

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS MEZCLADOS CON FIBRAS DE POLIPROPILENO
/ POLIETILENO**

**JHOJAN FERNANDO SERRANO P.
RAFAEL ANDRÉS FUENTES M.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

Cartagena

2009

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS MEZCLADOS CON FIBRAS DE POLIPROPILENO
/ POLIETILENO**

**JHOJAN FERNANDO SERRANO P.
RAFAEL ANDRÉS FUENTES M.**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

**Director de Investigación
Diego Álvarez Hernández
Ingeniero Civil Especialista en Vías y Pavimentos**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

Cartagena

2009

2

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Jurado

Cartagena de Indias, 3 de Noviembre de 2009

“Dedico el logro de este esfuerzo a Dios Padre, Dios hijo y Dios Espíritu, por ser quien me llevara a subir este peldaño y apoyarme en la carrera de mi vida. También dedico este triunfo a las tres personas con las que sin ellas, no estaría donde hoy estoy, mi Padre, Marcos Fuentes Mendoza, mi Madre, Lucila Marrugo Banquez y mi Hermano, Carlos Fuentes López.”

Rafael Andrés Fuentes Marrugo

“Hoy quiero dedicarle este triunfo a Dios por mi existencia, por ser mi guía, mi apoyo y mi amigo en cada momento de mi vida pero sobre todo por estar en mí, y darme la fortaleza y voluntad de seguir siempre adelante. A mis padres Fernando Serrano Cuellar Y María Pineda Marzan por el apoyo que me brindan y cada una de las enseñanzas que me dan en la vida. A mis hermanos porque a través de ellos, encuentro fuerzas para seguir a delante. A toda mi familia, por haberme acompañado durante las distintas etapas de mi vida, siempre con el propósito de bendecirme y protegerme. A mis amigos, por todos los momentos en los que me dieron toda la fortaleza, el ánimo y por permitirme vivir situaciones que han estructurado y aportado en la personalidad que hoy en día soy.”

Jhojan Fernando Serrano Pineda

AGRADECIMIENTOS

Damos gracias primero a Dios por habernos brindado la oportunidad de vivir, por ser nuestro guía y nuestro apoyo fundamental en cada uno de los proyectos que emprendemos día tras día en la vida.

A nuestros padres, hermanos y demás familiares por el apoyo brindado, por la confianza depositada en nosotros y por la motivación que nos dieron para salir adelante con este proyecto.

A nuestros amigos y compañeros por habernos dado la oportunidad de compartir momentos de alegría, felicidad, angustia y retos, en los que junto a ellos, nos dieron el molde de darnos el perfil y contribuir en la personalidad que hoy en día somos.

A la Universidad Tecnológica de Bolívar por haber sido un puente para nosotros poder realizar nuestro sueño, a todo su cuerpo docente por las grandes enseñanzas que nos dieron en el transcurso de estos años, las cuales estarán en nosotros para toda nuestra vida.

A nuestro director de Proyecto Diego Álvarez Hernández y a todos los que integran a Promotora Montecarlo Vías S.A, por su ayuda incondicional, por su gran paciencia para con nosotros pero sobre todo por la gran motivación que nos dio para poder hoy alcanzar, la culminación de este proyecto, uno de nuestros más grandes sueños.

A todos gracias.

Cartagena D. T y C, 3 de Noviembre de 2009

Señores

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

Comité de Investigación de Proyectos de Ingeniería Ambiental y Civil

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

La Ciudad

Referencia: Tesis de Grado de Ingeniería Civil.

Asunto: Presentación de Informe Final de Tesis de Grado.

Por la presente nos permitimos hacer entrega formal del proyecto de grado titulado “ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS MEZCLADOS CON FIBRAS DE POLIPROPILENO / POLIETILENO”, comprendiendo que es requisito necesario para obtener el título de Ingeniero Civil.

Cordialmente,

Rafael Andrés Fuentes Marrugo
C.C. 1.047.392.150 de C/gena

Jhojan Fernando Serrano Pineda
C.C. 73.205.314 de C/gena

Cartagena D. T y C, 3 de Noviembre de 2009

Señores

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

Comité de Investigación de Proyectos de Ingeniería Ambiental y Civil

Biblioteca Luís Enrique Borja Barón

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

La Ciudad

Referencia: Tesis de Grado de Ingeniería Civil.

Asunto: Autorización para Montaje del Informe Final de Tesis de Grado en Plataforma Virtual o en Página Web de la Universidad.

Por la presente nos permitimos dar la autorización formal para que el proyecto de grado titulado “ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS MEZCLADOS CON FIBRAS DE POLIPROPILENO / POLIETILENO”, sea expuesto en la página web de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Cordialmente,

Rafael Andrés Fuentes Marrugo
C.C. 1.047.392.150 de C/gena

Jhojan Fernando Serrano Pineda
C.C. 73.205.314 de C/gena

Cartagena D. T y C, 3 de Noviembre de 2009

Señores

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

Comité de Investigación de Proyectos de Ingeniería Ambiental y Civil

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

La Ciudad

Referencia: Tesis de Grado de Ingeniería Civil.

Asunto: Presentación Formal del Director del Proyecto de Grado.

Por la presente hago constar que siendo director del trabajo de grado titulado “ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS MEZCLADOS CON FIBRAS DE POLIPROPILENO / POLIETILENO”, hecho por los estudiantes Rafael Andrés Fuentes Marrugo y Jhojan Fernando Serrano Pineda, que estoy de acuerdo con los objetivos y alcances obtenidos en el proyecto.

Cordialmente,

Diego Álvarez Hernández

Ingeniero Civil, Especialista en Vías Y Pavimentos

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE ECUACIONES.....	11
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	18
2.1. OBJETIVO GENERAL	18
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
4. AGREGADOS	22
4.1. GENERALIDADES	22
4.2. ORIGEN DE LOS AGREGADOS	22
4.3. CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS	23
4.3.1. SEGÚN SU TAMAÑO.....	23
4.3.2. SEGÚN SU PROCEDENCIA.....	24
4.4. PROPIEDADES, FÍSICAS Y MECÁNICAS.....	24
4.4.1. PROPIEDADES FÍSICAS.....	25
4.4.1.1. FORMA Y TEXTURA.....	25

4.4.1.2. DENSIDAD O PESO ESPECÍFICO	26
4.4.1.2.1. Densidad Nominal.....	27
4.4.1.2.2. Densidad Absoluta.....	28
4.4.1.2.3. Densidad Aparente	28
4.4.1.3. POROSIDAD Y ABSORCIÓN	29
4.4.1.5. GRANULOMETRÍA	29
4.4.1.5.1. Análisis Granulométrico.....	30
4.4.1.5.2. Curvas De Granulometría.....	31
4.4.2. PROPIEDADES MECÁNICAS	32
4.4.2.1. TENACIDAD	33
4.4.2.2. ADHERENCIA	33
4.4.2.3. DUREZA.....	33
4.4. SUSTANCIAS Y FACTORES PERJUDICIALES	34
4.4.1. SANIDAD DE LOS AGREGADOS	35
5. ASFALTO	36
5.1. GENERALIDADES.....	36
5.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y ESTADO DE ARTE DEL ASFALTO	36
5.2.1. MEZCLA ASFÁLTICAS CON POLÍMEROS	38
5.2.2. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN DEL TEMA.....	40
5.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ASFALTO.....	41
5.4. CLASIFICACIÓN DE LOS ASFALTOS	42
5.4.1. ASFALTOS LÍQUIDOS	42
5.4.2. EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	43
5.4.3. CEMENTOS ASFÁLTICOS (AC – ASPHALT CEMENT)	44
5.4.3.1 PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS.....	45
5.4.3.1.1 Susceptibilidad Térmica.....	45
5.4.3.1.2 Endurecimiento y Envejecimiento.....	45
5.4.3.1.3. Adhesión y Cohesión	45

5.4.3.1.4 Durabilidad	46
5.4.3.2. ENSAYOS PROPORCIONADOS AL CEMENTO ASFALTICO.....	46
5.4.3.2.1. Ensayos para Medir la Consistencia del Cemento Asfáltico	46
5.4.3.2.1.1. Ensayo de Viscosidad	46
5.4.3.2.1.2. Ensayo de Penetración.....	47
5.4.3.2.1.3. Ensayo de Punto de Ablandamiento	48
5.5. MEZCLA ASFÁLTICA.....	48
5.5.1. CARACTERÍSTICAS.....	48
5.5.1.1. ESTABILIDAD	49
5.5.1.2. DURABILIDAD	49
5.5.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	49
5.5.2.1. DENSIDAD O PESO ESPECÍFICO DE LA MEZCLA	49
5.5.2.2. VACÍOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA	50
5.5.2. CLASIFICACIÓN	50
6. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES A UTILIZAR.....	51
6.1. AGREGADOS	51
6.2. ASFALTO.....	52
6.3. FIBRAS ESTRUCTURALES	53
6.3.1. DATOS TÉCNICOS DE FIBRAS.....	54
7. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y CÁLCULOS CUANTITATIVOS.....	55
7.1. MÉTODO MARSHALL PARA DISEÑOS DE MEZCLAS.....	55
7.1.1. METODOLOGÍA ADOPTADA SIN SIKAFIBER AD	55
7.1.1.1. GENERALIDADES	55
7.1.1.2. BOSQUEJO DEL MÉTODO	56
7.1.1.3. EQUIPOS PARA EL ENSAYO.....	57
7.1.1.4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.....	61
7.1.1.4.1. Números de Muestras.....	61

7.1.1.4.2. Preparación de los Agregados	62
7.1.1.4.3. Determinación de Temperaturas de Mezclas y Compactación...	64
7.1.1.4.4. Preparación de las Mezclas	65
7.1.1.4.5. Compactación de las Mezclas	68
7.1.1.5. ENSAYOS HECHO A PROBETAS COMPACTADAS	70
7.1.1.5.1. Determinación del Peso Específico de Probetas Compactadas.	71
7.1.1.5.2. Ensayo Marshall.....	71
7.1.1.5.3. Análisis de Densidad y Vacíos	74
7.1.2. METODOLOGÍA ADOPTADA CON SIKAFIBER AD	78
CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS.....	85

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación según el Tamaño de las Partículas	24
Tabla 2. Denominación y Aberturas de Tamices	30
Tabla 3. Tabla de resultados luego de aplicar la NTC – 77	31
Tabla 4. Caracterización normas INVIAS de los agregados para Mezclas	52
Tabla 5. Características del Asfalto utilizado en la MDC – 2	53
Tabla 6. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente	63

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Düsseldorf, Alemania	15
Figura 2. Tamices utilizados en Análisis Granulométrico	30
Figura 3. Curva de Granulometría o de Cribado	32
Figura 4. Composición Química del Asfalto	42
Figura 5. Asfalto Líquido	43
Figura 6. Emulsión Asfáltico.....	43
Figura 7. Cemento Asfáltico	44
Figura 8. Viscosímetro Saybolt – Furol	47
Figura 9. Penetrómetro	47
Figura 10. Agregados Empleados en la Mezcla Asfáltica	51
Figura 11. Molde y Pedestal para Compactación.....	57
Figura 12. Horno Calentar Materiales y Máquina de Extracción de Asfalto	58
Figura 13. Máquina Ensayo Marshall y Caja Termostática Baño de María.....	58
Figura 14. Estufa Eléctrica y Lavamanos.....	59
Figura 15. Termómetro en °C y °F	59
Figura 16. Balanzas y/o Pesos Eléctricos	60
Figura 17. Recipientes y Cucharones, espátulas para manipular materiales	60
Figura 18. Martillo para Compactación Marshall	61
Figura 19. Muestras para Ensayo Marshall – Briquetas de Asfalto.....	62
Figura 20. Toma de Muestras para Ensayo Marshall y Densidades	64
Figura 21. Gráfica para Establecer Temperatura Mezclado y Compactación ..	65
Figura 22. Mezcla de Agregados por Dosificación Analítica	66
Figura 23. Colocación de la Mezcla Asfáltica y Adición Asfalto	67
Figura 24. Mezcla de Agregados con el Cemento Asfáltico	67
Figura 25. Preparación del Molde Donde se Depositará Mezcla	68

Figura 26. Compactación de la Mezcla Asfáltica.....	69
Figura 27. Briquetas o Muestras de Ensayos Marshall	70
Figura 28. Baño de María de las Briquetas	72
Figura 29. Máquina de Ensayo Marshall	73
Figura 30. Estabilidad sin Adición de Sikafiber AD	81
Figura 31. Estabilidad con Adición de Sikafiber AD	81

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Densidad Nominal.....	27
Ecuación 2. Densidad Absoluta.....	28
Ecuación 3. Densidad Aparente	28
Ecuación 4. Capacidad de Absorción	29
Ecuación 5. Peso Específico Actual de la Mezcla	71
Ecuación 6. Peso Específico de Agregados Incluidos en la Mezcla	74
Ecuación 7. Peso Específico Máximo Teórico	75
Ecuación 8. Volumen que Ocupa el Cemento Asfáltico en Mezcla	75
Ecuación 9. Volumen que Ocupan los Agregados en la Mezcla	76
Ecuación 10. Volumen que Ocupan los Vacíos en la Mezcla.....	76
Ecuación 11. Porcentaje de Vacíos en los Agregados Minerales.....	76
Ecuación 12. Porcentaje de Vacíos que hay en la Mezcla	76
Ecuación 13. Porcentaje de Vacíos Ocupados o Llenos con Asfalto.....	77

RESUMEN

El artículo refiere al estudio y análisis experimental en laboratorio del comportamiento mecánico de la mezcla densa en caliente tipo dos (2), con la adición de fibras de polipropileno – polietileno. Esta mezcla hecha con cemento asfáltico de la refinería de Barrancabermeja; con agregados de cantera cercana a la región de Bolívar; y con fibras de Sikafiber AD, de SIKA S.A.

Primeramente, se inicia con la caracterización por capítulos de los materiales que son utilizados dentro de cada uno de los ensayos, comenzando con un marco teórico general de los agregados y de todo lo relacionado con asfalto. Después se va al punto de sintetizar la caracterización de los materiales con ciertas normativas aplicables para cada uno de ellos.

Una vez definido el marco teórico, se define el marco de la metodología experimental que se lleva a cabo en la investigación, definiendo paso por paso, lo hecho en las experiencias o ensayos que se llevaron a cabo. Se evalúan los resultados desde la perspectiva mecánica, viendo los puntos sobresalientes de la estabilidad, el flujo y el análisis de densidades, y vacíos, de la mezcla. Se observó que, a medida se va adicionando fibras de Sikafiber AD, a la MDC – 2, en esta va aumentando constantemente, la estabilidad; se observa que, dentro de los rangos de porcentajes de adición de fibras, el flujo permanece en valores aceptables por normativa INVIAS; se denota que, el peso unitario de la mezcla va disminuyendo cada vez más, conforme se va adicionando fibra; y que por último, al ir disminuyendo los pesos unitarios de cada uno de los juegos de muestras por porcentaje de adición de fibras, los vacíos, tanto de aire como de agregados, van aumentando, a un ritmo constante.

Cabe decir que estos comportamientos, evaluados desde la mecánica (estabilidad y fluencia) y desde el punto de densidades y vacíos, dan un panorama alentador a la experimentación de los asfaltos modificados con materiales que tiendan a tener características que puedan mejorar las propiedades mecánicas y dinámicas de los materiales utilizados en el sector de la construcción vial. Estudiando este material investigativo, se plantea la pregunta que puede abrir una pequeña investigación adicional, la cual radica en qué pasaría si en vez de fijar un solo contenido de cemento asfáltico, se va variando los porcentajes de fibra, para los mismos porcentajes de asfalto que se incluyeron en el diseño de la mezcla.

Palabras Claves: mezcla densa en caliente tipo dos (2), fibra de polipropileno – polietileno, estudio y análisis experimental, comportamiento mecánico, estabilidad, flujo, densidades y vacíos.

INTRODUCCIÓN

El nivel de desarrollo socio-económico de un país, se mide a través de la calidad y densidad de la red vial de sus entidades territoriales.

Las vías siempre tendrán un impacto en la calidad de vida de quienes vivan cerca a ellas, o circulen sobre ellas, puesto que por medio de las mismas, se establece un lazo que integra todos los sectores y actividades que puedan soportar el movimiento de una nación (movimiento representado en el comercio, en la economía, en la salud, educación, y en un sin número de otros componentes).



Figura 1. Düsseldorf, Alemania

La anterior imagen da muestra de la calidad y de las enormes magnitudes de estos proyectos viales en ciudades Europeas, por lo que observándolos motiva entonces, a aplicar este tipo de proyectos en Colombia.

Cuando nace la idea de estructurar obras de infraestructuras viales, se llega enseguida a la concepción, generalmente, de construirlas en pavimento rígido o en pavimento flexible, ya sea la necesidad o razones que tenga el contratante; al montarse la maquinaria de construcción que se va a encargar de levantar y hacer realidad la petición del contratante, el contratista se crea la obligación mental de hacer una vía que tenga una aceptación de conformidad, por factores como buena presentación estética, excelente funcionamiento estructural, vida útil larga y garantizada, de buena viabilidad económica, y otros factores más que depende del proceso constructivo que se lleve en el avance del proyecto, como también, en la calidad del material del pavimento, ya sea de concreto hidráulico, o de concreto asfáltico.

Y es precisamente, en este último punto que hace referencia de la calidad del material del pavimento, en donde se desea llevar a cabo una investigación con el objeto de mejorar la calidad de tales materiales. El material con el que se quiere hacer la investigación, es el del concreto asfáltico.

La construcción de obras viales en asfalto, se ha incrementado en los últimos años, en nuestra nación. Proyectos que se están adelantando a la fecha en Cartagena, como el sistema de transporte masivo denominado TRANSCARIBE; las vías de las concesiones viales que tienen que ser mantenidas y que están en proyecto, también se suman al listado de infraestructura vial en asfalto; el proyecto que desea mejorar las conexiones viales entre los puertos de la región Caribe localizados en las ciudades de Barranquilla y Cartagena, denominado como proyecto vial “Ruta Caribe”, acrecienta más la posición de realizar investigaciones que mejoren la calidad del material del concreto asfáltico utilizado en la construcción estas vías.

Por lo tanto, la investigación se basa en la idea de dar un aporte frente a una nueva alternativa para mejorar la calidad del asfalto; mejora que busca ser representada en la funcionalidad estructural del concreto asfáltico y en el comportamiento mecánico del pavimento asfáltico.

El proyecto de investigación busca la obtención de un diseño de concreto asfáltico mezclado con fibras sintéticas estructurales de **Polipropileno / Polietileno** que mejore las propiedades mecánicas del mismo.

1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, las capas de rodadura de pavimentos asfálticos, son expuestas a la acción directa de agentes atmosféricos (lluvias, variación de temperatura) y a la fatiga causada por el tránsito vehicular; además, el empleo de materiales que en muchos casos no cumplen con los estándares de calidad necesarios, hacen que la vida útil del pavimento, no se aproxime al periodo de diseño.

Por estos factores vemos que en la malla vial de la ciudad de Cartagena, presenta en la mayoría de sus calzadas, un deterioro representado en hundimientos, “piel de cocodrilo”, ahuellamiento, huecos, etc.

Dentro de las dos últimas décadas, la implementación de fibras sintéticas de ciertos polímeros en pavimentos asfálticos, ha reforzado las propiedades estructurales del mismo, mejorando así, el comportamiento mecánico y dinámico de la estructura del pavimento.

Por tal razón, se desea resolver el problema de establecer cuál es la cantidad óptima de fibra de **POLIPROPILENO / POLIETILENO** en base a la cantidad de mezcla asfáltica para que se obtenga el mejor comportamiento mecánico posible, del pavimento asfáltico.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema principal que quiere ser resuelto, es el siguiente:

¿Cuál es la dosificación óptima en porcentaje, de fibras SIKAFIBER AD de Sika, en base al peso de los agregados, para obtener el mejor comportamiento mecánico posible, de la mezcla asfáltica modificada?

2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto causado por fibras estructurales de polipropileno / polietileno en concretos asfálticos, mediante el estudio y el análisis del comportamiento mecánico del pavimento, para así determinar la dosis óptima porcentual de fibra sintética que se debe emplear en la mezcla asfáltica con respecto al peso de agregados, que produzca el mejor comportamiento mecánico posible.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Presentar un marco teórico completo sobre, las características y propiedades de los materiales a utilizar, y los conceptos necesarios para un mejor seguimiento dentro de la investigación.
- Señalar las investigaciones en las que se ha utilizado polímeros para la mejora del concreto asfáltico.
- Identificar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales a utilizar en la investigación, a través de una caracterización individual de cada uno de ellos.
- Definir la metodología experimental que se va seguir dentro de la investigación.
- Determinar la dosis óptima de asfalto en porcentaje respecto al peso de los agregados de la mezcla.
- Establecer los porcentajes de adición de fibras de Polipropileno / Polietileno, mezclados por vía seca (respecto al peso de agregados) dentro de la mezcla densa en caliente tipo dos (2).

- Evaluar el comportamiento mecánico, a través de ensayos aplicados a la mezcla de asfalto con fibras de Polipropileno – Polietileno.
- Estimar el porcentaje de adición de Sikafiber AD, en la mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC – 2), mezclado por vía seca, que proporcione el mejor comportamiento mecánico al concreto asfáltico.

3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Al ver el mal estado de la malla vial de la ciudad, en donde al mirar hacia la mayoría de los pavimentos asfálticos, se observa que son varios los que presentan algún desperfecto en la vía, como lo son huecos de todos los tamaños, frecuentes abultamientos en la carpeta asfáltica, una capa de rodadura que no ofrece una textura lo suficientemente lisa como para la comodidad de los usuarios de la misma, entre otros daños, los cuales todos juntos, hacen pensar que es necesario adelantar alguna investigación que vaya encaminada a encontrar una posible alternativa que busque solucionar o por lo menos aminorar el problema de los frecuentes daños de las calzadas en asfalto.

Bajo los anteriores hechos, nace la idea de implementar un método que no ha sido utilizado en la ciudad de Cartagena, según nuestro entendimiento, y que ha sido un tema de investigación reciente en países como Brasil y en la ciudad de Santa Fe de Bogotá.

El método que pareció interesante (para los autores de este documento) de proponer luego de una exhaustiva investigación respecto a la búsqueda de alternativas que suplieran la necesidad de mermar el problema antes mencionado, es el que tiene que ver con el refuerzo que parece efectuar las fibras de polipropileno en pavimentos asfálticos, para la posterior utilización en la malla vial de la ciudad de Cartagena.

Ahora, se pretende aplicar un polímero adicional, junto con el polipropileno, mezclado en la composición de la fibra sintética estructural, el cual es el polietileno, ya que no se ha establecido ninguna implementación **antes vista** con

este tipo de material de dos polímeros (solo con el polipropileno, y con el SBS – poli estireno/butadieno/estireno).

Por tal razón, la investigación que se desea entablar, sobre el uso de polímeros dentro de la mezcla del concreto asfáltico, es nueva, de manera que solo se han adelantado la utilización de polímeros como el poli estireno – butadieno – estireno, o SBS (investigación hecha en la Universidad Tecnológica de Bolívar hecha por Myriam Esther Álvarez Torres), y la implementación de polipropileno (investigación hecha en la Universidad Militar Nueva Granada¹) en la composición de la mezcla asfáltica. Ambos materiales productos del procesamiento hecho con estos dos polímeros, han establecido que mejoran significativamente el comportamiento del concreto asfáltico.

Lo que es diferente es la implementación de otro material presentado en forma de fibras monofilamentadas y estructurales, a base de polipropileno y polietileno.

Todos los anteriores argumentos, deberían alentar a la comunidad investigativa, a que se dé la oportunidad de adelantar esta investigación, para así averiguar el efecto que causaría en el asfalto, y si es técnica y económicamente viable, determinar la dosis óptima de fibras en la mezcla del concreto asfáltico para tener la posibilidad de que el uso en la pavimentación de vías en asfalto, sea generalizado en gran medida.

¹ Extraído del informe del proyecto de investigación hecho en la Universidad Militar Nueva Granada, página: http://www.umng.edu.co/www/resources/r15_02.pdf

4. AGREGADOS

4.1. GENERALIDADES

En el sentido general de la palabra los agregados también llamados áridos son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales que aglomerados junto con el cemento asfáltico, conforman una piedra artificial, utilizada en pavimentos flexibles o de asfalto.

En sí, los agregados se consideran como aquellos materiales que teniendo una resistencia propia suficiente (resistencia del grano), tiene una adherencia suficiente con la mezcla asfáltica como para componer el pavimento. Son utilizados, tanto en capas de mejoramiento de subrasante, de subbases granulares, de bases granulares, como también, en la composición del mismo concreto asfáltico.

El suelo es considerado como un cúmulo de agregados naturales de granos minerales, con o sin componentes orgánicos, que pueden separarse por medios mecánicos comunes, tales como la agitación en agua, o por la forma más práctica, por la separación granular mediante un proceso de tamizado.

4.2. ORIGEN DE LOS AGREGADOS

Todo agregado o árido proviene de una alteración inicial de las rocas, causada por la acción de fenómenos atmosféricos durante un tiempo considerable. Este proceso de alteración, denominado meteorización, se realiza por desintegración o descomposición de las rocas.

La desintegración es un proceso mecánico que divide las rocas en fragmentos más pequeños que la roca original o madre, y que conserva las propiedades físicas y químicas de la roca madre.

La descomposición en cambio, es aquel proceso por el cual la roca madre se transforma en un material producto de diferentes propiedades físicas y químicas.

Los causantes de estos procesos de meteorización son llamados agentes de intemperismo. Estos procesos son de naturaleza física, química y/o biológica.

De los anteriores procesos, surgen dos tipos de agregados que son clasificados, inicialmente, a groso modo, como los que son transportados por agentes físicos de meteorización, desde el punto donde estaba la roca madre hasta donde quedan depositados finalmente, ya modificados, y los que quedan cerca al lugar donde está ubicada la roca madre, después de que sufrieron el proceso de meteorización.

4.3. CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS

En general, los agregados se han clasificado de varias maneras a través del tiempo, pero principalmente desde los puntos de vista de su tamaño, procedencia y densidad.

4.3.1. SEGÚN SU TAMAÑO

La forma más generalizada de clasificar los agregados es según su tamaño, el cual varía desde fracciones de milímetros hasta varios centímetros en sección transversal. Esta distribución del tamaño de las partículas es lo que se conoce con el nombre de granulometría.

La fracción fina de este material, cuyas partículas tienen un diámetro inferior a 4.76 mm y no menor de 0.074mm (74µm), es lo que comúnmente se llama arena y

la fracción gruesa, o sea aquellas partículas de un diámetro superior 4.76mm, es la que normalmente se denomina agregado grueso o simplemente grava. Una clasificación más específica es la que se muestra en la tabla, donde se indican los nombres más usuales de las fracciones.

Tamaño de las partículas en mm (pulg)	Denominación más corriente	Clasificación
Inferior a 0.002 Entre 0.002-0.074(No. 200)	Arcilla limo	Fracción muy fina
Entre 0.074-4.76 (No. 200)-(No. 4)	Arena	Agregado fino
Entre 4.76-19.1 (No. 4)-(No. ¾")	Gravilla	Agregado grueso
Entre 19.1-50.8(No. ¾")-(2")	Grava	
Entre 50.8-152.4 (2")-(6")	Piedra	
Superior a 152.4(6")	Rajón, piedra bola	

Tabla 1. Clasificación según el Tamaño de las Partículas

4.3.2. SEGÚN SU PROCEDENCIA

Son todos aquellos que provienen de la explotación de fuentes naturales tales como depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de ríos) o de glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversa rocas y piedras naturales. Se pueden aprovechar en su granulación natural o triturándolos mecánicamente según sea el caso, de acuerdo con las especificaciones requeridas.

4.4. PROPIEDADES, FÍSICAS Y MECÁNICAS

Los agregados, como los elementos de más volumen dentro de las mezclas asfálticas, influyen mucho en el comportamiento mecánico y dinámico del aglomerado final del concreto asfáltico. Por tal motivo, caracterizar los agregados

desde todos los puntos de vistas de sus propiedades, es de vital importancia, ya que da una imagen de cómo va a comportarse dentro del pavimento, junto con el ligante del asfalto y otros aditivos que se le agreguen a la mezcla.

Siguiendo entonces en este orden de ideas, se presenta a continuación una serie de propiedades, subdivididas cada unas, como físicas y mecánicas.

4.4.1. PROPIEDADES FÍSICAS

Las propiedades que a continuación se relacionan y se definen, son las propiedades de mayor importancia para poder tener claro los conceptos que más adelante se necesitan para poder tener un claro entendimiento en el curso de la investigación.

Estas propiedades se presentan a continuación.

4.4.1.1. FORMA Y TEXTURA

La forma y textura de las partículas de agregados influyen mucho en los resultados a obtenerse en las propiedades del concreto asfáltico. Existiendo un efecto de anclaje mecánico que resulta más o menos favorable en relación con el tamaño, la forma, la textura superficial y el acomodo entre ellas, también se producen fenómenos de adherencia entre el ligante, que es el asfalto, y los agregados, condicionados por estos factores; todo estos puntos contribuyen en el comportamiento de resistencia y durabilidad de la estructura del pavimento en asfalto.

Por naturaleza los agregados tienen una forma irregularmente geométrica, compuesta por combinaciones aleatorias de caras redondeadas y angularidades.

Bryan Mather establece que: “la forma de las partículas está controlada por la redondez o angularidad, y la esfericidad, dos parámetros relativamente independientes”.

En términos meramente descriptivos, la forma de los agregados se define en:

- Angular : poca evidencia de desgaste en caras y bordes.
- Sub - angular : evidencia de algo de desgaste en caras y bordes.
- Sub - redondeada : bordes casi eliminados.
- Muy redondeadas : sin caras ni bordes.

La esfericidad resultante de agregados procesados, depende mucho del tipo de proceso de trituración y la manera como se opera. La redondez está más en función de la dureza y resistencia al desgaste de la abrasión.

La textura representa qué tan lisa o rugosa es la superficie del agregado. Es una característica ligada a la absorción, pues los agregados muy rugosos tienen mayor absorción que los lisos.

4.4.1.2. DENSIDAD O PESO ESPECÍFICO

La densidad es una propiedad física de los agregados y está definida por la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada, lo que significa que depende directamente de las características del grano del agregado.

Como generalmente las partículas del agregado tienen poros tanto saturables como no saturables, dependiendo de su permeabilidad interna pueden estar vacíos, parcialmente saturados o totalmente llenos de agua, se genera entonces, una serie de estados de humedad a los que corresponde idéntico número de tipos de densidad, descritos en las Normas Técnicas Colombianas 176 y 237. La que

más interesa en el diseño de mezclas es la densidad aparente que se define como la relación que existe entre el peso del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material incluidos todos los poros (saturables y no saturables).

Este factor es importante para el diseño de mezclas porque con él se determina la cantidad de agregado requerido para un volumen unitario de concreto, debido a que los poros interiores de las partículas de agregado van a ocupar un volumen dentro de la masa de concreto y además porque el agua se aloja dentro de los poros saturables. El valor de la densidad de la roca madre varía entre 2.48 y 2.8 kg/cm³. El procedimiento para determinarla está se encuentra en la NTC 176 para los agregados gruesos y la NTC 327 para los agregados finos.

Existen tres tipos de densidades, las cuales están basadas en la relación entre la masa (en el aire) y el volumen del material; se describen entonces los siguientes tipos de densidades.

4.4.1.2.1. Densidad Nominal

Es la relación que existe entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material, incluidos los poros no saturables.

$$Densidad\ Nominal = \frac{P_s}{V_m - VP_s}$$

Ecuación 1. Densidad Nominal

Donde P_s = peso seco de la masa m

V_m = volumen ocupado por la masa m

VP_s = volumen de los poros saturables

4.4.1.2.2. Densidad Absoluta

Se define como la relación que existe entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupa única y exclusivamente la masa sólida, es decir, que se excluyen todos los poros, saturables y no saturables.

$$\text{Densidad Absoluta} = \frac{P_s}{V_m - V_p}$$

Ecuación 2. Densidad Absoluta

Donde P_s = peso seco de la masa m

V_m = volumen ocupado por la masa m

V_p = volumen ocupado por los poros (saturables y no saturables)

4.4.1.2.3. Densidad Aparente

La densidad aparente está definida como la relación que existe entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material, incluidos los poros, saturables y no saturables.

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{P_s}{V_m}$$

Ecuación 3. Densidad Aparente

Donde P_s = peso seco de la masa m

V_m = volumen ocupado por la masa m

Es conveniente definir que la densidad aparente puede ser determinada, ya sea en estado seco o en estado húmedo, dependiendo esto, claro está, del grado de saturación de cada uno de sus poros intersticiales.

4.4.1.3. POROSIDAD Y ABSORCIÓN

La porosidad de las partículas del agregado, es muy importante en el comportamiento de los agregados dentro del concreto bituminoso o asfáltico, puesto que una partícula porosa es mucho menos dura que una partícula compacta o maciza, lo cual afecta no solo las propiedades mecánicas como la adherencia y la resistencia a compresión y a flexión del pavimento asfáltico, sino que además, influye en la durabilidad del mismo.

La porosidad está relacionada con la capacidad de absorción de agua u otro líquido dentro de los agregados según el tamaño de los poros, su continuidad (permeabilidad) y su volumen total.

Esta capacidad de absorción puede ser determinada por la diferencia de pesos, entre el peso saturado y superficialmente seco, y el peso seco, expresándola como un porcentaje del peso seco.

$$\% \text{ de absorcion} = \frac{P_{sss} - P_s}{P_s} \times 100$$

Ecuación 4. Capacidad de Absorción

Donde P_{sss} = peso de la muestra saturada y superficialmente seca

P_s = peso seco de la muestra

4.4.1.5. GRANULOMETRÍA

Es la distribución de los tamaños de las partículas que componen una masa de agregados. Se puede concebir mediante un análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. La medida de la cuantía de cada una de estas fracciones es lo que se conoce como granulometría.

Para tener una mejor concepción del concepto de granulometría, se pasa a definir varios puntos que es respecto a esta propiedad.

4.4.1.5.1. Análisis Granulométrico

Cuando se hace un análisis granulométrico, se realiza la operación de separar de una masa de agregado en fracciones de igual tamaño, a través de depositar la masa de agregados, por una serie de tamices que tienen diferentes tamaños de aberturas, cuadradas y cuyas características se ajustan a la Norma Técnica Colombiana NTC – 32.



Figura 2. Tamices utilizados en Análisis Granulométrico

TAMIZ	
Milímetros (mm)	Pulgadas – Inch (“)
25,00	1
19,00	¾
12,50	½
9,50	3/8
4,75	No.4
2,00	No.10
0,425	No. 40
0,180	No 80.
0,075	No. 200
FONDO	

Tabla 2. Denominación y Aberturas de Tamices

Al realizar el procedimiento descrito bajo la Norma Técnica Colombiana NTC – 77, los resultados deben tabularse de la siguiente manera, siguiendo este ejemplo.

	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO A		Código:	FLB-012			
	ARENA ZARANDEADA PALMARITO		Versión:	1			
			Fecha:	06 Feb 06			
EMPRESA: PROMOTORA MONTECARLO VIAS S A OBRA: _____ INFORME No _____ DESCRIPCIÓN: DISEÑO MDC-2 MUESTRA No _____ FUENTE: CANTERA DE PALMARITO SOLICITUD No _____ FECHA DE TOMA: 12/08/2009 FECHA DE ENSAYO: 12/08/2009 LOCALIZACIÓN: TORCOROMA, BAYUNCA							
NORMA DE ENSAYO E-213							
TAMIZ		PESO RETENIDO	% RETENIDO		% PASA	FRANJA GRANULOMÉTRICA ESPECIFICADA	
mm.	No.		TOTAL	ACUMULADO		PORCENTAJE QUE PASA	
25	1"						
19,0	3/4"	0	0,0	0,00	100,0		
12,5	1/2"	12,00	0,9	0,94	99,1		
9,5	3/8"	46,00	3,6	4,52	95,5		
4,8	No.4	310,00	24,2	28,68	71,3		
2,0	No.10	212,00	16,5	45,21	54,8		
0,43	No.40	260,00	20,3	65,47	34,5		
0,180	No.80	320,00	24,9	90,41	9,6		
0,075	No.200	58,00	4,5	94,93	5,1		
	FONDO	65	5,1	100,00			
PESO MUESTRA SECA(GRS)				1.283			

Tabla 3. Tabla de Resultados luego de Aplicar la NTC – 77

Con la imagen 2, se observa el grado de distribución de tamaños de partículas representada en la gráfica producto de los resultados tabulados, de los pesos de las fracciones de agregados retenidos en cada material y del peso pasante que atravesó cada uno de los tamices, mostrado todo esto, mediante la curva granulométrica.

4.4.1.5.2. Curvas de Granulometría

Para mayor facilidad de comprensión, resultados del análisis granulométrico, como se dijo anteriormente, se plasma una representación grafica que manifiesta la

distribución de los tamaños de las partículas de la masa del agregado, a través de una curva llamada curva granulométrica o de cribado.

Es en síntesis, una grafica de granulometría sobre el eje de las ordenadas, donde representa el porcentaje acumulado que pasa a través de los tamices en escala aritmética y sobre el eje de las abscisas, se indican las aberturas de los tamices, unas veces en escala aritmética, otras en escala logarítmica, y algunas en una escala mixta. Por lo general, es representada en escala logarítmica.

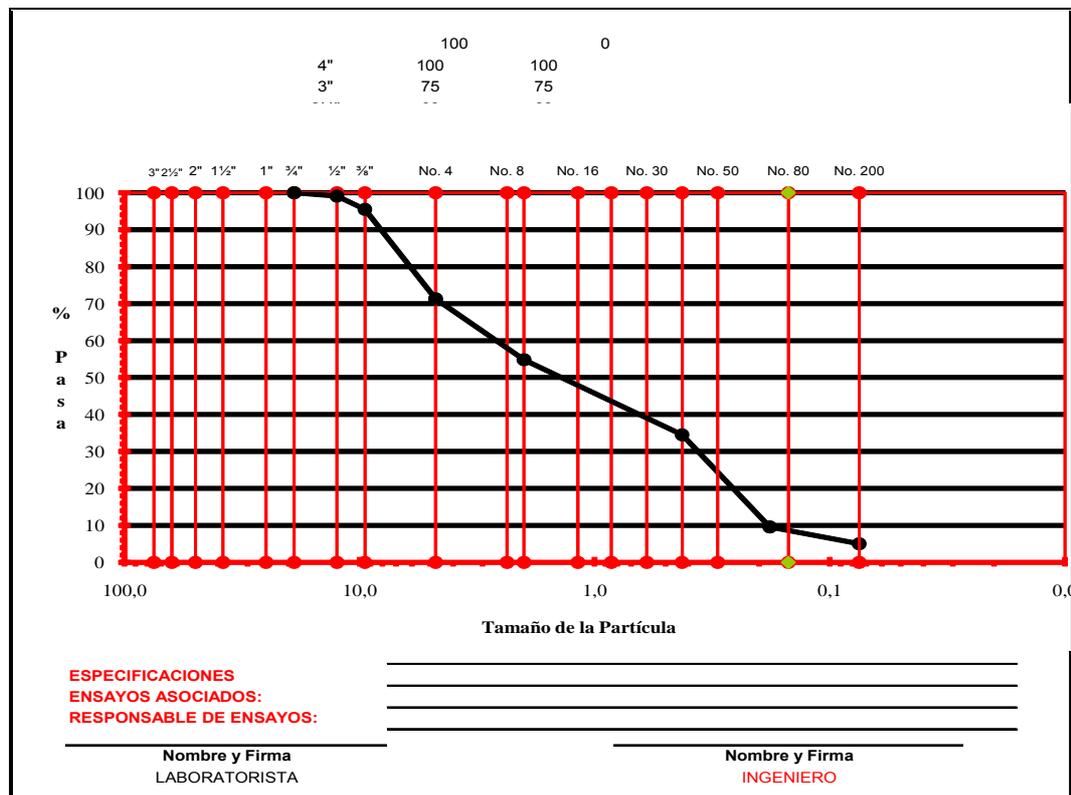


Figura 3. Curva de Granulometría o de Cribado

4.4.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

Dentro de las propiedades inherentes de los agregados, se ha concluido a través de la exploración a fondo de estos materiales, las siguientes propiedades que

intervienen directamente con el comportamiento mecánico, junto con las propiedades físicas, que también son de vital importancia respecto a este comportamiento específico.

4.4.2.1. TENACIDAD

Es la resistencia a la falla por impacto, la cual tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, ya que si estos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría, a parte de indicar que no son aptos para ser empleados en mezclas densas en calientes que más adelante serán llevadas a los pavimentos flexibles.

4.4.2.2. ADHERENCIA

La adherencia juega un papel muy importante dentro de la masa del concreto bituminoso, puesto a que cuando la interacción agregado – cemento asfáltico, y en algunos casos, aditivos extras, es lograda a través de una buen trabazón entre la masa de agregados y el ligante asfáltico, el cemento asfáltico, la resistencia del pavimento es mucho mayor.

La adherencia es gracia a las fuerzas de origen físico-químico que ligan las partículas de la masa de agregados con el cemento asfáltico.

La adherencia depende más exactamente, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas de los agregados.

4.4.2.3. DUREZA

Todos los agregados deben tener una estructura lo suficientemente apta como para garantizar una dureza prolongada frente a los agentes externos que intentaran deteriorar al pavimento asfáltico. La dureza es una propiedad que

depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia de los agregados.

La forma más usual de medir la dureza y determinar si es lo suficientemente dura como para garantizar un lejano desgaste, es mediante el ensayo de resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles, ensayo que está descrito bajo la Norma Técnica Colombiana, NTC – 90 y 98, para agregados gruesos.

4.4. SUSTANCIAS Y FACTORES PERJUDICIALES

Todo material que tenga un tamaño menor al tamiz pasa 200 (74 micras), presenta un efecto muy perjudicial frente al comportamiento dinámico y mecánico del concreto asfáltico, esto a razón de que impiden tácitamente, el enlace y la adherencia necesaria de los agregados en la mezcla densa en caliente. Los materiales a saber, que deterioran y perjudican en la concepción de un material apto para pavimentos asfáltico, son las arcillas, limos y la materia orgánica.

Por ejemplo, las arcillas presentan constantes cambio de volúmenes frente a cualquier cambio de humedad dentro de su estructura molecular, puesto a que intermolecularmente, están actuando expandiéndose, al mínimo contacto con agua. Esto genera entonces, un hinchamiento que a su vez genera esfuerzos de tensión dentro de la masa del concreto asfáltico, ya puesto en obra, por lo que puede conllevar a producir fallas según el contenido de arcillas dentro de las fracciones de la masa del agregado.

Por todas las anteriores razones, es menester controlar el contenido de estas partículas indeseables, para lo cual la Norma Técnica Colombiana, NTC – 78, para determinar el porcentaje de material que pasa el tamiz de 74 micras.

4.4.1. SANIDAD DE LOS AGREGADOS

Un concepto que se debe tener claro es el de la sanidad de los agregados dosificados en las mezclas asfálticas.

La sanidad de los agregados se refiere a la capacidad de éstos, para soportar cambios excesivos de volúmenes, debidos a cambios en las condiciones ambientales como congelamiento – deshielo, calentamiento – enfriamiento, humedecimiento – secado, los cuales afectan directamente a la durabilidad de la mezcla asfáltica, y pueden afectar no solamente su aspecto superficial, sino que además influye directamente en la estabilidad de la estructura interna (agrietamientos internos), con un fenómeno químico, similar al de la reacción agregado – álcali.

5. ASFALTO

5.1. GENERALIDADES

El asfalto es un material que se puede encontrar en la naturaleza en yacimientos naturales o puede ser obtenido como subproducto de la destilación de determinados crudos de petróleo.

Posee ciertas características muy específicas que lo hacen ideal para los trabajos de pavimentación, principalmente la cohesión y adhesión con materiales granulares. Tiene una consistencia sólida, al calentarlo se ablanda y se vuelve líquido, lo que le permite recubrir los agregados durante el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica en caliente.

El asfalto cambia su comportamiento dependiendo siempre, de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. Es más duro a bajas temperaturas y más blando a altas, por esto, se debe seleccionar el tipo de asfalto más conveniente dependiendo del clima del sitio de colocación.

5.2. EVOLUCION HISTORICA Y ESTADO DE ARTE DEL ASFALTO

Los primeros indicios de la utilización del asfalto, se remonta aproximadamente al año 3.200 A.C., esto descubierto por excavaciones hechas a ochenta (80) kilómetros al norte de Bagdad. Los sumerios utilizaron una mezcla de material bituminoso con finos minerales y paja; esta mezcla fue denominada como mastic, y se empleó en la pega de ladrillos en la mampostería, en la impermeabilización de los techos de las casas antiguas y en la construcción de pavimentos de plazas de espesores de cinco (5) a seis (6) centímetros.

Mucho más tarde, el campo de la construcción de vías modernas, estrena la utilización del asfalto. La firma Pillot et Eyquem comenzó a fabricar adoquines de asfalto, los cuales en el año de 1837 constituirían la plaza de la Concordia y los campos Elíseos en París.

En 1852, la construcción de la carretera Paris - Perpiñán utilizó el asfalto de Val de Travers, significando el comienzo de una nueva forma de construcción vial. En 1869, se introduce el procedimiento en Londres (con asfalto de Val de Travers), y en 1870 en los Estados Unidos con similar ligante. Desde esta época, el asfalto se implantó sólidamente en las vías urbanas y propició significativamente su uso vial.

La aparición y desarrollo de la circulación automovilística en las carreteras de aquel entonces - de macadam a base de agua - provocaban grandes nubarrones de polvo, ello dio origen a los tratamientos superficiales a base de emulsiones en el año 1903, con objeto de enfrentar dicho inconveniente. En 1909 en Versalles, sobre el firme de una carretera con un tráfico diario de 5000 vehículos, se construyó una capa de aglomerado bituminoso de 5 cm de espesor. Así pues, en los albores del siglo XX, ya existían los principales componentes de la técnica de revestimientos bituminosos. Su desarrollo y perfeccionamiento, es tarea que incumbe a los "profesionales del asfalto" (Ingenieros Civiles) del siglo XXI.

Las distintas sociedades y asociaciones de ingeniería, han participado en la causa de la evolución del material asfáltico, en pos de utilizarlo en la construcción de vías, cada vez más fuertes, duraderas y funcionales. Investigaciones que recrean a la realidad más cercana bajo la que está el pavimento asfáltico, ha dado diferentes pautas modernas que todavía están en vigencia, actualmente (Ensayos de la AASHTO), sin saltarse también las experimentaciones que arrojan los

distintos comportamientos del asfalto, y que se establecieron recientemente, conocidas como ensayos “Superpave”.

Al fin y al cabo, todas estas investigaciones llevan un solo propósito, la mejora del material, de los métodos de diseño, fabricación y colocación, de tal modo que garantice el mejor comportamiento mecánico y dinámico, posible, en las vías hechas con asfalto.

La investigación que se desea entablar, sobre el uso de polímeros dentro de la mezcla del concreto asfáltico, es nueva, de manera que solo se han adelantado la utilización de polímeros, como la cadena estireno – butadieno – estireno, o SBS (investigación hecha en la Universidad Tecnológica de Bolívar por Myriam Esther Álvarez), y la implementación de polipropileno (Universidad Militar Nueva Granada) en la composición de la mezcla asfáltica. Ambos materiales productos del procesamiento hecho con estos dos polímeros, han establecido que mejoran significativamente el comportamiento del concreto asfáltico.

5.2.1. MEZCLA ASFÁLTICAS CON POLÍMEROS

Hoy en día, se ha recurrido en la incursión de mezclar componentes químicos como lo son los polímeros, con materiales utilizados en la ingeniería, con el propósito de establecer ciertas características que demuestren que la reacción producto de la mezcla, sea favorable, al mejorar alguna propiedad del material con el que se mezcló el polímero. Éste es el caso de la mezcla de fibras con materiales como el hormigón, el cual se ha demostrado una mejora de sus propiedades físico-químicas, a través de la inmersión del material producto de la mezcla, a pruebas de laboratorio en los que se estudian los comportamientos mecánicos del mismo.

Con esta iniciativa de hacer ensayos aplicados a materiales que se utilizan en la construcción, mezclados con polímeros, nace la implementación de tales componentes químicos, en mezclas con asfalto, idea en la que prevalece la premisa del mejoramiento del material constructivo, como elemento idóneo para un buen funcionamiento de la estructura del pavimento.

En la actualidad, el uso de polímeros mezclados con el concreto asfáltico, ha ido ganando terreno, dentro de las investigaciones adelantadas en diferentes universidades nacionales, como la que se han mencionado con anterioridad, bajo los nombres de Universidad Militar Nueva Granada, en Bogotá, y la Universidad Tecnológica de Bolívar, en Cartagena.

En el primer recinto académico, se hizo una investigación en la que se estudió el comportamiento mecánico y dinámico del material asfáltico, una vez que fuese mezclado con fibras sintéticas de polipropileno; los resultados fueron alentadores, ya que se observó dentro de las conclusiones que sí mejoran las propiedades tanto mecánicas como dinámicas del mismo.

La metodología, fue la de proporcionar porcentajes con relación al peso total de la mezcla de asfalto (concreto asfáltico), de cantidades de polímeros, variándolos y ensayándolos con cada uno de los porcentajes respectivamente. Los resultados dieron a mostrar que con la adición de una cantidad determinada de polipropileno, la mezcla asfáltica tuvo un muy buen comportamiento mecánico, evaluado por ensayos que probaran la estabilidad y la fluencia, de la mezcla. Ahora, también se observó mejoras frente a la deformación permanente en el pavimento asfáltico. Cabe decir que en la investigación que se desea adelantar por parte de los autores, se acondicionará la misma metodología, señalando que en vez de utilizar fibras de polipropileno, se agrega un polímero más, el cual es el polietileno como anteriormente se ha dicho, y solo se desea hacer el estudio y evaluación del

comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica con la fibra de polipropileno/polietileno.

Ahora, desplazándose a la segunda actividad investigativa adelantada en la segunda universidad en mención dentro del penúltimo párrafo de la pagina pasada, la Universidad Tecnológica de Bolívar, es permitido decir que también se obtuvo una muy buena respuesta del material frente a ensayos que evaluaban los comportamientos mecánicos y dinámicos de la misma mezcla asfáltica, solo que esta vez se utilizó el polímero SBS o mejor conocido como Estireno – Butadieno – Estireno.

5.2.2. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN DEL TEMA

Como hasta ahora se ha dicho, la incursión reciente en el campo de la investigación del comportamiento del concreto asfáltico, mezclados con fibras sintéticas de polipropileno, ofrece un campo de investigación muy llamativo, ya que es un tema poco estudiado; ahora, frente al tópico de investigación de la utilización de fibras sintéticas de ciertos polímeros, los autores de la investigación, seleccionaron una fibra que cumple con la integración de la asignación de otro polímero más, el cual es el polietileno; estas fibras hacen parte del catálogo de productos de Sika S.A, y con estas fibras de este tipo de composición, no se ha hecho investigación alguna, en ocasiones pasadas. Una de las fibras sintéticas a base de polímeros de Sika S.A, es la denominada dentro de su línea de productos, “Sikafiber AD”. Esta fibra es una fibra sintética estructural base polipropileno – polietileno, monofilamentadas (es decir, de un solo filamento, de fibras separadas), las cuales se autofibrilan una vez mezcladas con el elemento de construcción, al cual se le adiciona. Cabe decir, que el elemento de construcción para el cual, fue diseñada la fibra para que se mezclara, es el concreto hidráulico, en el cual, al

mezclarse, se aumentan en él (concreto), la tenacidad a la flexión, impacto y la resistencia a la fatiga.

Todos los últimos beneficios mencionados anteriormente, son dados en el concreto hidráulico, más no se ha implementado alguna vez, dentro de la estructura del concreto producto de mezclas asfálticas. Por lo tanto, este hecho motiva entonces a los autores del presente documento, a llevar a cabo la investigación que permita determinar qué cantidad o dosis, sería óptima para garantizar la mejora en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica.

En resumen, la implementación del uso de fibras sintéticas de polímeros mezclados en materiales de construcción de la ingeniería civil, son actividades recientes, y tienen poco tiempo de abrirse dentro del campo de la investigación. Las líneas de investigación dentro del marco de la utilización de fibras de polipropileno, son escasas, más aun, la que tiene que ver directamente con fibras de polipropileno/polietileno, sobre la cual, no se ha hecho ningún estudio; el de mas acercamiento es el que tiene que ver con fibras de polipropileno pero el tema de investigación propuesto por los autores es un tema que en la actualidad no se ha llevado a cabo.

5.3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ASFALTO

El asfalto está compuesto por asfaltenos, resinas, aromáticos y saturados. Los asfaltenos proporcionan la dureza del asfalto; las resinas son las que aglutinan los asfaltenos, brindando la capacidad de liga; los saturados y aromáticos son aceites que le dan la consistencia para que sean trabajables.

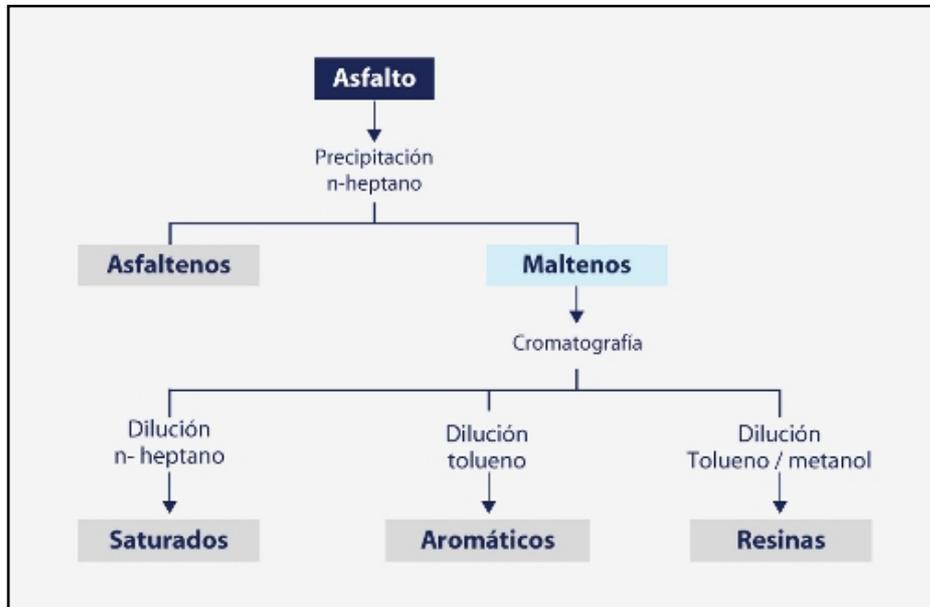


Figura 4. Composición Química del Asfalto

5.4. CLASIFICACIÓN DE LOS ASFALTOS

Los asfaltos se agrupan en tres clases.

5.4.1. ASFALTOS LÍQUIDOS

Éstos se producen diluyendo el cemento asfáltico en algún tipo de solvente derivado del petróleo. Se agrupan en tres (3) clases, dependiendo esta agrupación de la rapidez con que se evapora el solvente (curado del asfalto).

- SC: asfaltos rebajados de curado lento
- MC: asfaltos rebajados de curado medio
- RC: asfaltos rebajados de curado rápido

Esta denominación se suele acompañar de un número que indica el grado de viscosidad cinemática en unidades de medida de Centiestokes. Por ejemplo: RC – 250, MC – 70.

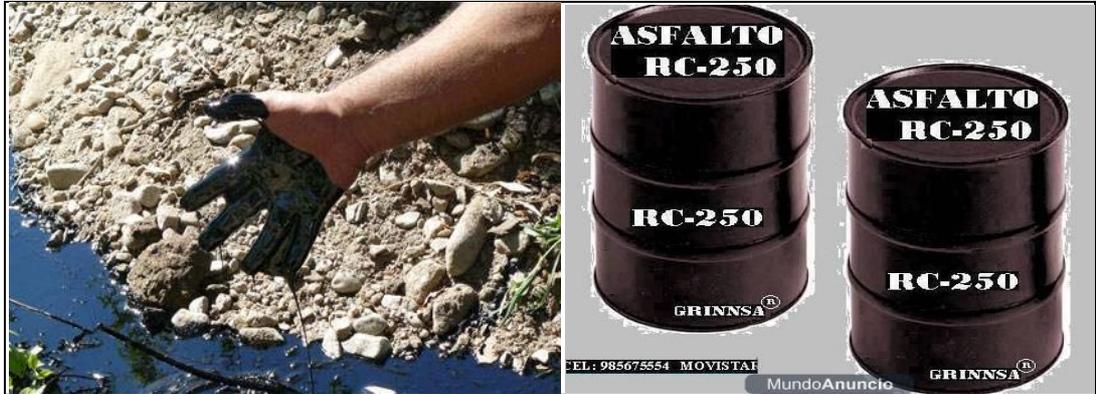


Figura 5. Asfalto Líquido

5.4.2. EMULSIONES ASFÁLTICAS

Se componen de dos elementos, de agua y cemento asfáltico. Se utilizan en tratamientos superficiales, riegos de adherencia, mezclas abiertas, estabilización de suelos y lechadas asfálticas.



Figura 6. Emulsión Asfáltica

Generalmente se identifican en el mercado a través de la velocidad de rompimiento, llevándolo entonces a tres grupos, de rompimiento rápido (RR), de rompimiento medio (RM) y de rompimiento lento (RL).

5.4.3. CEMENTOS ASFÁLTICOS (AC – ASPHALT CEMENT)

Es un material termoplástico, es decir, es un material derivado de los asfaltos que se endurece (se vuelve más viscoso) a medida que la temperatura disminuye y se ablanda (fluido) a medida que la temperatura aumenta.



Figura 7. Cemento Asfáltico

Son los más utilizados en la pavimentación en asfalto. Se pueden subclasificar bajo tres parámetros de identificación diferentes:

1. Viscosidad antes de envejecimiento
2. Viscosidad después de envejecimiento
3. Penetración

Se preparan comercialmente en grados o rangos de consistencia, con base en el ensayo de penetración, por ejemplo: AC 60 - 70, AC 60 - 80, AC 70 - 90, AC 80 - 100, etc. Los números indican la penetración en décimas de milímetro. El ensayo de penetración es uno de los más comunes para caracterizar el asfalto.

5.4.3.1. PROPIEDADES DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

Como generalmente el cemento asfáltico es el tipo de asfalto que más se utiliza y el que por tales razones, se va a emplear dentro del marco de la investigación actual, se definirá entonces las propiedades del cemento asfáltico.

5.4.3.1.1. Susceptibilidad Térmica

Como se mencionó anteriormente, al comenzar definiendo el concepto de asfalto, se lanza una explicación de lo que se refiere al presentar esta propiedad, la cual es de vital importancia frente a la definición del comportamiento mecánico del pavimento asfáltico; el cemento asfáltico es un material termoplástico el cual, se endurece (gana viscosidad) a medida que se va perdiendo la temperatura. En cambio, a medida que la temperatura aumenta, el asfalto se va ablandando (gana fluidez – pierde viscosidad).

5.4.3.1.2 Endurecimiento y Envejecimiento

El asfalto al tener contacto directo con el oxígeno, sufre una oxidación que conlleva a que tenga la reacción de ir envejeciendo constantemente, y a medida que se va oxidando y va perdiendo calor, este va presentando un endurecimiento continuo.

5.4.3.1.3. Adhesión Y Cohesión

Cuando se habla de adhesión, se hace mención a la propiedad que demarca el comportamiento de la tendencia del material de adherirse a la masa de agregados, durante el proceso de mezcla e inmediatamente después, a ésta.

En cambio la cohesión, demarca la propiedad de tener la capacidad de permanecer y conservar las fracciones de la masa de agregado, juntas y en su sitio, una vez se haya colocado en el sitio de pavimentación.

5.4.3.1.4. Durabilidad

Esta propiedad señala el nivel de persistencia del asfalto, a mantener y conservar sus características propias iniciales, desde el momento de su colocación, soportando la acción de agentes externos y procesos de envejecimiento que tienden a degradar su estructura.

5.4.3.2. ENSAYOS PROPORCIONADOS AL CEMENTO ASFALTICO

Para evaluar la calidad de un cemento asfáltico y caracterizarlo se han ideado diversos ensayos que tratan de reproducir el comportamiento a escala real del material. Para una mejor concepción de los ensayos que se realizarán más adelante, dentro de la sección metodológica del presente documento, se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

5.4.3.2.1. Ensayos para Medir la Consistencia del Cemento Asfáltico

Antes de empezar a presentar los conceptos claves de estos ensayos, cabe definir lo que es la consistencia. La consistencia es el grado de fluidez que tiene el asfalto a una determinada temperatura.

5.4.3.2.1.1. Ensayo de Viscosidad

Esta ya definido que la viscosidad es la resistencia que tiene un fluido a fluir. Generalmente, se hacen mediciones de viscosidades cinemáticas o dinámicas. Para la Norma Técnica Colombiana referente al ensayo de viscosidad dinámica, ésta debe ser medida a 60 °C de temperatura.



Figura 8. Viscosímetro Saybolt – Furol

5.4.3.2.1.2. Ensayo de Penetración

Para saber cuál es la consistencia del asfalto a una temperatura media de 25 °C, se realiza también un ensayo que es conocido como ensayo de penetración.

Este ensayo utiliza un equipo denominado penetrómetro, el cual, luego de seguir el procedimiento designado por la Norma Técnica Colombiana, o de las normas INVIAS, se obtiene resultados de penetraciones propuestas en rangos, los cuales permiten caracterizar un determinado tipo de asfalto.



Figura 9. Penetrómetro

El cemento asfáltico utilizado en la investigación, frente a la denominación dada por este ensayo es AC 60 – 70 (60 dmm hasta 70 dmm).

5.4.3.2.1.3. Ensayo de Punto de Ablandamiento

El punto de ablandamiento es el instante y la situación en la que el cemento asfáltico, obtiene un cierto estado de fluidez, al ser expuesto a un determinado grado de temperatura, el cual es alto, no puede soportar el peso de una bola de acero dentro de un anillo.

5.5. MEZCLA ASFÁLTICA

Esta mezcla consiste en la combinación de cemento asfáltico con agregados pétreos, y últimamente aditivos que modifican las propiedades de los acostumbrados tipos de asfaltos, todos estos componentes en proporciones exactas y previamente especificadas.

La mezcla asfáltica se puede fabricar en caliente o en frío, siendo la más común y precisamente, dentro de la investigación se recurre a la producción de una mezcla densa en caliente.

En la actualidad, se cuenta con varios modos de calcular las cantidades de dosificación de los materiales que componen a la mezcla. El más utilizado es el que tiene que ver con el método de diseño de mezclas asfálticas de propuesto por Marshall; este método es uno de los más antiguos. Actualmente los ensayos SUPERPAVE son los que están tomando terreno dentro del marco de ser una herramienta de diseño que dentro de poco, al parecer, podría ser empleado como método de diseño en Colombia.

5.5.1. CARACTERÍSTICAS

Dentro de las características de las mezclas asfálticas, las más relevantes son las que se presentan a continuación.

5.5.1.1. ESTABILIDAD

Es la capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento inestable presenta ahuellamientos, corrugaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.

Esta estabilidad es evaluada en la máquina de “Estabilidad Marshall”, y la usual unidad de medida es en libras (Lb).

5.5.1.2. DURABILIDAD

Es la capacidad para resistir la acción de los agentes climáticos y del tránsito, que se observa en la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.

5.5.2. PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

La mezcla asfáltica tiene en sí, cuatro características principales que determinan su comportamiento mecánico y dinámico dentro de la funcionalidad de su servicio. Estas son las siguientes.

5.5.2.1. DENSIDAD O PESO ESPECÍFICO DE LA MEZCLA

Al definir las propiedades de los agregados, en secciones pasadas de este documento (sección 4.4.1.2 - Agregados), se dio el concepto de que es el peso de un volumen específico de determinado material, en este caso, de la mezcla.

La densidad obtenida en el laboratorio es la densidad patrón y la densidad obtenida in situ, es expresada como porcentaje de este patrón. Si en caso tal, la densidad in situ, sobrepasa a la densidad patrón, puede transcribirse al hecho de que la mezcla asfáltica dará una mayor durabilidad al pavimento, de lo que se esperaba.

5.5.2.2. VACÍOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

Como muy bien se sabe, toda masa conformada de materiales particulados, está compuesta a su vez de vacíos que pueden ser ocupados por algún fluido; en el caso de la mezcla asfáltica, estos vacíos pueden ser llenados con aire o asfalto.

Este hecho es de vital importancia tener en cuenta, ya que es ideal que inmediatamente antes de compactar la mezcla asfáltica (al colocarla dentro de la estructura del pavimento), se debe dejar un pequeño número de vacíos que permitan al asfalto alojarse dentro de ellos, una vez se compacte, pero que no sean muchos, a razón de que más adelante se verá reflejado en deterioros prematuros.

5.5.2. CLASIFICACIÓN

Hay en la actualidad, distintos tipos de mezclas, cuya clasificación depende del tipo de asfalto, la dosificación de los agregados y el proceso de fabricación.

La mezcla se puede fabricar en caliente en centrales de mezcla, o en frío in situ.

Según sea su granulometría, las mezclas pueden ser usadas como bases a otros pavimentos o como capas de rodaduras dentro del pavimento flexible.

Por las normas INVIAS, se tienen: las mezclas densas en frío, mezclas abiertas en frío, mezclas densas en caliente, mezclas abiertas en caliente, mezclas discontinuas en caliente para capa de rodadura y mezclas drenantes.

6. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES A UTILIZAR

Los materiales a utilizar en la investigación son básicamente los siguientes.

6.1. AGREGADOS

1. Grava Triturada de 3/4" – Grava gruesa
2. Grava Triturada de 1/2" – Grava menos gruesa
3. Arena de Palmarito 1/2" – Arena fina
4. Polvillo Cimaco – Material llenante mineral



Figura 10. Agregados Empleados en la Mezcla Asfáltica

Al evaluar si estos cumplen con los estándares propuestos por las normas INVIAS respecto a los materiales a utilizar en mezclas asfálticas, se realizan los ensayos y se comparan con lo requerido por tales normas.

Ensayo	Norma INV	Agregado Grueso	Agregado Fino	Especificación
Partículas fracturadas mecánicamente	E-227	80,8%	NA	>75%
Desgaste en la máquina de los Ángeles	E-218, E-219	24,3%	NA	<30%
Perdida de solidez en sulfato de sodio	E-220	1,8%	1,6%	<12%
Adherencia en bandeja	E-732	>95%	NA	>95%
Índice de aplanamiento	E-230	15,2%	NA	>35%
Índice de alargamiento	E-231	15,2%	NA	>35%
Plasticidad	E-125, E-126	NA	NP	NP
Equivalente de arena	E-133	NA	57%	>50%
Resistencia conservada Inmersión comprensión	E-738	18,5%		>25%
Peso específico ponderado	E-223	2,583	2,582	NA

Tabla 4. Caracterización por normas INVIAS de los agregados para Mezclas

Efectivamente, si cumplen con los requerimientos por el INVIAS. Los ensayos y las respectivas caracterizaciones de tales materiales, se presentan en la sección de anexos del presente documento.

6.2. ASFALTO

Cemento asfáltico 60 – 70, que en central de mezcla conforma una mezcla asfáltica MDC – 2 (mezcla densa en caliente, tipo 2).

En Colombia la empresa encargada de distribuir el cemento asfáltico es ECOPETROL, que cuenta con tres grandes refinerías. Una, está en la ciudad de Cartagena, la cual, actualmente, no vende este tipo de derivado del crudo, la

segunda en Barrancabermeja y la última en Apiay, de donde las dos últimas son las que actualmente producen el tipo de asfalto deseado, pero la que más específicamente produce el cemento asfáltico 60 – 70, es la refinería de Apiay.

Por lo tanto, el cemento asfáltico a emplear es AC 60 – 70 de la refinería de Barrancabermeja, con la siguiente caracterización.

CARACTERISTICA	Unidad	Método ASTM	Min.	Max.	Resultado
Ductibilidad a 25 °C, 5 cm/min	cm	D 113	100		140
Penetración a 25 °C, 100 g 5 s	mm/10	D 5	60	70	68
Punto de ablandamiento	°C	D 36	45	55	48,7
Punto de inflamación	°C	D 92	232		232
Solubilidad en Tricloroetileno	g/100g	D 2042	99		100
Pérdida de masa	g/100g	D 32872		1	0,29
Índice de Penetración	NA				-1

Tabla 5. Características del Asfalto utilizado en la MDC – 2

Las demás caracterizaciones como granulometría y demás factores que son requeridos por las normas de ensayos de materiales a mezclas asfálticas, se presentan en la sección de anexos del presente documento.

6.3. FIBRAS ESTRUCTURALES

Extraído textualmente, de la ficha técnica del catálogo de productos de SIKA S.A – Sikafiber AD² “son fibra de refuerzo de polipropileno modificada con polietileno que disminuye el agrietamiento de concretos y morteros.

Sikafiber AD está compuesto por una mezcla de monofilamentos reticulados y enrollados y polímeros sintéticos que anulan la tendencia a reducir la

² Extraído de la hoja de vida del material, desde la página: http://www.sika.com.co/co-ht_Sikafiber_AD.pdf

trabajabilidad y el asentamiento del concreto, propia de otro tipo de fibras convencionales.

Durante la mezcla, Sikafiber AD se distribuye aleatoriamente dentro de la masa de concreto o mortero formando una red tridimensional muy uniforme.

6.3.1. DATOS TÉCNICOS DE FIBRAS

- Densidad real: aprox. 0,91 kg/l
- Absorción de agua: ninguna
- Módulo de elasticidad: 15.000 kg/cm²
- Alargamiento de rotura: 20-30 %
- Resistencia a tracción: 300-350 kg/cm²
- Resistencia química: inerte a los álcalis del cemento, ácidos en general, agua de mar, residuos alimentarios y ganaderos, aceites vegetales. No se pudre y es resistente a hongos y bacterias.
- Durabilidad: indefinida
- Temperatura de fusión: 160-170 °C.
- Longitud: 19 mm.
- Presentación: bolsas de 1 kg y bolsa de 600 gr. También en bultos con 20 unidades de 1 kg o de 600 gr.

7. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y CÁLCULOS CUANTITATIVOS

7.1. METODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLAS

La metodología experimental y los debidos cálculos que a continuación se describen, son hechos en base a toda la normatividad de especificaciones de construcción y normas de ensayos, propuestos por el Instituto Nacional de Vías, INVIAS.

Para una mayor claridad, se presentarán todas estas normatividades en la sección de anexos donde se presentan todas las normas de especificaciones de construcción, y normas de ensayos, con los que se relaciona la investigación presente.

Se establece el hecho, que la investigación presentara el siguiente esquema donde primero, se describe la metodología experimental que se desarrolla paso a paso sin fibra, como se hace común y corriente, cualquier ensayo de acuerdo a la normativa de INVIAS y de Marshall. Luego, se describe los pasos que se siguen para establecer la metodología adoptada para el caso de adicionar Sikafiber Ad.

7.1.1. METODOLOGIA ADOPTADA SIN SIKAFIBER AD

7.1.1.1 GENERALIDADES

El método Marshall se emplea para dosificar mezclas en caliente de agregados pétreos y cemento asfáltico con o sin la adición de llenante mineral. El método puede utilizarse tanto para diseños en laboratorio como para controles de campo. El objetivo del diseño de una mezcla asfáltica es determinar la proporción adecuada de cemento asfáltico en la mezcla, que asegure que está presente.

1. Suficiente estabilidad como para satisfacer las exigencias del servicio sin desplazamientos o distorsiones.
2. Suficiente asfalto para asegurar la obtención de un pavimento durable que resulte del recubrimiento completo de las partículas de agregado pétreo, impermeabilizando y ligando las mismas entre si, bajo una compactación adecuada.
3. Suficiente trabajabilidad para permitir una eficiente colocación de la mezcla con que se pavimentara, sin que se produzca segregación.
4. Suficientes vacios con aire en la mezcla compactada, para proveer una reserva de espacio que impida exudaciones y perdidas de estabilidad al producirse una pequeña compactación adicional bajo las cargas del tránsito, como los posibles aumentos de volumen del asfalto a altas temperaturas.

7.1.1.2. BOSQUEJO DEL METODO

El método emplea muestras normales para ensayos de 2 ½ pulgadas de altura por 4 de diámetro, las cuales se preparan siguiendo un procedimiento especificado para calentar y compactar las mezclas de agregados y cemento asfaltico.

Las dos características principales del ensayo son un análisis de DENSIDAD-VACIOS y una prueba de ESTABILIDAD-FLUJO.

La estabilidad es la máxima resistencia a la carga que la muestra normal soporta a 60°C cuando se ensaya como se indica más adelante, mientras que el flujo es la deformación total que se produce en la muestra, desde la carga cero hasta la carga máxima.

7.1.1.3. EQUIPO PARA EL ENSAYO

Los equipos para realizar los ensayos, se detallan a continuación.

- Juego de elementos para ensayo Marshall, que incluye molde de compactación especial de 4 pulgadas de diámetro y 3 de altura con su collar de extensión, martillo de compactación con una zapata circular de 3 y $\frac{7}{8}$ " de diámetro, peso de 10 libras y altura de caída de 18 pulgadas, pedestal de compactación firmemente anclado al piso, prensa de ensayo y mordazas para ensayo con sus guías.
- Otros elementos tales como calentadores, termómetros, estufa, bandejas metálicas, baño María, balanzas, espátulas, guantes, cucharones, tamices, extractores de muestras, etc.



Figura 11. Molde y pedestal para compactación



Figura 12. Horno para Calentar Materiales y Máquina de Extracción de Asfalto



Figura 13. Máquina de Ensayo Marshall y Caja Termostática para Baño de María



Figura 14. Estufa Eléctrica y Lavamanos



Figura 15. Termómetro en °C y °F



Figura 16. Balanzas y/o Pesos Eléctricos



Figura 17. Recipientes y Cucharones, espátulas para manipular materiales



Figura 18. Martillo para Compactación Marshall

7.1.1.4. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

7.1.1.4.1. Numero de Muestras

Deberán prepararse tres muestras para cada combinación de agregados y contenido de cemento asfáltico elegida. Tanto los agregados como el asfalto deberán cumplir individualmente las especificaciones correspondientes a ellos.

Generalmente se emplean para el diseño 5 porcentajes diferentes de cemento asfáltico, por lo que se deduce que es necesario elaborar, cuando menos 15 muestras de ensayo.



Figura 19. Muestras para Ensayo Marshall – Briquetas de Asfalto

Se acostumbra comenzar desde 4.0 o 4,5% de cemento asfáltico con respecto al peso de la mezcla total, elaborándose los juegos de probetas con incrementos en dicho porcentaje de 0.5%.

Los agregados muy porosos requieren elevados contenidos de cemento asfáltico, por lo que al ensayarlos es conveniente comenzar con porcentajes más altos.

7.1.1.4.2. Preparación de los Agregados

En primer término, se sacan a 110° C hasta peso constante. Como casi nunca es posible obtener un agregado que cumpla con los requisitos granulométricos exigidos, deberá hacerse una combinación de los disponibles.

Generalmente, en la planta asfáltica se dispone de un material del tipo grava (retenido en el tamiz No. 4) de una arena gruesa (pasa No. 4 retiene No 10 ó No. 40), de una arena fina (pasa No.10 ó No. 40 y retiene No. 200), y un llenante mineral (pasa No.200), con los cuales se trata de obtener la granulometría especificada, por lo que parece adecuado separar en el laboratorio el material en

fracciones similares, determinando la proporción en que debe intervenir cada una de ellas, para obtener la gradación requerida.

Tipo de Mezcla		Tamiz (mm / U.S. Standard)									
		37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75	2,00	0,425	0,180	0,075
		1 ^{1/2"}	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
		% Pasa									
Densa	MDC 1		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC 2			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC 3					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
Semidensa	MSC 1		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC 2			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
Gruesa	MGC 0	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC 1		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
Alto modulo	MAM		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9

Tabla 6. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente

Debe determinarse, por lo tanto, la proporción en que deben mezclarse los cuatro materiales disponibles con el fin de obtener uno que satisfaga la gradación MDC – 2.



Figura 20. Toma de Muestras para Ensayo Marshall y de Densidades

El alcance de este requisito se establece en la sección de la dosificación analítica de la mezcla de agregados. Ésta se presenta en la división de anexos.

7.1.1.4.3. Determinación de las Temperaturas de Mezcla y Compactación

La temperatura a la cual debe calentarse el cemento asfáltico para producir viscosidades Saybolt Furol de 85 ± 10 y 140 ± 15 segundos, debe establecerse como la de mezcla con los agregados y compactación respectivamente. Para ello es necesario elaborar una curva de calibración para el cemento asfáltico en la que puede apreciarse la variación de su viscosidad en la temperatura.

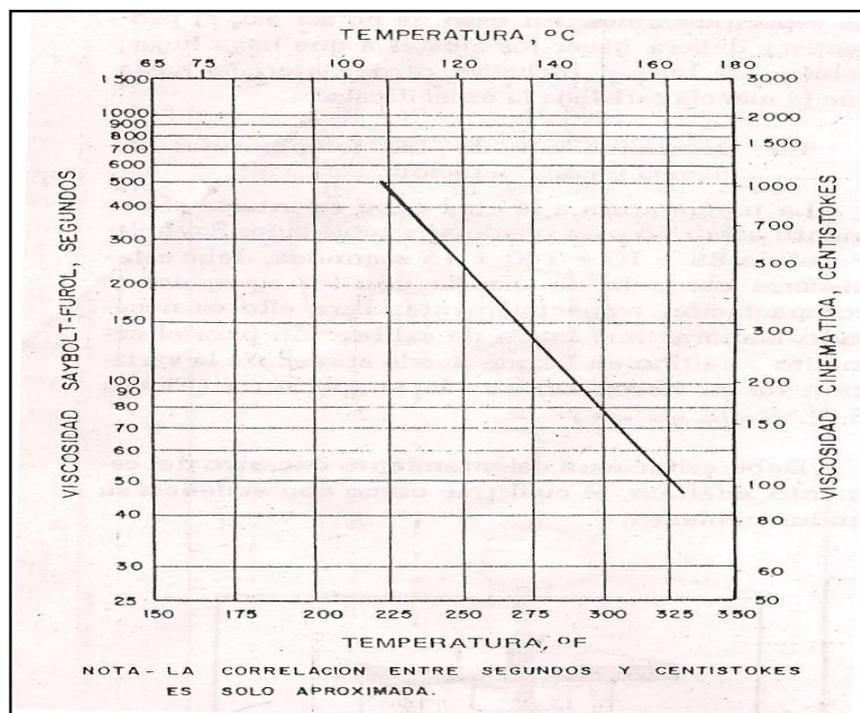


Figura 21. Gráfica para Establecer Temperatura de Mezclado y Compactación

Se debe evitar un calentamiento excesivo del cemento asfáltico, el cual trae como consecuencia su endurecimiento.

La temperatura de los agregados deberá superar en 20°C a la del cemento asfáltico durante la mezcla. Si es mayor, puede perjudicar al asfalto durante el mezclado, mientras que si es muy baja, la envoltura de los agregados por el asfalto y la extensión de la mezcla serán difíciles.

7.1.1.4.4. Preparación de las Mezclas

La experiencia ha demostrado que las mezclas de agregados y cementos asfálticos de 1200 gramos de peso permiten obtener muestras compactadas de 2.5 ± 0.01 pulgadas de altura. Por lo tanto para cada probeta se mezclarán las

cantidades necesarias de cada fracción de agregados y cemento asfáltico para alcanzar dicho peso.



Figura 22. Mezcla de Agregados por Dosificación Analítica

Como la cochada ha de pesar 1200 gramos de mezcla deberá colocarse la cantidad indicada de cada fracción de agregado a la temperatura especificada, mezclándose estas rápidamente y abriéndose un cráter dentro del cual se añade la cantidad calculada de cemento asfáltico, también la temperatura especificada.

La dosificación analítica se establece por medio del análisis que defina la mejor selección de adición porcentual de los agregados, en base al cumplimiento de las franjas de granulometrías (tabla 6), exigidas por el INVIAS, para una mezcla densa en caliente tipo dos (2).

El agregado se calienta en el horno o en la estufa se coloca en el recipiente de mezcla la cantidad hasta alcanzar la temperatura especificada. Se añade la cantidad requerida de cemento asfáltico.



Figura 23. Colocación de la Mezcla Asfáltica en el horno, y la Adición del Asfalto

Se hace la mezcla entre agregados y asfalto con un palustre o un mezclador mecánico tan rápido como sea posible, con el fin de evitar disminuciones perjudiciales de temperatura.



Figura 24. Mezcla de los Agregados con el Cemento Asfáltico

Este procedimiento se repite para las otras dos muestras que se van a preparar con el mismo porcentaje de cemento asfáltico.

Para los otros porcentajes elegidos, se procede de manera similar, calculando las cantidades de cada fracción de agregados y el asfalto que corresponden a cada caso, con respecto al peso total de la mezcla.

7.1.1.4.5. Compactación de las Mezclas

Para realizar un debido proceso de compactación de las mezclas densas en caliente tipo 2, se debe seguir los siguientes pasos:

1. Antes de colocar la cochada dentro del molde, tanto este como el pisón de compactación deben limpiarse con gasolina o kerosene y colocarse a estufa entre 100 y 150°C por unos 30 minutos.
2. Al retirarlo de la estufa, se arma el molde, se le coloca su base y collar de extensión y se introduce un papel de filtro en el fondo, colocando luego de manera rápida dentro del mismo, la cochada de 1200 gramos, la cual debe emparejarse con una espátula o palustre caliente, aplicando 15 golpes alrededor del perímetro y 10 en su interior y nivelando finalmente la superficie del material.



Figura 25. Preparación del Molde donde se Depositará la Mezcla Asfáltica

La temperatura en este instante debe encontrarse dentro de los límites mencionados en el numeral 7.4.3., (página 62) o de lo contrario la mezcla debe descartarse, pues no se permite su recalentamiento.

1. A continuación, se sujeta el molde con el aro de ajuste que tiene para tal efecto, se coloca en el pedestal de compactación, se apoya sobre la mezcla la zapata del pistón y se aplica 35, 50 ó 75 golpes que el vástago del pistón se mantenga siempre vertical.

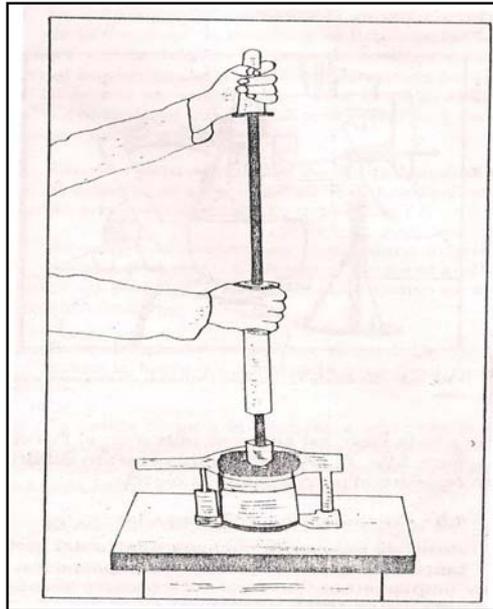


Figura 26. Compactación de la Mezcla Asfáltica

2. Terminada la aplicación del número de golpes requerido, se retira el molde del dispositivo de ajuste, se le quita la placa de base y el collar de extensión, se invierte el molde y se vuelve a montar el dispositivo, aplicando el mismo número de golpes a la que ahora es la cara superior de la muestra.
3. Se retira el molde del pedestal, se le quita el collar y la base y se deja enfriar a la temperatura ambiente.
4. Se le coloca al molde el collar de extensión y con el extractor se saca de él la probeta compactada, la cual se debe identificarse marcándola en cada cara con una crayola.

5. Finalmente, se coloca la probeta sobre una superficie lisa y bien ventilada toda la noche.
6. Este procedimiento de compactación se realiza sobre todas las muestras que se elaboren con los diversos porcentajes de cemento asfáltico.



Figura 27. Briquetas o Muestras de Ensayos Marshall

7.1.1.5. ENSAYOS HECHO A PROBETAS COMPACTADAS

En el método de ensayo Marshall, cada muestra compactada se somete a los siguientes ensayos en el orden indicado:

- a) Determinación del peso específico "Bulk"
- b) Ensayo de estabilidad y flujo
- c) Análisis de la densidad y vacíos

7.1.1.5.1. Determinación del Peso Especifico "Bulk" de las Probetas Compactadas

El peso específico "Bulk" de una probeta compactada es la relación entre su peso en el aire y su volumen incluyendo sus vacíos permeables.

Si la probeta tiene una textura superficial densa impermeable, su peso específico "bulk" se determina sencillamente mediante la expresión:

$$Gb = \frac{Wa}{W_{ss} - W_w}$$

Ecuación 5. Peso Específico Actual de la Mezcla

Siendo:

W_a = peso de la probeta seca en el aire, en gramos

W_w = peso de la probeta en el agua, en gramos

W_{ss} = peso en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca, en gramos

7.1.1.5.2. Ensayo Marshall

El procedimiento que se describe a continuación, es aplicable a todas las probetas compactadas.

1. Se lleva la probeta a un baño de agua $60 \pm 1^\circ\text{C}$ durante un lapso de 30 a 40 minutos.

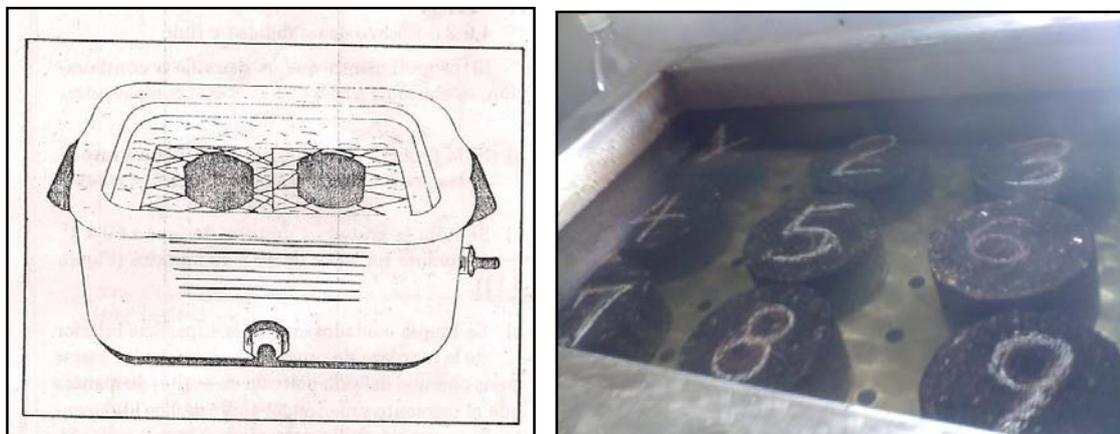


Figura 28. Baño de María de las Briquetas

2. Se limpia cuidadosamente la superficie interior de la mordaza de prueba y se lubrican las barras guías con una delgada película de aceite, de manera que el segmento superior del anillo deslice libremente. si se usa un anillo para medir la carga aplicada, debe controlarse que su dial este bien fijo y en cero cuando no haya carga.
3. Estando listo el aparato de carga Marshall para el ensayo, se saca la probeta del agua y se seca rápida y cuidadosamente su superficie.
4. Se coloca la probeta en la mordaza inferior de prueba y se centra. Luego se ajusta el anillo superior en posición y se centra el conjunto en el mecanismo de carga.
5. A continuación se coloca el medidor de flujo sobre la barra guía marcada y se lleva su aguja a cero.
6. Se aplica carga a la probeta a una velocidad de 2 pulgadas/minutos hasta que ocurra la falla. El punto de falla se define mediante la máxima lectura obtenida en el dial de carga.

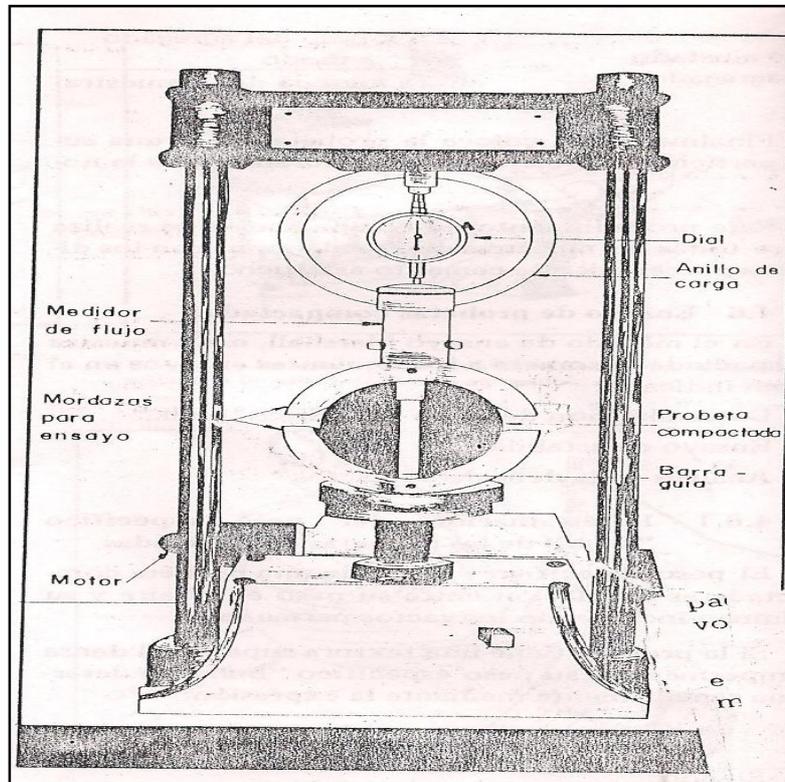


Figura 29. Máquina de Ensayo Marshall

7. El número de libras correspondientes a esta lectura se anota como ESTABILIDAD MARSHALL, y dentro del formato de diseño, es incluida en la columna de la estabilidad medida p, que al multiplicarse por un factor de corrección de acuerdo al espesor de las briquetas (rangos de espesores), ubicados en los ensayos dentro de la investigación, en la columna c.
8. El valor producto de la última operación con referencia al factor de corrección, establece el valor de la estabilidad corregida, nuevo valor incluido en la columna q.
9. Mientras se está aplicando carga, se mantiene el medidor de flujo firmemente en posición sobre la barra-guía y se retira cuando ocurra la carga máxima FLUJO y se acostumbra expresar en centésimas de pulgada (0,01 pulgadas).

Este valor se introducirá dentro de los valores que conformarán la última columna r.

10. El procedimiento completo, desde que se saca la probeta del baño de agua hasta que falla en la maquina, no debe tardar más de 30 segundos.

7.1.1.5.3. Análisis de Densidad y Vacíos

Al terminar los ensayos de estabilidad y flujo, debe realizarse un análisis de la densidad y vacíos para cada serie de muestras en la forma siguiente:

- a) Se promedian los pesos específicos "bulk" de todas las probetas elaboradas con el mismo porcentaje de asfalto, descartando las que se alejen demasiado del promedio. Este valor promedio, multiplicando por 62.4 se obtiene la densidad en sistema inglés; este valor es ubicado en la columna correspondiente del peso unitario, respecto al peso específico de la mezcla actual, que es la columna o.
- b) Se calcula el peso específico promedio del agregado total, mediante la expresión:

$$G_{agr} = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \dots} = 2.241$$

Ecuación 6. Peso Específico Agregados Incluidos en la Mezcla

Donde:

P_1, P_2, P_3 = porcentaje en peso de cada una de las fracciones del material que intervienen en el total del agregado

G_1, G_2, G_3 = pesos específicos de los materiales a los que corresponden las fracciones anteriormente mencionadas. Deberá emplearse el aparente para el

material llenante mineral y el "bulk" para las fracciones de agregados grueso y fino.

- c) Se calcula el peso específico máximo teórico de la muestra para cada porcentaje de asfalto, el cual corresponde al que teóricamente se obtendría si fuera posible comprimir la muestra hasta obtener una masa de asfalto y agregados carente de vacíos con aire. Este valor se calcula así.

$$G_{mt} = \frac{100}{\frac{\% \text{ Peso de agregados en mezcla}}{G_{agr}} + \frac{\% \text{ Peso cemento Asfáltico en mezcla}}{G_{asf}}}$$

Ecuación 7. Peso Específico Máximo Teórico

Este valor que se coloca en la columna h del formato que se observará en la sección de anexos, al presentar los diseños con y sin Sikafiber AD.

- d) Se procede a hallar el valor del volumen que ocupa el asfalto en la mezcla total, a través del reemplazo en la siguiente ecuación, de los valores que ya se han determinado antes, de esta manera:

$$V_{asf} = \frac{\% \text{ cemento asfáltico} \times G_b}{G_{asf}}$$

Ecuación 8. Volumen que ocupa el cemento asfáltico en la mezcla

Este valor se incluye en la columna i del formato.

- e) Se determina el porcentaje en volumen que ocupa los agregados con respecto al volumen total de la probeta (columna j del formato).

$$V_{agr} = \frac{\% \text{ agregados} \times G_b}{G_{agr}}$$

Ecuación 9. Volumen que Ocupan los Agregados en la Mezcla

- f) Se procede a hallar el porcentaje de volumen que ocupa en la mezcla, los vacios, mediante el sencillo planteamiento de restar del 100% del volumen total de la muestra, el volumen que ocupa los agregados y el asfalto.

$$V_{vac} = 100 - V_{asf} - V_{agr}$$

Ecuación 10. Volumen que Ocupan los Vacios en la Mezcla

Este valor se presenta en la columna k del formato.

- g) Se determina el porcentaje de vacios en los agregados minerales en la mezcla compactada.

$$\% V_{am} = 100 - V_{agr}$$

Ecuación 11. Porcentaje de Vacios en los Agregados Minerales

Este valor se ubicará en la columna l del formato de diseño Marshall.

- h) Se calcula el porcentaje de vacios con aires con respectos al volumen total de la probeta.

$$\% V_{mezcla} = \left(1 - \frac{G_b}{G_{mm}} \right) \times 100$$

Ecuación 12. Porcentaje de vacios que hay en la Mezcla

Esta cantidad es incluida dentro la serie de valores de la columna m.

- i) Por último, se procede a determinar un valor que dará a conocer el porcentaje de vacíos que es ocupado por el cemento asfáltico dentro de la mezcla, mediante esta ecuación:

$$\% \text{ Vacios LLenos} = \frac{\% V_{asf}}{\% V_{am}}$$

Ecuación 13. Porcentaje de vacíos ocupados o llenos con cemento asfáltico

Este valor se incluirá en la columna m del formato.

Una vez se arma el formato de diseño Marshall, se procede a graficar los siguientes “versus”, con respecto a estas relaciones:

- Densidad vs % de cemento asfáltico
- Estabilidad vs %de cemento asfáltico
- Flujo vs % de cemento asfáltico
- % de vacíos con aire en la mezcla total vs % cemento asfáltico
- % de vacíos en los agregados minerales vs % cemento asfáltico

Por lo general, la mezcla de diseño a elegir debe ser la más económica que cumpla con los criterios establecidos, siempre que las condiciones económicas fuesen iguales, se elegirá la mezcla de mayor estabilidad, aunque debe tenerse presente que las mezclas con estabilidad muy alta y flujo muy bajo no son deseable, porque los pavimentos hechos con tales mezclas tienden a ser muy rígidos y frágiles y pueden agrietarse bajo tránsito. Eso es particularmente cierto cuando las características de la base y la subrasante son tales que permiten deflexiones relativamente altas dentro de la estructura del pavimento.

Es así mismo deseable que el porcentaje de vacíos con aire permanezca dentro de los límites fijados por las especificaciones, ya que si es muy bajo habrá tendencia hacia la exudación del asfalto de la mezcla, mientras que si es muy alto puede producirse un envejecimiento prematuro del asfalto por cuanto la capa queda más expuesta a los agentes atmosféricos, lo que traduce en la desintegración del pavimento.

Cuando con el porcentaje de asfalto calculado no sea posible cumplir los requisitos de las tablas, deberán hacerse algunos ajustes, tales como los indicados en la tabla. Sin embargo, si ni siquiera de ese modo se pueden satisfacer los criterios de diseño, pueden permitirse una tolerancia de 1% en los vacíos con aire, pero por ningún motivo se podrá aceptar que el valor del flujo sea mayor al permitido, ni la estabilidad inferior de la exigida.

7.1.2. METODOLOGIA ADOPTADA CON SIKAFIBER AD

La metodología, básicamente es la misma, solo que esta vez se adicionan las fibras en base al porcentaje del peso que ocupan los agregados dentro de la mezcla asfáltica.

Es en síntesis, casi la misma forma de hacer los ensayos, solo que las fibras se comienzan adicionando en base a lo anteriormente dicho, desde el valor de 0,15% hasta 1,05%, variándolo en intervalos de 0,15%, es decir, 0,15%, 0,30%,...,etc.

Se elige iniciar desde estos valores, a razón de que hacerlo con valores más grandes, y al ver la presentación de estas fibras, nos resultaría una mezcla que no homogenizada por el exceso de volumen que puede obtenerse desde un valor más alto que el 2%, y se decide entonces a simplificar la selección del porcentaje de adición de Sikafiber AD, desde valores bajos al 0%.

En cuanto a la concepción de los ensayos de densidad y vacíos, se determinan los pesos específicos “bulk” actual, es decir, el dado por la interacción de las variables que participan en la ecuación 5, del documento; después, se determina el peso específico por RICE.

Se recuerda que todos los resultados tanto de diseño Marshall sin fibras (normal) y el mismo adicionando Sikafiber AD, se presentan en la sección de anexos.

Se omiten entonces algunas columnas que no se consideran, aporten a las conclusiones que desean saberse, frente al objeto de la investigación del comportamiento mecánico de la mezcla densa en caliente tipo 2 con fibras de Sikafiber AD.

Por último, se procede a graficar las mismas representaciones de “versus” que fueron descritas anteriormente, con el fin de esclarecer un panorama más amplio entre ambos comportamientos con y sin fibras, y así, determinar las conclusiones que sean visibles dentro de la investigación.

CONCLUSIONES

- ❖ A medida que se va incrementando la adición de fibras Sikafiber AD, el peso unitario de la mezcla total, va disminuyendo. Esto es, a razón de que el peso específico de la fibra Sikafiber AD, es menor en comparación al volumen que ésta ocupa dentro de la mezcla, por lo que al ir aumentando la adición de fibra, la mezcla va tornándose, menos densa, y por lo tanto, los vacíos van tomando mas lugar dentro del concreto asfáltico.
- ❖ La disminución del peso específico de la mezcla, produce un aumento en los vacíos de la mezcla. Al tener una mezcla que va siendo menos densa, tenemos el punto de que los vacíos en la misma (mezcla), se va haciendo notorio (va aumentando), cada vez más.
- ❖ La estabilidad de la mezcla mejora a medida que se va adicionando más Sikafiber AD. Junto con esto, la deformación de fluencia, presenta un comportamiento aparente de incrementos y decrementos, ESTABILIDAD Y FLUJO Vs % DE FIBRAS, mostrada en la sección de anexos (graficas diseño de mezcla asfáltica con fibras Sikafiber AD). Esto con 5,5% de cemento asfáltico.

La primera grafica, comunica el comportamiento de la estabilidad de la mezcla densa en caliente tipo 2, con solo la adición de cemento asfáltico. La segunda expresa como, a medida que se agrega más fibra, la mezcla densa en caliente, adquiere un aumento de la estabilidad

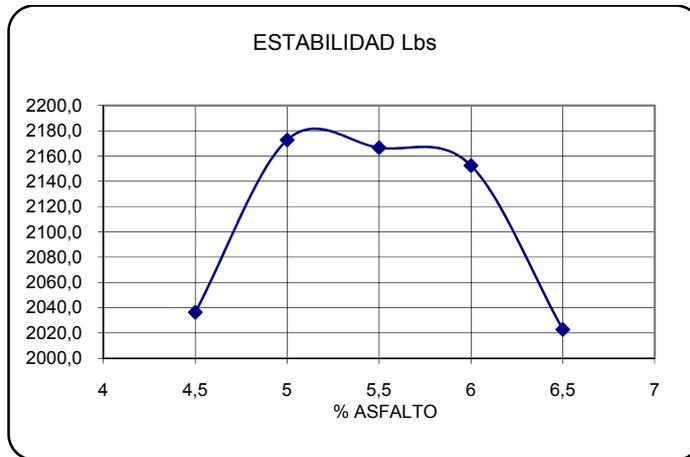


Figura 30. Estabilidad sin Adición de Sikafiber AD

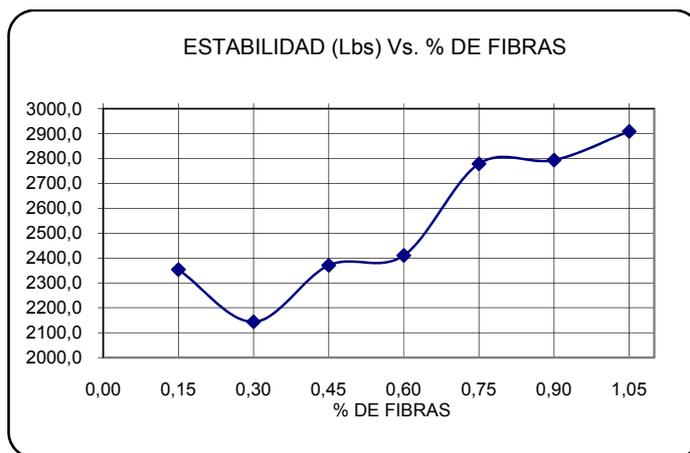


Figura 30. Estabilidad sin Adición de Sikafiber AD

- ❖ Para un porcentaje de cemento asfáltico de 5,5% con respecto al peso de agregados, el mejor porcentaje estimado, de adición de fibras de Sikafiber AD, fue del 0,6% aplicado respecto al peso de agregados.
- ❖ Bajo la estimación anterior con referencia al porcentaje más óptimo de fibras Sikafiber AD, se obtuvo un aumento porcentual de la estabilidad, del 11,3%, mostrando una amplia mejoría del material con la adición de fibra.

- ❖ El flujo dentro de la experiencia, sin fibra, y con fibra, se mantuvo estable con un valor para las condiciones de con y sin Sikafiber AD de 14×10^{-2} pulgadas.

RECURSOS BIBLIOGRAFICOS Y TECNOLÓGICOS

1. **ACOSTA MEZA, RAUL. OJEDA CAICEDO, VILMA VIVIANA. ARELLANO CARTAGENA, WILLIAM.** Guía metodológica para el diseño y desarrollo del trabajo de grado. 1 ed. Cartagena; 2001. 55p.
2. **ALCALDIA MAYOR DE CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.** Decreto No. 0977 de 2001: Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias. 1 ed. Cartagena; 2001. 235 p.
3. **RESTREPO MONTOYA, ALEJANDRO. CASTAÑEDA ACERO, JAVIER HERNANDO. RESTREPO LALINDE, GUSTAVO ADOLFO. GUTIÉRREZ DUQUE, JULIAN ANDRÉS. VÉLEZ GONZÁLEZ, SAMUEL RICARDO.** Membranas de hormigón reforzadas con fibras sintéticas. En: Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales; 2006 Oct. 9-13; Habana; 2006. P. 524-533.
4. **REYES ORTÍZ, O.J. TRONCOS RIVERA, J.R.** Comportamiento Mecánico y Dinámico de una Mezcla Asfáltica con Adición de Fibras. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería Civil; 2005. 17 p.
5. **HEINECK SALVAGNI, K. RICHARD COOP, MATTHEW. CESAR CONSOLI, NILO.** Effect of Microreinforcement of Soils From Very Small to Large Shear Strains. ASCE: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering * 2005; Vol. 131, Issue 8, p. 1024-1033.
6. **MONTEJO FONSECA, ALFONSO.** Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, Estudios Básicos y Diseño; Tomo 1 y Tomo 2. Reimpresión 3 ed. Bogotá: Universidad Católica de Colombia; 2008. 612 p.

7. **MORALES CAMACHO, PABLO MANUEL.** Construcción y Conservación de Vías. 1 ed. Bogotá; 2008. 486 p.

8. **ASOCIACION DE PRODUCTORES Y PAVIMENTADORES ASFÁLTICOS DE COLOMBIA, ASOPAC,** Cartilla del Pavimento Asfáltico. 1 ed. Bogotá, Colombia; 2004. 51 p.

9. **INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, INVIAS.** Normas de Ensayos para Materiales de Carreteras. Bogotá, Colombia; 2007.

10. **INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, INVIAS.** Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá, Colombia; 2007.

ANEXOS