

**UTILIZACIÓN DE FIBRAS DESECHAS DE PROCESOS INDUSTRIALES COMO  
ESTABILIZADOR DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SMA**

**CARLOS ALBERTO PRECIADO BOLÍVAR  
CARLOS ENRIQUE SIERRA MARTÍNEZ**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL  
2013**



**UTILIZACIÓN DE FIBRAS DESECHAS DE PROCESOS INDUSTRIALES COMO  
ESTABILIZADOR DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SMA**

**CARLOS ALBERTO PRECIADO BOLÍVAR  
CARLOS ENRIQUE SIERRA MARTÍNEZ**

**Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director:**

**MANUEL SANTIAGO OCAMPO TERREROS  
Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL  
2013**

---

---

---

## **APROBACIÓN**

El Trabajo de Grado titulado “UTILIZACIÓN DE FIBRAS DESECHAS DE PROCESOS INDUSTRIALES COMO ESTABILIZADOR DE MEZCLAS ASFÁLTICAS SMA”, desarrollado por los estudiantes CARLOS ALBERTO PRECIADO BOLÍVAR y CARLOS ENRIQUE SIERRA MARTÍNEZ, en cumplimiento de uno de los requisitos dispuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, para optar el título de Ingeniero Civil, fue aprobado por:

**Director de Tesis**  
**Manuel Santiago Ocampo Terreros**  
**Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D**

**Jurado**

---

---

---

---

## **DEDICATORIA**

En primer lugar queremos dedicar este logro a Dios por brindarnos la oportunidad de lograr culminar nuestro trabajo de grado para obtener el título de Ingenieros Civiles.

A nuestros padres por su incondicional apoyo en todos los momentos de nuestra formación universitaria, etapa indispensable para el crecimiento integral nuestro.

---

---

---



---

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestro director, ingeniero Manuel Ocampo, por todo su apoyo y disposición durante el desarrollo de nuestro trabajo de grado.

A todos nuestros profesores, los cuales hicieron posible adquirir las herramientas básicas para nuestra formación como ingenieros y futuro desenvolvimiento profesional.

Al ingeniero Hermes Vacca y a los laboratoristas de la carrera de ingeniería civil, Carlos Mora y José Rubio, por su apoyo en buena parte del desarrollo de los ensayos que se realizaron para dar forma a este trabajo de investigación.

Al ingeniero Jesús Evaristo Valdes Montoya, representante legal de la empresa Pavimentos SMA S.A. de C.V., por el suministro de materia prima fundamental para el desarrollo de nuestro trabajo de grado.

Finalmente a nuestras familias, por su incondicional apoyo durante toda nuestra formación universitaria.

---

---

---

---

## RESUMEN

Las mezclas tipo SMA (Stone Mastic Asphalt) son mezclas asfálticas calientes de gradación discontinua desarrolladas para maximizar la resistencia al ahuellamiento y la durabilidad. Esta mezcla está compuesta de dos partes: un esqueleto de agregados gruesos y un *mastic* rico en asfalto; sin embargo, estas dos partes hacen que la mezcla asfáltica presente segregación entre los agregados y el asfalto, y como consecuencia de ello escurrimiento del mismo asfalto. Es por esto que la mezcla requiere del uso de fibras que inhiban el escurrimiento, y para ello los manuales de diseño específicos para este tipo de mezcla exigen el uso de fibras de celulosa peletizadas y premezcladas con asfalto. Este tipo de fibras actualmente no se producen en el país, por lo que su importación eleva el costo de la mezcla respecto al costo de una mezcla convencional.

Bajo este argumento, este trabajo de grado se enfocó en encontrar una alternativa para reemplazar de forma eficiente la fibra de celulosa; para esto se utilizaron dos fibras producto de desechos industriales en el país, como son la fibra de polipropileno proveniente de la producción de elementos de higiene y seguridad, y la fibra de la cáscara de coco. Estos productos, al ser desechos industriales, no generan mayores costos en la elaboración de la mezcla asfáltica tipo SMA, comparado con la mezcla SMA elaborada con fibra de celulosa. Para ello se diseñó una mezcla asfáltica de tipo SMA con fibra de celulosa peletizada premezclada con asfalto, así como también con fibras de polipropileno y coco. Estas tres mezclas fueron sometidas a pruebas de desempeño mecánico como módulo resiliente, deformación plástica, y susceptibilidad a la humedad.

Los resultados obtenidos en este trabajo indicaron que las fibras producto de desechos industriales son capaces de inhibir el escurrimiento del asfalto y no alteran de forma considerable las propiedades mecánicas estudiadas de la mezcla asfáltica tipo SMA comparado con los resultados obtenidos en esta mezcla con fibra de celulosa.

---

---

---

---

## ABSTRACT

SMA mixtures (Stone Mastic Asphalt) are hot asphalt mixtures discontinuous gradation developed to maximize rutting resistance and durability. This mixture is composed of two parts: a coarse aggregate skeleton and asphalt rich mortar, however, these two parts make present asphalt mixture segregation of the aggregates and asphalt and as a consequence asphalt draindown. That is why the mixture requires the use of fibers that inhibit runoff, and for these specific design manuals for this type of mixture require the use of cellulose fibers and premixed pelletized asphalt. This type of fiber is not currently produced in the country, so import raises the cost of the mixture in relation to the cost of a conventional mixture.

Under this argument, this degree work focused on finding an alternative for efficiently replace cellulose fiber and for this we used two fiber industrial waste products in the country, such as polypropylene fiber production from elements health and safety, and fiber from coconut shell. These products, when industrial wastes, generate higher costs in the development of SMA asphalt mixture compared to the SMA mixture made with cellulose fiber. We designed an asphalt mixture of SMA with pelletized cellulose fiber premixed with asphalt, as well as polypropylene fiber and coconut. These three mixtures were tested for mechanical performance as resilient modulus, creep, and moisture susceptibility.

The results obtained in this study indicate that the industrial waste product fibers can inhibit the draindown of the asphalt and not significantly alter the mechanical properties of the asphalt mix studied SMA compared with the results obtained in this mixture of cellulose fiber.

---

---

---

## CONTENIDO

	Pág.
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
<b>2 MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>3</b>
2.1 DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA	3
2.2 TIPOS Y CLASES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	4
2.2.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	4
2.2.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS	6
2.2.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO	6
2.3 ASFALTOS MODIFICADOS	7
2.3.1 POLÍMEROS	9
2.4 MEZCLA ASFÁLTICA TIPO SMA	12
2.4.1 HISTORIA	12
2.4.2 MATERIALES EMPLEADOS	16
<b>3 MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>19</b>
3.1 MATERIALES	19
3.1.1 Agregados pétreos	19
3.1.2 Asfalto modificado tipo II	21
3.1.3 Fibra de celulosa peletizada pre mezclada con asfalto	22
3.1.4 Fibra de coco	23

---

---

3.1.5	Fibra de polipropileno	24
3.1.6	Filler	24
<b>3.2</b>	<b>METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIPÓ SMA25</b>	
<b>3.3</b>	<b>METODOLOGÍA COMPARATIVA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON DIFERENTES FIBRAS ESTABILIZADORAS</b>	<b>30</b>
3.3.1	Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta (INV E-725.07)	30
3.3.2	Ensayo de tensión indirecta para determinar módulo resiliente de mezclas asfálticas (INV E-749-07)	31
3.3.3	Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (INV E-756-07)	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS</b>	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Diseño de una mezcla SMA (AASHTO PP41-02)</b>	<b>35</b>
4.1.1	Selección de los materiales	35
4.1.2	Selección de la gradación óptima	38
4.1.3	Selección del porcentaje óptimo de asfalto	43
4.1.4	Determinación de la sensibilidad al escurrimiento (AASHTO T-305)	46
4.1.5	Determinación de la susceptibilidad a la humedad (INV E-725.07)	50
<b>4.2</b>	<b>Ensayo de tensión indirecta para determinar módulo resiliente de mezclas asfálticas (INV E-749-07)</b>	<b>52</b>
<b>4.3</b>	<b>Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (INV E-756-07)</b>	<b>58</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>67</b>

---



**8 BIBLIOGRAFÍA**

**69**



## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - CARACTERIZACIÓN Y CURVA REOLÓGICA DEL ASFALTO

ANEXO B – ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO

ANEXO C – ENSAYOS DE MÓDULO RESILIENTE Y DEFORMACIÓN PLÁSTICA

ANEXO D –REGISTRO FOTOGRÁFICO



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de la tipología de las mezclas asfálticas .....	4
Figura 2. Composición de la mezcla asfáltica tipo SMA (Sabogal) .....	13
Figura 3. Mezcla SMA y mezcla convencional (Rodríguez, 2011).....	14
Figura 4. Transferencia de esfuerzos a través de los contactos en el agregado (Rodríguez, 2011).....	14
Figura 5. Especímenes de mezcla SMA.....	16
Figura 6. Agregado Grueso .....	20
Figura 7. Agregado Fino.....	21
Figura 8. Asfalto modificado con polímeros tipo II.....	22
Figura 9. Fibra de celulosa.....	23
Figura 10. Fibras de coco.....	23
Figura 11. Fibras de polipropileno .....	24
Figura 12. Ceniza Volante .....	25
Figura 13. Especímenes acondicionados en baño de agua .....	31
Figura 14. Ensayo de tensión indirecta para determinar módulo resiliente de mezclas asfálticas (INV E-749-07) .....	32
Figura 15. Ensayo de resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (INV 756-07).....	33
Figura 16. Ensayo de contenido de materia orgánica en la ceniza volante .....	37
Figura 17. Agregados gruesos de las gradaciones de prueba. ....	38
Figura 18. Gradaciones de prueba.....	39
Figura 19. % de vacíos en función de % de asfalto en la mezcla.....	45
Figura 20. Ensayo de escurrimiento (AASHTO T-305).....	46
Figura 21. Escurrimiento en función del porcentaje de fibra de celulosa .....	47
Figura 22. Escurrimiento en función del porcentaje de fibra de polipropileno .....	48
Figura 23. Escurrimiento en función del porcentaje de fibra de coco .....	48

---

Figura 24. Grumos en la mezcla por exceso de fibra de polipropileno .....	49
Figura 25. Resultado de la resistencia a la tensión en la mezcla asfáltica tipo SMA con su respectiva fibra estabilizadora .....	51
Figura 26. Relación de la resistencia a la tensión % .....	51
Figura 27. Isotermas para 10° C .....	53
Figura 28. Isotermas para 20°C .....	53
Figura 29. Isotermas para 30°C .....	54
Figura 30. Curva maestra SMA con fibra de celulosa .....	55
Figura 31. Curva maestra SMA con fibra de polipropileno .....	56
Figura 32. Curva maestra SMA con fibra de coco .....	56
Figura 33. Curva maestra.....	57
Figura 34. Espécimen después de ser sometido al ensayo de resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio. ....	58
Figura 35. Deformación plástica mezcla SMA con fibras de celulosa .....	60
Figura 36. Deformación plástica mezcla SMA con fibras de coco.....	60
Figura 37. Deformación plástica mezcla SMA con fibras de polipropileno .....	61
Figura 38. Gráfica comparativa de la deformación plástica de las mezclas elaboradas con diferentes tipos de fibras estabilizadoras. ....	62

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Requisitos del agregado grueso, de acuerdo con la Especificación Estándar para SMA AASHTO MP 8-07 .....	20
Tabla 2. Requisitos del agregado fino, de acuerdo con la Especificación Estándar para SMA AASHTO MP 8-07 .....	21
Tabla 3. Valores para la selección del porcentaje del contenido de asfalto de prueba, dependiendo de la gravedad específica de la gradación de prueba .....	27
Tabla 4. Requisitos de diseño para una mezcla SMA .....	29
Tabla 5. Requisitos y resultados de los agregados gruesos, de acuerdo con la Especificación Estándar para SMA AASHTO MP 8-07 .....	35
Tabla 6. Requisitos y resultados de los agregado fino .....	36
Tabla 7. Ensayos verificados en laboratorio.....	37
Tabla 8. Resultados caracterización ceniza volante.....	37
Tabla 9 Gradaciones de prueba .....	38
Tabla 10. <b>VCADRC</b> para cada gradación de prueba .....	39
Tabla 11. Gravedades específicas combinada del agregado para cada gradación de prueba .....	40
Tabla 12. % de asfalto para su respectiva gravedad específica.....	40
Tabla 13. Porcentaje de agregado grueso en la mezcla, gravedad específica promedio Bulk ( <b>G<sub>SB</sub></b> ) de las probetas compactadas y gravedad máxima teórica para cada gradación.....	41
Tabla 14. Valores de <b>VCADRC</b> (volumen entre las partículas del agregado grueso seco compactado con varillada de la fracción), <b>VC<sub>Amezcla</sub></b> (Vacíos en el agregado grueso de la mezcla compactada) y <b>VMA</b> (Vacíos en el agregado de la mezcla compactada), para cada gradación.....	41
Tabla 15. Porcentajes de asfalto de prueba .....	43
Tabla 16. Porcentaje de vacíos para diferentes % de asfalto.....	44

---

Tabla 17. Diseño mezcla SMA .....	45
Tabla 18. Porcentajes de fibra y resultados de escurrimiento para cada mezcla..	47
Tabla 19. Valores de relación de la resistencia a la tensión para cada mezcla con su respectiva fibra .....	50
Tabla 20. Módulos Resilientes promedio para cada mezcla con su respectiva fibra .....	52
Tabla 21. Velocidades de deformaciones, en $\mu\text{m}/\text{min}$ .....	58



## 1 INTRODUCCIÓN

La mezcla SMA (por sus siglas en inglés Stone Matrix Asphalt o Stone Mastic Asphalt) es una mezcla asfáltica en caliente de gradación discontinua para capa de rodadura, desarrollada para maximizar la resistencia al ahuellamiento y la durabilidad. Esta mezcla necesita fibras de celulosa como aditivo para estabilizar la mezcla, ya que sin estas fibras presenta escurrimiento del asfalto. En los Estados Unidos de América (Putman & Amirghanian, 2004) se realizó un estudio con el fin de utilizar fibras desechas en manufactura de textiles en mezclas SMA y sustituir las fibras de celulosa dando como resultado que las fibras utilizadas en el estudio, cumplen con el propósito de evitar el escurrimiento de la mezcla y estabilizarla; en Brasil (Oda, Leomar Fernandes Jr, & Ildfonso, 2011) utilizaron fibras naturales como la de coco , sisal y polyester para este tipo de mezclas, y se compararon con el desempeño de fibras de celulosa peletizadas, aditivo utilizado para estabilizar la mezcla y controlar el escurrimiento del asfalto llegando a resultados satisfactorios. En Colombia se realizó un estudio (Andrade, 2005) que consistía en el diseño óptimo de una mezcla SMA para la ciudad de Bogotá. Este tipo de mezclas no se ha utilizado en ninguna vía del país. Con estos antecedentes se ha logrado articular esta investigación y llegar a la idea de realizar un análisis comparativo entre una mezcla SMA elaborada con fibras de celulosa, recomendadas por la especificación de diseño (AASHTO MP 8-07), y una mezcla SMA con fibras recicladas de polipropileno y fibras de coco; estas fibras son desechos de procesos industriales derivadas de la fabricación de pañales y la industria de productos derivados del coco en nuestro país. La utilización de estos desechos en este tipo de mezclas es una alternativa para ayudar a reciclar y bajar los niveles de desechos en los rellenos sanitarios, además de una disminución de costos considerable para la elaboración de mezclas tipo SMA, ya que las fibras de celulosa son costosas y requieren ser importadas. Es por esto que el trabajo de esta investigación presenta una

alternativa ecológicamente amigable, económicamente viable, y socialmente aceptada, ya que estas mezclas son diseñadas para maximizar la resistencia al ahuellamiento y la durabilidad, por lo tanto serían ideales para nuestro país.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Comparar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas SMA con fibras de celulosa y el de mezclas asfálticas SMA con fibras desechas de procesos industriales como aditivos estabilizadores.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el diseño óptimo de la mezcla asfáltica SMA controlando el escurrimiento del ligante con fibras de celulosa.
- Determinar el porcentaje óptimo de fibras desechas de procesos industriales, como polipropileno y coco, para controlar el escurrimiento de asfalto en una mezcla asfáltica SMA.
- Comparar el comportamiento al escurrimiento de las mezclas asfálticas SMA elaboradas con fibras de celulosa y las provenientes de desechos industriales.
- Determinar si las fibras de desechos industriales alteran la susceptibilidad a la humedad, módulo resiliente y resistencia a la deformación plástica de la mezcla asfáltica SMA con respecto a una elaborada con fibras de celulosa
- Determinar si las fibras de desechos industriales pueden funcionar como aditivo estabilizador de la mezcla SMA con el fin de poder sustituir las fibras de celulosa.

## 2 MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 DEFINICIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA

Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos agregados quedan cubiertos por una película continua del ligante. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan (Kraemer, 2009).

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráfico pesado intenso.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90% de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (*filler*) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta al conjunto. El asfalto y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen en la calidad de la mezcla asfáltica.

En la Figura 1 se presenta el esquema de los diferentes tipos y clases de las mezclas asfálticas. El tipo de mezcla asfáltica depende de la temperatura de mezclado y compactación (p. ej. mezclas en caliente, mezclas tibias, mezclas frías), y la clase de las mezclas depende de su distribución granulométrica (p. ej.

mezclas densas, mezclas abiertas, mezclas discontinuas). A continuación se realiza una breve descripción de cada una de estas.

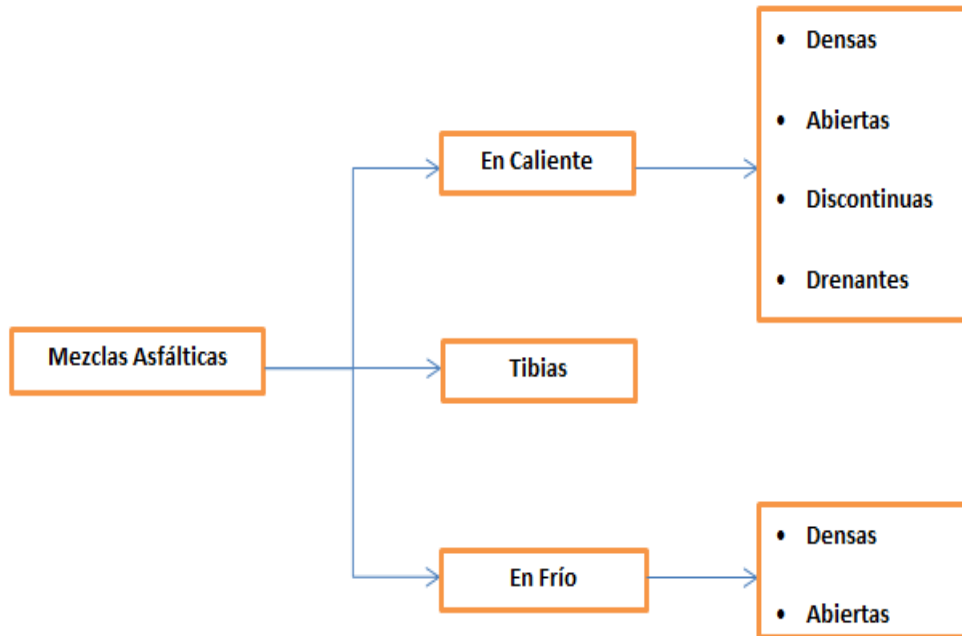


Figura 1. Esquema de la tipología de las mezclas asfálticas

## 2.2 TIPOS Y CLASES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 2.2.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

Son las elaboradas en caliente, utilizando cemento asfáltico y materiales pétreos, en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla. Las mezclas asfálticas en caliente se clasifican a su vez en:

**Mezcla asfáltica de granulometría densa:** Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos bien gradados,

---

con tamaño nominal entre treinta y siete coma cinco (37,5) milímetros (1 ½ in) y nueve coma cinco (9,5) milímetros (3/8 in). Normalmente se utiliza en la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos en los que se requiere una alta resistencia estructural, o en renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.

**Mezcla asfáltica de granulometría abierta:** Es la mezcla en caliente, uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre doce coma cinco (12,5) milímetros (1/2 in) y seis coma tres (6,3) milímetros (1/4 in). Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, no tienen función estructural y generalmente se construyen sobre una carpeta de granulometría densa, con la finalidad principal de satisfacer los requerimientos de calidad de rodamiento del tránsito, al permitir que el agua de lluvia sea desplazada por las llantas de los vehículos, ocupando los vacíos de la carpeta, con lo que se incrementa la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, se minimiza el hidropelaje, se reduce la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos adyacentes y se mejora la visibilidad de la señalización horizontal de la vía.

**Mezcla asfáltica de granulometría discontinua:** Es la mezcla en caliente, uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal entre diecinueve coma cero (19,0) milímetros (3/4 in) y nueve coma cinco (9,5) milímetros (3/8 in). Estas mezclas normalmente se utilizan para formar capas de rodadura, aunque también pueden utilizarse en capas inferiores en carreteras de alto tránsito. Cuando son usadas como capas de rodadura su finalidad principal es mejorar las condiciones de circulación de los vehículos respecto a una carpeta asfáltica convencional. Al tener una elevada macrotextura se evita que el agua de lluvia forme una película continua sobre la superficie del pavimento. Con lo que se incrementa la fricción de las llantas; se minimiza el hidropelaje; se reduce la cantidad de agua que se proyecta sobre los vehículos adyacentes; se mejora la visibilidad de la

señalización horizontal de la vía y se reduce el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura.

**Mezcla asfáltica drenante:** Se trata de mezclas asfálticas que se caracterizan por tener un elevado porcentaje de vacíos interconectados entre sí (16 a 25% o más, dependiendo del uso, cabe destacar que no solo son usadas como superficie de rodadura, sino también, están contempladas como capa de alivio de fisuras). Estos huecos permiten el paso del agua a través de la misma, favoreciendo su eliminación en la superficie del camino, y presentando una alta macrotextura y microtextura, ésta última como consecuencia de la calidad de los agregados usados.

### 2.2.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS

Es una mezcla asfáltica que garantiza la elaboración y puesta en obra a menores temperaturas, por lo general entre 30° C Y 50° C por debajo de las empleadas para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, y ligeramente por encima de los 100° C (D'Angelo et al, 2008), utilizándose los mismos asfaltos y dosificaciones que en una mezcla asfáltica en caliente, empleándose las mismas plantas de mezclado existentes, y con propiedades mecánicas similares a la de una mezcla asfáltica en caliente convencional.

### 2.2.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO

Son las elaboradas en frío, en una planta mezcladora móvil, utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados y materiales pétreos. Las mezclas asfálticas en frío se clasifican a su vez en:

**Mezcla asfáltica de granulometría densa:** Es la mezcla en frío, uniforme y homogénea, elaborada con emulsión asfáltica o asfalto rebajado y materiales

---

pétreos, con tamaño nominal entre treinta y siete coma 5 (37,5) milímetros (1 ½ in) y nueve coma cinco (9,5) milímetros (3/8 in). Normalmente se utiliza en los casos en la que la intensidad de tránsito es igual a un millón de ejes equivalentes o menor, en donde no se requiere de una alta resistencia estructural, para la construcción de carpetas asfálticas de pavimentos nuevos y en carpetas para el refuerzo de pavimentos existentes, así como para la reparación de baches.

**Mezcla asfáltica de granulometría abierta:** Es la mezcla en frío, una combinación de un agregado pétreo predominantemente grueso y de granulometría uniforme, con un ligante bituminoso, constituyendo un producto que puede ser elaborado, extendido y compactado a temperatura ambiente y que presenta un elevado contenido de vacíos con aire. La mezcla abierta en frío puede ser colocada en obra inmediatamente después de su fabricación o tras un período de almacenamiento más o menor largo.

### 2.3 ASFALTOS MODIFICADOS

Se presentan casos en los que las características de las mezclas asfálticas obtenidas con los cementos asfálticos convencionales no son capaces de resistir a la acción conjunta del tránsito y del clima, por lo que resulta necesaria la utilización de ligantes modificados que presenten mejores propiedades reológicas, un mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento y menor susceptibilidad térmica.

Según Reyes (2003) las mezclas asfálticas elaboradas con estos ligantes modificados presentan altos valores de *stiffness* a temperaturas altas de servicio, lo que disminuye el ahuellamiento, y bajos *stiffness* a temperaturas bajas, que reducen el riesgo de aparición prematura de fisuras. De igual manera, el grado de afinidad ligante-agregado en presencia de agua se mejora sustancialmente.

Algunas de estas propiedades pueden mejorarse mediante el empleo de ligantes más duros, pero esto reduciría su flexibilidad a temperatura ambiente y proveerá al ligante de un mayor grado de fragilidad a temperaturas bajas.

Para mejorar las propiedades citadas sin producir efectos negativos secundarios, se están usando a escala mundial los cementos asfálticos modificados con polímeros. Con la utilización de los modificadores y aditivos, se puede lograr:

- Mejorar el *stiffness* del cemento asfáltico a temperaturas altas de servicio, minimizando el riesgo de ahuellamiento.
- Obtener mezclas más flexibles a temperaturas bajas de servicio para minimizar la aparición de fisuras asociadas a los cambios térmicos.
- Mejorar la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas.
- Mejorar la afinidad ligante-agregado pétreo, con el fin de reducir el riesgo de *stripping* o pérdida de adherencia.
- Mejorar la resistencia a la abrasión de las mezclas asfálticas.
- Rejuvenecer el cemento asfáltico.
- Minimizar los problemas durante el proceso de colocación y compactación de la mezcla asfáltica.
- Mejorar las características elásticas del cemento asfáltico.
- Permitir un mayor espesor de la película de ligante alrededor de las partículas del agregado, con el propósito de aumentar la durabilidad de la mezcla.
- Reducir la probabilidad de exudación del cemento asfáltico.
- Disminuir los espesores de las estructura del pavimento.
- Mejorar el comportamiento general de toda la estructura del pavimento.

Una mezcla asfáltica ideal debe tener las siguientes características:

- Baja rigidez o viscosidad a las temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra.
-



- Alta rigidez a las temperaturas altas de servicio para reducir el ahuellamiento.
- Baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio para reducir el riesgo de la aparición de fisuras por cambios de temperatura.

Buenas características adherentes en presencia de humedad, con el propósito de reducir el *stripping*. Según Figueroa & Reyes (2012), el *stripping* se puede definir como la pérdida de adherencia entre la película de asfalto y la superficie del agregado en la mezcla asfáltica, debido a la acción del agua, la cual rompe la unión adhesiva entre ambos, produciendo una pérdida de funcionalidad de la mezcla asfáltica.

En el pasado, algunas de estas propiedades se podían obtener con los cementos asfálticos tradicionales. Ahora, con el incremento del volumen de tránsito y de la presión de inflado, el aumento en las sobrecargas de los vehículos pesados y la aparición de nuevos crudos, se necesitan modificadores y aditivos para obtener mezclas asfálticas que cumplan con la mayor parte de estos requerimientos.

Debido a que el asfalto es el responsable del comportamiento visco-elástico de las mezclas asfálticas, sus propiedades determinan muchos aspectos del comportamiento de las mismas en las vías.

Uno de los principales objetivos de un asfalto modificado es aumentar la resistencia a la deformación permanente en temperaturas de servicio altas, sin afectar adversamente las propiedades a otras temperaturas.

### **2.3.1 POLÍMEROS**

De acuerdo con Reyes (2003) los polímeros son sustancias macromoleculares naturales o sintéticas, obtenidas a partir de moléculas más sencillas por reacciones poliméricas. Por consiguiente un polímero es un compuesto con un

---

elevado peso molecular, cuya estructura se representa por la repetición de pequeñas unidades.

Los polímeros, una vez dispersos en el asfalto, llegan a formar verdaderas redes tridimensionales, creando un reticulado que le confiere propiedades relevantes de elasticidad al asfalto modificado.

Existen muchos tipos de polímeros, por lo cual su dosificación y sistematización resultan muy complejas. Atendiendo a su estructura, se clasifican en:

- Polímeros termoplásticos: Son solubles que se reblandecen con el calor y, de acuerdo con su intensidad, pueden llegar a fluir. Una vez enfriados, es posible moldearlos en repetidas ocasiones sin que pierdan sus propiedades. Por lo general, son polímeros lineales o ligeramente ramificados. Los termoplásticos más comunes son el polietileno, el polipropileno, el policloruro de vinilo, el poliestireno, los copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA) y las poliamidas, entre otros.
- Polímeros termoendurecibles: Se forman por la reacción química de dos componentes: la base y el endurecedor, y dan lugar a una estructura entrecruzada, por lo que no pueden recuperarse para volver a transformarse. Entre los más comunes se encuentran las resinas fenólicas, las resinas epoxi, las resinas de poliéster y las resinas de poliuretano.
- Elastómeros o cauchos: Son polímeros lineales amorfos, por lo general saturados. Sometidos a un proceso de vulcanización, adquieren una estructura parcialmente reticulada, la cual les confiere las propiedades elásticas. Los cauchos de uso más común son el caucho natural, los cauchos de butadieno-estireno (SBR), los cauchos de policloropreno y los elastómeros termoplásticos de estirenobutadieno-estireno (SBS).

Los polímeros más utilizados para modificar los cementos asfálticos son el caucho natural (NR), los copolímeros de etileno-acetato de vinilo (EVA) y los elastómeros termoplásticos de estireno-butadieno-estireno (SBS).

Los polímeros tienen una serie de propiedades generales, que pueden considerarse comunes a todos ellos, siendo estas:

- **Propiedades mecánicas:** La mayor parte de los polímeros tiene un comportamiento reológico tipo visco-elástico, lo cual hace que sus propiedades mecánicas dependan en gran medida del tiempo de duración de la carga. Si se aplica un esfuerzo constante, habrá una deformación inicial instantánea y una deformación de fluencia (más lenta). Si se mantiene la deformación constante, el esfuerzo necesario para producir dicha deformación disminuirá paulatinamente (relajación de esfuerzos).
- **Influencia de la temperatura:** La variación de la temperatura genera cambios en las propiedades de los polímeros, lo que limita su uso a un cierto rango. La elevación de la temperatura produce un rápido descenso de la resistencia mecánica en los materiales termoplásticos, que comienza antes de su punto de ablandamiento, mientras que las temperaturas bajas los hacen más frágiles y quebradizos, con la consiguiente disminución de la resistencia a la tracción y al impacto. En los polímeros termoestables las propiedades mecánicas se mantienen en un mayor rango de temperatura, mientras que en los elastómeros, cuando baja la temperatura, se produce primero un aumento de la rigidez y finalmente, por debajo de la temperatura de transición vítrea, pierden su capacidad de deformación y se tornan frágiles. Se envejecen a temperaturas elevadas y en presencia de oxígeno, con la consiguiente pérdida de propiedades.
- **Durabilidad:** Las alteraciones de las propiedades de los polímeros se producen por fatiga (aplicación repetida de esfuerzos) o por envejecimiento (acción del medio ambiente), aunque normalmente ambos factores actúan en conjunto. Los agentes que pueden dar lugar a cambios apreciables en

las propiedades de los polímeros son los agentes atmosféricos (agua, ozono, oxígeno y humedad), la radiación solar y el calor, los microorganismos, los agentes químicos y la acción del tránsito. Los cambios generados por esos agentes dependerán del tipo de polímero, su composición y estructura química.

## **2.4 MEZCLA ASFÁLTICA TIPO SMA**

### **2.4.1 HISTORIA**

La mezcla asfáltica SMA (por sus siglas en inglés de *Stone Mastic Asphalt*) nació de manera experimental en Europa como respuesta a la necesidad de fabricar un pavimento o carpeta de rodadura, resistente al desgaste y deterioro de los pavimentos producido por el uso de neumáticos revestidos con clavos, utilizados en caminos con hielo.

La mezcla SMA 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 (Yupanqui, 2009).

Como consecuencia de ello, en 1984 se reglamentó el sistema SMA en Alemania. Luego comenzó a ser utilizado en otros países de Europa, Estados Unidos y Asia Pacífica.

La particularidad de esta mezcla asfáltica, 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 ligante

---

asfáltico empleadas, del orden de 6.5% a 8% en peso, 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 puesto en terreno (ver Figura 2).

Según Yupanqui (2009) de acuerdo a la experiencia en países que han utilizado este tipo de mezclas se puede decir que:

- SMA es una mezcla asfáltica de excelente desempeño a largo plazo, específicamente a su alta resistencia a la deformación permanente bajo un tráfico pesado.
- La cantidad y calidad de los agregados son esenciales. La granulometría discontinua del agregado es importante para elaborar un esqueleto de piedras altamente resistente lo que redundará en la alta estabilidad del SMA evitando deformaciones permanentes.
- Un alto contenido de ligante asfáltico reduce el envejecimiento y el agrietamiento, por tanto es otra base para una vida útil.
- Para una buena homogeneidad de la mezcla, para evitar segregación y drenaje del ligante asfáltico, se recomienda el uso de fibras de celulosa como aditivo estabilizador.

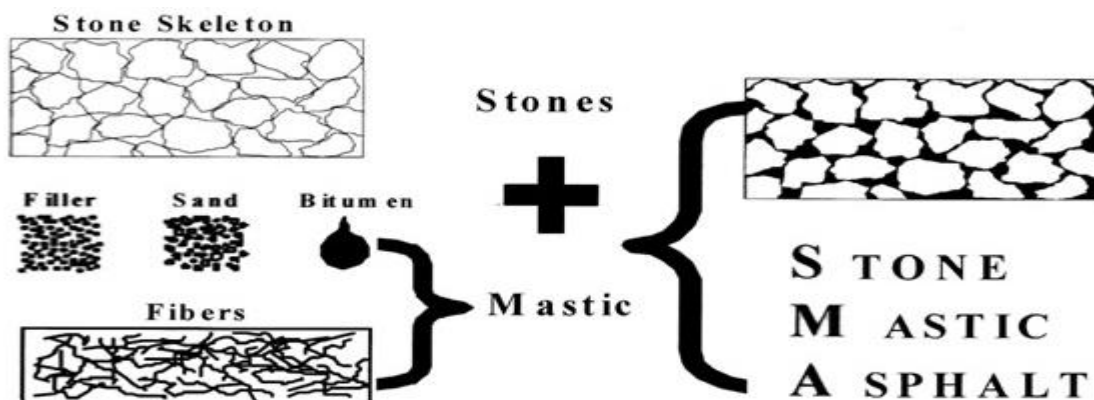


Figura 2. Composición de la mezcla asfáltica tipo SMA (Sabogal)

La composición de las mezclas SMA se caracteriza por su alto contenido en agregados gruesos y su distribución en un esqueleto de estructura controlada. Los vacíos de la matriz estructural son llenados por un mastic bituminoso de alta viscosidad, y el elevado contenido de agregados de por lo menos el 70 % asegura un contacto perfecto entre las partículas después de la compactación. En la Figura 3 se puede observar una gráfica comparativa entre una mezcla asfáltica tipo SMA y una mezcla asfáltica convencional.

Debido a que estas mezclas presentan un esqueleto pétreo de agregados de alta calidad, donde se asegura un contacto de piedra con piedra, se logra un incremento de la fricción interna y de resistencia al corte, lo que origina una estabilidad de la mezcla extremadamente elevada (ver Figura 4). Esta estructura tiene una mayor profundidad en la textura superficial (ver Figura 5), por tanto proporciona una excelente resistencia al deslizamiento, reduce el hidroplaneo, mejora la visibilidad de las demarcaciones de la vía y reduce los ruidos del tráfico.

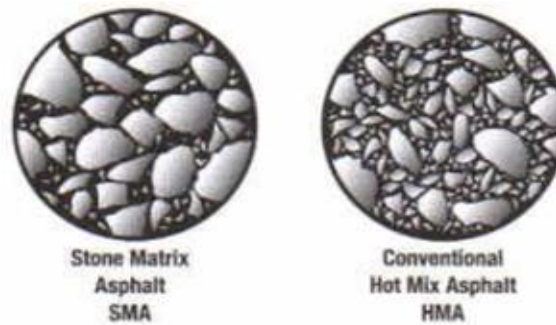


Figura 3. Mezcla SMA y mezcla convencional (Rodríguez, 2011)

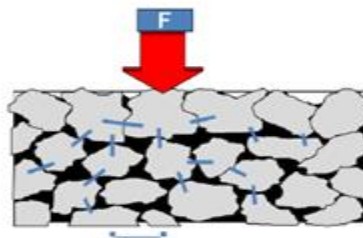


Figura 4. Transferencia de esfuerzos a través de los contactos en el agregado (Rodríguez, 2011)

---

La gran cantidad de asfalto presente en estas mezclas asegura un bajo contenido de vacíos totales, lo que le confiere una buena impermeabilidad y le provee buena resistencia al envejecimiento y a la humedad, lo que eleva la durabilidad.

En resumen, el SMA es una mezcla asfáltica en caliente que se caracteriza por ser impermeable, dura, estable y resistente a la formación de roderas. Estas propiedades de la mezcla se deben a la granulometría discontinua con la que se forma un esqueleto mineral entre las partículas gruesas, a la presencia de un mortero rico en asfalto y a la adición de fibras de celulosa asfaltadas (como agente estabilizador).

Según Zúñiga y Aguila (2002) se ha demostrado que el uso de la mezcla SMA es una excelente alternativa para ser utilizada como carpeta de rodadura en:

- Rutas de elevado tránsito.
- Elevada frecuencia de tránsito pesado.
- Autopistas.
- Zonas en pendientes.
- Playas de estacionamiento.
- Áreas residenciales.



**Figura 5. Especímenes de mezcla SMA**

## **2.4.2 MATERIALES EMPLEADOS**

### **2.4.2.1 AGREGADO GRUESO**

La fracción gruesa de agregado para las mezclas SMA se define en función del tamaño máximo nominal (TMN) de la mezcla. De tal manera que para las mezclas SMA con TMN de 12.5 y 19 mm ( $1/2$  y  $3/4$  in), el agregado grueso se define como la fracción retenida en el tamiz No. 4 (4.75 mm), y para las mezclas con TMN de 9.5 mm ( $3/8$  in), el agregado grueso se define como la fracción retenida en el tamiz No. 8 (2.36 mm).



#### **2.4.2.2 AGREGADO FINO**

Para las mezclas SMA, el agregado fino se define como el material que pasa por el tamiz No. 8 (2.36 mm) para un TMN de la mezcla de 9.5 mm (3/8 in) o No. 4 (4.75 mm) para las mezclas con TMN de 12.5 y 19 mm (1/2 y 3/4 mm).

#### **2.4.2.3 RELLENO MINERAL DE APORTE (FILLER DE APORTE)**

Se define como *filler* de aporte a la fracción de material que pasa por el tamiz No. 200 (0.075 mm) y que se incorpora a la mezcla de manera complementaria, normalmente con el fin de cumplir con los requisitos granulométricos establecidos.

El *filler* de aporte suele ser ceniza volante o material proveniente de la trituración de agregado fino. Este material se caracteriza por estar libre de aglomeraciones cuando se encuentra seco. Además de estar libre de impurezas orgánicas y tener un índice de plasticidad no mayor de 4, así como un valor de azul de metileno no mayor de 12.

#### **2.4.2.4 CEMENTO ASFÁLTICO**

El cemento asfáltico que se emplea en las mezclas SMA puede ser convencional o modificado con polímeros; este último es recomendado debido a que presenta mejores propiedades reológicas, un mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento y menor susceptibilidad térmica (Reyes, 2003).

#### **2.4.2.5 AGENTE ESTABILIZADOR**

Las fibras de celulosa que se emplean en la fabricación de las mezclas SMA deben ser capaces de inhibir el escurrimiento del asfalto. La dosificación de las mismas será del 0.3% o más sobre la masa total de la mezcla. El escurrimiento máximo será 0.3% en peso de la mezcla.

Las fibras de celulosa deben estar pre-cubiertas con asfalto y ser suministrada en pellets (con el fin de facilitar la disgregación y distribución homogénea de las fibras en la mezcla). Durante la producción de la mezcla se debe controlar que se produzca una correcta dispersión y mezclado de las fibras.

### **3 MATERIALES Y MÉTODOS**

Para diseñar la mezcla tipo SMA se utilizó el procedimiento para el diseño del Stone Mastic Asphalt (SMA) AASHTO PP 41-02 (2006).

El diseño de SMA se basa en las características volumétricas en términos de vacíos en la mezcla ( $V_a$ ), vacíos en el agregado mineral ( $V_{MA}$ ) y la presencia del contacto piedra-piedra.

#### **3.1 MATERIALES**

A continuación se realizará una breve descripción de los materiales que se emplearon para la elaboración de la mezcla SMA, como también los requisitos mínimos que deben tener según la especificación estándar para Stone Mastic Asphalt (SMA) AASHTO MP 8-07.

##### **3.1.1 Agregados pétreos**

Los agregados pétreos que se utilizaron en este trabajo de investigación (ver Figura 6 y Figura 7) fueron seleccionados y proporcionados por la empresa IncoAsfaltos (Industria Colombiana de Asfaltos S.A.), de la planta de Mosquera (Cundinamarca), ubicada en el km 3 vía Balsillas. Con el fin que cumplieran con los requisitos mínimos, se realizaron los ensayos de caracterización enunciados en la Tabla 1 y Tabla 2:

**Tabla 1. Requisitos del agregado grueso, de acuerdo con la Especificación Estándar para SMA AASHTO MP 8-07**

Ensayo	Descripción del ensayo	Norma	Requisito		Resultado Laboratorio
			Mínimo	Máximo	
Resistencia al desgaste de los agregados en la máquina de los ángeles	-	INV E-218-07	-	30%	19.85%
Partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos	3 a 1	INV E-240-07	-	20%	1.2%
Absorción de agregados gruesos	-	INV E-223-07	-	2%	2%
Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio	Sulfato de Sodio	INV E-220-07	-	15%	1.8%
	Sulfato de Magnesio		-	20%	-
Porcentaje de caras fracturadas	Una Cara	INV E-227-07	90%	-	99.1%



**Figura 6. Agregado Grueso**

Tabla 2. Requisitos del agregado fino, de acuerdo con la Especificación Estándar para SMA AASHTO MP 8-07

Ensayo	Descripción del ensayo	Norma	Requisito		Resultado Laboratorio
			Mínimo	Máximo	
Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio	Sulfato de Sodio	INV E-220-07	-	15%	6.1%



Figura 7. Agregado Fino

### 3.1.2 Asfalto modificado tipo II

El asfalto que se empleó para realizar el diseño de la mezcla asfáltica SMA en el presente trabajo de grado (ver Figura 8) fue suministrado por la empresa IncoAsfaltos (Industria Colombiana de Asfaltos S.A.), el cual es un asfalto modificado con polímeros tipo II. Este asfalto se utilizó teniendo en cuenta que en el artículo 400 (Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto,

lechadas asfálticas, mezclas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos) del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), se recomienda el uso de asfalto modificado con polímeros tipo II en mezclas drenantes, densas y discontinuas en caliente; por lo cual la mezcla SMA entra en la clasificación de este grupo, al ser esta una mezcla asfáltica discontinua en caliente.

La caracterización y curva reológica del asfalto fue proporcionada por la empresa IncoAsfaltos (Industria Colombiana de Asfaltos S.A.), los cuales se podrán presentar en el ANEXO A. Sin embargo, en el laboratorio se corroboraron los ensayos de ductilidad, penetración y punto de ablandamiento; resultados que se presentan en el numeral 4.1.1.



**Figura 8. Asfalto modificado con polímeros tipo II**

### **3.1.3 Fibra de celulosa peletizada pre mezclada con asfalto**

Las fibras de celulosa (ver Figura 9) peletizadas pre mezcladas con asfalto fueron suministradas por la empresa Pavimentos SMA S.A. de C.V., la cual es una empresa destinada a la producción de este tipo de fibras y mezclas asfálticas tipo SMA, cuya sucursal se encuentra en la ciudad de Playas de Rosarito, Baja California en México D.F.



**Figura 9. Fibra de celulosa**

#### **3.1.4 Fibra de coco**

Las fibras de coco (ver Figura 10) fueron suministradas por el ingeniero agrónomo Iván Roza de la empresa Distribuciones Agroecológicas, la cual comercializa con este tipo de fibras orgánicas desechas en la elaboración de productos a base de coco, como material innovador en otras áreas.



**Figura 10. Fibras de coco**



### 3.1.5 Fibra de polipropileno

Las fibras de polipropileno (ver Figura 11) fueron suministradas por la empresa PGI (Polymer Group Inc), la cual es una empresa que se dedica a la producción de tapabocas, guantes, batas, entre otros productos en polipropileno para higiene y seguridad ocupacional. Estas fibras son producto del desecho del proceso industrial, y actualmente las utilizan como material de relleno en almohadas, colchones, entre otros usos.



**Figura 11. Fibras de polipropileno**

### 3.1.6 Filler

El *filler*, o llenante mineral, es requerido en la elaboración de la mezcla SMA. Como *filler* se empleó ceniza volante la cual es el residuo de la combustión del carbón pulverizado en los hornos de las calderas de las centrales eléctricas, que se



recolectan antes de la salida de los humos a la atmosfera y por despolvamiento electroestático (ver Figura 12).



**Figura 12. Ceniza Volante**

### **3.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIPÓ SMA**

Para el diseño de la mezcla SMA se debe llevar a cabo el siguiente procedimiento:

1. Selección de los materiales: Se selecciona el asfalto, el agregado, el filler mineral y el aditivo estabilizador (fibra de celulosa). Estos materiales deben cumplir con los requerimientos de la especificación contemplados en el procedimiento para el diseño del Stone Mastic Asphalt (SMA) AASHTO PP 41-02 (2006).
2. Selección de la gradación óptima: La especificación tiene tres bandas de gradaciones en función del tamaño máximo nominal del agregado, de la cual se escoge una, y en ésta se evalúan tres posibles gradaciones dentro de la franja maestra de la especificación, una en el límite superior, otra en el límite

inferior y una media entre estas, con el objetivo de seleccionar la gradación óptima para el diseño de la mezcla SMA. Para cada gradación de prueba se calculan los  $VCA_{DRC}$  (volumen entre las partículas del agregado grueso seco compactado con varillada de la fracción) por medio de la Ecuación 1:

$$VCA_{DRC} = \frac{G_{CA} Y_W - Y_S}{G_{CA} Y_W} \times 100\% \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

$G_{CA}$  : Gravedad específica a granel del agregado grueso (INV E 223-07).

$Y_S$  : Densidad Bulk (Peso unitario) de los agregados compactados con varilla (INV E 217-07).

$Y_W$  : Peso unitario del agua (1000 kg/m<sup>3</sup>).

Para cada gradación de prueba se halla la gravedad específica combinada del agregado ( $G_{SB}$ ) por medio de la Ecuación 2:

$$G_{SB} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_i}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_i}{G_i}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

$P_i$  : Porcentajes individuales por masa del agregado.

$G_i$  : Gravedad específica neta individual del agregado.

Teniendo las gravedades específicas para cada gradación, se procede a seleccionar el porcentaje del asfalto de prueba utilizando la Tabla 3 proporcionada por la especificación (ver Tabla 3):

**Tabla 3. Valores para la selección del porcentaje del contenido de asfalto de prueba, dependiendo de la gravedad específica de la gradación de prueba**

Agregado Combinado $G_{SB}$	Asfalto %
-	
2.30	6.90
2.37	6.83
2.38	6.82
2.41	6.79
2.4	6.80
2.45	6.70
2.50	6.60
2.55	6.50
2.60	6.40
2.65	6.30
2.70	6.20
2.75	6.10
2.80	6.00
2.85	5.90
2.90	5.80
2.95	5.70
3.00	5.60

Con el porcentaje del ligante de prueba seleccionado correspondiente a cada gradación de prueba, se realizan tres probetas compactadas con el compactador giratorio a 100 giros y una probeta suelta o sin compactar para cada una; para las probetas compactadas se halla la gravedad específica bulk ( $G_{SB}$ ) y para la probeta suelta o sin compactar, se halla la gravedad específica máxima teórica ( $G_{mm}$ ).

Usando los valores calculados anteriormente se calculan los  $VMA$  (Vacíos en el agregado de la mezcla compactada),  $VCA_{mezcla}$  (Vacíos en el agregado

grosso de la mezcla compactada) y  $V_a$  (Vacíos en la mezcla compactada) correspondiente a cada gradación de prueba con la Ecuación 3, Ecuación 4 y Ecuación 5:

$$VMA = 100 - \left( \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \right) P_s \quad \text{Ecuación 3}$$

$$VCA_{mezcla} = 100 - \left( \frac{G_{mb}}{G_{CA}} \right) P_{CA} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Va = 100 \times \left( 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

$G_{mb}$  : Gravedad específica de la mezcla compactada (INV E 734-07).

$G_{SB}$  : Gravedad específica combinada del agregado.

$P_s$  : Porcentaje del agregado en la mezcla.

$G_{CA}$  : Gravedad específica a granel del agregado grueso (INV E 223-07).

$P_{CA}$  : Los por ciento del agregado grueso en la mezcla total.

$G_{mm}$  : Gravedad específica máxima teórica (INV E 735-07).

De las tres gradaciones de prueba evaluadas, la que está con los por ciento más bajos del agregado grueso, que exceda el requisito del mínimo  $VMA$  (17%) y que el  $VCA_{mezcla}$  sea menor que el  $VCA_{DRC}$ , se selecciona como la gradación deseada.

- Selección del contenido óptimo de asfalto: Como ya se tiene la gradación óptima de la mezcla es necesario encontrar el porcentaje óptimo de asfalto que dé como resultado la cantidad apropiada de  $V_a$  (4%) en la mezcla según la especificación.

Para obtener el porcentaje de asfalto óptimo, es necesario realizar tres mezclas con la gradación óptima y con diferentes porcentajes de asfalto, por encima y por debajo del ligante de prueba que se utilizó con la gradación óptima. Para cada mezcla se realizan tres probetas compactadas mediante el compactador giratorio a 100 giros y una probeta suelta o sin compactar para cada una; para las probetas compactadas se halla la gravedad específica bulk ( $G_{SB}$ ) y para la probeta suelta o sin compactar, se halla la gravedad específica máxima teórica ( $G_{mm}$ ).

Al tener el porcentaje de asfalto óptimo que proporciona el nivel deseado de  $V_a$ , la mezcla óptima debe cumplir con los requisitos de diseño de una mezcla SMA mostrada a continuación en la Tabla 4, dada por la especificación estándar para Stone Mastic Asphalt (SMA) AAHTO MP 8-07.:

**Tabla 4. Requisitos de diseño para una mezcla SMA**

Propiedades	Requisito
Vacíos del aire $V_a$ (tanto por ciento)	4
$VMA$ (tanto por ciento)	17 min
$VCA_{mezcla}$ (tanto por ciento)	menos de $VCA_{drc}$
Contenido de asfalto (tanto por ciento)	6 min

- Determinación de la sensibilidad al escurrimiento: La sensibilidad al drenado de la mezcla seleccionada se determina usando la norma

Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures AASHTO T 305. La mezcla debe contener mínimo 0.3% de la masa total de la mezcla de fibra de celulosa, con el fin de que el escurrimiento del ligante asfáltico sea máximo del 0.3% sobre el peso de la mezcla especificado en AASHTO MP 8-07; respecto a las mezclas que llevarán fibras de desechos industriales, se harán tres ensayos con tres porcentajes de fibra diferentes, con el fin de determinar el porcentaje óptimo de las mismas, que cumplan con el valor máximo de escurrimiento dicho anteriormente.

5. Determinación de la susceptibilidad a la humedad: La susceptibilidad a la humedad de cada mezcla con su respectiva fibra se determina de acuerdo a la norma INV E-725-07, teniendo en cuenta que el manual de diseño AASHTO PP 41-02 exige un contenido de  $V_a$  de  $6\% \pm 1\%$ .

### **3.3 METODOLOGÍA COMPARATIVA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA SMA CON DIFERENTES FIBRAS ESTABILIZADORAS**

Para la metodología comparativa se evaluarán las propiedades mecánicas obtenidas a partir de los ensayos de susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas, utilizando la prueba de tracción indirecta, al igual que la prueba de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas, y el ensayo de resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo del laboratorio para las diferentes mezclas realizadas con sus respectivas fibras estabilizadoras.

#### **3.3.1 Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta (INV E-725.07)**

Este método de prueba tiene como propósito medir el efecto del agua sobre la resistencia a la tracción indirecta.

---

Este ensayo se realizó para cada mezcla SMA con su respectiva fibra estabilizadora; consiste en preparar seis (6) especímenes, tres (3) para ser probados en seco, y tres (3) para ser probados después de una saturación parcial y acondicionamiento en un baño con agua (ver Figura 13). Con los datos obtenidos en la prueba se calcula la resistencia promedio a la tensión de los especímenes acondicionados bajo agua, y la resistencia promedio a la tensión de los especímenes secos. Con estos resultados se obtiene la relación de resistencia a la tensión, y se puede evaluar la variación de la susceptibilidad a la humedad en función de las fibras de desechos industriales en la mezcla SMA respecto a la mezcla asfáltica SMA elaborada con fibra de celulosa.



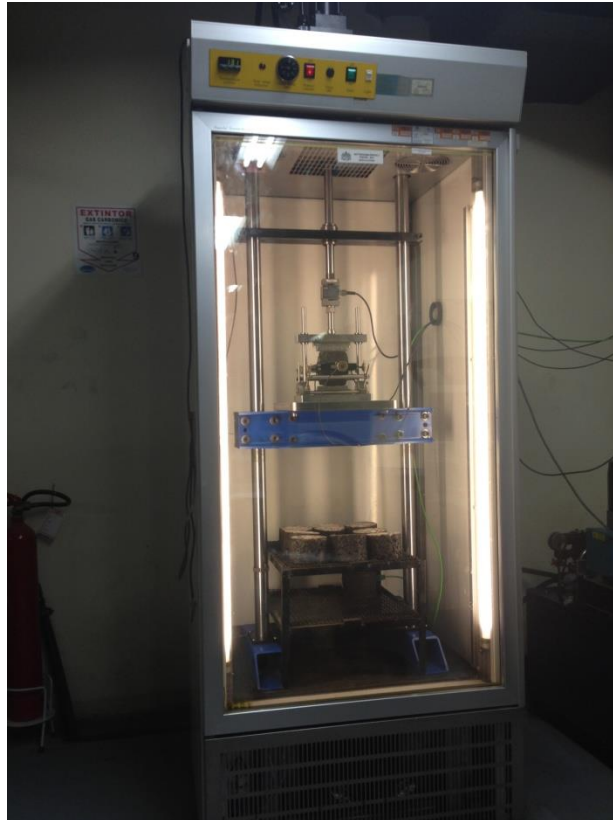
Figura 13. Especímenes acondicionados en baño de agua a 60 °C

### **3.3.2 Ensayo de tensión indirecta para determinar módulo resiliente de mezclas asfálticas (INV E-749-07)**

Este método tiene como propósito determinar los valores del módulo resiliente aplicando el ensayo de tensión indirecta con carga repetida (ver Figura 14).

Este ensayo se realizó para cada mezcla SMA con su respectiva fibra estabilizadora, el cual consiste en preparar tres (3) especímenes y someterlos a

variaciones de cargas, frecuencias y temperaturas. El ensayo se efectúa a 10° C, 20° C y 30° C, y a frecuencias de carga de 2.5 Hz, 5 Hz, y 10 Hz. Esta serie da como resultado nueve valores de ensayo para una muestra, los cuales se emplean para evaluar el comportamiento resiliente total de cada mezcla, y así poder comparar su comportamiento respecto a la mezcla asfáltica SMA realizada con fibra de celulosa.



**Figura 14. Ensayo de tensión indirecta para determinar módulo resiliente de mezclas asfálticas (INV E-749-07)**

### **3.3.3 Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (INV E-756-07)**

Este método tiene como propósito determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica.



Este ensayo se realizó para cada mezcla SMA con su respectiva fibra estabilizadora, el cual consiste en someter un espécimen de mezcla asfáltica (de tamaño 30 cm x 30 cm x 5 cm) al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de deformación producida. La presión de contacto normalizada, ejercida por la rueda cargada sobre la superficie de la probeta durante todo el ensayo es de  $900 \pm 25 \text{ kN/m}^2$  ( $9 \pm 0.25 \text{ kgf/cm}^2$ ), y la temperatura del ensayo de  $60^\circ \pm 1^\circ \text{ C}$  (ver Figura 15).



**Figura 15. Ensayo de resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (INV 756-07)**



## 4 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentaran los resultados del proceso de diseño de la mezcla asfáltica tipo SMA, como también, los resultados comparativos de las tres mezclas con los diferentes tipos de fibras, sometidas a los ensayos de susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta, el ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente, y la resistencia a la deformación plástica mediante la pista de ensayo del laboratorio.

### 4.1 Diseño de una mezcla SMA (AASHTO PP41-02)

#### 4.1.1 Selección de los materiales

- **Caracterización del agregado grueso:** en la Tabla 5 se muestran los ensayos de caracterización junto con los resultados obtenidos, en el laboratorio, de los agregados gruesos que se emplearon para la elaboración del trabajo de investigación.

**Tabla 5. Requisitos y resultados de los agregados gruesos, de acuerdo con la Especificación Estándar para SMA AASHTO MP 8-07**

Ensayo	Descripción	Norma	Mínimo	Máximo	Resultado Laboratorio
Resistencia al desgaste de los agregados en la máquina de los ángeles	-	INV E-218-07	-	30%	19.85%
Partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos	3 a 1	INV E-240-07	-	20%	1.2%

Ensayo	Descripción	Norma	Mínimo	Máximo	Resultado Laboratorio
Absorción de agregados gruesos	-	INV E-223-07	-	2%	2%
Sanidad de los agregados frente a la solución de	Sulfato de Sodio	INV E-220-07	-	15%	1.8%

- **Caracterización del agregado fino:** en la Tabla 6 se muestran los ensayos de caracterización junto con los resultados obtenidos, en el laboratorio, de los agregados finos que se emplearon para la elaboración del trabajo de investigación.

**Tabla 6. Requisitos y resultados de los agregado fino**

Ensayo	Descripción	Norma	Mínimo	Máximo	Resultado Laboratorio
Sanidad de los agregados frente a la solución de	Sulfato de Sodio	INV E-220-07	-	15%	6.1%

- **Caracterización del asfalto tipo II:** el asfalto tipo II, al igual que su caracterización, fue suministrada por la empresa IncoAsfaltos (Industria Colombiana de Asfaltos S.A.), cuyos resultados se pueden encontrar en el ANEXO A. Sin embargo, con fines de corroborar los datos suministrados por esta empresa, se realizaron los ensayos de ductilidad, penetración, y punto de ablandamiento en el laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana; los resultados obtenidos, así como también, los requisitos que se encuentran en el Artículo 400 (Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos) del Instituto Nacional de Vías se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Ensayos verificados en laboratorio

Ensayo	Norma	Requisito		Resultado Laboratorio
		Mínimo	Máximo	
Penetración	INV E-706-07	55 mm	70 mm	67.3 mm
Ductilidad	INV E-702-07	15 cm	-	80 cm
Punto de Ablandamiento	INV E-712-07	58 °C	-	78° C

- **Caracterización del filler:** como llenante mineral para el diseño de la mezcla asfáltica tipo SMA se empleó ceniza volante. En la Tabla 8 se presentan los ensayos realizados a este material, así como también los resultados obtenidos.

Tabla 8. Resultados caracterización ceniza volante

Ensayo	Norma	Requisito	Resultado Laboratorio
Gravedad Específica	INV E-222-07	-	2.402
Contenido de materia orgánica	INV E-212-07	Sin materia orgánica	No hay presencia de materia orgánica (ver Figura 16).



Figura 16. Ensayo de contenido de materia orgánica en la ceniza volante

#### 4.1.2 Selección de la gradación óptima

Se seleccionaron tres (3) gradaciones de prueba (ver Figura 17) dentro de la franja maestra para una mezcla SMA de tamaño nominal 1/2": una en el límite superior, otra en el límite inferior, y una media entre estas dos (ver Tabla 9 y Figura 18). Para una mezcla SMA de tamaño nominal 1/2" el tamiz de corte que divide el agregado grueso del agregado fino es el No 4.



Figura 17. Agregados gruesos de las gradaciones de prueba.

Tabla 9 Gradaciones de prueba

Tamiz US S	Tamiz mm	Gradación 1	Gradación 2	Gradación 3
0.75	19	100	100	100
0.5	12.5	90	95	100
0.375	9.5	50	65	80
No. 4	4.75	20	27.5	35
No. 8	2.36	16	20	24
No. 200	0.075	8	9.5	11
Fondo	0	0	0	0

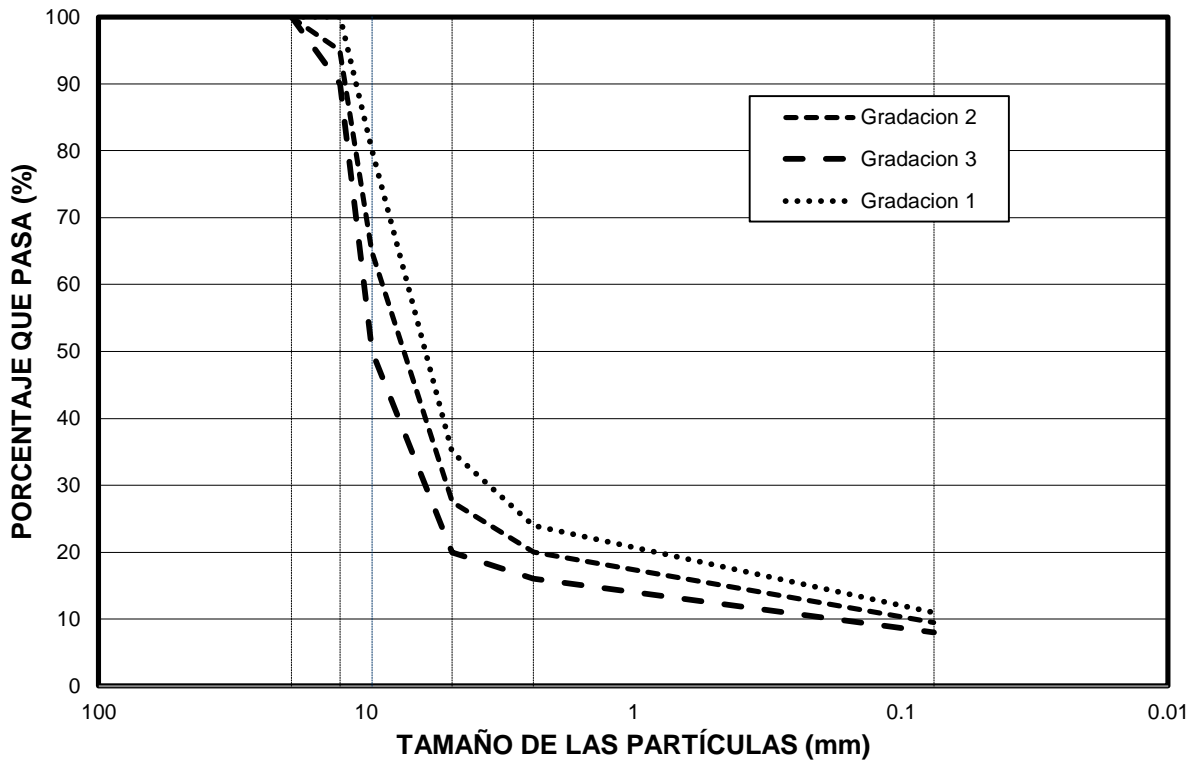


Figura 18. Gradaciones de prueba

Para cada gradación de prueba se calcularon los volúmenes entre las partículas del agregado grueso seco compactado con varilla de la fracción ( $VCA_{DRC}$ ) por medio de la Ecuación 1. En la Tabla 10 se presentan los valores calculados para cada gradación de prueba.

Tabla 10.  $VCA_{DRC}$  para cada gradación de prueba

	Gradación		
	1	2	3
$G_{CA}$	2.33	2.31	2.31
$Y_W$ (kg/m <sup>3</sup> ).	1000.00	1000.00	1000.00
$Y_S$ (kg/m <sup>3</sup> ).	1344.71	1335.67	1336.51
<b><math>VCA_{DRC}</math></b>	<b>42.23</b>	<b>42.26</b>	<b>42.20</b>

Teniendo los valores de  $VCA_{DRC}$  (volumen entre las partículas del agregado grueso seco compactado con varilla de la fracción), se procedió a calcular para cada gradación de prueba su respectiva gravedad específica combinada del agregado ( $G_{SB}$ ) utilizando la Ecuación 2 (ver Tabla 11).

**Tabla 11. Gravedades específicas combinada del agregado para cada gradación de prueba**

Parámetro	Gradación		
	1	2	3
P1	0.800	0.725	0.650
P2	0.120	0.180	0.240
P3	0.080	0.095	0.110
G1	2.328	2.313	2.312
G2	2.562	2.572	2.614
G3	2.402	2.402	2.402
$G_{SB}$	<b>2.359</b>	<b>2.364</b>	<b>2.388</b>

Teniendo las gravedades específicas para cada gradación, se procedió a seleccionar el porcentaje del asfalto de prueba utilizando los valores de la gravedad específica de cada gradación (ver Tabla 3). En la Tabla 12 se presenta el porcentaje de asfalto para cada gradación de prueba en función de su respectiva gravedad específica.

**Tabla 12. % de asfalto para su respectiva gravedad específica**

Gradación	$G_{SB}$	% asfalto
1	2.359	6.88
2	2.364	6.87
3	2.388	6.82

Con el porcentaje del asfalto de prueba seleccionado correspondiente a cada gradación, se realizaron tres (3) probetas compactadas con el Compactador



Giratorio a 100 giros, y una (1) probeta suelta o sin compactar. Para las probetas compactadas se calculó la gravedad específica promedio Bulk ( $G_{SB}$ ), y para la probeta suelta o sin compactar se calculó la gravedad específica máxima teórica ( $G_{mm}$ ), (ver Tabla 13).

**Tabla 13. Porcentaje de agregado grueso en la mezcla, gravedad específica promedio Bulk ( $G_{SB}$ ) de las probetas compactadas y gravedad máxima teórica para cada gradación**

	Gradación		
	1	2	3
$P_{ca}$	74.514	67.540	60.593
$G_{mb}$	2.090	2.083	2.074
$G_{mm}$	2.163	2.165	2.185

Con los valores calculados, y mostrados en la Tabla 13, se calcularon los valores de  $VMA$  (Vacíos en el agregado de la mezcla compactada), los valores de  $VCA_{mezcla}$  (Vacíos en el agregado grueso de la mezcla compactada), y los valores de  $V_a$  (Vacíos en la mezcla compactada) correspondientes a cada gradación de prueba, haciendo uso de la Ecuación 3, Ecuación 4, y Ecuación 5, respectivamente (ver Tabla 14).

**Tabla 14. Valores de  $VCA_{DRC}$  (volumen entre las partículas del agregado grueso seco compactado con varillada de la fracción),  $VCA_{mezcla}$  (Vacíos en el agregado grueso de la mezcla compactada) y  $VMA$  (Vacíos en el agregado de la mezcla compactada), para cada gradación**

	Gradación		
	1	2	3
$VCA_{DRC}$	42.23	42.26	42.20
$VCA_{mezcla}$	33.086	39.198	45.640
$VMA(\%)$	17.481	17.944	19.033

Con los valores mostrados en la Tabla 14, y los tres criterios para la selección de la gradación óptima dados por el procedimiento de diseño AASHTO: PP 41-02, se encontró la gradación óptima para una mezcla asfáltica SMA de tamaño nominal de ½.”

- **Criterio de selección 1:**

$$VCA_{mezcla} < VCA_{DRC}$$

Gradación 1: Cumple el criterio

Gradación 2: Cumple el criterio

Gradación 3: No Cumple el criterio

- **Criterio de selección 2:**

VMA Mínimo 17%

Gradación 1: Cumple el criterio

Gradación 2: Cumple el criterio

Gradación 3: Cumple el criterio

- **Criterio de selección 3:**

Porcentaje más bajo de agregado grueso en la mezcla: la gradación 1 y la gradación 2 cumplieron los dos criterios evaluados; por esto, para elegir la gradación óptima, se define cuál de estas dos gradaciones tienen el porcentaje más bajo de agregados gruesos en la mezcla. La gradación 1 tiene 74.5% de agregado grueso en la mezcla, mientras que la gradación 2 tiene un 65% de agregado grueso en la mezcla; por lo cual, la gradación 2 es la que cumple con el criterio 3.

La gradación que cumplió con los tres criterios de selección fue la gradación 2, la cual será la gradación óptima de diseño.

#### **4.1.3 Selección del porcentaje óptimo de asfalto**

Para obtener el porcentaje de asfalto óptimo, se realizaron tres (3) mezclas con la gradación óptima y con diferentes porcentajes de prueba de asfalto, entre 6% y 7%, como lo indica el procedimiento para el diseño del Stone Mastic Asphalt (SMA) AASHTO: PP 41-02 (ver Tabla 15).

**Tabla 15. Porcentajes de asfalto de prueba**

<b>Mezclas</b>	<b>% Asfalto</b>
1	6.60
2	6.30
3	6.00

Para cada mezcla se realizaron tres (3) probetas compactadas mediante el compactador giratorio a 100 giros, y una (1) probeta suelta o sin compactar para

---

cada mezcla; para las probetas compactadas se calculó la gravedad específica promedio Bulk ( $G_{mb}$ ), y para la probeta suelta o sin compactar se calculó la gravedad específica máxima teórica ( $G_{mm}$ ), (ver Tabla 16).

**Tabla 16. Porcentaje de vacíos para diferentes % de asfalto**

	Gradación		
	1	2	3
% asfalto	6.6	6.3	6.0
$G_{mb}$	2.055	2.036	2.028
$G_{mm}$	2.164	2.169	2.198
$V_a$	<b>5.034</b>	<b>6.116</b>	<b>7.726</b>

En la Tabla 16 se tienen tres porcentajes de vacíos para tres porcentajes de asfalto correspondientes. Además hay que tener en cuenta que para la fase de selección de la gradación se tiene otro porcentaje de vacíos con su respectivo porcentaje de asfalto, el cual corresponde a la mezcla con la gradación óptima. Así, con estos cuatro puntos, se procedió a graficarlos, y por medio de una regresión polinómica se ajustó la gráfica del porcentaje de vacíos contra el porcentaje de asfalto; lo anterior con el fin de obtener el porcentaje de asfalto óptimo que produce un porcentaje de vacíos de 4% ya que este es el porcentaje de vacíos que exige la especificación estándar para Stone Mastic Asphalt (SMA) AASHTO MP 8-07.

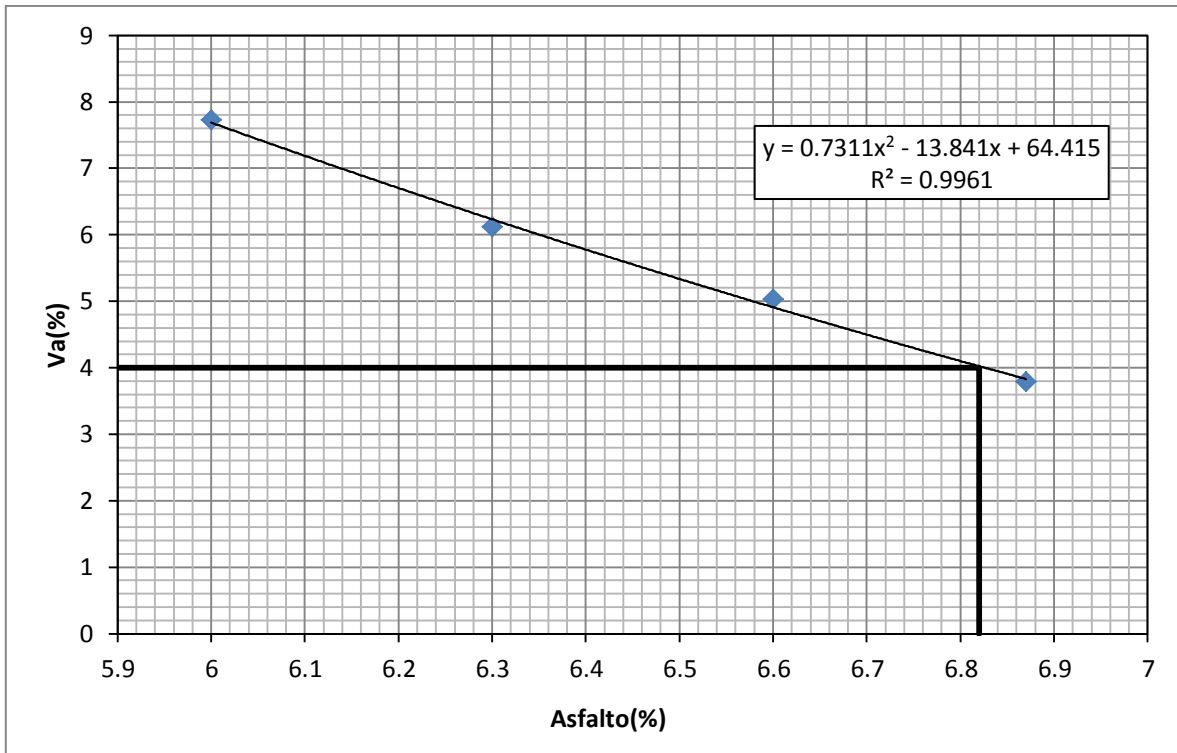


Figura 19. % de vacíos en función de % de asfalto en la mezcla

Utilizando la gráfica mostrada en la Figura 19 se encuentra que el porcentaje óptimo de asfalto para producir un 4% de vacíos, el cual es 6.82%. En la Tabla 17 se presentan los parámetros finales del diseño óptimo de la mezcla SMA.

Tabla 17. Diseño mezcla SMA

Propiedades	Requisito	Resultado
Vacíos del aire $V_a$ (tanto por ciento)	4	4
$VMA$ (tanto por ciento)	17 min	19.03
$VCA_{mezcla}$ (tanto por ciento)	menos de $VCA_{drc}$	39.1 < 42.2
Contenido de asfalto (tanto por ciento)	6 min	6,82

#### 4.1.4 Determinación de la sensibilidad al escurrimiento (AASHTO T-305)

Con la gradación óptima, y el porcentaje óptimo de asfalto, se procedió a realizar la verificación del escurrimiento de la mezcla (ver Figura 20). Se realizaron tres (3) ensayos de escurrimiento: la mezcla con fibra de celulosa, la mezcla con fibra de polipropileno, y para la mezcla con fibra de coco. Estos ensayos se realizaron variando los porcentajes de la fibra empleada, con el fin de encontrar el porcentaje óptimo de fibra que inhibe el escurrimiento a parámetros aceptables según la especificación estándar para Stone Mastic Asphalt (SMA) AASHTO MP 8-07 (Tabla 18).



Figura 20. Ensayo de escurrimiento (AASHTO T-305)

Tabla 18. Porcentajes de fibra y resultados de escurrimiento para cada mezcla

	Fibra de Celulosa			Fibra de Polipropileno			Fibra de Coco		
	0.30%	0.50%	0.70%	0.03%	0.04%	0.05%	0.03%	0.04%	0.05%
Porcentaje de fibra en la mezcla	0.30%	0.50%	0.70%	0.03%	0.04%	0.05%	0.03%	0.04%	0.05%
Peso (g)	3	5	7	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5
Escurrecimiento (g)	0.7	0.5	0	1.2	1	0.9	1	0.8	0.7
Escurrecimiento (%)	0.07	0.05	0	0.12	0.10	0.09	0.10	0.08	0.07

A continuación se presentara gráficamente el comportamiento de cada fibra frente al ensayo de escurrimiento (AASHTO T-305). Ver Figura 21 a Figura 23.

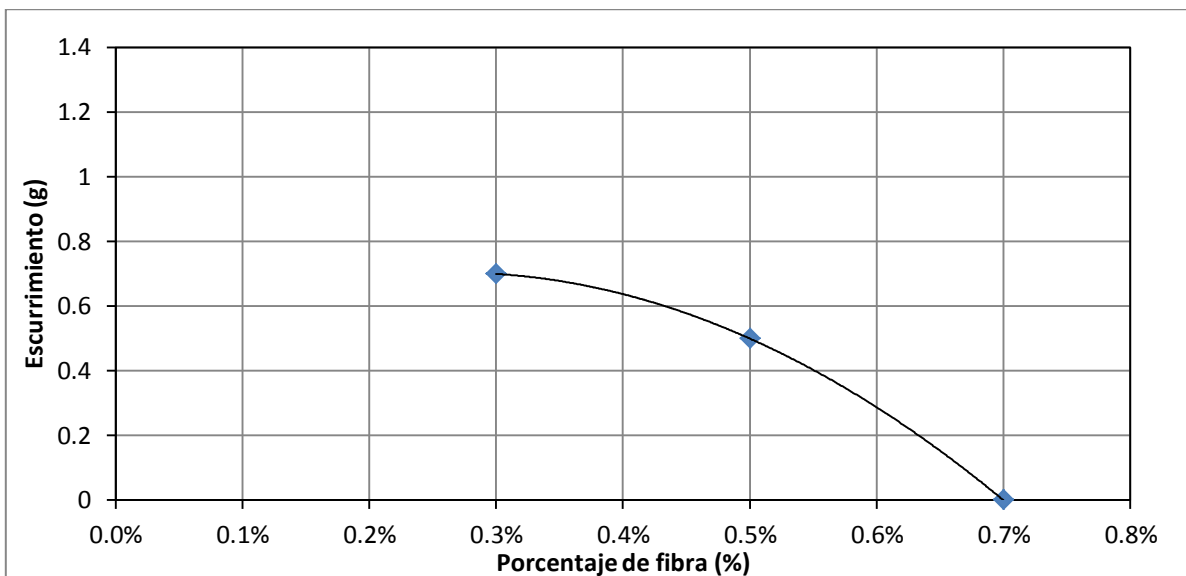


Figura 21. Escurrecimiento en función del porcentaje de fibra de celulosa

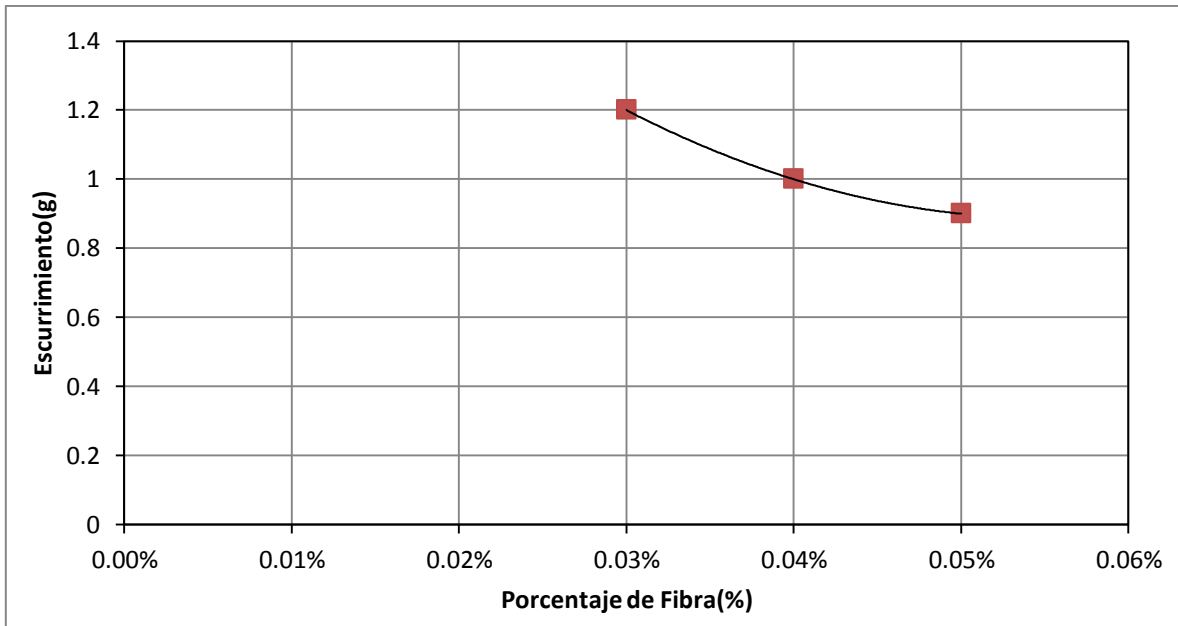


Figura 22. Ecurrimiento en función del porcentaje de fibra de polipropileno

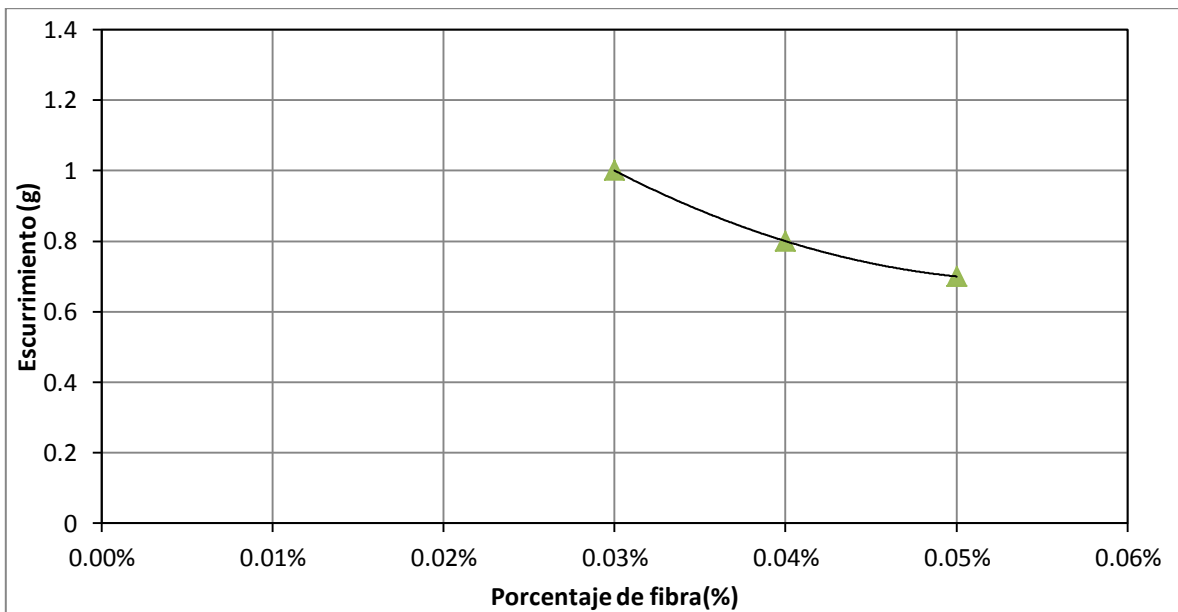


Figura 23. Ecurrimiento en función del porcentaje de fibra de coco

Como se puede observar en la Tabla 18, a mayor porcentaje adicionado de fibras en la mezcla se evidencia una disminución del escurrimiento del asfalto en la



muestra de prueba. También se puede observar que todos los porcentajes utilizados con las diferentes fibras cumplen con los requisitos de la especificación Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures AASHTO T-305, lo cual es satisfactorio para la investigación.

Los porcentajes de fibras de desechos industriales utilizados en la mezcla fueron seleccionadas durante el proceso de ensayo en función de su peso; ya que si se utilizaba el porcentaje estipulado por la norma de diseño (norma AASHTO PP 41-02 (2006), donde se estipula que el contenido de fibra a emplear en la mezcla debe ser del 0.3% sobre el peso total de la mezcla), se tendrían problemas al momento de mezclado, debido a que al no ser estas peletizadas y estar premezcladas con asfalto (como las fibras de celulosa), el volumen de las fibras sería significativamente mayor. Lo anterior generaría una condición no deseada para la mezcla, ya que se busca que la fibra estabilizadora empleada quede distribuida de manera uniforme en toda la mezcla, y sin la presencia de grumos (ver Figura 24). Por lo tanto, se buscó un porcentaje adecuado que no presentara inconvenientes durante el proceso de mezclado y que cumpliera con el requisito. Todo lo anterior con el fin de buscar la viabilidad de utilizar este tipo de fibras en una mezcla asfáltica tipo SMA.



**Figura 24. Grumos en la mezcla por exceso de fibra de polipropileno**

#### 4.1.5 Determinación de la susceptibilidad a la humedad (INV E-725-07)

Para los especímenes secos y húmedos, con cada tipo de fibra empleada, se determinó la resistencia a la humedad de la mezcla asfáltica de diseño tipo SMA. Lo anterior con el fin de cumplir con el criterio del ensayo de la susceptibilidad a la humedad, el cual estipula que la relación de la resistencia a la tensión de la mezcla entre muestras secas y húmedas debe ser mayor al 80%. Estos resultados se podrán observar a continuación en la Tabla 19, en la Figura 25 y Figura 26.

**Tabla 19. Valores de relación de la resistencia a la tensión para cada mezcla con su respectiva fibra**

	Mezcla con fibra de		
	Celulosa	Polipropileno	Coco
Resistencia promedio a la tensión del subgrupo acondicionado al agua, <i>kPa</i> .	613.47	629.30	628.46
Resistencia promedio a la tensión del subgrupo seco, <i>kPa</i> .	497.61	551.73	524.65
<b>Relación de la resistencia a la tensión, %.</b>	<b>81.11</b>	<b>87.67</b>	<b>83.48</b>

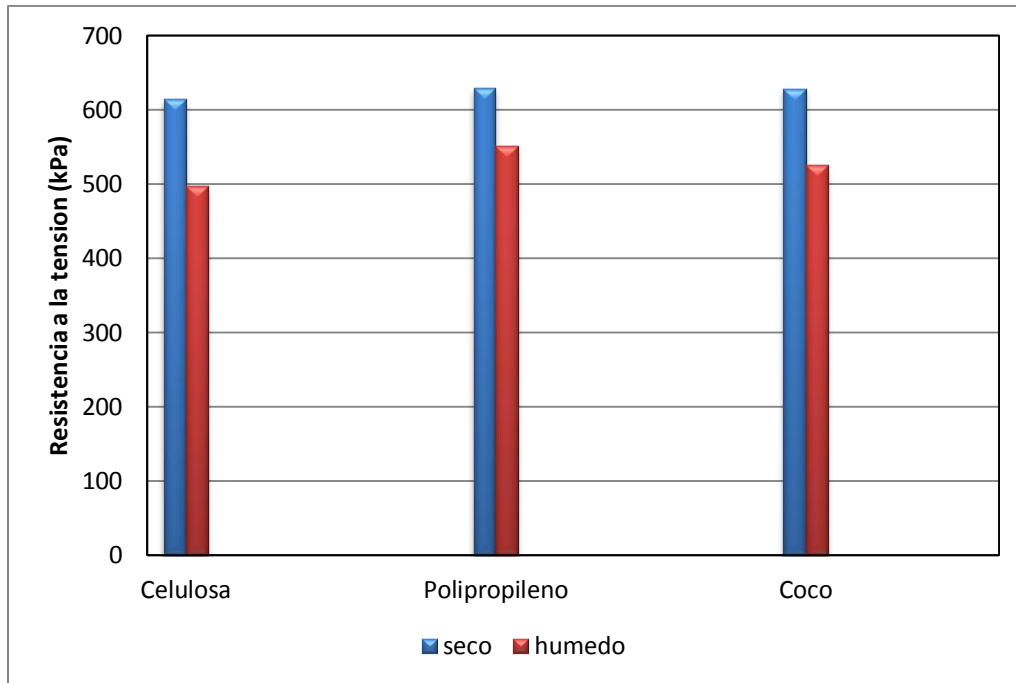


Figura 25. Resultado de la resistencia a la tensión en la mezcla asfáltica tipo SMA con su respectiva fibra estabilizadora

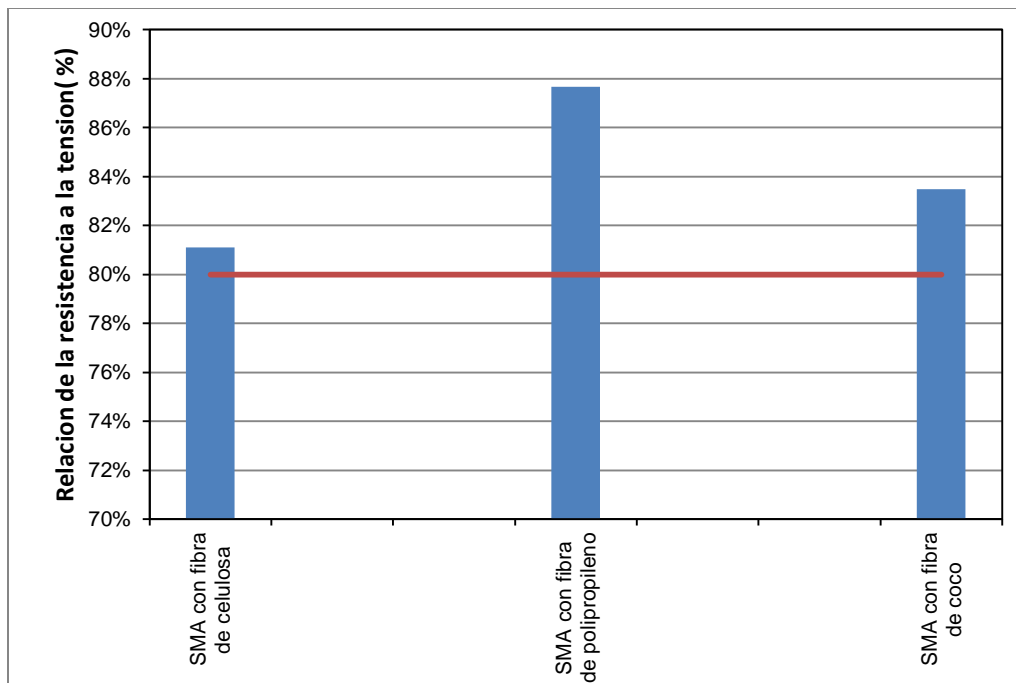


Figura 26. Relación de la resistencia a la tensión %

Como se mencionó anteriormente, el criterio de diseño que se estipula para el ensayo de la resistencia a la tensión entre las muestras secas y húmedas debe ser del 80%, lo cual se cumplió satisfactoriamente para los tipos de mezcla ensayados (ver Figura 26).

Los valores de la relación de la resistencia a la tensión indirecta obtenidos para la mezcla con fibra de polipropileno fue de 87.6% y con fibra de coco fue de 83.4% los cuales son mayores respecto a la mezcla con fibra de celulosa en un 8.1% y 2.9% respectivamente. Lo anterior nos indica que las fibras desechas en procesos industriales, además de servir para inhibir el problema de escurrimiento de asfalto que generan este tipo de mezclas asfálticas, desarrollan un mayor grado de resistencia a la susceptibilidad a la humedad.

#### 4.2 Ensayo de tensión indirecta para determinar módulo resiliente de mezclas asfálticas (INV E-749-07)

Para los diseños óptimos se determinó el módulo resiliente de las mezclas asfálticas tipo SMA con cada fibra (celulosa, polipropileno, y coco). En la Tabla 20, y de la Figura 27 a la Figura 29, se puede observar la variación del módulo resiliente a las temperaturas de 10° C, 20° C y 30°C, y a frecuencias de 2.5 Hz, 5 Hz y 10 Hz.

**Tabla 20. Módulos Resilientes promedio para cada mezcla con su respectiva fibra**

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo Resiliente SMA (MPa) con		
		Celulosa	Polipropileno	Coco
10	2.5	7597	5572	6451
10	5	8386	6385	7153
10	10	9326	7176	8242
20	2.5	4071	2284	2874
20	5	5027	2715	3555
20	10	5732	3593	4240
30	2.5	1841	726	1005
30	5	2169	963	1265
30	10	2609	1169	1597

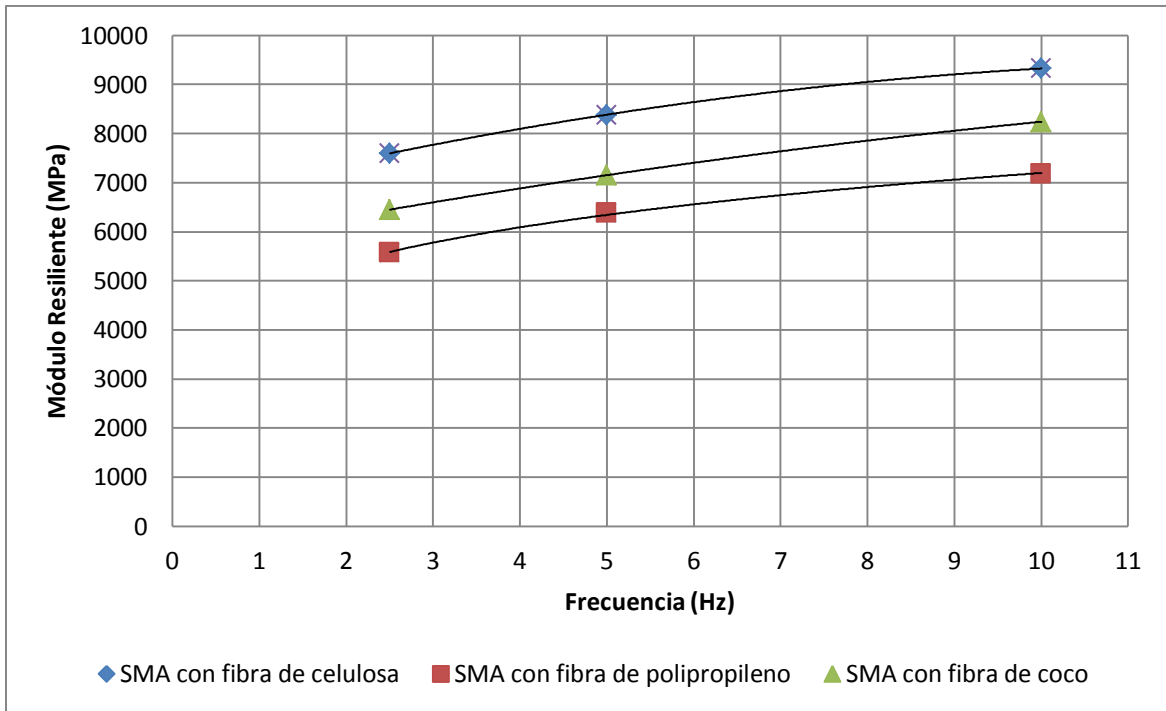


Figura 27. Isotermas para 10° C

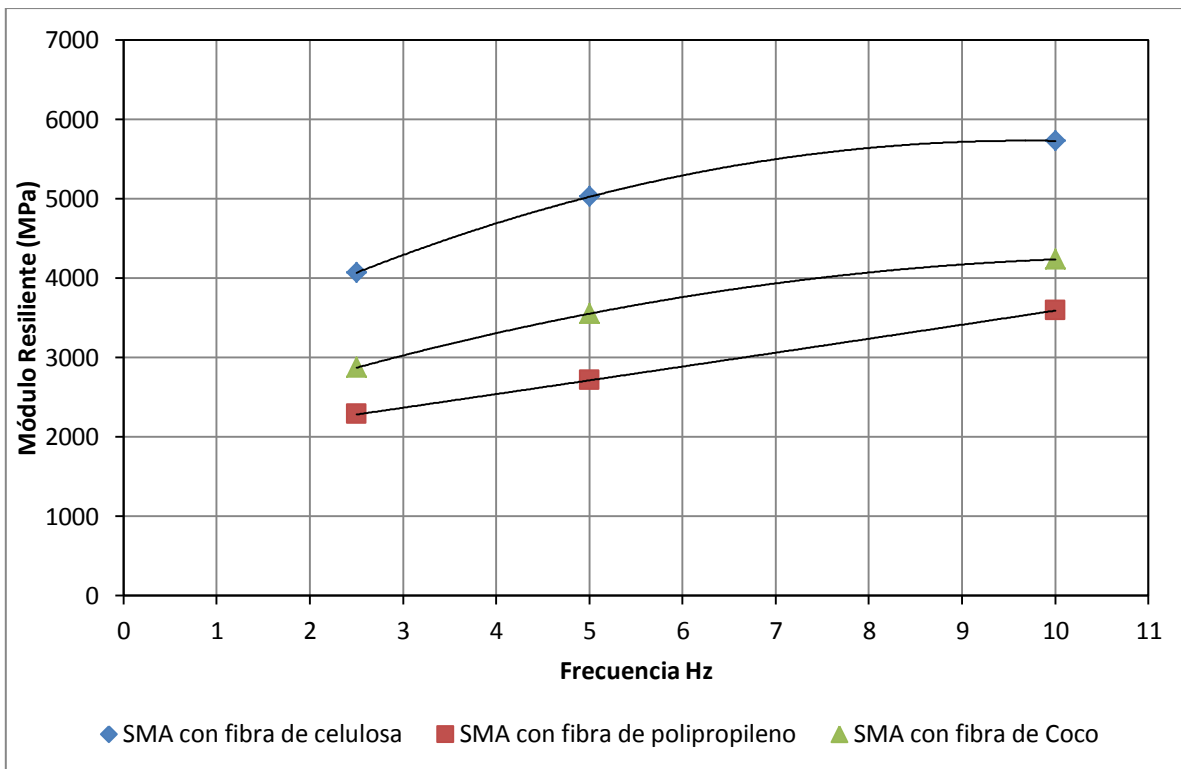


Figura 28. Isotermas para 20° C

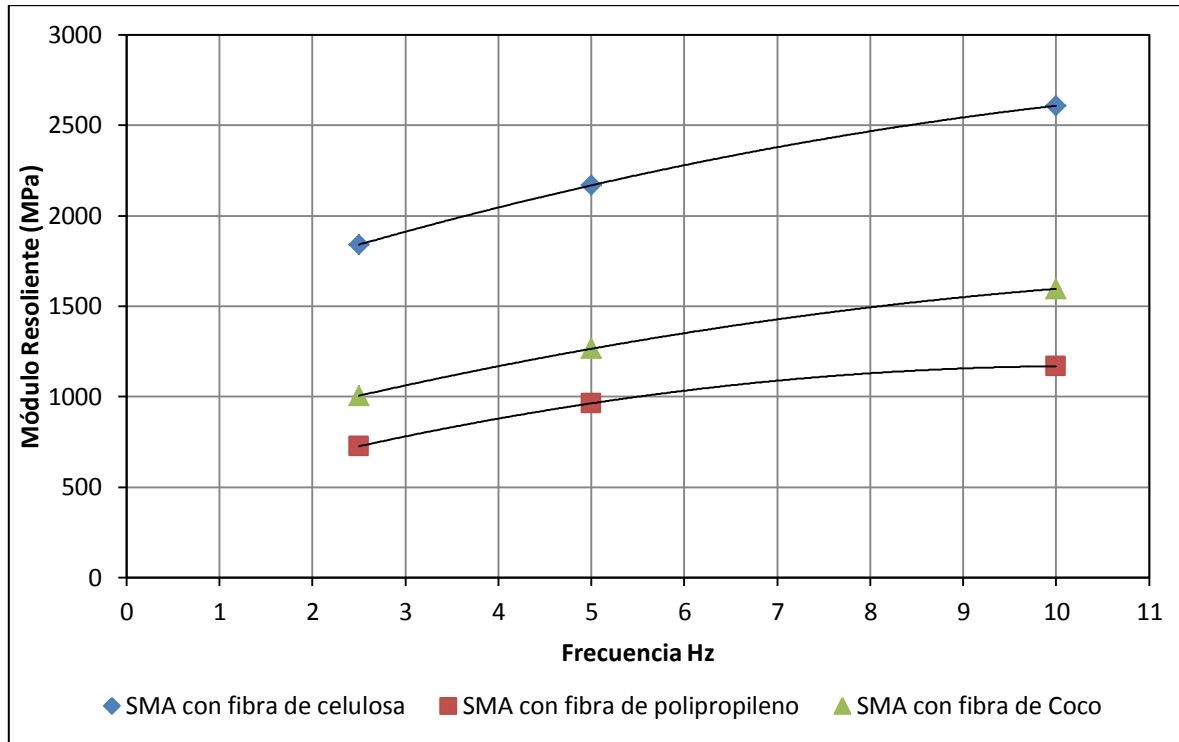


Figura 29. Isothermas para 30° C

En la Figura 30 a la Figura 32 se presentan las curvas maestras del módulo para la mezcla tipo SMA con cada tipo de fibra estudiada. Estas curvas maestras se obtuvieron bajo una temperatura de referencia de 10° C. El valor del módulo a cualquier frecuencia y temperatura se determina a partir de la Ecuación 6 y la Ecuación 7. Estas curvas maestras se comparan en la Figura 33.

$$X = \alpha_T + \ln(f)$$

Ecuación 6

$$\alpha_T = 2.52 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right)$$

Ecuación 7

Dónde:

$X$  : Parámetro de reducción de la curva maestra.

$\alpha_T$  : Factor de modificación en función de la temperatura.

$f$  : Frecuencia de la prueba, en Hz.

$T$  : Temperatura absoluta de la prueba, en °K.

$T_s$  : Temperatura absoluta de referencia, en °K.

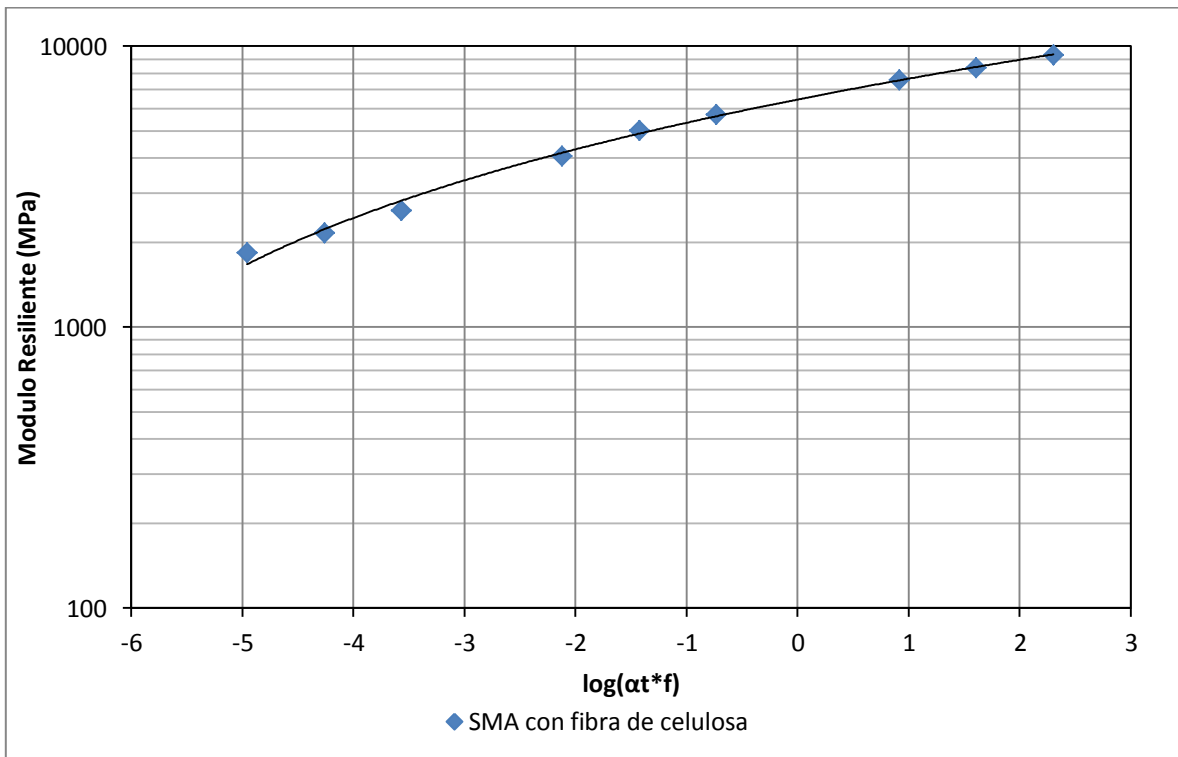


Figura 30. Curva maestra SMA con fibra de celulosa

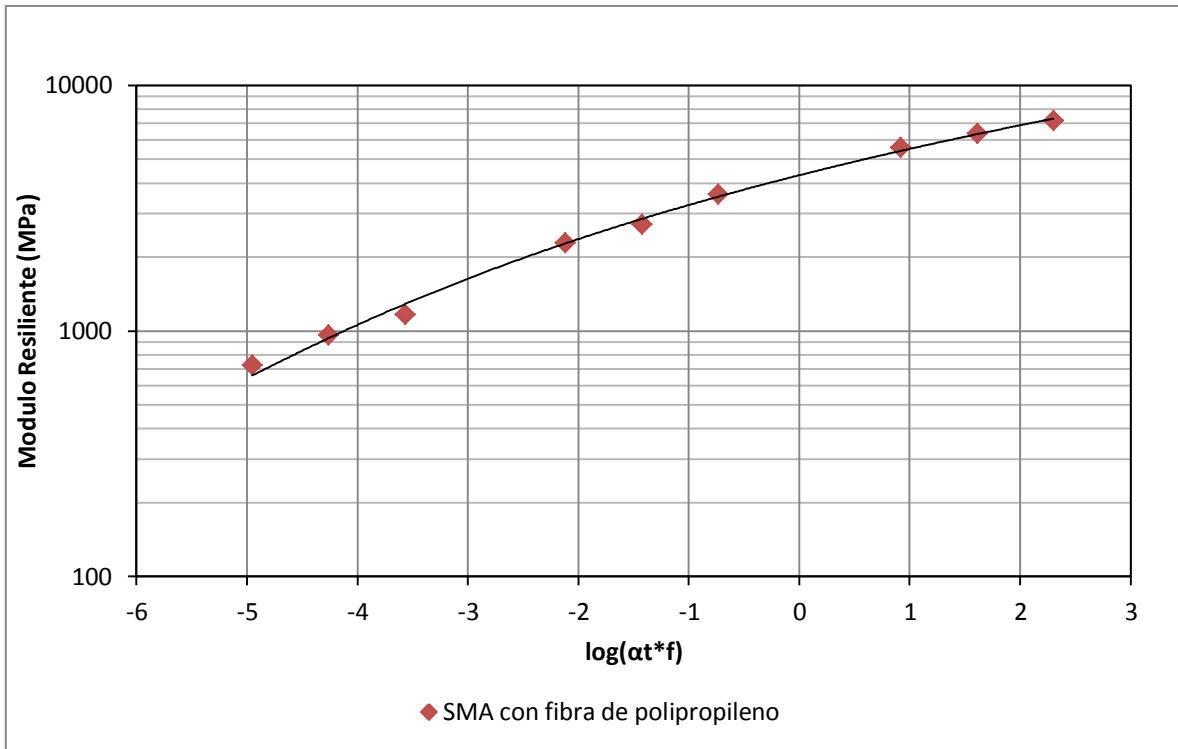


Figura 31. Curva maestra SMA con fibra de polipropileno

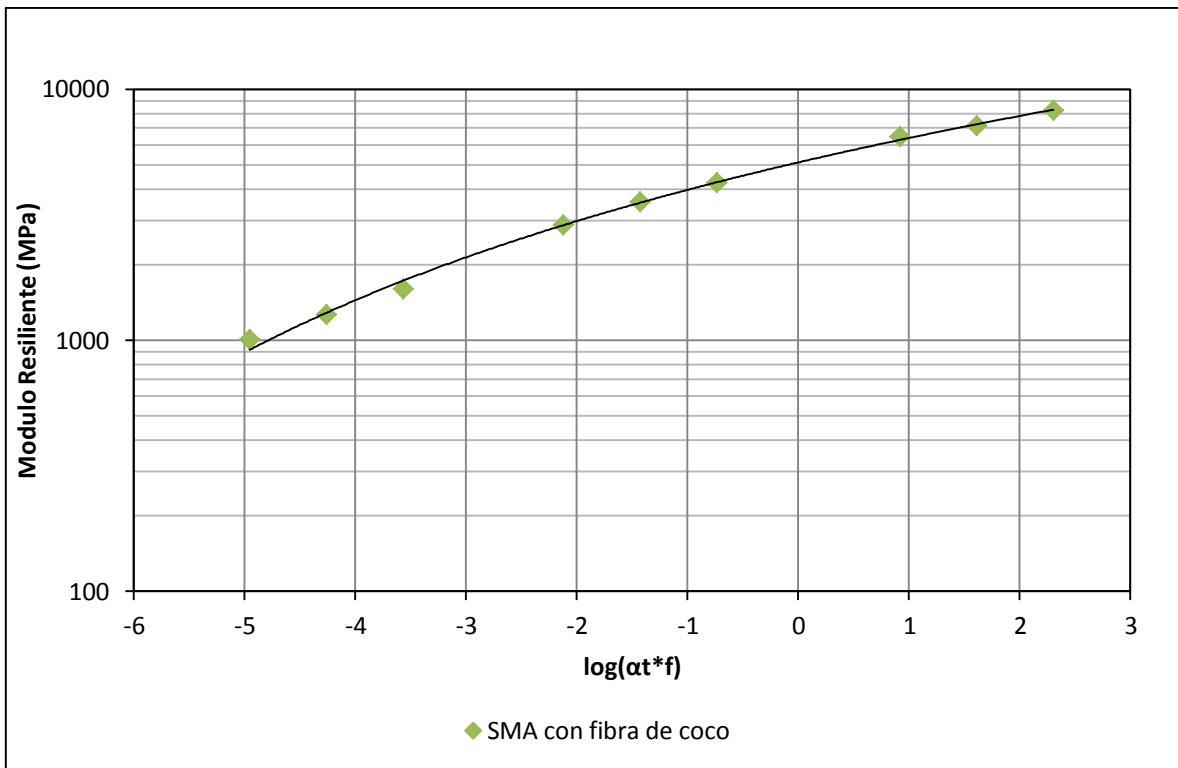


Figura 32. Curva maestra SMA con fibra de coco



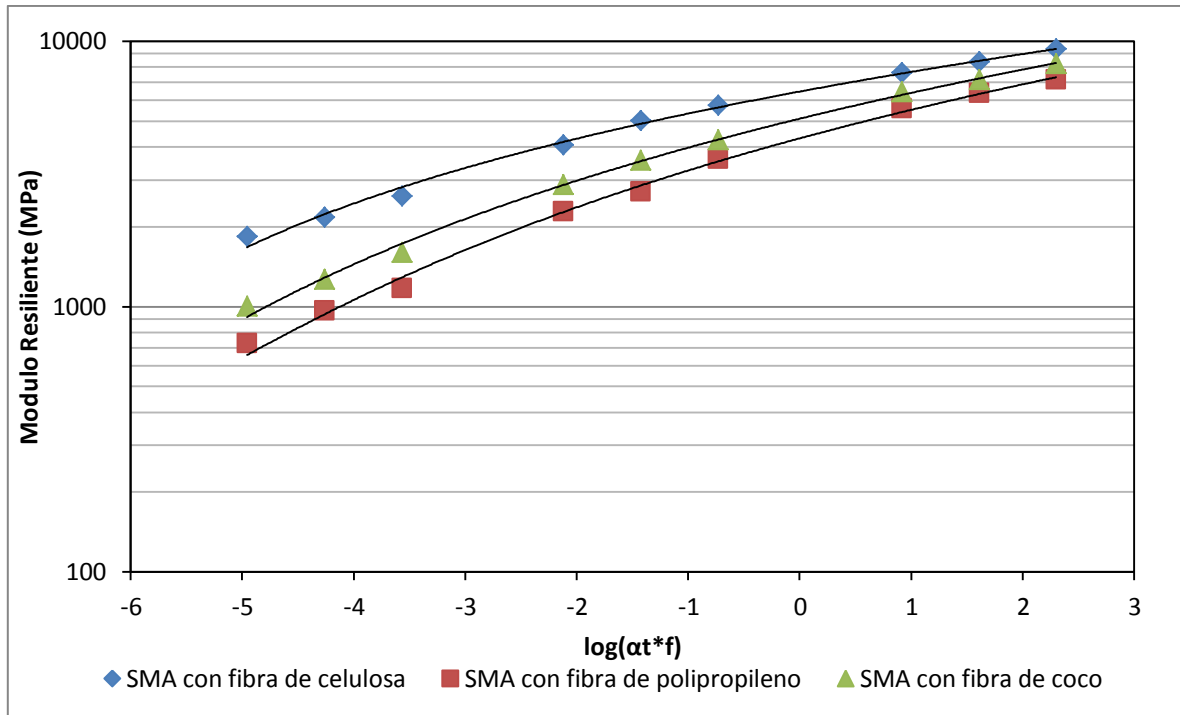


Figura 33. Curva maestra

De los anteriores resultados se puede observar el mayor módulo resiliente en la mezcla tipo SMA se obtuvo con la fibra de celulosa, seguido por la mezcla con la fibra de coco (p. ej. 26% menor comparado con la mezcla con fibra de celulosa, a 20° C y 10 Hz), y el más bajo en la mezcla con fibra de polipropileno (p. ej. 37% menor comparado con la mezcla con fibra de celulosa, a 20° C y 10 Hz). Por otro lado, y comparado los resultados con el módulo resiliente de una mezcla asfáltica tipo MDC-2 (mezcla de uso convencional en Colombia, con módulo aproximado de 3496 MPa, evaluada a 20° C y 10 Hz), se encuentra que la mezcla tipo SMA con fibra de celulosa tiene un módulo resiliente mayor en un 64% (a 20° C y 10 Hz), la mezcla con fibra de coco un módulo mayor en 21% (a 20° C y 10 Hz), y la mezcla con fibra de polipropileno con un módulo aproximadamente igual (3%, a 20° C y 10 Hz).

### 4.3 Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (INV E-756-07)

Para cada mezcla SMA con su respectiva fibra estabilizadora se determinó la resistencia a la deformación plástica mediante la pista de ensayo de laboratorio. Para ello se empleó la norma INV E-756-07, y sus resultados se muestran a continuación (ver Tabla 21).

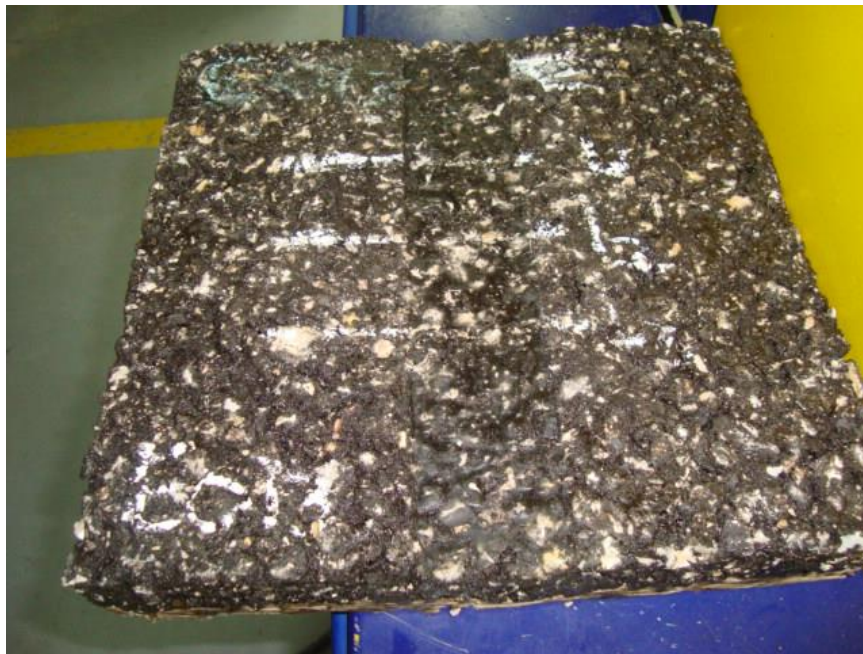


Figura 34. Espécimen después de ser sometido al ensayo de resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio.

Tabla 21. Velocidades de deformaciones, en  $\mu\text{m}/\text{min}$

Intervalo	Mezcla SMA con fibra de:		
	Celulosa	Polipropileno	Coco
30 – 45 min	40	68	41
75 - 90 min	38	37	48
105 – 120 min	11	7	12

Con base en la información suministrada en la Tabla 21 se puede observar que la mezcla tipo SMA que obtuvo menor velocidad de deformación en el intervalo entre 105 min a 120 min fue la mezcla con fibra de polipropileno, seguida de la mezclas con fibra de celulosa y fibra de coco. La mezcla con fibra de polipropileno disminuyó la velocidad de deformación en un 36% con respecto a la mezcla con fibra de celulosa. La mezcla con fibra de coco aumento en un 9% la velocidad de deformación respecto a la mezcla con fibra de celulosa. En el artículo 452 del INVIAS se menciona que la velocidad de deformación en el intervalo de 105 min a 120 min no podrá ser mayor de 12  $\mu\text{m}/\text{min}$  para mezclas que se vallan a emplear en zonas donde la temperatura media anula sea superior a veinticuatro grados Celsius ( $24^\circ\text{C}$ ), ni mayor de 15  $\mu\text{m}/\text{min}$  para regiones con temperaturas hasta de veinticuatro grados Celsius ( $24^\circ\text{C}$ ), por lo cual se puede ver que las mezclas ensayadas con las fibras de desechos industriales cumplen con el requisito, teniendo en cuenta que la mezcla asfáltica SMA es una mezcla discontinua en caliente.

A continuación se podrán observar gráficamente en la Figura 35 a la Figura 37 los resultados del ensayo realizado a cada una de las mezclas asfálticas elaboradas con cada tipo de fibra estabilizadora empleada. Con base en la información en estas figuras se puede observar que la mezcla tipo SMA que menos se deformó fue la que contenía fibras de celulosa (3053  $\mu\text{m}$ ), seguida por la mezcla con fibra de coco (3223  $\mu\text{m}$ ), y la que más se deformó fue la mezcla con fibra de polipropileno (3970  $\mu\text{m}$ ).

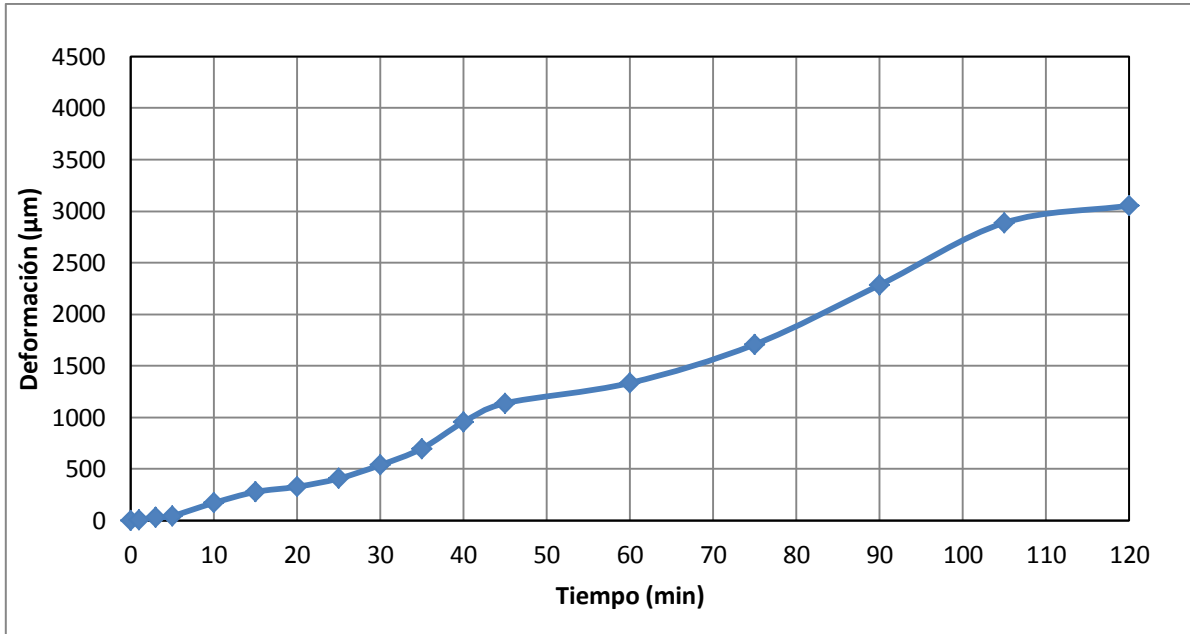


Figura 35. Deformación plástica mezcla SMA con fibras de celulosa

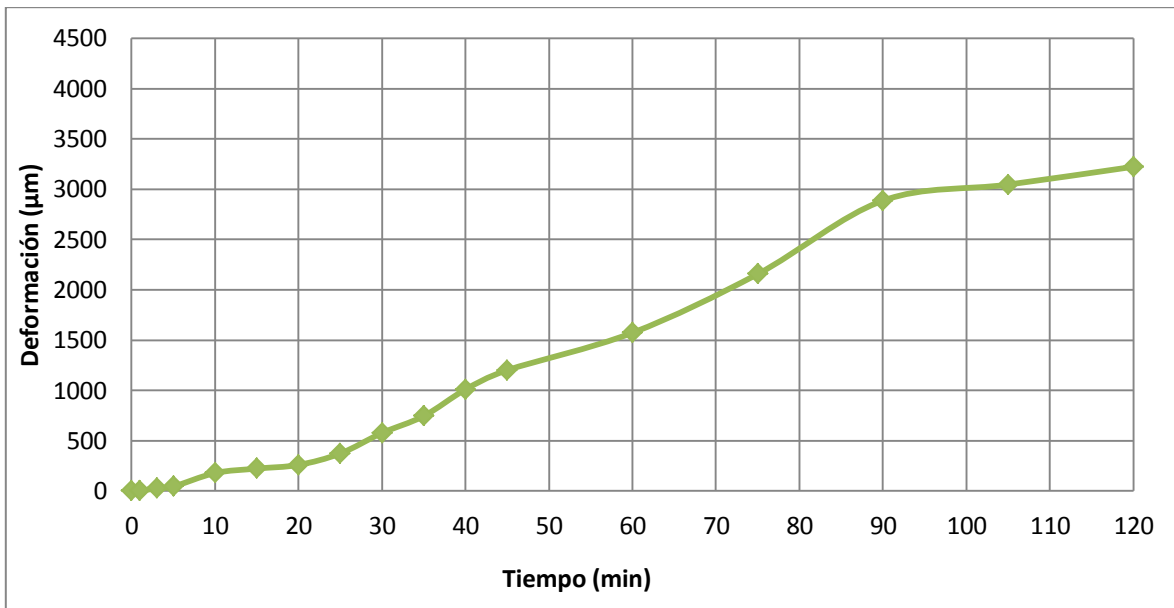
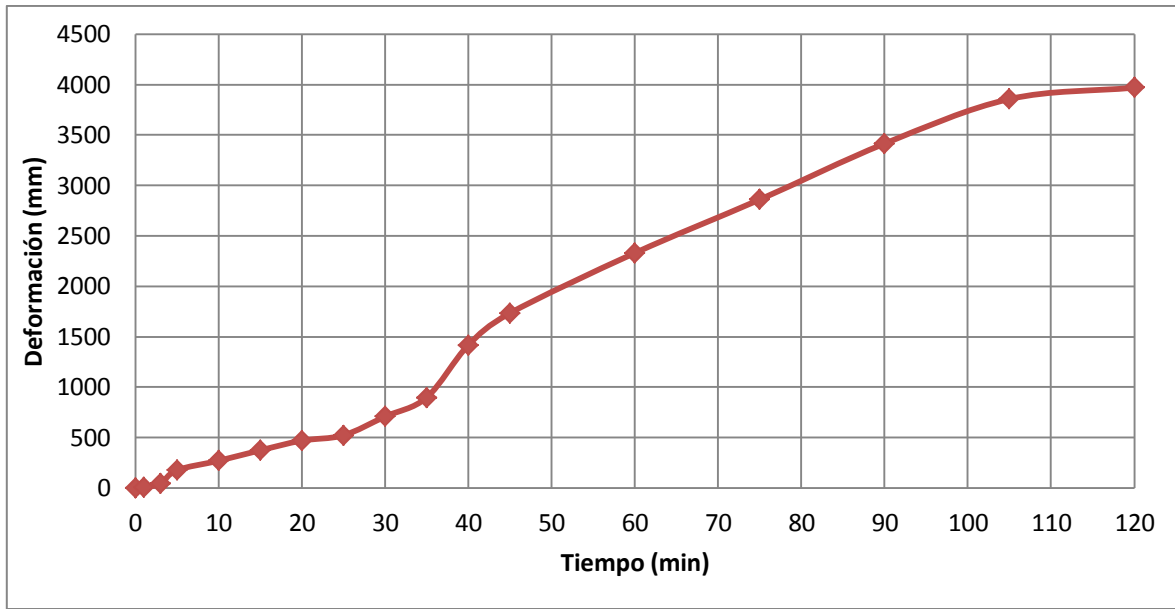


Figura 36. Deformación plástica mezcla SMA con fibras de coco



**Figura 37. Deformación plástica mezcla SMA con fibras de polipropileno**

En la Figura 38 se presenta una gráfica comparativa del ensayo de deformación plástica de las mezclas con adición de fibra de celulosa, fibra de coco y fibra de polipropileno. De la gráfica se puede observar que el comportamiento de la deformación de las mezclas elaboradas con los diferentes tipos de fibras mencionadas anteriormente es similar frente a la carga ejercida por la rueda de la pista de ensayo, lo que indica que las fibras desechas en procesos industriales como estabilizadoras en mezclas SMA no tienen una alteración significativa frente al ensayo, y además, presentan un buen comportamiento frente al ensayo de ahuellamiento, como se esperaría en un tipo de mezcla asfáltica tipo SMA, ya que este tipo de mezcla se diseña para este fin.

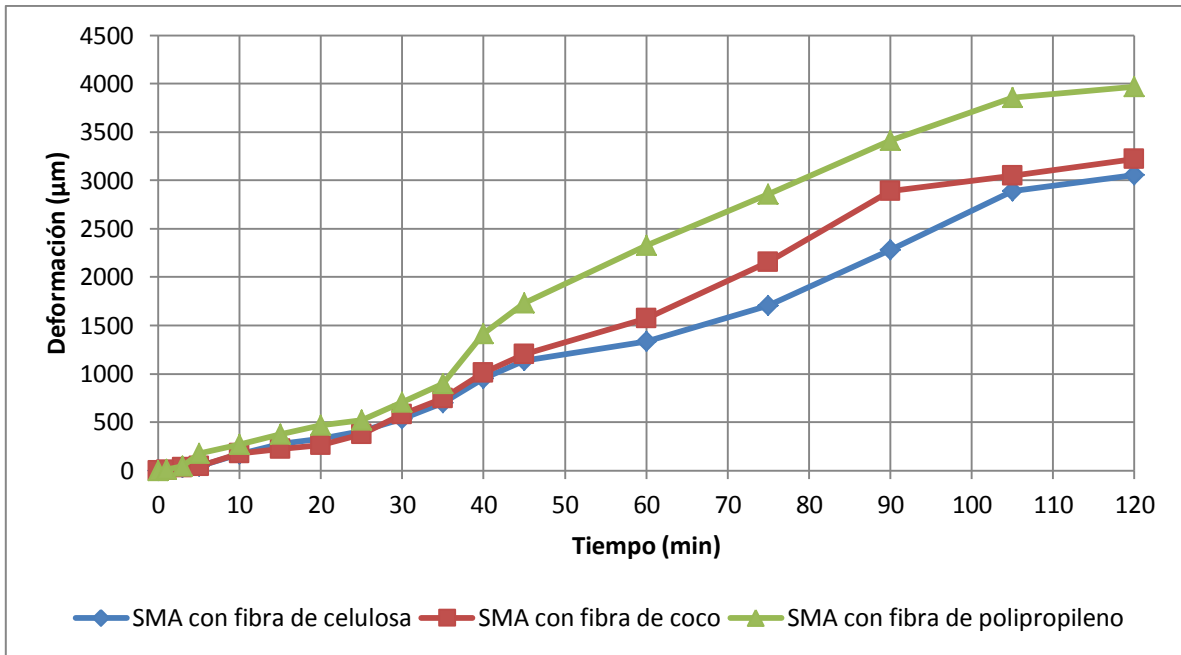


Figura 38. Gráfica comparativa de la deformación plástica de las mezclas elaboradas con diferentes tipos de fibras estabilizadoras.

## 5 DISCUSIÓN

La cantidad de fibra de coco que empleó Oda y colaboradores (2011) para inhibir el escurrimiento del asfalto en una mezcla tipo SMA, de acuerdo con parámetros aceptados según la especificación AASHTO PP-41-02, fue de 0.3% de fibra sobre el peso total de la mezcla. Sin embargo, en ésta investigación se encontró que con un porcentaje de 0.05% de fibras de coco sobre el peso total de la mezcla se logra inhibir el escurrimiento a valores aceptables.

La diferencia de porcentaje de fibra utilizada se ve influenciada directamente por la utilización de asfalto modificado con polímeros tipos II en el presente trabajo de investigación. Según Membrillo (2004), los asfaltos modificados, además de mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica SMA, ayudan a reducir la utilización de la fibra inhibidora para controlar el problema de escurrimiento que se presenta en este tipo de mezclas. A diferencia de este trabajo, Oda y colaboradores (2011) utilizaron asfalto de penetración 50-70 sin modificar, razón por la cual se puede ver una clara diferencia entre los porcentajes de fibra de coco empleados durante el proceso de diseño de la mezcla asfáltica. Por otro lado, de acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, se pudo observar que el porcentaje de 0.3% de adición de fibra de coco en la mezcla asfáltica presentaba grandes cantidades de grumos y problemas en el mezclado, lo cual no es ideal para una mezcla asfáltica, debido a lo que se busca es que las fibras queden distribuidas homogéneamente en toda la mezcla.





## 6 CONCLUSIONES

Utilizando el método de diseño AAHSTO PP 41-02 se determina que el diseño óptimo para la mezcla asfáltica SMA con fibras de celulosa se compone de la gradación de prueba número 2 de este método (ver Tabla 9 y Figura 18), con un porcentaje de asfalto modificado con polímeros tipo II de 6.82%, y un porcentaje de fibras de celulosa del 0.3% sobre el peso total de la mezcla como aditivo inhibidor de escurrimiento.

Se encontró que para controlar el escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA diseñada durante este trabajo de investigación, se debe emplear un 0.05% sobre el peso total de la mezcla de fibra de polipropileno o fibra de coco, con el fin de garantizar que el escurrimiento del asfalto de la mezcla esté dentro de los parámetros admitidos según la especificación AASHTO MP-8-07 (escurrimiento máximo del asfalto en la mezcla 0.35% sobre el peso total de la mezcla).

Utilizando los porcentajes óptimos de fibras de celulosa, fibra de polipropileno y fibra de coco, se pudo observar que la fibra de celulosa tiene una mayor capacidad para inhibir el escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA frente a las otras dos fibras. Sin embargo, al igual que la fibra de celulosa, estas dos fibras de desechos industriales tienen la capacidad de inhibir el escurrimiento del asfáltico a parámetros aceptables según la especificación AASHTO MP-8-07.

Las fibras desechas en procesos industriales empleadas para el diseño de la mezcla asfáltica SMA elaborada en éste trabajo de investigación, alteraron las propiedad mecánicas estudiadas respecto a la mezcla SMA realizada con la fibra

de celulosa. La mezcla con fibra de polipropileno mostró que mejora la susceptibilidad a la humedad en un 8.1%, disminuye el valor del módulo resiliente en un 37% (20° C y 10 Hz), y disminuye en un 36% el valor de la velocidad de deformación en el intervalo de 105 min a 120 min respecto a una mezcla SMA con fibra de celulosa. La mezcla con fibra de coco mostró que mejora la susceptibilidad a la humedad en un 2.9%, disminuye el valor de módulo resiliente en un 26% (20° C y 10 Hz), y aumenta en un 9% el valor de la velocidad de deformación en el intervalo de 105 min a 120 min respecto a una mezcla con fibra de celulosa.

El trabajo de investigación mostró que las fibras desechas en procesos industriales utilizadas en este proyecto alteran las propiedades mecánicas estudiadas de una mezcla asfáltica tipo SMA, respecto a una mezcla SMA con fibra de celulosa; sin embargo, estas fibras resultaron ser aptas para emplearse en el proceso de diseño de este tipo de mezcla, ya que mostraron un comportamiento que cumple frente a las especificaciones requeridas para las mezclas discontinuas en caliente en Colombia (Especificaciones Invías).

Por todo lo anterior, es posible concluir que sustituir las fibras de celulosa por las fibras de desechos industriales estudiadas es una alternativa ecológicamente amigable debido a que utilizando estas fibras se le da un tipo de uso a los desechos industriales; resulta ser económicamente viable debido a que se elimina el costo de importación de las fibras de celulosa, debido a que este tipo de fibras no se producen en el país; y finalmente, resulta ser socialmente aceptada porque este tipo de mezclas son una buena alternativa para nuestras vías, ya que son diseñadas para maximizar la durabilidad.

## 7 RECOMENDACIONES

Debido a los resultados en éste trabajo de investigación, se recomienda realizar el mismo análisis comparativo midiendo las leyes de fatiga para la mezcla asfáltica SMA elaborada con estas tres fibras. En esta investigación no fue posible realizar este ensayo debido a que no se contempló por factores de tiempo.

Se recomienda abrir un campo de investigación en el país por parte de las entidades gubernamentales encargadas del diseño de la infraestructura vial, junto con las universidades, enfocado a la implementación de la mezcla asfáltica SMA, pues las ventajas de este tipo de mezcla mencionadas en el marco teórico son una buena alternativa para nuestras vías.

Se recomienda evaluar las propiedades mecánicas de este tipo de mezcla elaborada con fibras de celulosa, al igual que con las fibras empleadas en este trabajo de investigación, en un tramo de prueba en campo, con el objetivo de evaluar su comportamiento frente a una situación real de tránsito y factores ambientales.



## 8 BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. *Draindown characteristics in uncompacted asphalt mixture AASHTO T 305.*
- AASHTO. (2006). *Diseño del stone mastic asphalt (SMA) - AASHTO: PP- 41-02.*
- AASHTO. (2006). *Especificación estándar para stone mastic Asphalt (SMA) AASHTO: MP-8-07.*
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., & Shafiq, P. *Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. Materials & Design, 32(10), 4844-4849.*
- Andrade, A. R. J. (2005). *Mezcla asfáltica de matriz gruesa " stone mastic asphalt" para Bogotá.*
- Casey, D., McNally, C., Gibney, A., & Gilchrist, M. D. (2008). *Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. Resources, Conservation and Recycling, 52(10), 1167-1174.*
- Chiu, C.-T., & Lu, L.-C. (2007). *A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber. Construction and Building Materials, 21(5), 1027-1033.*
- Ibrahim M, A. (2006). *Laboratory comparison study for the use of stone matrix asphalt in hot weather climates. Construction and Building Materials, 20(10), 982-989.*
- INVIAS. (2002). *Artículo 400. Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos.*
- INVIAS. (2002). *Artículo 452. Mezcla discontinua en caliente para capa de rodadura.*
- INVIAS. (2007). *Especificaciones generales de construcción y normas de ensayo para materiales de carreteras.*
- Kraemer, C. (2009). *Ingeniería de carreteras.*
-

- Membrillo, O. (2004). *Acondicionamiento y remodelación de la carpeta asfáltica en el autódromo de los hermanos Rodríguez utilizando el sistema S.M.A. con Viatop 66*. Instituto tecnológico de la construcción.
- Oda, S., Leomar Fernandes Jr, J., & Ildefonso, J. S. (2011). *Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures*. *Construction and Building Materials*, 26(1), 13-20.
- Putman, B. J., & Amirhanian, S. N. (2004). *Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures*. *Resources, Conservation and Recycling*, 42(3), 265-274.
- Reyes, F. A. (2003). *Diseño Racional de Pavimentos*.
- Reyes, F & Figueroa, S. (2012). *Jornadas Internacionales del Asfalto. Influencia del asfalto expuesto al agua en el daño por stripping en pavimentos, Bogotá*.
- Rodríguez, O. (2011). *Mezclas con mantenimiento anticipado Stone Mastic Asphalt (SMA)*. Universidad Veracruzana, Xalapa.
- Sabogal, F. S. *Notas de Clase (Revestimientos Bituminosos Modulo 9)*.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., & Chen, Y. (2007). *Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures*. *Building and Environment*, 42(7), 2580-2585.
- Xue, Y., Hou, H., Zhu, S., & Zha, J. (2009). *Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact*. *Construction and Building Materials*, 23(2), 989-996.
- Yupanqui, F. (2009). *Diseño de mezcla asfáltica en caliente SMA*. Facultad de Ingeniería. Chimbote, Universidad Católica los ángeles de Chimbote.
- Zúñiga, R., & Aguila, M. (2002). *Estudio y evaluación preliminar de la mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA) mediante un tramo de prueba*.

**ANEXO A - CARACTERIZACIÓN Y CURVA REOLÓGICA DEL ASFALTO**

Ver ANEXO A en medio magnético.

## ANEXO B – ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO

Ver ANEXO B en medio magnético.



**ANEXO C – ENSAYOS DE MODULO RESILIENTE Y DEFORMACION PLASTICA**

Ver ANEXO C en medio magnético.

**ANEXO D- REGISTO FOTOGRÁFICO**

Ver ANEXO D en medio magnético.