4	48.0 9
PESO MUESTRA + PARAFINA EN EL AGUA, g	655.4	672.3	637	650.7	662. 8	658. 4
VOLUMEN MUESTRA + PARAFINA CM3	563.6	583.1	594.7	581.8	553. 4	561. 2
VOLUMEN MUESTRA CM3	520.12	519.62	502.12	511.58	514. 86	513. 11
DENSIDAD g/cm3	2.27	2.31	2.29	2.29	2.30	2.29
PROMEDIO	2.298			2.292		



B.5 PESO ESPECÍFICO TOTAL DEL AGREGADO DE LA MEZCLA

$$G_{ag} = \frac{100}{\left[\frac{\% \text{ peso Ag. grueso}}{\text{Peso esp Ag. gru}} \right] + \left[\frac{\% \text{ peso Ag. fino}}{\text{Peso esp Ag. fino}} \right] + \left[\frac{\% \text{ peso Filler}}{\text{Peso esp Filler}} \right]}$$

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

MDC-2	% En peso por Material total de la mezcla	Peso específico (g/cm ³)
Agr. Grueso	43	2.694
Agr. Fino	51	2.655
Filler	6	2.144
G Agregado		2.636

MEZCLA SMA	
TAMIZ No	% Pasa
4	34
No 200	10.9

SMA	% En peso por Material total de la mezcla	Peso específico (g/cm ³)
Agr. Grueso	66	2.698
Agr. Fino	23.1	2.655
Filler	10.9	2.144
G Agregado		2.615

ANEXO C:

DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR MARSHALL



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



C.1 DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR EL METODO MARSHALL

PROYECTO: MDC-2

PROCEDENCIA DE LOS AGREGADOS: CHICAMOCHA

PESO ESPECIFICO DEL ASFALTO: 1.006

HOJA 1 DE 2

MEZCLA No	% DE ASFALTO	ESPESOR (PULG)	PESO ESPECIFICO			% ASFALTO ABSORBIDO	VOLUMEN % TOTAL DE LA PROBETA			% DE VACIOS AGREGADO MINERAL	% ASFALTO EFECTIVO	% VACIOS LLENOS DE ASFALTO	PESO UNITARIO (LB/PULG ²)
			BULK	MAXIMO TEORICO	MAXIMO 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



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



C.1 DISEÑO DE MEZCLA BITUMINOSA POR EL METODO MARSHALL

PROYECTO: SMA-CAUCHO

PROCEDENCIA DE LOS AGREGADOS: CHICAMOCHA

PESO ESPECIFICO DEL ASFALTO: 1.006

HOJA 2 DE 2

MEZCLA No	% DE ASFALTO	ESPESOR (PULG)	PESO ESPECIFICO			% ASFALTO ABSORBIDO	VOLUMEN % TOTAL DE LA PROBETA			% DE VACIOS AGREGADO MINERAL	% ASFALTO EFECTIVO	% VACIOS LLENOS DE ASFALTO	PESO UNITARIO (LB/PULG ²)
			BULK	MAXIMO TEORICO	MAXIMO MEDIDO		AGREGADOS	VACIOS CON AIRE	ASFALTO				
A1	5.8	2.55	2.2676										
A2	5.8	2.56	2.255										
A3	5.8	2.54	2.2902										
prom			2.261	2.393	2.426	0.607	77.72	9.207	13.07	22.101	5.193	58.34	142.485
B1	6.3	2.62	2.275										
B2	6.3	2.54	2.287										
B3	6.3	2.56	2.2483										
prom			2.281	2.376	2.405	0.552	77.22	6.206	16.56	21.848	6.748	71.593	143.317
C1	6.8	2.63	2.2693										
C2	6.8	2.59	2.3073										
C3	6.8	2.56	2.2889										
prom			2.298	2.358	2.404	0.866	77.27	3.97	18.76	21.805	5.934	81.801	143.941
D1	7.3	2.44	2.2871										
D2	7.3	2.58	2.2956										
D3	7.3	2.54	2.2935										
prom			2.292	2.342	2.401	1.146	78.39	3.591	18.02	22.563	6.154	84.083	143.317

ANEXO D:

ENSAYOS DE MODULO DE ELASTICIDAD



D.1 ENSAYOS DEL MODULO ELASTICO
VALORES DE DEFLEXION TOMADAS PARA MEZCLA SMA-CAUCHO

HOJA 1 DE 2

CONSTANTE DEL DEFORMIMETRO = 0.001"

Esfuerzo (lb/pulg ²)	LECTURA TOMADA EN EL DEFORMIMETRO											
	PROBETAS 5.8%			PROBETAS 6.3%			PROBETAS 6.8%			PROBETAS 7.3%		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
0.056	18	37	18	27	28	20	31	16	32	19	30	38
0.111	29	55	29	40	43	28	45	30	60	49	44	51
0.167	37	66	42	49	53	39	54	41	78	55	53	63
0.222	44	78	49	56	60	48	64	52	90	60	63	75
0.278	49	89	59	63	69	60	74	60	100	64	72	85
0.333	55	97	65	73	76	71	81	68	110	69	80	96
0.389	60	106	70	78	85	79	90	78	120	79	88	103
0.444	66	112	71	85	92	87	97	85	130	83	96	111
0.500	70	118	75	92	99	95	105	93	138	97	102	119
0.556	77	124	82	99	106	103	113	100	146	104	110	127
0.611	83	130	88	106	114	110	120	108	154	111	118	136
0.667	91	134	96	115	119	118	129	116	162	121	125	144

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



D.2 ENSAYO DEL MODULO ELASTICO

HOJA 2 DE 2

CONSTANTE DEL ANILLO 10.125 Lb

MEZCLA TIPO MDC-2				
Esfuerzo MPA	Deformación (mm/mm)			
	4.50%	5.00%	5.50%	6.00%
0.056	0.0242	0.0125	0.0147	0.0163
0.111	0.0264	0.0199	0.0221	0.0245
0.167	0.0288	0.0235	0.0266	0.0289
0.222	0.0303	0.0262	0.0303	0.0340
0.278	0.0318	0.0291	0.0328	0.0363
0.333	0.0352	0.0305	0.0352	0.0384
0.389	0.0371	0.0337	0.0371	0.0409
0.444	0.0380	0.0350	0.0389	0.0421
0.500	0.0400	0.0370	0.0408	0.0431
0.556	0.0409	0.0380	0.0420	0.0449
0.611	0.0411	0.0390	0.0432	0.0470
0.667	0.0430	0.0402	0.0447	0.0490

MEZCLA TIPO SMA-CAUCHO				
Esfuerzo (MPA)	Deformación (mm/mm)			
	5.80%	6.30%	6.80%	7.30%
0.056	0.0070	0.0098	0.0092	0.0113
0.111	0.0113	0.0145	0.0147	0.0188
0.167	0.0155	0.0184	0.0186	0.0223
0.222	0.0182	0.0214	0.0227	0.0258
0.278	0.0211	0.0250	0.0262	0.0288
0.333	0.0235	0.0287	0.0291	0.0319
0.389	0.0254	0.0315	0.0328	0.0352
0.444	0.0268	0.0344	0.0356	0.0377
0.500	0.0283	0.0373	0.0387	0.0415
0.556	0.0311	0.0401	0.0416	0.0444
0.611	0.0334	0.0430	0.0445	0.0475
0.667	0.0366	0.0459	0.0479	0.0508

ANEXO E: ENSAYO CREEP



E.1. ENSAYO CREEP SIN CONFINAR

UNIDAD DE CARGA CONSTANTE = 100.125 Lb

CONSTANTE DEL ANILLO = 10.125 Lb

CONSTANTE DEL DEFORMIMETRO = 0.001"

HOJA 1 DE 2

MEZCLA SMA-CAUCHO												
LECTURAS TOMADAS DEL DEFORMIMETRO												
TIEMPO	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.1666667	2	2	3	2	6	4	10	4	6	30	6	23
0.3333333	2	2	3	3	7	6	14	4	8	34	10	27
0.5	5	5	4	4	8	8	15	4	10	35	13	29
0.6666667	6	6	4	5	9	9	16	5	11	37	15	30
0.8333333	7	7	5	6	10	10	17	5	13	37	17	31
1	8	7	5	6	11	11	18	5	13	38	18	32
1.25	11	8	6	6	12	14	18	6	14	39	19	33
1.5	13	8	7	9	13	16	19	6	14	40	20	33
1.75	14	11	7	10	14	17	21	6	15	41	25	34
2	15	13	8	11	15	18	22	7	17	43	27	37
4	16	13	8	12	16	18	22	7	18	44	28	39
6	16	14	9	12	17	19	23	8	19	45	29	40
8	17	14	9	13	18	19	24	9	21	46	30	41
10	17	14	10	13	18	20	24	9	22	46	31	41
12	18	15	10	14	19	20	24	9	23	46	32	42
14	18	15	10	15	19	21	25	9	23	47	33	43
16	18	15	11	15	19	21	25	9	24	47	33	44
18	19	15	11	16	20	21	25	10	24	48	34	44
20	19	15	11	16	20	22	25	10	25	49	34	45
22	19	15	12	17	21	23	25	10	25	49	35	45
24	20	16	12	17	21	23	26	11	26	49	36	45
26	20	16	12	17	21	23	26	11	26	49	37	45
28	20	16	12	18	21	23	26	11	27	49	37	45
30	20	16	13	19	21	23	26	11	28	49	37	45
32	20	16	13	20	21	23	26	11	28	50	38	46
34	21	16	13	20	21	23	26	11	28	50	38	46
36	21	16	13	20	21	23	27	11	28	50	39	46
38	22	16	14	20	21	23	27	11	29	50	39	46
40	22	16	14	20	21	23	27	12	29	50	40	47
42	22	17	14	20	21	23	27	12	29	51	40	47
44	22	17	14	21	22	23	27	12	29	51	40	47
46	22	17	14	22	22	23	27	12	30	51	40	47
48	22	17	15	22	22	23	27	12	30	51	41	47
50	22	17	15	22	22	24	27	12	30	51	41	47
52	22	17	15	22	22	24	28	12	30	51	41	47
54	22	17	15	22	22	24	28	12	30	51	41	47
56	22	17	16	22	22	24	28	12	30	51	41	47
58	22	17	16	22	22	24	28	12	30	51	41	47
60	22	17	16	22	22	24	28	12	30	51	41	47



E.2 ENSAYO CREEP SIN CONFINAR

CONSTANTE DEL ANILLO= 10.125 Lb

UNIDAD DE CARGA CONSTANTE= 100.125

MEZCLA MDC-2				
tiempo	Deflexión (mm/mm)			
	4.50%	5.00%	5.50%	6.00%
0	0	0	0	0
0.167	0.00146	0.00261	0.00391	0.00423
0.333	0.00180	0.00325	0.00469	0.00505
0.5	0.00209	0.00394	0.00567	0.00643
0.667	0.00281	0.00473	0.00664	0.00819
0.833	0.00339	0.00504	0.00723	0.00947
1	0.00356	0.00529	0.00762	0.00970
1.25	0.00377	0.00584	0.00801	0.01056
1.5	0.00408	0.00612	0.00840	0.01107
1.75	0.00495	0.00698	0.00957	0.01268
2	0.00522	0.00726	0.00996	0.01326
4	0.00593	0.00804	0.01055	0.01382
6	0.00627	0.00842	0.01094	0.01442
8	0.00648	0.00880	0.01153	0.01499
10	0.00647	0.00878	0.01172	0.01510
12	0.00658	0.00899	0.01192	0.01557
14	0.00654	0.00894	0.01192	0.01548
16	0.00675	0.00923	0.01231	0.01599
18	0.00675	0.00923	0.01231	0.01599
20	0.00694	0.00938	0.01250	0.01624
22	0.00694	0.00938	0.01250	0.01624
24	0.00716	0.00967	0.01290	0.01675
26	0.00716	0.00967	0.01290	0.01682
28	0.00716	0.00967	0.01290	0.01682
30	0.00716	0.00975	0.01290	0.01682
32	0.00716	0.00975	0.01290	0.01682
34	0.00716	0.00975	0.01290	0.01682
36	0.00735	0.00990	0.01309	0.01708
38	0.00725	0.00977	0.01309	0.01686
40	0.00725	0.00977	0.01309	0.01686
42	0.00725	0.00977	0.01309	0.01695
44	0.00736	0.00992	0.01329	0.01721
46	0.00736	0.00992	0.01329	0.01721
48	0.00736	0.00992	0.01329	0.01721
50	0.00736	0.00992	0.01329	0.01721
52	0.00736	0.00992	0.01329	0.01721
54	0.00736	0.00992	0.01329	0.01721
56	0.00736	0.00992	0.01329	0.01721
58	0.00736	0.00992	0.01329	0.01721
60	0.00736	0.00992	0.01329	0.01721

MEZCLA SMA-CAUCHO				
tiempo	Deflexión (mm/mm)			
	4.50%	5.00%	5.50%	6.00%
0	0	0	0	0
0.167	0.00091	0.00156	0.00313	0.00769
0.333	0.00091	0.00208	0.00430	0.00925
0.5	0.00182	0.00261	0.00488	0.01003
0.667	0.00208	0.00300	0.00528	0.01068
0.833	0.00247	0.00339	0.00586	0.01107
1	0.00261	0.00365	0.00606	0.01146
1.25	0.00326	0.00417	0.00625	0.01185
1.5	0.00365	0.00495	0.00645	0.01211
1.75	0.00417	0.00534	0.00703	0.01303
2	0.00469	0.00573	0.00762	0.01394
4	0.00482	0.00599	0.00782	0.01446
6	0.00508	0.00625	0.00821	0.01485
8	0.00521	0.00651	0.00879	0.01524
10	0.00534	0.00664	0.00899	0.01537
12	0.00560	0.00690	0.00918	0.01563
14	0.00560	0.00716	0.00938	0.01602
16	0.00573	0.00716	0.00957	0.01615
18	0.00586	0.00742	0.00957	0.01641
20	0.00586	0.00755	0.00977	0.01667
22	0.00599	0.00795	0.00977	0.01680
24	0.00625	0.00795	0.01016	0.01693
26	0.00625	0.00795	0.01016	0.01706
28	0.00625	0.00808	0.01036	0.01706
30	0.00638	0.00821	0.01055	0.01706
32	0.00638	0.00834	0.01055	0.01745
34	0.00651	0.00834	0.01055	0.01745
36	0.00651	0.00834	0.01075	0.01758
38	0.00677	0.00834	0.01094	0.01758
40	0.00677	0.00834	0.01094	0.01785
42	0.00690	0.00834	0.01094	0.01798
44	0.00690	0.00860	0.01094	0.01798
46	0.00690	0.00873	0.01114	0.01798
48	0.00703	0.00873	0.01114	0.01811
50	0.00703	0.00886	0.01114	0.01811
52	0.00703	0.00886	0.01133	0.01811
54	0.00703	0.00886	0.01133	0.01811
56	0.00716	0.00886	0.01133	0.01811
58	0.00716	0.00886	0.01133	0.01811
60	0.00716	0.00886	0.01133	0.01811

ANEXO F: ESTABILIDAD Y FLUJO



F.1 ESTABILIDAD Y FLUJO

ESTABILIDAD Y FLUJO MDC-2						
PROBETA	ESTABILIDAD MEDIDA	h PROMEDIO	F.C	ESTABILIDAD (NEWTONS)	FLUJO (0.001")	FLUJO (mm)
A1	262	6,37	1,00	11800,02	58	1,473
A2	258	6,22	1,04	12084,66	62	1,575
A3	266	6,38	1,00	11980,17	54	1,372
Promedio				11954.95		1.473
B1	265	6,13	1,09	13009,31	88	2,235
B2	269	6,12	1,09	13205,65	94	2,388
B3	259	6,34	1,04	12131,50	96	2,438
Promedio				12782.15		2.354
C1	275	6,16	1,09	13500,21	126	3,200
C2	282	6,35	1,04	13208,81	132	3,353
C3	268	6,36	1,00	12070,24	124	3,150
Promedio				12926.42		3.234
D1	238	6,04	1,14	12219,79	152	3,861
D2	232	6,19	1,09	11389,27	153	3,886
D3	229	6,31	1,04	10726,30	148	3,759
Promedio				11445.12		3.835

ESTABILIDAD Y FLUJO SMA-CAUCHO						
PROBETA	ESTABILIDAD MEDIDA	h PROMEDIO	F.C	ESTABILIDAD (NEWTONS)	FLUJO (0.001")	FLUJO (mm)
A1	100	6.48		4499.479	210	5.3
A2	50	6.5	1	2249.740	190	4.8
A3	55	6.47	1	2474.714	170	4.3
Promedio				2362.226541		4.572
B1	70	6.66	1	3149.635	220	5.6
B2	70	6.44	1	3149.635	250	6.4
B3	40	6.49		1799.792	270	6.9
Promedio				3149.635388		5.969
C1	75	6.68	1.09	3374.609	340	8.6
C2	125	6.58	1	5624.349	310	7.9
C3	120	6.5	1.04	5399.375	290	7.4
Promedio				5511.861928		7.620
D1	60	6.21	1,14	2699.687	330	8.4
D2	70	6.55	1,09	3149.635	320	8.1
D3	100	6.44	1,04	4499.479	150	3.8
Promedio				2924.661431		8.255

ANEXO E:

CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DEL ASFALTO



Shell Bitumen

Certificado de Análisis

MEXPHALTE PM TIPO II

CLIENTE: **ING JUAN CAMILO OSPINA**
UNIVERSIDAD DEL CAUCA

DOCUMENTO:

LOTE: Muestra

PLACAS: Muestra

FECHA: Mayo 28 de 2008

ENSAYO	MÉTODO	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO
		Mín.	Máx.	
Penetración 25°C, 5s, 100g (mm/10)	ASTM D-5	55	70	63
Punto de Ablandamiento (°C)	ASTM D-36	58		64
Recuperación Elástica por Tensión a 25°C (%)	NIT-329/91	40		42
Punto de Chispa (°)	ASTM D-92	230		290
Peso específico a 25°C	ASTM D-71		Reportar	1.02
Temperatura de Mezcla (°C)	ASTM D-1559		Reportar	164-138
Temperatura de Compactación* (°C)	ASTM D-1559		Reportar	156-158
ENSAYO EN HORNO DE PELÍCULA FINA EN MOVIMIENTO, RTFOT, 85 min. 163°C				
ASTM D-2872				
Pérdida de Masa (%)	ASTM D-2872		1.0	0.1500
Resistencia Retenida (%)	ASTM D-5	65		64
Varianza del Punto de Ablandamiento	ASTM D-36		-3 a 10	1.2

- * Temperatura de Mezcla y Compactación recomendada para el diseño Marshall.
- Temperatura de cargue: 176°C.

Aprobado por: **SHS** S.A.
EDITH MARCELA ERERA
ANALISTA DE BITUMEN - Tarjeta Profesional No 2521
Firma: **PLANTA MOSQUERA**

Shell Colombia S.A.
Km. 18.5 Vía Fecaravá
Mosquera - Colombia
Tel: (73) 1-640-4000 Ex: 3401
Fax: (73) 1-8292900