

**DIAGNÓSTICO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EMPLEADAS PARA EL  
DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS EN CALIENTE MDC-2**

**HUGO ERNEY CAMARGO CHÁVEZ  
ANDREA DEL PILAR SUÁREZ MESA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN DE INGENIERÍA DE PAVIMENTOS  
BOGOTÁ D.C  
2010**

**DIAGNÓSTICO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EMPLEADAS PARA EL  
DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS EN CALIENTE MDC-2**

**HUGO ERNEY CAMARGO CHÁVEZ  
ANDREA DEL PILAR SUÁREZ MESA**

**Monografía de grado presentado como requisito parcial para optar al título  
de Especialista en Ingeniería de Pavimentos**

**Director: Msc. CARLOS ALBERTO ECHEVERRY ARCINIEGAS**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN DE INGENIERÍA DE PAVIMENTOS  
BOGOTÁ D.C  
2010**

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD**

**BRIGADIER GENERAL (r) EDUARDO ANTONIO HERRERA BERBEL**  
**Rector**

**MAYOR GENERAL (r) GABRIEL CONTRERAS OCHOA**  
**Vicerector General**

**DOCTORA MARTHA LUCÍA BAHAMÓN JARA**  
**Vicerectora Académica**

**BRIGADIER GENERAL (r) ALBERTO BRAVO SILVA**  
**Vicerector Administrativo**

**INGENIERO ERNESTO VILLAREAL SILVA. Ph.D**  
**Decano de la Facultad**

## **APROBACIÓN**

La Monografía de Grado titulada “**DIAGNÓSTICO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EMPLEADAS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS EN CALIENTE MDC-2**”, presentado por Hugo Erney Camargo Chávez y Andrea del Pilar Suárez Mesa en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de “Especialista en Ingeniería de Pavimentos”, fue aprobada por el Director.

---

**Msc. CARLOS ALBERTO ECHEVERRY ARCINIEGAS**

Director

---

Jurado I

---

Jurado II

---

**Ing. FELIPE RIAÑO PÉREZ**

Metodólogo Asesor

Bogotá D.C, octubre de 2010

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos:

- Al Ingeniero CARLOS ALBERTO ECHEVERRY ARCINIEGAS, profesor de cátedra del área de Administración de Pavimentos y Director del Proyecto.
- Al Ingeniero DAVID GONZALEZ HERRERA, profesor de cátedra del área de pavimentos flexibles.
- Al Ingeniero FELIPE RIAÑO PÉREZ, docente de la Universidad Militar Nueva Granada y metodólogo asesor del proyecto.
- A las directivas de la Universidad Militar Nueva Granada.
- Al Ingeniero DIEGO CORREAL MEDINA MIC, Director del Programa de Ingeniería Civil.
- Al Ingeniero GONZALO RIOS, Coordinador Especialización Ingeniería de Pavimentos
- A todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto.

## CONTENIDO

0.	INTRODUCCIÓN.....	17
1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
2.	JUSTIFICACIÓN.....	19
3.	OBJETIVOS.....	22
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	22
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
4.	MARCO TEÓRICO .....	23
4.1	NORMATIVIDAD.....	23
4.1.1	Especificaciones INVIAS 2007.....	23
4.1.2	Especificaciones IDU – 2005. ....	24
4.1.3	Especificaciones Especiales del IDU – 2009. ....	24
4.2	MEZCLA ASFÁLTICA .....	25
4.2.1	Mezcla Asfáltica Densa en Caliente.....	26
4.2.1.1	Asfalto. ....	26
4.2.1.2	Agregados Pétreos. ....	27
4.2.1.3	Llenante Mineral. ....	27
4.2.1.4	Modificadores.....	28
4.3	ASFALTO MODIFICADO PARA FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	28
4.3.1	Morfología de los asfaltos modificados .....	29
4.3.2	Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos. ....	30
4.3.2.1	Elastómeros.....	31
4.3.2.2	Plastómeros .....	35

4.3.3 Otros modificadores de las mezclas asfálticas. ....	37
4.3.3.1 Llenante mineral .....	38
4.3.3.2 Fibras .....	38
4.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS.....	39
4.4.1 Características óptimas de las mezclas asfálticas modificadas.....	40
4.4.2 Ventajas de una mezcla modificada respecto a una mezcla convencional..	41
4.4.3 Ensayos realizados para caracterizar las mezclas asfálticas.....	42
4.4.3.1 Ensayo Marshall. ....	48
4.4.3.2 Ahuellamiento. ....	48
4.4.3.3 Módulo dinámico.....	49
4.4.3.4 Ensayo SARA – Características químicas del cemento asfáltico.....	50
5. METODOLOGÍA.....	53
6. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE MODIFICACIÓN.....	55
6.1 MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON GRANO DE CAUCHO DE LLANTA .....	55
6.1.1 Estudio realizado por el Grupo conformado por el IDU – Universidad de los Andes.....	57
6.1.1.1 Proceso por vía seca. ....	64
6.1.1.2 Proceso por vía húmeda. ....	69
6.1.2 Mezcla densa 0/10 fabricada con desperdicio de llanta.....	82
6.1.3 Comparativo de los estudios desarrollados con adición de desecho de llanta. ....	84
6.2 MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE MODIFICADA CON DESECHOS PLASTOMÉRICOS.....	85
6.2.1 Estudio del comportamiento de la mezcla asfáltica modificada con policloruro de vinilo (PVC) .....	86

6.2.2	Análisis del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas modificadas con desechos de Policloruro de Vinilo (PVC), Polietileno de alta densidad (PEAD) y Poliestireno (PS). .....	93
6.2.3	Mejoramiento de la capa asfáltica mediante la inclusión de desechos plásticos.....	99
6.2.4	Mezcla asfáltica densa en caliente modificada con icopor. E .....	105
6.2.5	Comparativo entre las experiencias analizadas. ....	110
6.3	MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON LA COMBINACIÓN DE PLASTÓMEROS Y ELASTÓMEROS.....	112
6.3.1	Mezcla asfáltica modificada con caucho y tiras de bolsas de leche.....	113
6.3.2	Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada.....	122
6.3.3	Comparativo en las experiencias analizadas de acuerdo al comportamiento del GCR con el plastómero adicionado (Plástico bolsas de leche e icopor). .....	125
6.4	COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES .....	126
6.5	COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE FIBRAS.....	132
7.	RESULTADOS .....	135
8.	CONCLUSIONES .....	139
9.	RECOMENDACIONES.....	141
	BIBLIOGRAFIA.....	142



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proporción de llenante mineral de aporte (% en masa del llenante total, excluido el adherido a los agregados) .....	38
Tabla 2. Ensayos de laboratorio sobre los componentes de las mezclas asfálticas .....	43
Tabla 3. Ensayos de laboratorio para la fabricación de las mezclas asfálticas.....	46
Tabla 4. Resultados de los ensayos realizados a los agregados pétreos de la Cantera Mario Huertas.....	58
Tabla 5. Propiedades generales del cemento asfáltico 80 – 100 proveniente de Barrancabermeja y 60 – 70 proveniente de Apiay .....	59
Tabla 6. Resultados del ensayo SARA a los asfaltos de Barrancabermeja y Apiay sin modificar.....	61
Tabla 7. Resultados de viscosidad Brookfield para el asfalto de Apiay .....	62
Tabla 8. Resultados de viscosidad Brookfield para el asfalto de Barrancabermeja .....	63
Tabla 9. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los asfaltos de Apiay y Barrancabermeja en los estados (Original, RTFO, PAV) .....	64
Tabla 10. Resultados del Diseño Marshall para la MDC-2 con 0%, 1% y 2% de adición de caucho .....	65
Tabla 11. Resultados de Módulos dinámicos de la MDC-2 .....	66
Tabla 12. Resultados de Deformación permanente diseños MDC-2 .....	68
Tabla 13. Resultados del ensayo de Viscosidad Brookfield del cemento asfáltico de Apiay .....	71
Tabla 14. Resultados del ensayo de Viscosidad Brookfield del cemento asfáltico de Barrancabermeja .....	71
Tabla 15. Resultados de la Viscosidad Brookfield para los asfaltos modificados seleccionados .....	72

Tabla 16. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los asfaltos modificados A-13-165-55 y B-15-155-50 en los estados (Original, RTFO, PAV)...	76
Tabla 17. Resultados de ensayos convencionales sobre cemento asfáltico no modificado y modificado con GCR.....	77
Tabla 18. Resultados de Módulos dinámicos de la MDC-2 por el proceso húmedo .....	79
Tabla 19. Resultados de los ensayos de caracterización del material granular.....	82
Tabla 20. Resultados de los ensayos de caracterización del asfalto .....	83
Tabla 21. Comparativo de las experiencias realizadas por (IDU – Universidad de los Andes) y la presentada en el libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas.....	84
Tabla 22. Caracterización de los agregados pétreos.....	87
Tabla 23. Características generales del cemento asfáltico 80 – 100 proveniente de Barrancabermeja .....	87
Tabla 24. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica convencional MDC-2 con cemento asfáltico 80 - 100.....	88
Tabla 25. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PVC por vía húmeda.....	88
Tabla 26. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PVC por vía seca .....	89
Tabla 27. Comparativo del comportamiento del módulo dinámico por vía seca y húmeda de la adición de PVC a la mezcla asfáltica .....	91
Tabla 28. Conclusiones de la mezcla asfáltica modificada por vía seca y húmeda .....	92
Tabla 29. Caracterización de los agregados pétreos.....	94
Tabla 30. Características generales del asfalto proveniente de Barrancabermeja	94
Tabla 31. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica convencional MDC-2 .....	95
Tabla 32. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PVC .....	95

Tabla 33. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PEAD .....	95
Tabla 34. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PS .....	96
Tabla 35. Resultados de caracterización de los asfaltos .....	97
Tabla 36. Propiedades mecánicas del poliestireno .....	99
Tabla 37. Metodología de diseño empleada .....	100
Tabla 38. Resultados del diseño Marshall con la inclusión del poliestireno .....	101
Tabla 39. Relación de módulos dinámicos de las mezclas asfálticas .....	102
Tabla 40. Número de ciclos en la falla debido al esfuerzo aplicado.....	103
Tabla 41. Resultados del ensayo de deformación permanente de la mezcla convencional y modificada.....	104
Tabla 42. Caracterización de los agregados pétreos.....	105
Tabla 43. Caracterización del asfalto.....	106
Tabla 44. Caracterización del poliestireno – Norma NTC 1524 .....	106
Tabla 45. Caracterización del asfalto modificado con poliestireno comparado con el asfalto convencional.....	107
Tabla 46. Comparación de los resultados obtenidos en la mezcla asfáltica convencional y modificada.....	107
Tabla 47. Relación de módulos dinámicos de las mezclas asfálticas .....	108
Tabla 48. Comparativo de las experiencias estudiadas de acuerdo a cada tipo de modificador .....	111
Tabla 49. Resultados de los ensayos de caracterización del agregado .....	114
Tabla 50. Resultados de los ensayos de caracterización del asfalto .....	115
Tabla 51. Resultados de ahuellamiento en las cuatro mezclas analizadas .....	116
Tabla 52. Resultados análisis SARA al asfalto convencional y al asfalto modificado .....	119
Tabla 53. Comparativo de las experiencias realizadas: Combinación GCR + Bolsas de leche y GCR + Icopor.....	125
Tabla 54. Resultados de la caracterización de los materiales pétreos .....	128

Tabla 55. Resultados de la caracterización del cemento asfáltico.....	129
Tabla 56. Caracterización química de la ceniza volante .....	129
Tabla 57. Diseño del ensayo Marshall.....	130
Tabla 58. Resultados de la caracterización de los materiales pétreos .....	132
Tabla 59. Resultados de la caracterización del cemento asfáltico.....	133
Tabla 60. Resultados de la caracterización de las fibras .....	133
Tabla 61. Ventajas y desventajas de la utilización de los modificadores estudiados en las mezclas asfálticas .....	136

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de una mezcla asfáltica .....	26
Figura 2. Composición del asfalto.....	27
Figura 3. Clasificación de los aditivos y modificados de cementos asfálticos.....	28
Figura 4. Composición del caucho de llanta empleado para la modificación del asfalto .....	33
Figura 5. Componentes del caucho GCR que intervienen en las propiedades de las mezclas asfálticas .....	34
Figura 6. Niveles de molienda del neumático para transformarlo en grano de caucho .....	34
Figura 7. Características deseadas en una Mezcla Asfáltica.....	42
Figura 8. Resultados del ensayo Marshall .....	48
Figura 9. Factores que intervienen en la resistencia a la deformación .....	49
Figura 10. Comportamientos del módulo dinámico en las mezclas .....	49
Figura 11. Estructura molecular del asfalto.....	51
Figura 12. Cromatograma tipo de los cementos asfálticos .....	52
Figura 13. Proceso metodológico empleado para el desarrollo del proyecto.....	54
Figura 14. Variación de los componentes químicos del cemento asfáltico en los tres estados analizados .....	61
Figura 15. Variación de los módulos dinámicos de la MDC-2 0%, MDC-2 1% y MDC-2 2% GCR a temperaturas de 5°C, 25°C y 40°C y frecuencias de 1, 4, 10 y 16 Hz .....	66
Figura 16. Productos de la Viscosidad Brookfield.....	70
Figura 17. Variación de la viscosidad Brookfield para los asfaltos A-13-165-55 y B-15-155-50 en los estados (Original, RTFO, PAV) .....	73
Figura 18. Comparativo gráfico de la viscosidad Brookfield para los asfaltos A-13-165-55 y Convencional de Apiay en los estados (Original, RTFO, PAV).....	74

Figura 19. Comparativo gráfico de la viscosidad Brookfield para los asfaltos B-15-155-50 y Convencional de Barrancabermeja en los estados (Original, RTFO, PAV) .....	75
Figura 20. Variación de los módulos dinámicos de la mezcla con adición de 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0% de asfalto a temperaturas de 5°C, 25°C y 40°C y frecuencias de 1, 4, 10 y 16 Hz.....	79
Figura 21. Variación de los módulos dinámicos de la mezcla convencional y la modificada a temperaturas 10°C, 20°C, 30°C.....	102
Figura 22. Variación de los módulos dinámicos de la mezcla convencional y la modificada a temperaturas 10°C, 20°C, 30°C.....	109
Figura 22. Resultados de ahuellamiento en las cuatro mezclas analizadas .....	116
Figura 24. Diagrama de metodología de la investigación .....	127

## GLOSARIO

**ASFALTENOS:** son compuestos solubles que se precipitan del petróleo crudo por la adición de como mínimo 40 moléculas de n-pentano. Son de color que va desde el café oscuro – negro sin punto de fusión definido; al calentarse forma una masa viscosa que se descompone, se hincha y se aglutina, dejando un residuo de carbón.

**CENIZA:** producto de la combustión de algún material, compuesto por sustancias inorgánicas no combustibles como sales minerales.

**DESECHOS:** material considerado como basura y que se necesita eliminar.

**DURABILIDAD:** capacidad de mantener las propiedades ligantes y cohesivas en la mezcla, antes y después de envejecido.

**GCR:** grano de caucho de llanta reciclado.

**MALTENOS:** son la fracción soluble en hidrocarburos saturados de bajo punto de ebullición. Es un dispersante coloidal de partículas de asfaltina disueltas en un material parecido al aceite y muy pesado. Le dan la calidad al asfalto.

**MICROSCOPIA:** es la técnica de producir imágenes visibles de estructuras o detalles demasiado pequeños para ser percibidos a simple vista. En la microscopia se evidencia los grandes aportes que la física ha hecho a la biología.

**PETREO:** son las piedras naturales, pueden presentarse en forma de bloques, losetas, gránulos. Se derivan de la roca o poseen una calidad similar a la de ésta, siendo usados casi exclusivamente en el sector de la construcción.

**PVC:** (policloruro de vinilo). Es un polímero termoplástico que tiene buena resistencia eléctrica y a la llama.

**RECICLAR:** obtener materia prima a partir de desechos, introduciéndolos de nuevo en un ciclo de vida.

**REOLOGÍA:** es la rama de la mecánica que estudia el comportamiento de la materia a través del tiempo de aplicación de una carga, mediante el estudio de propiedades de flujo y deformación como la viscosidad, la ductilidad, la fragilidad, entre otras, permitiendo establecer una relación entre el estado coloidal de los cementos asfálticos y su composición química.

**REUTILIZAR:** intentar alargar la vida de los productos; y en el caso que el producto no sirva para su función, intentar darle otros usos.

**RIGIDEZ:** es la relación entre el esfuerzo cortante y la deformación en función del tiempo de aplicación de carga. Se afirma que a altas temperaturas de servicio, el cemento asfáltico debe tener alta rigidez con el fin de evitar el ahuellamiento, por el contrario a bajas temperaturas debe ser la rigidez baja para evitar el fisuramiento por contracción térmica.

**SBS:** (estireno – butadieno – estireno). Caucho duro que se usa para fabricar neumáticos. Es un tipo de copolímero en bloque.

**STRIPPING:** desprendimiento de la interfase por efecto del agua.



## 0. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo pretende brindar alternativas de modificación de las Mezclas Asfálticas Densas en Caliente, empleadas para la pavimentación de las vías en Colombia, mecanismos que actualmente generan un impacto ambiental negativo debido a la utilización de los materiales pétreos, los cuales debido a su ubicación no cumplen con las especificaciones técnicas o son de difícil acceso en algunas zonas de nuestro país. Es por ello que estudios realizados han demostrado que la fabricación de mezclas con asfalto convencional no han sido suficientes para soportar la acción del tránsito y el clima; por lo tanto se ha recomendado emplear modificadores o aditivos en las mezclas, con el fin de mejorar las características o propiedades reológicas tanto del cemento asfáltico como de las mezclas asfálticas; así como emplear desechos de materiales que generan un alto impacto en el ambiente.

Por lo anterior se darán a conocer nuevas tecnologías de modificación de las mezclas asfálticas convencionales, en las cuales se emplean modificadores como desechos de PVC, caucho reciclado de llanta, desechos plásticos, desechos de caucho y bolsas de leche (Larga vida), empleo de fibras y cenizas volantes como llenante mineral.

Con estas tecnologías se realizará un diagnóstico comparativo del comportamiento de cada uno de estos modificadores en cumplimiento con las especificaciones INVIAS vigentes en el momento de realizada la investigación.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Las Mezclas Asfálticas Densas en Caliente, empleadas actualmente para la pavimentación de las vías en Colombia, son mecanismos que están generando un impacto ambiental negativo debido a la utilización de los materiales pétreos, los cuales debido a su ubicación no cumplen con las especificaciones técnicas o son de difícil acceso en algunas zonas de nuestro país. Es por ello que estudios realizados han demostrado que la fabricación de mezclas con asfalto convencional no han sido suficientes para soportar la acción del tránsito y el clima; por lo tanto se ha recomendado emplear modificadores o aditivos en las mezclas, con el fin de mejorar las características o propiedades reológicas tanto del cemento asfáltico como de las mezclas asfálticas. Estos materiales estudiados son desechos no biodegradables que afectan notablemente el ambiente a nivel mundial.

Por lo anterior se ve la necesidad de analizar tecnologías de modificación de mezclas asfálticas practicadas en Colombia, con el fin de analizar el comportamiento químico y reológico con el asfalto y materiales pétreos empleados para la fabricación de mezclas asfálticas.

### **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuál es el comportamiento de los modificadores en el diseño de mezclas asfálticas para lograr que cumplan con las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras INVIAS?

## 2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia se han establecido parámetros para la elaboración de Mezclas Densas en Caliente MDC-2, las cuales han sido fabricadas empleando asfaltos convencionales, derivados del petróleo y siguiendo las directrices estipuladas en las Especificaciones Técnicas INVIAS cuando las mezclas son empleadas en la construcción de capas de rodadura de las vías del país; para el caso de Bogotá se tienen en cuenta las Especificaciones Técnicas IDU.

Estas mezclas han presentado “alta susceptibilidad al ahuellamiento como consecuencia del flujo vehicular y la repetición de las cargas, la canalización de la circulación y en zonas de paraderos por el efecto de impulso y detenimiento de vehículos.”<sup>1</sup> Generando deterioros a corto plazo e incrementos económicos debido a un mejoramiento o rehabilitación para poder cumplir con la vida útil programada. Por otro lado la fabricación de las mezclas asfálticas genera altos índices de deterioro de los recursos pétreos existentes en las diferentes regiones del país, produciendo un nivel alto de impacto ambiental.

Paralelamente en el mundo existe la problemática sobre la disposición de desechos como cauchos, plásticos, y otros desechos que impactan el ambiente debido a su difícil descomposición y mala utilización; residuos que abundan en nuestro país y que no se ha definido un modo de reutilización.

Por estas razones ingenieros investigadores se han dedicado a profundizar acerca de la fabricación de mezclas empleando estos materiales desechados por la

---

<sup>1</sup> REYES LIZCANO, Freddy Alberto y FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía. Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas. Síntesis de la investigación colombiana. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2008.p. 13.

sociedad y que se pueden aprovechar desarrollando actividades de reducción, reutilización y reciclaje para de esta manera contribuir a la disminución del impacto ambiental, a través de la generación de nuevas mezclas con el fin de brindar durabilidad a los pavimentos flexibles tanto en Colombia como a nivel mundial.

Actualmente, “las mezclas asfálticas elaboradas con ligantes modificados o agentes modificadores, presentan altos valores de rigidez a temperaturas altas de servicio, ayudando a disminuir los ahuellamientos y bajos valores de rigidez a bajas temperaturas, permitiendo disminuir el fisuramiento y deterioro prematuro de la carpeta asfáltica.”<sup>2</sup>

Partiendo de estas apreciaciones, con el desarrollo de este trabajo se pretende dar a conocer nuevas tecnologías desarrolladas en Colombia, a partir de investigaciones realizadas por grupos de ingenieros de investigación, los cuales han demostrado que las mezclas asfálticas modificadas son y serán una buena alternativa tanto de preservación del medio ambiente, como del comportamiento que pueden llegar a presentar estas mezclas en las vías colombianas.

Es por ello que al analizar las experiencias realizadas, las cuales son la base principal para el desarrollo de este trabajo, y mediante los resultados generados en el momento de la investigación se generará un diagnóstico que dará a conocer las ventajas y desventajas de cada una de estas alternativas frente a la normativa vigente en Colombia. Es de comprender que las vías nacionales presentan variaciones en el momento de su construcción, como es el clima, tráfico, terreno (Montañoso, ondulado, plano, etc.), dificultad de contar con agregados en la zona; estas variaciones han generado la visión de desarrollar procesos acordes a la región de desarrollo de la vía, como utilización de nuevos materiales como

---

<sup>2</sup> ARENAS, Lozano Hugo León. Tecnología del cemento asfáltico. 5ª. Edición. 2006. Pág. 281

desechos plásticos, residuos de PVC, reciclaje del caucho de llantas deterioradas, cenizas volantes, entre otras formas de modificación de mezclas.

Por lo tanto, al comparar cada una de estas mezclas modificadas con una mezcla convencional se darán a conocer las ventajas, desventajas, conclusiones y recomendaciones para el empleo de ellas, de acuerdo a las condiciones iniciales del proyecto.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar la información existente acerca del uso de agentes modificadores empleados para la fabricación de las mezclas asfálticas que cumplan con las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras INVIAS.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ∞ Recopilar la información existente acerca de las nuevas tecnologías empleadas para la fabricación de las mezclas asfálticas.
  
- ∞ Conocer las tecnologías existentes de modificación de mezclas asfálticas y practicadas en Colombia.
  
- ∞ Realizar una descripción técnica de cada una de las metodologías y compararlas con las normas técnicas vigentes en el momento de la realización de la investigación y llevarlas a la norma actual.
  
- ∞ Elaborar un diagnóstico aplicativo de cada una de estas tecnologías en el cual se expondrán las ventajas y desventajas de cada técnica.

## 4. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se dará una breve descripción de la información normativa, técnica y experimental relacionada con las mezclas asfálticas densas en caliente modificadas.

A continuación se describe el marco legal vigente en Colombia para la utilización de las mezclas asfálticas modificadas en la pavimentación de la red vial nacional y urbana en la ciudad de Bogotá D.C.

### 4.1 NORMATIVIDAD

Dentro de la normativa vigente en Colombia para la construcción de carreteras, existen las siguientes:

**4.1.1 Especificaciones INVIAS 2007.** El Ministerio de Transporte a través de la Resolución No. 003288 del 15 de agosto de 2007 actualizó las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras para los contratos de obra celebrados por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS<sup>3</sup>.

En estas especificaciones se contemplan los Artículos 400 y 450 los cuales describen:

---

<sup>3</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2007. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007.

**Artículo 400 – 07.** Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos.

**Artículo 450 – 07.** Mezclas asfálticas en caliente (Concreto asfáltico y Mezcla de Alto Modulo).

**4.1.2 Especificaciones IDU – 2005.** El Instituto de Desarrollo Urbano – IDU a través de la Resolución No. 1959 del 18 de mayo de 2006, adoptó las Especificaciones Técnicas Generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C. – IDU ET 2005<sup>4</sup>.

Dentro de estas especificaciones se contempla el Capítulo 2, dentro del cual se enmarcan las siguientes secciones:

Sección 200 – 05. Cemento asfáltico

Sección 202 – 05. Cemento asfáltico modificado con polímeros

Sección 510 – 05. Mezclas Asfálticas en Caliente Densas, Semidensas y Gruesas

**4.1.3 Especificaciones Especiales del IDU – 2009.** Después de realizar estudios de investigación, el Instituto de Desarrollo Urbano expidió la Resolución No. 3649 del 16 de septiembre de 2009, por medio de la cual se adoptaron las siguientes especificaciones técnicas:

---

<sup>4</sup> INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificaciones Técnicas Generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C. – IDU ET 2005. Bogotá D.C.: El Instituto, 2005.



- ∞ Geomallas en capas asfálticas
- ∞ Parcheo de Pavimento Asfáltico con Mezclas Asfálticas Prefabricadas Almacenadas.
- ∞ Aplicación del Grano de Caucho Reciclado (GCR) en Mezclas Asfálticas en Caliente (Vía Húmeda)<sup>5</sup>

De estas especificaciones técnicas especiales, se hará referencia a la aplicación del grano de caucho reciclado.

## **4.2 MEZCLA ASFÁLTICA**

Las mezclas asfálticas, también llamadas aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que cubre los agregados. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de llenante mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Componentes que son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el llenante mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.<sup>6</sup>

---

<sup>5</sup> INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación Técnica para la Aplicación del Grano de Caucho Reciclado (GCR) en Mezclas Asfálticas en Caliente (Vía Húmeda). Bogotá D.C.: El Instituto, 2009.

<sup>6</sup> PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. México D.F. Universidad Politécnica de Catalunya. Ingeniería de Canales, Puertos y Caminos Vecinales. 2004. 45 p.

**Figura 1. Componentes de una mezcla asfáltica**



FUENTE. Tomado de la teoría básica y elaborada por los autores del presente trabajo

De los tipos de mezcla asfáltica, existente se realizará una breve descripción de la mezcla asfáltica densa en caliente.

**4.2.1 Mezcla Asfáltica Densa en Caliente.** Es la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y eventualmente aditivos, de manera que todas las partículas de agregados queden bien recubiertos por la película del ligante. Su proceso de fabricación implica calentar bien el ligante y los agregados, excepto el llenante mineral.<sup>7</sup>

**4.2.1.1 Asfalto.** El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido por asfáltenos, resinas y aceites, los cuales proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientes normales. Al calentarse se ablanda

---

<sup>7</sup>Ibid., 47p.

gradualmente hasta alcanzar una consistencia líquida. Pueden tener dos orígenes: los derivados del petróleo y los naturales.<sup>8</sup>

**Figura 2. Composición del asfalto**



Fuente. Manual del Asfalto. AsphaltInstitute

**4.2.1.2 Agregados Pétreos.** Son materiales granulares provenientes de fuentes naturales o mediante el proceso de trituración y deben cumplir con las granulometrías adecuadas para la fabricación de mezclas asfálticas.

∞ **Agregados Gruesos.** Los agregados gruesos consisten en grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm.

∞ **Agregados Finos.** Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o material triturado siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm.

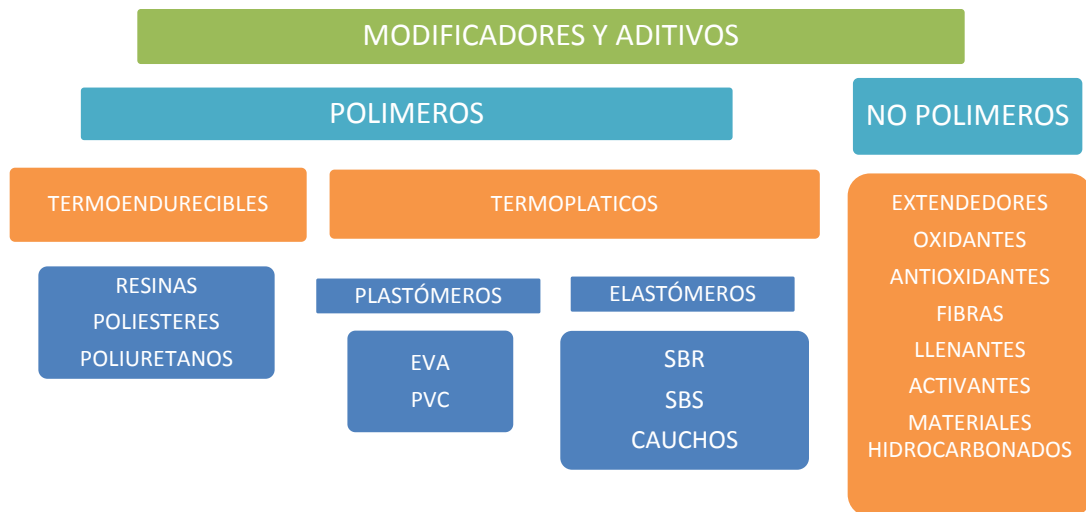
**4.2.1.3 Llenante Mineral.** Es también llamado filler, es el material granular que pasa el tamiz No. 200, puede ser proveniente del proceso de trituración o como producto comercial de origen calizo.

---

<sup>8</sup> N-CMT-4-05-001/00. Materiales para Pavimentos, Calidad de Pavimentos Asfálticos. SCT. 1p

**4.2.1.4 Modificadores.** Los modificadores del asfalto son aditivos provenientes de polímeros o llenante mineral proveniente de la trituración de material calizo; estos modificadores se adicionan al asfalto para mejorar las características dentro de la mezcla asfáltica.

**Figura 3. Clasificación de los aditivos y modificados de cementos asfálticos**



Fuente. Apuntes de clase Tecnología del Asfalto. David González Herrera. UMNG

### 4.3 ASFALTO MODIFICADO PARA FABRICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Los asfaltos modificados son el producto de la disolución o incorporación de un aditivo modificador (polímero o no polímero), que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades como: menor susceptibilidad a la temperatura, mayor intervalo de plasticidad, mayor cohesión, mejor respuesta elástica, mayor resistencia al agua y al envejecimiento. (Heshmat, 1995).

Los modificadores aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos como la fatiga; reducen el agrietamiento, la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de la temperatura. Estos modificadores son adicionados al asfalto antes de mezclarlos con el material pétreo. (Heshmat, 1995).<sup>9</sup>

**4.3.1 Morfología de los asfaltos modificados.**<sup>10</sup> Diversos autores han estudiado la morfología de los asfaltos modificados por métodos como la microscopía óptica, la microscopía de fluorescencia, la microscopía electrónica de barrido y la microscopía electrónica de transmisión, para determinar si hay o no una verdadera compatibilidad entre el asfalto y el polímero.

∞ Wilson et al. (2000) trabajaron en la localización de fases en las mezclas de asfalto – polímero con criomicroscopía electrónica de emisión de campo. En este estudio se analizaron las interacciones de las mezclas de bitumen – polímero por métodos físicos y reacciones químicas in situ. El estudio microscópico de la mezcla por métodos químicos mostró una distribución homogénea del polímero muy superior a la obtenida por métodos físicos, lo que se correlacionó con su caracterización fisicoquímica y fisicomecánica.

∞ Daquan et al. (2006) prepararon asfaltos modificados con SBS por medios físicos y químicos, para los cuales realizaron ensayos de estabilidad al almacenamiento y de caracterización morfológica por microscopía de fluorescencia y análisis reológicos empleando un DSR; este estudio arrojó

---

<sup>9</sup> FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía, FONSECA SALTANILLA, Elsa Beatriz y REYES LIZCANO, Freddy Alberto. Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. En: Ing. Univ. Bogotá. Enero – Junio de 2009. 47 p. ISSN 0123-2126

<sup>10</sup>Ibíd. 50 – 52 p.

resultados que indican que las propiedades reológicas del asfalto modificado son más estables cuando es el resultado de una verdadera reacción química.

- ∞ Panagiotis (2003) estudió las interacciones entre el caucho triturado y el asfalto modificado por criomicroscopia óptica y señaló que los residuos de caucho pueden reutilizarse, procesándolos en partículas trituradas de caucho y usarlos en pavimentos flexibles, mediante la incorporación de caucho triturado a las mezclas asfálticas.
  
- ∞ Collins et al (1991) estudiaron una estructura tipo red obtenida de acuerdo al tipo de asfalto, grado de asfalto, tipo de polímero y concentración del polímero mediante la microscopia electrónica de transmisión y barrido, preparando delgadas secciones de muestra, embebiendo la mezcla asfalto – polímero en una resina y seccionándola a menos de 110° C.

Con estos estudios realizados, se demuestra que el asfalto modificado con polímeros mejora notablemente las propiedades reológicas brindando un mejor comportamiento al fabricar una mezcla asfáltica.

**4.3.2 Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos.** Los polímeros son compuestos, con un elevado peso molecular formados por muchas unidades pequeñas que se repiten llamados monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termofijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> AVELLÁN CRUZ, Martha Dina. Asfaltos modificados con polímeros. Trabajo de grado Ingeniera Civil. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil, 2007. 91 p.

Los polímeros más utilizados en la modificación del asfalto son:

**4.3.2.1 Elastómeros.** Son polímeros de respuesta elástica: Caucho, SBS, SBR, Isopreno. Estos polímeros al estirarlos sobrepasan la tensión de fluencia, no volviendo a su longitud original al cesar la sollicitación. Tiene deformaciones pseudoplásticas con poca elasticidad.

Los polímeros tipo elastómeros para modificar el asfalto requieren mezclar tres componentes: asfalto, resina base y un endurecedor. Dentro de estos polímeros los más utilizados son:

∞ **Látex, hule natural, SBS, SBR.** Este tipo de polímero es el más utilizado en la modificación del asfalto, el efecto de la adición de estos al asfalto es aumentar su intervalo de plasticidad y disminuir la susceptibilidad térmica. El punto de ablandamiento puede aumentar hasta 20°C, a temperaturas inferiores a 70°C los asfaltos tienen menor penetración, esto es interesante ya que a estas temperaturas se dan deformaciones en las superficies de rodamiento.

Los asfaltos son más duros pero siguen siendo elásticos lo que evita la formación de roderas y el agrietamiento de las mismas. La rigidez de estos asfaltos ayuda a soportar los largos tiempos de carga sin deformaciones.

Entre -10°C y + 10°C el elastómero proporciona al asfalto mayor elasticidad sin aumentar la rigidez.

∞ **Grano de caucho reciclado de llanta (GCR).** Las propiedades que adquiere el asfalto al añadirle este tipo de hule son similares a las que se obtienen con el polímero SBR o SBS aunque, se deben utilizar dosificaciones más

elevadas. Las llantas para ser utilizadas como agentes modificadores de asfalto requieren de un proceso físico para reducir sus dimensiones, el cual suele ser complejo. Estos asfaltos modificados presentan altas viscosidades por lo que se requiere el empleo de algún fluidificante, alrededor del 6% de queroseno. Son usados principalmente en riegos de sello destinados a absorber las grietas debidas a contracciones y dilataciones, estos riegos son llamados SAM (membranas de absorción de tensiones).

El neumático de desecho (Llanta) está compuesto por:<sup>12</sup>

- a) El neumático está compuesto por cauchos naturales a partir de látex el cual es una resina blanca lechosa que sale de la corteza del árbol de caucho y cauchos sintéticos como el SBR y SBS.
- b) Los cauchos naturales proporcionen elasticidad, resistencia mecánica y adherencia del neumático a la superficie de las vías y los cauchos sintéticos estabilidad térmica, favoreciendo la durabilidad y la capacidad de adaptarse a las nuevas exigencias del tránsito.
- c) Otras materias primas del neumáticos son el acero, textiles y aditivos, entre los que se destacan el negro de humo, aceites, óxido de zinc activado con cadmio, dióxido de titanio, sulfuro, sílice, resinas fenólicas y ácidos grasos. Los alambres de acero son normalmente recubiertos de bronce. El negro de humo es obtenido por combustión o descomposición térmica parcial de gases naturales o hidrocarburos pesados. Es el

---

<sup>12</sup>CAICEDO, Bernardo, GONZALEZ HERRERA, David y OCAMPO, Manuel. Experiencia colombiana sobre el empleo de grano de caucho reciclado proveniente de llantas usadas. Instituto de Desarrollo Urbano IDU – Universidad de Los Andes. 2002. En: III Jornada Internacional del Asfalto. Popayán.: Agosto del 2002.



elemento en las llantas que permite a estas ser más resistentes a la rotura y a la abrasión, y es el que les da el característico color negro.

A continuación se describe la composición del caucho de llanta:

**Figura 4. Composición del caucho de llanta empleado para la modificación del asfalto**

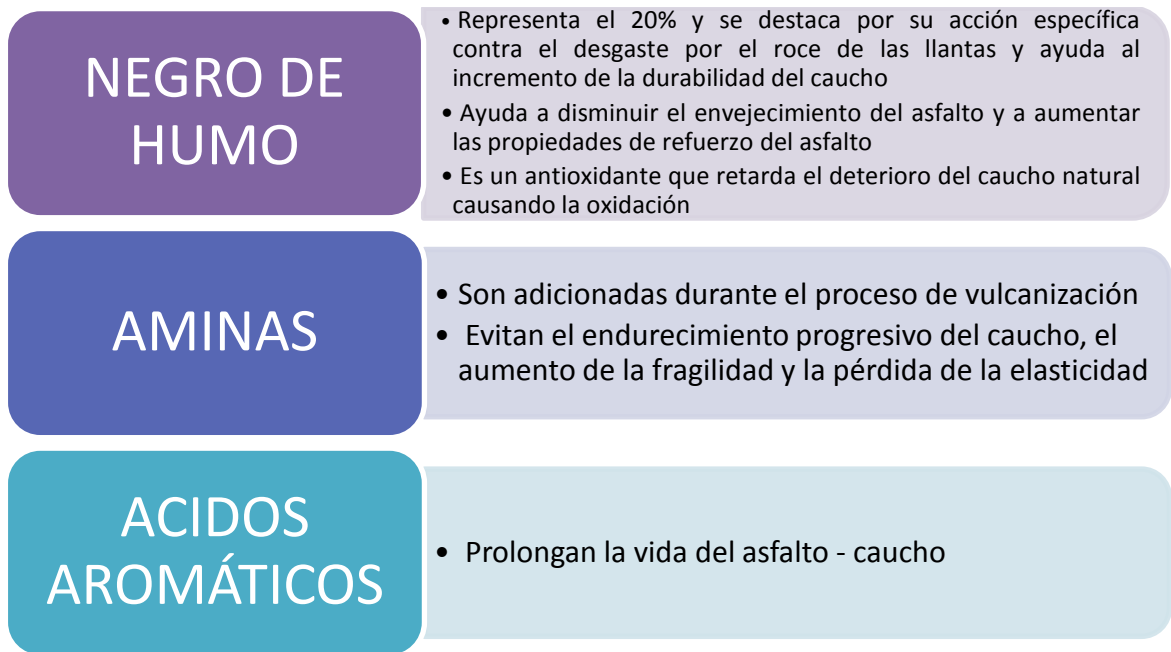


FUENTE. Tomado de la teoría de los autores CAICEDO, Bernardo, GONZALEZ HERRERA, David y OCAMPO, Manuely elaborado por los autores del presente trabajo.

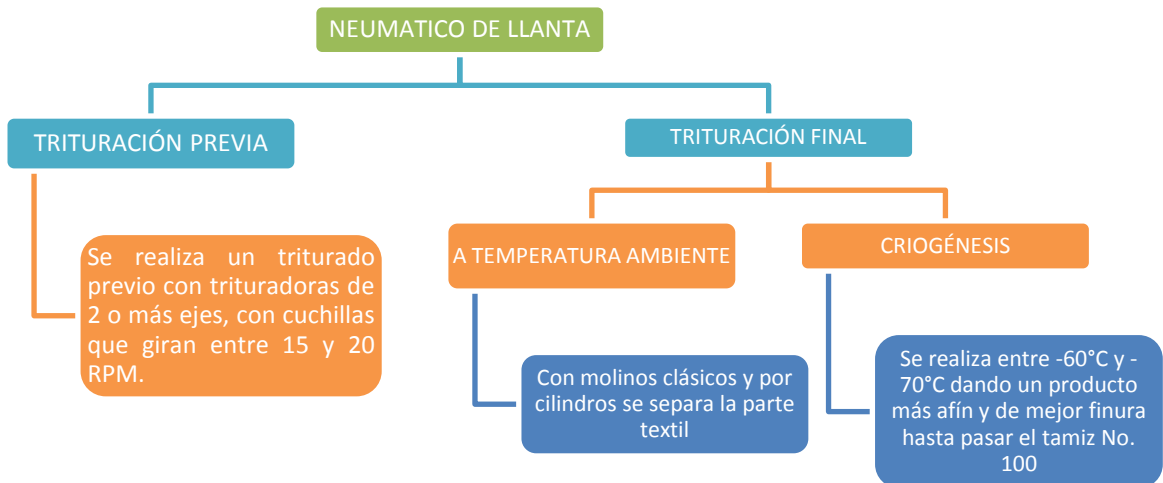
De los diferentes componentes del GCR (Caucho de llanta), los que actúan de manera benéfica en la mezcla asfáltica resultante, se describen en la Figura 5.

Luego, el neumático es transformado en grano de caucho reciclado; proceso que se realiza por niveles. Ver Figura 6.

**Figura 5. Componentes del caucho GCR que intervienen en las propiedades de las mezclas asfálticas**



**Figura 6. Niveles de molienda del neumático para transformarlo en grano de caucho**



FUENTE. Tomado de la Utilización de caucho en mezclas asfálticas. Botasso, González, Rivera y Rebollo. Universidad Tecnológica Nacional. La Plata, Argentina y elaborado por los autores del presente trabajo

**4.3.2.2 Plastómeros**<sup>13</sup>. Rigidizan el asfalto ofreciendo resistencia; como consecuencia no son deformables elásticamente (PVC, EVA). Debido a la forma en que estos polímeros se incorporan al asfalto aumentan de forma considerable su viscosidad, incluso en bajas dosificaciones. Si se aumenta la concentración del polímero, se llega a un punto en el cual la mayoría de los aceites están asociados con el polímero y se produce un cambio drástico en las propiedades físicas del asfalto. Estas se acercan más a las propiedades del polímero que a las del asfalto. Esto sucede cuando el contenido del polímero va de 8 – 10%, en este punto, el asfalto aumenta el intervalo de plasticidad, aumenta la resistencia a la ruptura, disminuye su sensibilidad térmica sobre todo en el intervalo de temperaturas de aplicación.

Dentro de este tipo de polímeros se contemplan:

∞ **Polietileno.** Este polímero no tiene una alta compatibilidad con el asfalto ni le confiere propiedades espectaculares, pero se usa ya que es un componente de bajo costo y soluciona un problema ecológico, al poder disponer de los desechos de este material en las carreteras.

Los asfaltos modificados con este tipo de polímero termoplástico cuando son añadidos en bajas proporciones, poseen las siguientes propiedades:

- a) Buena resistencia al calor
- b) Buena resistencia al envejecimiento
- c) Baja viscosidad

En el plano mecánico:

---

<sup>13</sup> AVELLÁN CRUZ, Op. Cit., p. 32

- a) La resistencia Marshall aumenta de 2 a 2.5 veces a 25°C mientras que a 0°C y -2.5°C es prácticamente igual a la de un asfalto convencional.
- b) Buena flexibilidad a baja temperatura
- c) Cuando es utilizado en concentraciones de 7% aumenta la rigidez del asfalto a temperaturas elevadas.
- d) Buena resistencia a deformaciones permanentes

∞ **PVC**<sup>14</sup>. El PVC es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo a policloruro de vinilo. Es un material termoplástico industrial amorfo, que puede ser transparente e incoloro pero que se encuentra comúnmente pigmentado. Es rígido, duro, naturalmente retardante a la combustión, y presenta alta resistencia química (los solventes son su punto débil, particularmente para la rotura bajo carga). La resina que resulta de la polimerización es la más versátil de la familia de los plásticos, pues además de ser termoplástica, a partir de ella se pueden obtener productos rígidos y flexibles.

El PVC utilizado para modificar el asfalto es un residuo de la producción del mismo, la acumulación de este tipo de desecho podría llegar a generar en el futuro un impacto ambiental negativo por su difícil degradación y por su baja demanda para ser reutilizado. Es por esto que la implementación de este desecho industrial (en este caso para pavimentos) puede llegar a tener un impacto ambiental positivo.

---

<sup>14</sup> RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander, RODRÍGUEZ RINCÓN, Edgar y MORENO ANSELMÍ, Luis Ángel. Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de Policloruro de Vinilo (PVC), Polietileno de alta densidad (PEAD) y Poliestireno (PS). En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Medellín, Julio, 2007, vol. 6, No. 11. ISSN 1692-3324

∞ **EVA**<sup>15</sup>. Los polímeros o resinas Etilo – Vinil – Acetato son relativamente nuevos en la modificación de asfaltos, son muy compatibles con estos. Un polímero EVA con un contenido del 18% de acetato de vinilo es el más adecuado para ser usado en la construcción de carreteras. Cuando se aumenta la concentración de acetato de vinilo en el polímero (15 a 30%), adquiere un excelente poder adherente.

Los asfaltos modificados con EVA poseen las siguientes características:

- a) Buena estabilidad térmica a un costo razonable.
- b) Las dosificaciones de polímero oscilan entre el 2 hasta un 10% dependiendo de las propiedades que se pretende obtener.
- c) La temperatura de ablandamiento aumenta entre 6 y 12°C.
- d) Excelente resistencia al resquebrajamiento en flexión es decir a las fatigas provocadas por las flexiones o vibraciones repetidas.
- e) Aumentan la cohesión de las mezclas a medida que se aumenta el contenido del polímero.

**4.3.3 Otros modificadores de las mezclas asfálticas.** Existen modificadores no polímeros como el llenante mineral, los antioxidantes, las fibras, oxidantes, activantes, extendedores y materiales hidrocarbonados. Estos materiales son naturales o provenientes de la trituración de material pétreo, productos comerciales, etc.

---

<sup>15</sup> AVELLÁN CRUZ, Op. Cit., p. 36

De estos materiales los más empleados en la modificación de las mezclas asfálticas son:

**4.3.3.1 Llenante mineral**<sup>16</sup>. El llenante mineral de las mezclas asfálticas podrá proceder de los agregados pétreos, separándose de ellos por medio de los ciclones de la planta mezcladora, o aportarse a la mezcla por separado de aquellos como un producto comercial o especialmente preparado para este fin. La proporción de llenante mineral de aporte deberá ser, como mínimo, la indicada en la Tabla 1, excluido el que inevitablemente quede adherido a los agregados. Este último, no podrá exceder del 2% de la masa de la mezcla.

Es por esto, que existen materiales diferentes a los descendientes de los agregados pétreos, tales como la cal, cemento Portland, ceniza de escoria, entre otros.

**Tabla 1. Proporción de llenante mineral de aporte (% en masa del llenante total, excluido el adherido a los agregados)**

Tipo de capa	NT1	NT2	NT3
RODADURA	-	≥ 25	≥ 50
INTERMEDIA	-	≥ 25	≥ 50
BASE	-	-	≥ 25

FUENTE. Artículo 450 – 07. Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras INVIAS

**4.3.3.2 Fibras**<sup>17</sup>. Las fibras son estructuras unidimensionales, largas y delgadas con el propósito principal de creación de tejidos; tienen gran cohesión molecular,

<sup>16</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2007. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007.

<sup>17</sup><http://www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro11c.pdf>

lo que las hace ser más fuertes que los plásticos. Existen varios tipos de fibras como: Naturales, sintéticas, artificiales, etc.

- ∞ Las fibras naturales son sustancias producidas por animales y vegetales que se pueden hilar para obtener hebras, hilos o cordelería. Las fibras de origen animal son proteínas resistentes a la mayoría de los ácidos orgánicos pero el hipoclorito clórico las destruye. Las fibras de origen vegetal son principalmente de celulosa, lo que las hace resistentes al álcalis, a los ácidos orgánicos pero débiles frente a los ácidos minerales.
  
- ∞ Las fibras sintéticas empleadas para la modificación de mezclas asfálticas son fibras que se elaboran a través de un proceso de polimerización, en el cual los monómeros que conforman los polímeros forman entre sí una larga cadena lineal, con extraordinarias condiciones de ligereza, elasticidad y resistencia. Las fibras sintéticas se pueden clasificar en: poliamidas, poliésteres, poliacrílicas, polivinilos y polipropilénicas.
  
- ∞ La fibra de vidrio es la única fibra de origen mineral, resultante de mezclar la malla de vidrio con una resina epoxi, la cual acelera la reacción química mediante el uso de un catalizador o acelerador. Este material es un excelente aislante térmico, es inerte a muchas sustancias especialmente los ácidos, tiene gran maleabilidad y es altamente resistente a la tracción.

#### **4.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS**

Las mezclas asfálticas modificadas con polímeros u otros modificadores tienden a optimizar las propiedades reológicas y mecánicas, así:

#### **4.4.1 Características óptimas de las mezclas asfálticas modificadas.**<sup>1819</sup>

Las mezclas asfálticas convencionales al adicionar los modificadores adquieren las siguientes características:

- ∞ Mejorar la rigidez del cemento asfáltico a altas temperaturas de servicio, minimizando el riesgo al ahuellamiento.
- ∞ Obtener mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio para minimizar la aparición de fisuras asociadas a los cambios térmicos.
- ∞ Mejorar la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas.
- ∞ Mejorar la adhesividad ligante – agregado pétreo con el fin de reducir el riesgo de stripping.
- ∞ Mejorar la resistencia a la abrasión de las mezclas asfálticas.
- ∞ Rejuvenecer el cemento asfáltico.
- ∞ Minimizar los problemas durante el proceso de colocación y compactación de la mezcla asfáltica.
- ∞ Mejorar las características elásticas del cemento asfáltico.
- ∞ Permitir un mayor espesor de película de ligante alrededor de las partículas de agregado con el fin de incrementar la durabilidad de la mezcla.

---

<sup>18</sup> ARENAS. Op. Cit., p. 282

<sup>19</sup> Revista de la facultad de ingeniería. EPSILON. Bogotá D.C. 2007, No. 009 ISSN 1962 - 1259



- ∞ Reducir la probabilidad de exudación del cemento asfáltico.
- ∞ Disminuir los espesores de la estructura del pavimento.
- ∞ Mejorar el comportamiento general de toda la estructura del pavimento.
- ∞ Disminuir la susceptibilidad térmica.
- ∞ Aumentar la cohesión interna.
- ∞ Mejorar la elasticidad y la flexibilidad a bajas temperaturas.

**4.4.2 Ventajas de una mezcla modificada respecto a una mezcla convencional.**<sup>20</sup> Las mezclas asfálticas densas en caliente (MDC-2) cuando son modificadas logran mejorar sus características obteniendo las siguientes ventajas respecto a una mezcla convencional:

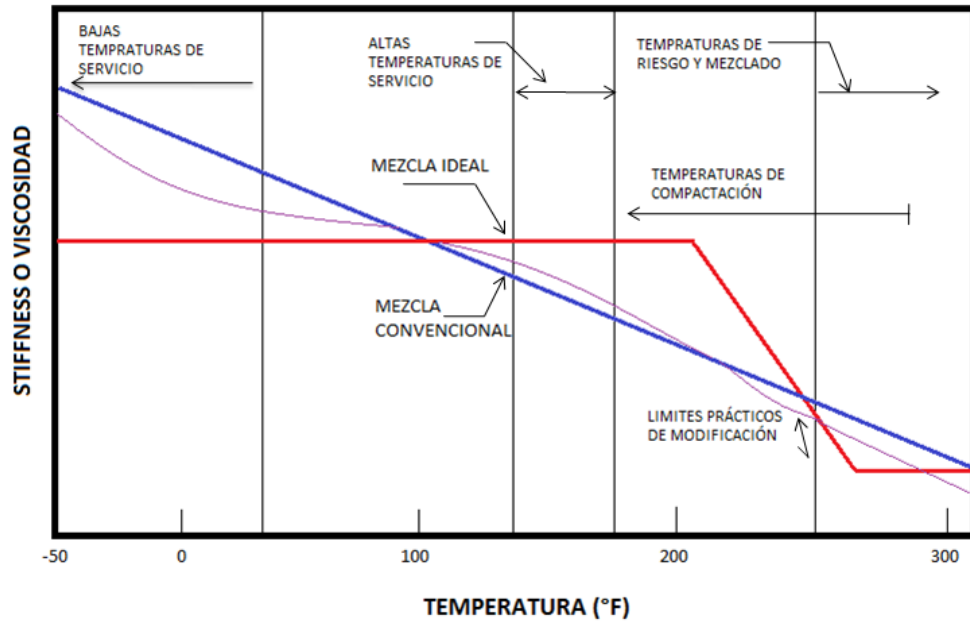
- ∞ Baja rigidez o viscosidad a las temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra.
- ∞ Alta rigidez a las temperaturas altas en servicio para reducir el ahuellamiento.
- ∞ Baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio para reducir el riesgo de la aparición de fisuras por cambios de temperatura.

---

<sup>20</sup> ARENAS. Op. Cit., p. 283

- ☞ Buenas características adherentes en presencia de humedad, con el propósito de reducir el stripping.

**Figura 7. Características deseadas en una Mezcla Asfáltica**



Fuente. Tecnología del Cemento Asfáltico. Hugo León Arenas

**4.4.3 Ensayos realizados para caracterizar las mezclas asfálticas.**<sup>21</sup> La caracterización de cada uno de los componentes de las mezclas (agregados, asfalto y modificadores) es determinada de acuerdo a los siguientes ensayos:

<sup>21</sup> REYES LIZCANO, Fredy Alberto., FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía. Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas. Síntesis de la investigación colombiana. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C., 2008. ISBN: 978-958-716-136-6

**Tabla 2. Ensayos de laboratorio sobre los componentes de las mezclas asfálticas**

Ensayo	Norma	Objetivo
<b>AGREGADOS PÉTREOS</b>		
Granulometría	INV E – 213	Determinar cuantitativamente los tamaños de las partículas de los agregados gruesos y finos de un material.
Resistencia al desgaste	INV E – 218– 219	Determinar la resistencia al desgaste de agregados gruesos de tamaños mayores a 19 mm (3/4”) y de tamaños menores de 37,5 mm (1 ½”), por medio de la máquina de los Ángeles.
Equivalente de arena	INV E – 133	Determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos.
Valoración de elementos arcillosos en los materiales finos por medio de azul de metileno	INV E – 235	Determinar la presencia de elementos arcillosos en los materiales finos, como arenas naturales o de trituración, polvos minerales, etc mediante la acción del azul de metileno.
Índice de forma y de textura de las partículas de agregado	INV E – 231	Determinar el valor índice de las características relativas de forma y textura de las partículas del agregado; el cual es una medida cuantitativa de estas características que pueden afectar el desempeño de la mezcla en los pavimentos.
Peso unitario y porcentaje de vacíos de los agregados		Establecer el método para determinar el peso unitario y el porcentaje de los vacíos de los agregados ya sean finos, gruesos o una mezcla de ambos.
Sanidad de los agregados en sulfato de sodio o sulfato de magnesio	INV E – 220	Determinar la resistencia a la desintegración de los agregados, por la acción de soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio
Índice de alargamiento y aplanamiento	INV E – 230	Determinar los índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados; donde el índice de aplanamiento se define como el porcentaje en peso de las partículas que la forman, cuya dimensión mínima (espesor) es inferior a 3/5 de la dimensión media de la fracción. El índice de

		alargamiento es definido como el porcentaje en peso de las partículas que la forman, cuyo dimensión máxima (longitud) es superior a 9/5 de la dimensión media de la fracción. Este método no es aplicable a las fracciones del agregado inferiores a 6,3 mm (1/4").
Porcentaje de caras fracturadas	INV E – 227	Determinar el porcentaje en peso del material que presente una o más caras fracturadas de las muestras de los agregados pétreos.
Peso específico de agregados gruesos	INV E – 223	Determinar los pesos específicos aparente y nominal, así como la absorción, después de 24 horas sumergidos en agua de los agregados con tamaño $\geq$ 4,75 mm (tamiz No. 4).
Peso específico de arenas	INV E – 222	Determinar el peso específico aparente real a 23 /23° C, así como la absorción después de 24 horas de sumergidos en agua, de los agregados con tamaño inferior a 4,75 mm (tamiz No. 4).
Peso específico del llenante mineral	INV E – 128	Determinar el peso específico de los suelos y el llenante mineral por medio de un picnómetro.

#### **ASFALTO**

Viscosidad de Brookfield	ASTM 4402	Determinar la consistencia del asfalto al establecer el par de torsión que se hace necesario aplicar en un eje rotacional para que gire a una cierta velocidad, controlando la temperatura.
Ductilidad	INV E – 702	Determinar la ductilidad de los materiales asfálticos, de consistencia sólida y semisólida.
Punto de ignición y punto de llama mediante la copa abierta de Cleveland	INV E – 709	Determinar los puntos de ignición y de llama, mediante la copa abierta de Cleveland, de productos de petróleo y de otros líquidos, a excepción de aceites combustibles y materiales que tienen punto de ignición por debajo de 79°C.
Peso específico	INV E – 707	Determinar el peso específico y el peso unitario de materiales asfálticos sólidos y semisólidos y de alquitranes blandos, mediante el empleo de un picnómetro.
		Determinar el punto de ablandamiento de productos

Punto de ablandamiento	INV E – 712	bituminosos en el intervalo de 30 – 157°C, utilizando el aparato de anillo y bola sumergida en agua destilada, glicerina USP o glicol etileno.
Penetración	INV E – 706	Determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos en los cuales el único o principal componente es un asfalto. La penetración se define como la distancia expresada en décimas de mm, hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura.
Índice de penetración	INV E – 724	Determinar el índice de penetración de los cementos asfálticos. Este índice concebido por Pfeiffer y Van Doormal se calcula a partir de los valores de penetración y del punto de ablandamiento, y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad de estos materiales a los cambios de temperatura y de su comportamiento reológico.

#### **MODIFICADORES**

Poliestireno	NTC 1 524	Índice de flujo en fusión, en g/10 mín. (mínimo). Temperatura de ablandamiento Vicat en °C (mínimo). Viscosidad de la disolución al 10% en tolueno, en cP (mínima). Contenido máximo de estireno monómero residual en porcentaje.
Caucho (natural, reprocesado SBR, butilo, EP, polibutadieno, polisopreno)	NTC 447 a 70° C	Envejecimiento acelerado
	NTC 812, aceite No. 3, 70h a 70°C	Inmersión en aceite
	ASTM 395	Deformación por compresión

FUENTE. Tomado del Capítulo 3 del libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas elaborado por los autores del presente trabajo

**Tabla 3. Ensayos de laboratorio para la fabricación de las mezclas asfálticas**

<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>	<b>Objetivo</b>
Peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas para pavimentos	INV E – 735	Determinar el peso específico teórico máximo de mezclas asfálticas para pavimentos sin compactar. El método incluye el ensayo para determinar el peso específico relativo que puede emplearse en un laboratorio de terreno o de planta.
Peso específico aparente y peso unitario de las mezclas asfálticas compactadas empleando especímenes saturados con superficie seca	INV E – 733	Determinar el peso específico aparente y del peso unitario de especímenes de mezclas asfálticas compactadas.
Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas	INV E – 736	Determinar el porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas.
Stripping	INV E – 737	Determinar el efecto de la acción del agua sobre la película asfáltica que recubre un agregado mediante un ensayo de adhesividad pasiva (Stripping), que intenta poner en manifiesto la afinidad recíproca entre ambos materiales.
Ensayo de inmersión - compresión	INV E – 738	Determinar la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua sobre las mezclas asfálticas compactadas, preparadas con cementos asfálticos.
Adherencia en bandeja	INV E – 740	Determinar el porcentaje de adherencia entre un ligante bituminoso y una muestra representativa del agregado grueso que se va a utilizar en un pavimento asfáltico.
Espesor o altura de especímenes compactados de mezclas asfálticas	INV E – 744	Determinar el espesor de especímenes compactados de mezclas asfálticas para pavimentos.
Resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas	INV E – 747	Determinar la resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas compactadas en caliente.

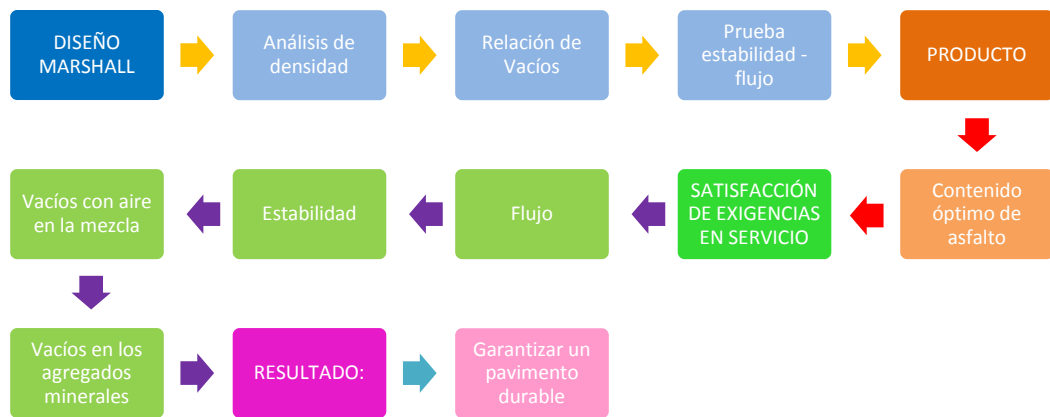
Resistencia de mezclas empleando el aparato Marshall	INV E – 748	Determinar la resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas para pavimentos.
Preparación de especímenes asfálticos para el ensayo del módulo dinámico	INV E – 753	Preparar especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas densamente gradadas que contengan agregados hasta de 38,1 mm (1.5”) de tamaño máximo.
Módulo dinámico	INV E – 754	Determinar el módulo dinámico, cumpliendo el intervalo tanto para temperatura como para frecuencia de carga. Temperatura (5, 25, 40°C) y frecuencias de carga (1, 4, 16 Hz)
Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (ahuellamiento)	INV E – 756	Determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica; para lo cual se somete una probeta de mezcla al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura; y se mide periódicamente la profundidad de la deformación producida.
Cálculo del porcentaje de asfalto que absorbe un agregado	INV E – 781	Calcular la cantidad de asfalto que absorbe un agregado en una mezcla asfáltica, expresada como un porcentaje del peso seco al horno del agregado de dicha mezcla.
Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas	INV E – 782	Determinar la granulometría de los agregados gruesos y finos recuperados de las mezclas asfálticas, empleando tamices con malla de abertura cuadrada.
Ensayo de fatiga trapezoidal	NF P 98 - 250	Número de ciclos en los cuales la mezcla asfáltica falla en el tercio central de la probeta.

FUENTE. Tomado del Capítulo 3 del libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas elaborado por los autores del presente trabajo

De los ensayos que se le realizan a las mezclas asfálticas, los predominantes son:

**4.4.3.1 Ensayo Marshall.** Este ensayo es realizado a la mezcla asfáltica, para determinar el contenido óptimo de asfalto, para poder garantizar la suficiente estabilidad y así mismo las exigencias del servicio sin desplazamientos o distorsiones, un buen recubrimiento de partículas para lograr un pavimento durable incluyendo el factor de compactación. A continuación se describe teóricamente el objetivo del ensayo Marshall.

**Figura 8. Resultados del ensayo Marshall**

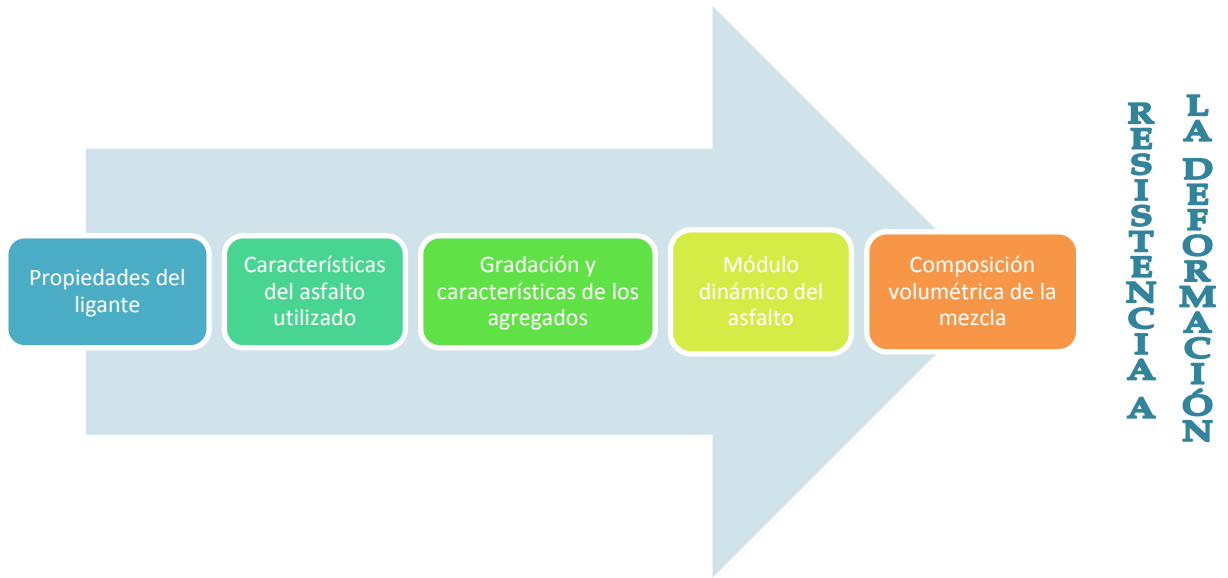


FUENTE. Tomado de la teoría del desarrollo del ensayo y elaborado por los autores del presente trabajo

**4.4.3.2 Ahuellamiento.** Es la falla causada por el efecto de esfuerzos verticales de compresión en la capa asfáltica de un pavimento, manifestada en ahuellamiento bajo la superficie de carga de las llantas y de esfuerzos horizontales que varían desde compresión en la parte superior de la capa a tensión en la parte inferior. La magnitud de estos esfuerzos depende de factores relacionados con la estructura de los agregados.



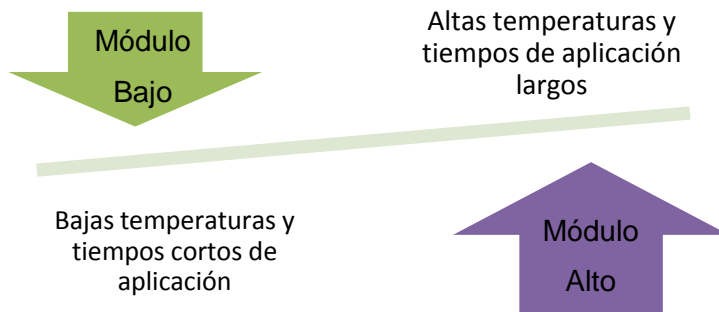
**Figura 9. Factores que intervienen en la resistencia a la deformación**



FUENTE. Tomado de la teoría del desarrollo del ensayo y elaborado por los autores del presente trabajo

**4.4.3.3 Módulo dinámico.** Considerada como la propiedad más importante debido a que suministra información sobre el comportamiento dinámico de la mezcla, básicamente es la relación entre la deformación del material bajo una carga aplicada y el esfuerzo, siendo la magnitud del módulo complejo de una mezcla.

**Figura 10. Comportamientos del módulo dinámico en las mezclas**



FUENTE. Tomado de la teoría del desarrollo del ensayo y elaborado por los autores del presente trabajo

**4.4.3.4 Ensayo SARA – Características químicas del cemento asfáltico.**<sup>22</sup>Existen diversos métodos para la caracterización química de los cementos asfálticos, los cuales se basan en la facilidad que tienen para ser separados en un gran número de clases o grupos genéricos, usando precipitación por solventes de diferentes grados de aromaticidad y cromatografía líquida.

Los diversos procedimientos para el estudio de la composición química del asfalto se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- ∞ Fraccionamiento por precipitación
- ∞ Fraccionamiento por destilación
- ∞ Separación cromatográfica
- ∞ Análisis químico
- ∞ Análisis de pesos moleculares

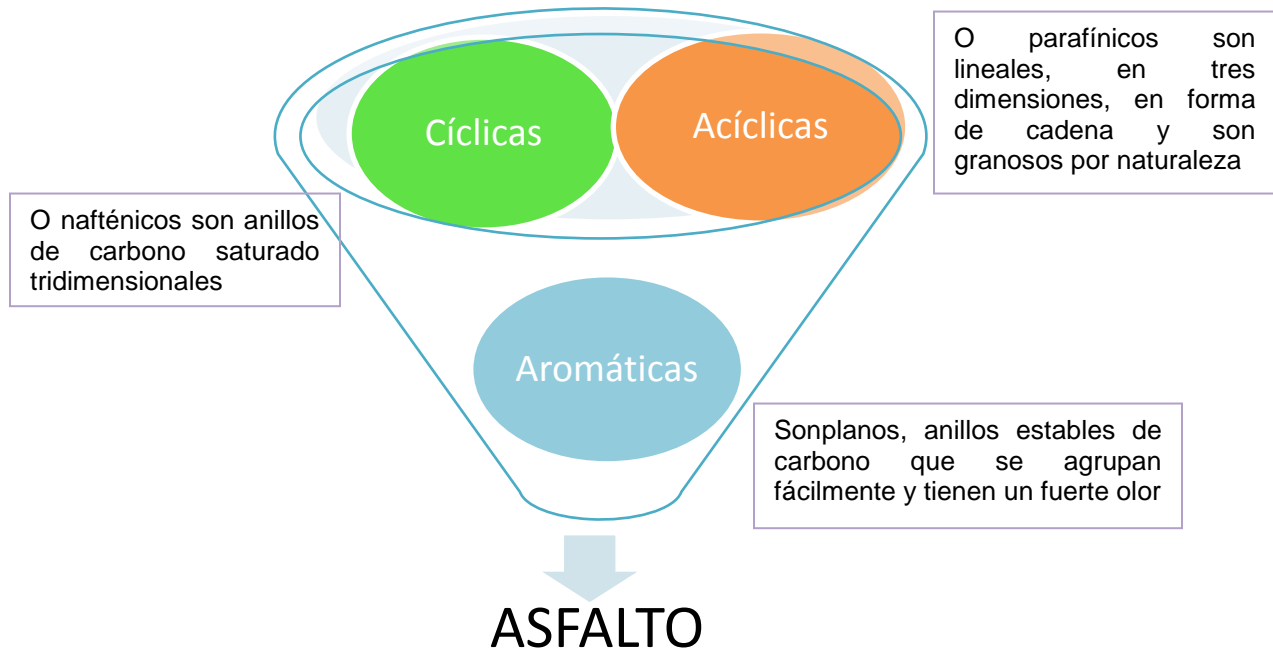
Métodos de los cuales el más usado son el método cromatográfico de Corbett (usado por la ASTM) y el método de precipitación de Rostler.

La cromatografía líquida de alta presión ha sido usada para determinar la distribución de los tamaños de las moléculas en el asfalto. Esto es análogo a la determinación de la distribución de los tamaños en un agregado pétreo. Un cromatograma con la distribución de las moléculas grandes, medianas y pequeñas es el resultado de este análisis.

---

<sup>22</sup> ARENAS, Op. Cit., p.100

**Figura 11. Estructura molecular del asfalto**



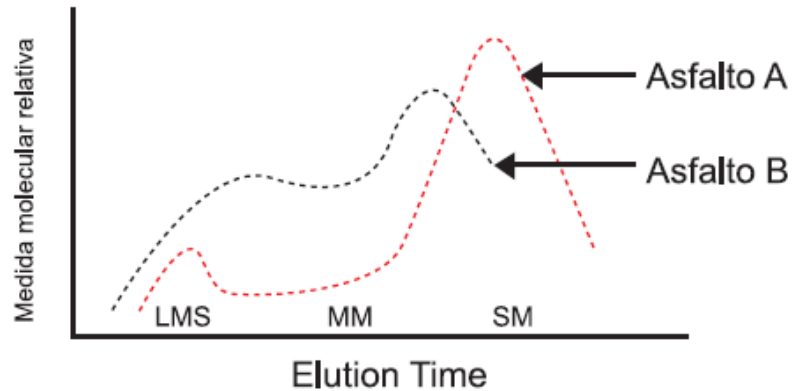
FUENTE. Tomado del Estudio de Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80 – 100) y elaborado por los autores del presente trabajo

El procedimiento consiste en pasar una solución del asfalto a través de una columna de filtración. El sistema permite que las moléculas más grandes pasen rápidamente la columna retardando el proceso de las más pequeñas.

Un sistema electrónico permite detectar y cuantificar la cantidad de moléculas para la definición del cromatograma. Jennings ha clasificado las moléculas eluidas durante el primer tercio del período de elusión como moléculas grandes (LMS), las eluidas durante el segundo tercio como moléculas de tamaño medio (MMS) y las eluidas en el último tercio del período como moléculas pequeñas (SMS). La

distribución de tamaños moleculares es diferente en los cromatogramas obtenidos de dos asfaltos, por lo que se espera un comportamiento en servicio diferente.

**Figura 12. Cromatograma tipo de los cementos asfálticos**



FUENTE. Tomado del Estudio de Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80 – 100)

## 5. METODOLOGÍA

La investigación desarrollada es de carácter descriptivo, en el cual se parte de la recopilación de la información relacionada con las tecnologías de fabricación de mezclas asfálticas modificadas, luego esta información es analizada, interpretada para poder seleccionar las tecnologías aplicadas en Colombia, se describe el proceso de cada una de ellas y luego se realiza un comparativo de ventajas y desventajas de las alternativas analizadas para finalmente concluir el desarrollo del proyecto.

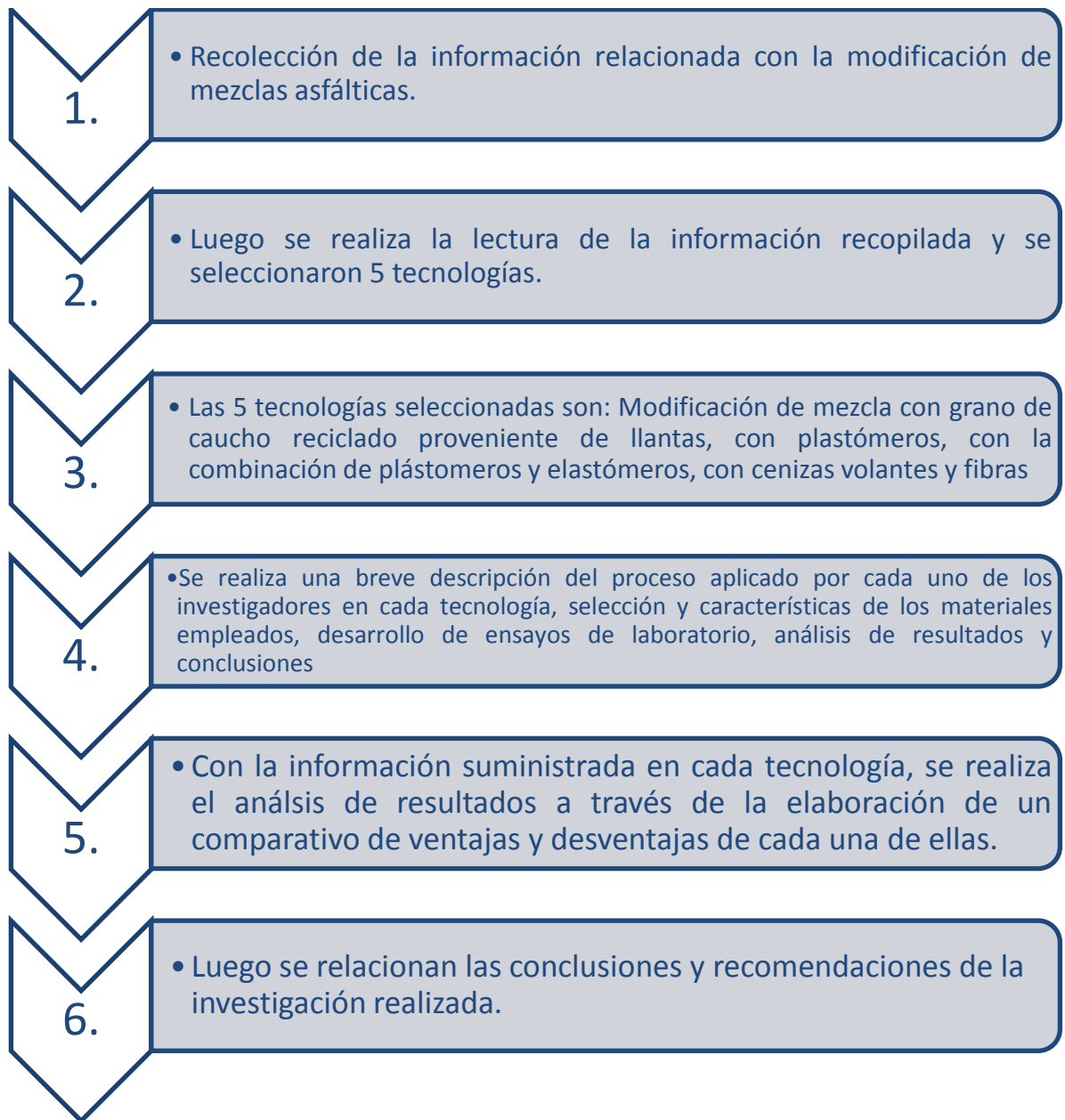
A continuación se relacionan las tecnologías analizadas:

1. Mezcla densa en caliente modificada con grano de caucho reciclado proveniente de llantas.
2. Mezcla asfáltica modificada con plastómeros
3. Mezcla asfáltica modificada con la combinación de plastómeros y elastómeros
4. Mezcla asfáltica modificada con ceniza volante
5. Mezcla asfáltica modificada con fibras

De estas tecnologías se realiza un cuadro comparativo de las investigaciones realizadas por cada una de ellas. Estas tecnologías fueron seleccionadas porque son experiencias desarrolladas y aplicadas en Colombia.

A continuación se realiza la descripción del proceso metodológico desarrollado:

**Figura 13. Proceso metodológico empleado para el desarrollo del proyecto**



FUENTE. Autores.

## **6. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE MODIFICACIÓN**

Una vez conocidas las ventajas de modificación de una mezcla asfáltica, se analizan las siguientes tecnologías, las cuales son el resultado de experiencias realizadas por investigadores, quienes las realizaron en cumplimiento a las especificaciones INVIAS vigentes en el momento de la realización de las pruebas experimentales.

### **6.1 MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON GRANO DE CAUCHO DE LLANTA**

Existen varias investigaciones realizadas en Colombia acerca de la modificación de mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2 mediante la adición de grano de caucho de llanta (GCR); de las cuales se hará un comparativo de resultados obtenidos por cada uno de los grupos de investigadores; entre los cuales se destacan la Universidad de los Andes, Escuela Colombiana de Ingeniería, Universidad de la Salle, Grupo de Geotecnia de la Universidad Militar Nueva Granada y la Pontificia Universidad Javeriana; entre otros grupos o entidades de la industria para los asfaltos.

Con el desarrollo de esta tecnología se busca aprovechar una de las propiedades del Grano de Caucho Reciclado (GCR), la cual es la flexibilidad y la mejora en la susceptibilidad térmica; es por esto que a través del tiempo en el mundo se han desarrollado técnicas para incorporar GCR en los pavimentos, con resultados iniciales poco satisfactorios porque tenían un pobre aporte mecánico y acompañado de un mayor costo en el proceso. Como todo proceso se fue

mejorando, hasta llegar a una parametrización adecuada que cumpliera con las expectativas de ingenieros investigadores.

Partiendo de este principio, en Colombia se implementa la tecnología, basados en la aplicación dada en algunos países como Estados Unidos quienes se han interesado en incluirlo de manera estrecha en los pavimentos en pro del medio ambiente, hasta llegar a exigir en las licitaciones públicas que las empresas constructoras utilicen un porcentaje de alrededor del 5 % en las obras a construir.

Por lo tanto, con el desarrollo de esta tecnología se busca mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas con caucho producto del desecho de llantas usadas iniciando en la caracterización de los materiales involucrados, el diseño y estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho y la evaluación de las mejoras en la vida útil del pavimento.

Igualmente se busca disminuir el problema ambiental generado por estos desechos.

A continuación se dan a conocer los procesos empleados en cada una de las investigaciones relacionadas con esta tecnología:



**6.1.1 Estudio realizado por el Grupo conformado por el IDU – Universidad de los Andes.**<sup>23</sup> Los investigadores desarrollaron el estudio por dos procesos: Vía Seca y Vía Húmeda; para lo cual emplearon los siguientes materiales, a los cuales les realizaron ensayos de laboratorio con base en las Especificaciones INVIAS – 96.

**AGREGADOS PÉTREOS:**

- ☞ Mario Huertas ----- Proveniente del Vino
- ☞ Bogotana de asfaltos ----- Proveniente de Subachoque
- ☞ Conagre Ltda. ----- Proveniente de Tunjuelito

A estos agregados seleccionados dentro de los existentes en la Sabana de Bogotá se le realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- ☞ Clasificación del material granular
- ☞ Determinación del porcentaje de humedad evaporable en los agregados
- ☞ Determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados gruesos y finos
- ☞ Determinación de la resistencia al desgaste de los agregados, por medio de la máquina de Los Ángeles
- ☞ Determinación de la presencia de elementos arcillosos en los materiales finos mediante el ensayo de Azul de Metileno
- ☞ Determinación del peso específico, masa unitaria y absorción de los agregados
- ☞ Determinación del Índice de partículas del agregado como una medida general de sus características de forma y textura

---

<sup>23</sup>INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO – IDU; UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Contrato IDU – 366 – 01. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Bogotá D.C. 2002. 303 p.

De los ensayos realizados, los agregados que presentaron mejor comportamiento fueron los agregados de la Cantera Mario Huertas, los cuales fueron seleccionados para realizar las pruebas por vía húmeda y seca.

A continuación se resumen los resultados obtenidos:

**Tabla 4. Resultados de los ensayos realizados a los agregados pétreos de la Cantera Mario Huertas**

Ensayo		Unidad	Resultado
Índice de Azul de Metileno		g/100g	0,04
Producto Azul de Metileno x finos totales		%	0,09
Resistencia al desgaste mediante la Máquina de los Ángeles		%	23,13
Masa unitaria suelta	Arena	g/cm <sup>3</sup>	1,58
	Gravilla	g/cm <sup>3</sup>	1,40
	Grava	g/cm <sup>3</sup>	1,39
Masa unitaria compacta	Arena	g/cm <sup>3</sup>	1,75
	Gravilla	g/cm <sup>3</sup>	1,55
	Grava	g/cm <sup>3</sup>	1,54
Peso específico	Arena	g/cm <sup>3</sup>	2,62
	Gravilla	g/cm <sup>3</sup>	2,48
	Grava	g/cm <sup>3</sup>	2,49
Absorción	Arena	%	0,99
	Gravilla	%	2,79
	Grava	%	2,43
Índice de partículas del agregado	Arena	%	12,27
	Gravilla	%	8,68
	Grava	%	8,90

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas – IDU – Universidad de los Andes y elaborado por los autores del presente trabajo

Estos agregados cumplen notoriamente los parámetros contemplados en las Especificaciones INVIAS – 96 y otras normas tenidas en cuenta en el momento del estudio.

#### CEMENTO ASFÁLTICO:

De los cementos asfálticos que existen en Colombia, para el desarrollo de la presente investigación se emplearon los asfaltos de Barrancabermeja y Apiay. A continuación se presentan las propiedades generales de estos asfaltos:

**Tabla 5. Propiedades generales del cemento asfáltico 80 – 100 proveniente de Barrancabermeja y 60 – 70 proveniente de Apiay**

Propiedad	Método ASTM	Unidad	Máximo	Mínimo
<b>Refinería de Apiay – Asfalto 60 – 70</b>				
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	ASTM D-113	cm	100 min.	
Solubilidad en tricloroetileno	ASTM D-2042	%	99 min	
Punto de ablandamiento	ASTM D-36	° C (°F)	45 (113)	55 (131)
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s	ASTM D-5	mm/10	60	80
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C (°F)	232 (450)	
<b>Refinería de Barrancabermeja – Asfalto 80 - 100</b>				
Punto de ablandamiento	ASTM D-36	° C (°F)	42 (108)	53 (127)
Penetración a 25°C, 100 g, 5 s	ASTM D-5	mm/10	80	100
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C (°F)	232 (450)	

Fuente. Ecopetrol, [www.ecopetrol.com.co/ecop/catalogo/productos.htm](http://www.ecopetrol.com.co/ecop/catalogo/productos.htm)

A los asfaltos empleados se les realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- ∞ Ensayo de cromatografía SARA, para determinar la composición del cemento asfáltico y su envejecimiento.
- ∞ Curva reológica para determinar la variación de la viscosidad con la temperatura.

- ∞ Medición de propiedades reológicas a través del Reómetro de Corte Dinámico.
- ∞ Ductilidad
- ∞ Penetración
- ∞ Punto de ablandamiento
- ∞ Densidad

Al cemento asfáltico convencional y modificado con GCR envejecidos en el PAV se les realizó el ensayo de Reómetro de Viga a Flexión (BBR), para medir la rigidez a la fluencia del asfalto a bajas temperaturas.

A continuación se realiza una breve descripción de los resultados de los ensayos realizados a los asfaltos de Apiay y Barrancabermeja:

El ensayo de cromatografía SARA es realizado a los asfaltos en tres estados: Original, RTFO y envejecido en PAV, con el fin de analizar la composición química (Asfaltenos, Resinas, Saturados y Aromáticos); así como conocer el índice de inestabilidad coloidal, el cual se determina a través de la siguiente ecuación:

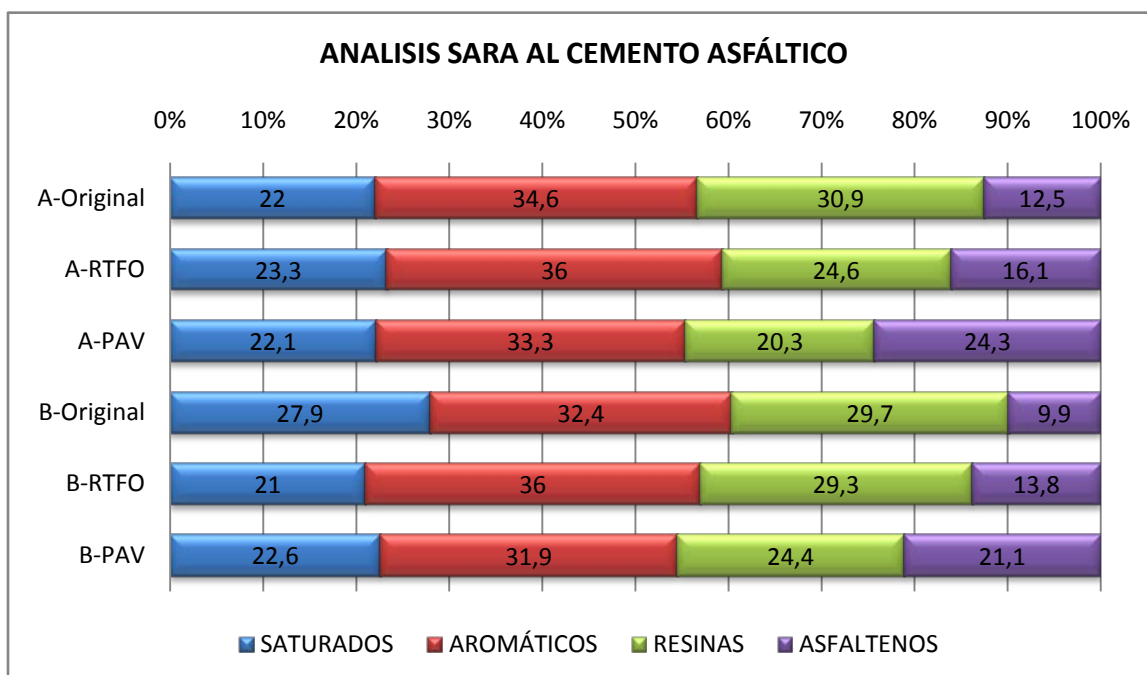
$$\text{Índice de Inestabilidad Coloidal} = \frac{\text{Saturados} + \text{Asfaltenos}}{\text{Aromáticos} + \text{Resinas}} \text{Ecuación 1}$$

**Tabla 6. Resultados del ensayo SARA a los asfaltos de Barrancabermeja y Apiay sin modificar**

Código	Estado	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos	Índice Coloidal
<b>A</b>	Original	22,0	34,6	30,9	12,5	0,53
	RTFO	23,3	36,0	24,6	16,1	0,65
	PAV	22,1	33,3	20,3	24,3	0,87
<b>B</b>	Original	27,9	32,4	29,7	9,9	0,61
	RTFO	21,0	36,0	29,3	13,8	0,53
	PAV	22,6	31,9	24,4	21,1	0,78

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes

**Figura 14. Variación de los componentes químicos del cemento asfáltico en los tres estados analizados**



FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes

En el anterior gráfico se observa lo siguiente:

- ∞ En estado original los dos asfaltos (Apiay – Barrancabermeja) presentan mayor cantidad de aromáticos y menor cantidad de asfaltenos.
- ∞ En estado RTFO aumentan los asfaltenos, aromáticos y saturados y empiezan a disminuir las resinas.
- ∞ En estado envejecido PAV aumentan los asfaltenos y disminuyen los otros tres componentes. Este comportamiento se debe a que a medida que el asfalto endurece se van disminuyendo los maltenos.

Para la curva reológica se tuvieron en cuenta los valores de viscosidad Brookfield y temperaturas que van desde 90°C hasta 160°C. Al igual que el ensayo anterior se analizó el asfalto en los tres estados: (Original, RTFO, PAV):

**Tabla 7. Resultados de viscosidad Brookfield para el asfalto de Apiay**

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>140</b>	<b>160</b>
<b>Estado</b>	<b>Viscosidad Brookfield (cP)</b>			
Original	4000	600	240	100
RTFO	10200	1250	400	175
PAV	64800	7200	2000	600

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes y modificado por los autores del presente trabajo

**Tabla 8. Resultados de viscosidad Brookfield para el asfalto de Barrancabermeja**

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>140</b>	<b>160</b>
<b>Estado</b>	<b>Viscosidad Brookfield (cP)</b>			
Original	3800	580	220	95
RTFO	9800	1230	410	190
PAV	84600	8600	2200	800

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes y modificado por los autores del presente trabajo

De los resultados del ensayo se deduce:

- ∞ El asfalto en su proceso de envejecimiento aumenta notablemente la viscosidad, debido al endurecimiento del mismo.
  
- ∞ La temperatura de mezclado del asfalto de Apiay está entre 145°C – 150°C y del asfalto de Barrancabermeja entre 144°C – 149°C y para compactación en laboratorio se encuentran entre 133°C – 138°C y 144°C – 149°C respectivamente. En conclusión el asfalto de Barrancabermeja conserva la temperatura tanto para mezclado como para compactación; mientras la temperatura del asfalto de Apiay disminuye de mezclado a compactación.

A los asfaltos se les realiza en ensayo DSR, el cual arrojó los siguientes resultados de temperatura en cumplimiento con los parámetros Superpave:

**Tabla 9. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los asfaltos de Apiay y Barrancabermeja en los estados (Original, RTFO, PAV)**

Parámetro	Estado	Temperatura	Apiay	Barrancabermeja
G*/Senδ (kPa)	Original	58°C	1.65	1.47
	RTFO	64°C	3.97	3.07
	PAV	25°C		3985.2
		22°C	3816.8	

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes y modificado por los autores del presente trabajo

Los otros ensayos convencionales realizados ambos asfaltos los cumplen, aunque el asfalto de Barrancabermeja tiene mejor comportamiento respecto al de Apiay.

**6.1.1.1 Proceso por vía seca.** A los agregados seleccionados se les reemplaza un % de granulometría por 1% y 2% de caucho molido, del peso total. El asfalto seleccionado fue el de Barrancabermeja y el grano de caucho empleado fue suministrado por la firma Renovadora de Llantas Ltda.

Una vez determinados los porcentajes de GCR a adicionar se realizan los siguientes ensayos de laboratorio tanto a la mezcla convencional como a la modificada para comparar su comportamiento:

- ∞ Diseño Marshall para determinar la proporción óptima de asfalto a emplear
- ∞ Compactación giratoria en la máquina de cizallamiento giratorio PCG, para la evaluación de módulos dinámicos
- ∞ Determinación del comportamiento a la fatiga
- ∞ Determinación del Módulo Dinámico
- ∞ Determinación de la resistencia a la deformación plástica en laboratorio



A continuación se resumen los resultados de laboratorio obtenidos para la MDC-2 convencional y modificada con adición del 1% y 2% de GCR:

**Tabla 10. Resultados del Diseño Marshall para la MDC-2 con 0%, 1% y 2% de adición de caucho**

Ensayo	Vacíos con aire en la mezcla asfáltica	% Óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad	Flujo	Peso Unitario	Vacíos en los agregados minerales
<b>Especificación</b>	<b>4 - 6</b>		<b>mín. 750</b>	<b>2 – 3.5</b>	<b>-</b>	<b>mín. 14</b>
<b>MDC-2 0% GCR</b>	5.0	5.4	1538	2.6	2.18	21.6
<b>MDC-2 1% GCR</b>	5.0	6.5	1429	3.0	2.13	25.1
<b>MDC-2 2% GCR</b>	5.0	6.6	1077	3.0	2.10	26.8

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes

Una vez realizado el diseño Marshall se determinó lo siguiente:

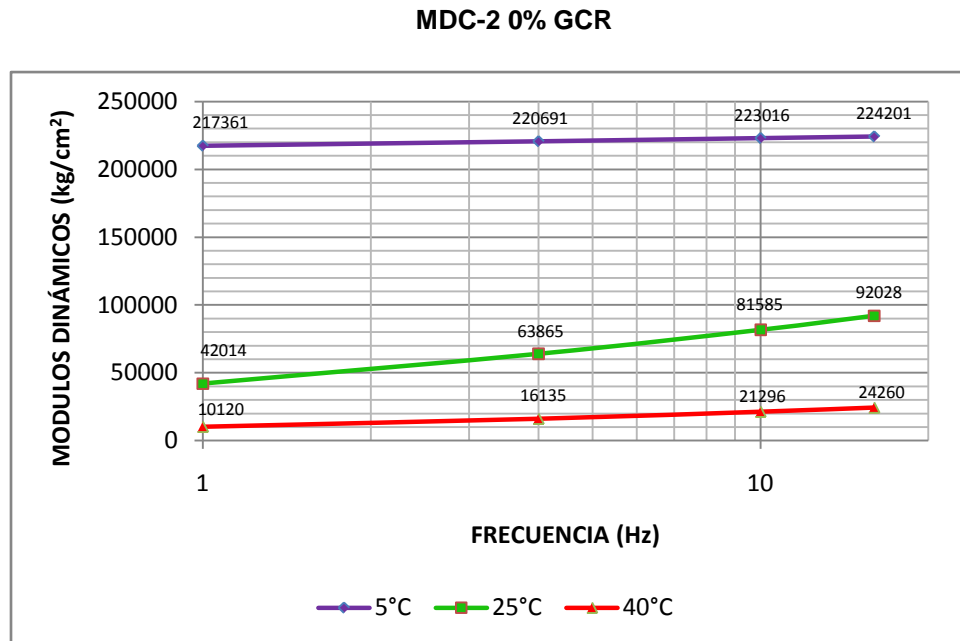
- ∞ En las mezclas convencionales la estabilidad es alta, mientras en las mezclas modificadas con GCR disminuye, especialmente cuando se adiciona el 2%.
- ∞ En las mezclas modificadas el flujo es alto inicialmente para contenidos de ligante bajos y disminuye positivamente hasta un cierto contenido de asfalto y vuelve a aumentar conservándose para el óptimo establecido.
- ∞ En las mezclas modificadas el peso unitario disminuye a medida que la proporción de caucho aumenta, lo que se explica por el aumento de los vacíos cuando se aportan mayores cantidades de GCR.

**Tabla 11. Resultados de Módulos dinámicos de la MDC-2**

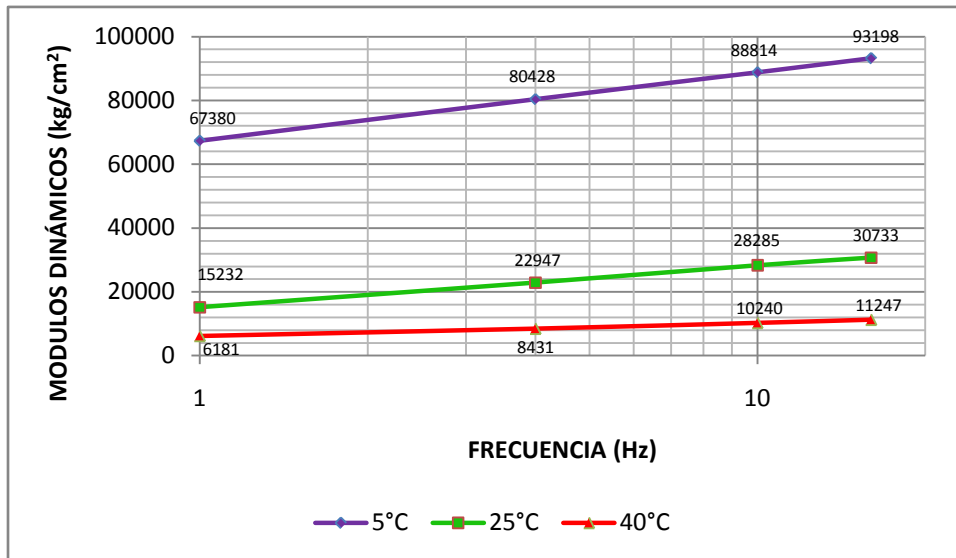
Temperatura de ensayo (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo Dinámico (kg/cm <sup>2</sup> )		
		MDC-2 0%	MDC-2 1%	MDC-2 2%
5	1	217361	67380	62680
	4	220691	80428	77913
	10	223016	88814	85812
	16	224201	93198	89668
25	1	42014	15232	9767
	4	63865	22947	15389
	10	81585	28285	19278
	16	92028	30733	21100
40	1	10120	6181	5100
	4	16135	8431	7119
	10	21296	10240	8727
	16	24260	11247	9553

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes

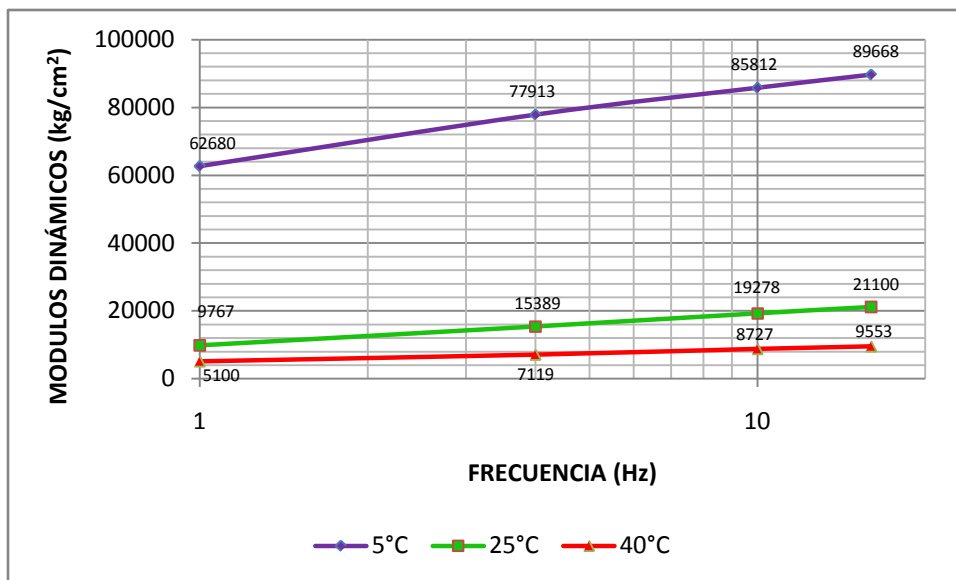
**Figura 15. Variación de los módulos dinámicos de la MDC-2 0%, MDC-2 1% y MDC-2 2% GCR a temperaturas de 5°C, 25°C y 40°C y frecuencias de 1, 4, 10 y 16 Hz**



### MDC-2 1% GCR



### MDC-2 2% GCR



FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes y elaborada por los autores del presente trabajo

De estos gráficos se deduce lo siguiente:

- ∞ Los módulos disminuyen con el incremento de la temperatura.
- ∞ El módulo a una misma frecuencia no es muy susceptible al cambio de la temperatura en las mezclas modificadas, manifestando una mejora en la estabilidad de la mezcla.
- ∞ En las mezclas convencionales el módulo disminuye considerablemente con el aumento de la temperatura hasta llegar a ser similar los resultados de la temperatura de 40°C a los de las mezclas modificadas a 25°C.
- ∞ Para bajas temperaturas la mezcla modificada tiene menos riesgo al fisuramiento que las mezclas convencionales, mientras que para altas temperaturas presentan comportamiento similar.

Otro ensayo que se le realizó a las mezclas es el de deformación en laboratorio, del cual se desprenden los siguientes resultados:

**Tabla 12. Resultados de deformación permanente diseños MDC-2**

Intervalo (mín)	Velocidad de deformación (mm/min)			Deformación acumulada (mm)		
	MDC-2 0%	MDC-2 1%	MDC-2 2%	MDC-2 0%	MDC-2 1%	MDC-2 2%
30 – 45	40.00	32.67	32.67	1.53	2.70	3.80
75 – 90	12.67	8.67	14.67	2.23	3.28	4.40
105 – 120	9.33	8.67	16.00	2.50	3.55	4.82

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes

De esta tabla de resultados se deduce que:

- ∞ Entre mayor sea el porcentaje de adición de caucho a la mezcla, la deformación permanente es mayor.
- ∞ Respecto a la velocidad de deformación en el intervalo de 105 a 120 minutos, esta disminuye en los diseños con 1% de GCR frente a la mezcla convencional, pero aumenta al adicionar el 2% de GCR, hasta ser el doble.

El ensayo de resistencia a la fatiga es realizado a la mezcla convencional y modificada con el 1% y 2% de GCR, del cual se determina que la mezcla con mayor adición de GCR presenta mejor comportamiento.

**6.1.1.2 Proceso por vía húmeda.** En este proceso se analiza el comportamiento que el asfalto modificado con partículas de GCR obtiene en la fabricación de las mezclas asfálticas. Este proceso es llevado a cabo conforme a las Especificaciones del Departamento de Transporte de California, en las cuales se propone la granulometría tanto de los granulares como del caucho a emplear.

En este proceso se emplearon los asfaltos de Barrancabermeja y Apiay, a los cuales se les adiciona el GCR y se les realiza los siguientes ensayos de laboratorio:

- ∞ Viscosidad Brookfield a 163°C
- ∞ Curva reológica
- ∞ Medición de propiedades reológicas o caracterización viscoelástica mediante el Reómetro de Corte Dinámico
- ∞ Medición de propiedades reológicas mediante el Reómetro de viga a flexión para el residuo del PAV

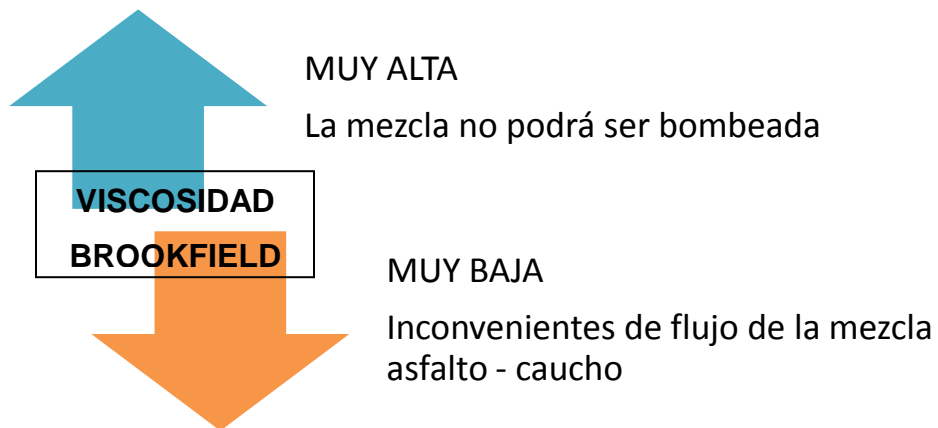
- ∞ Ductilidad
- ∞ Penetración
- ∞ Punto de ablandamiento
- ∞ Densidad

El ensayo de Viscosidad Brookfield es realizado a los asfaltos con adición de GCR, inicialmente en porcentajes de 15% y 20%, en el cual se debe tener en cuenta el siguiente parámetro

PARÁMETRO:

Temperatura 163°C    →    Viscosidad entre 1500 – 3000 cps
--

**Figura 16. Productos de la Viscosidad Brookfield**



FUENTE. Tomado de la teoría del desarrollo del ensayo y elaborado por los autores del presente trabajo

A continuación se relacionan los resultados obtenidos para los asfaltos de Apiay y Barrancabermeja, a los cuales se les adicionó GCR. Como el asfalto de Apiay no

cumplía con el parámetro establecido, se tuvieron que hacer ensayos con adición de 10 y 13% de GCR.

**Tabla 13. Resultados del ensayo de Viscosidad Brookfield del cemento asfáltico de Apiay**

Tiempo (min)	45	50	55	60	70	80
Código	Viscosidad Brookfield (cps)					
A – 10 - 155	800	600	1400	1200	1400	1400
A – 10 – 165	1000	600	1200	1200	1600	600
A – 13 - 155	1400	1200	1600	2000	1200	1200
A – 13 – 165	1667	2000	2400	1600	3400	2800
A – 15 - 155	3800	4000	5200	5200	6667	3867
A – 15 – 165	4867	4667	5267	4000	3867	5467
A – 20 - 155	5200	8400	6000	9400	10267	7600
A – 20 – 165	7933	7800	6000	12200	10600	9200

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes

El asfalto de Apiay cumple con el parámetro de viscosidad a los 55 minutos con adición del 13% de GCR y a 165°C de temperatura.

**Tabla 14. Resultados del ensayo de Viscosidad Brookfield del cemento asfáltico de Barrancabermeja**

Tiempo (min)	45	50	55	60	70	80
Código	Viscosidad Brookfield (cps)					
B – 15 - 155	2200	2467	2000	2800	2533	1800
B – 15 – 165	2133	1867	1867	2467	1933	2267
B – 20 - 155	5200	8400	6000	9400	10267	7600
B – 20 – 165	7933	7800	6000	12200	10600	9200

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes

En cambio el asfalto de Barrancabermeja cumple con la viscosidad a 50 minutos, con adición del 15% de GCR y a 155°C de temperatura.

La viscosidad que presenta el asfalto de Barrancabermeja es mayor que la del de Apiay, lo que garantiza un asfalto con mejor comportamiento de mezclado.

Con los resultados obtenidos de la Viscosidad Brookfield se elaboró la curva reológica con el fin de analizar el comportamiento de los dos asfaltos modificados seleccionados en los estados (Original, RTFO, PAV). Por lo tanto se presenta la siguiente tabla de resultados:

**Tabla 15. Resultados de la Viscosidad Brookfield para los asfaltos modificados seleccionados**

Temperatura (°C)		90	120	140	160
Código	Estado	Viscosidad Brookfield (cP)			
A -13-165-55	Original	129000	14600	4200	2600
	RTFO	405000	52500	16533	5800
	PAV	105000	9600	2400	1000
B-15-155-50	Original	70000	7000	2600	1800
	RTFO	181000	22600	8000	3400
	PAV	989400	55000	12200	3000

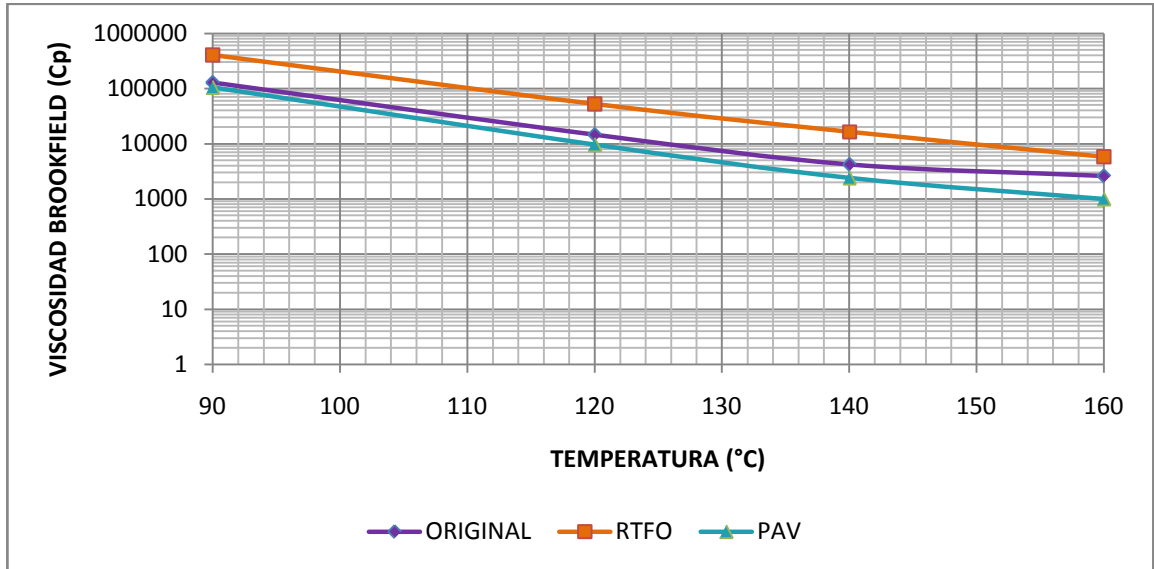
FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes y modificada por los autores del presente trabajo

En los gráficos a continuación se observa el comportamiento de cada uno de los asfaltos en los tres estados analizados:

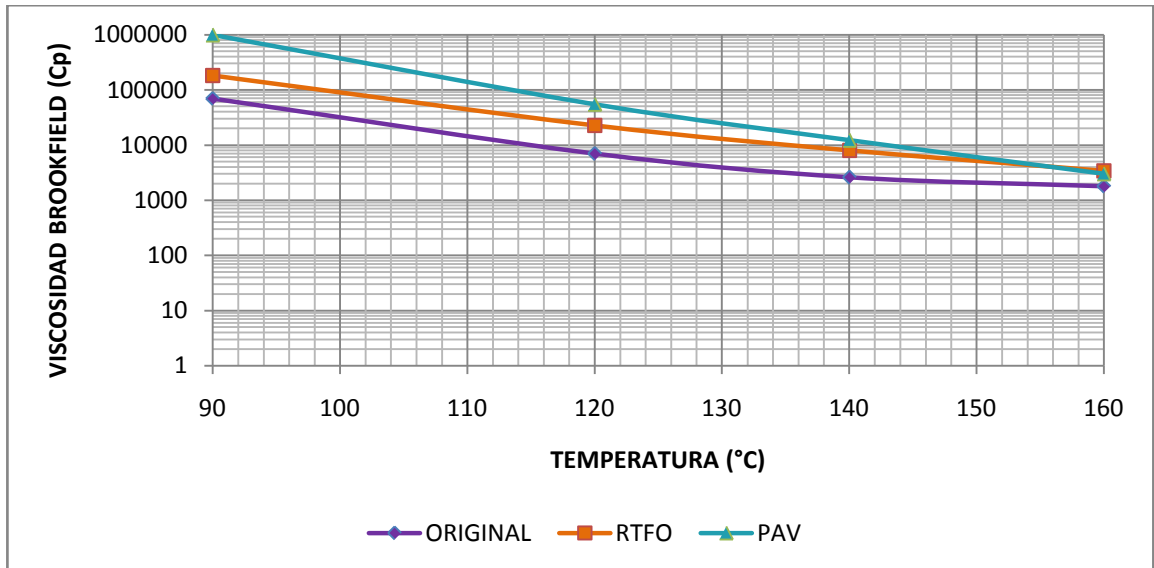


**Figura 17. Variación de la viscosidad Brookfield para los asfaltos A-13-165-55 y B-15-155-50 en los estados (Original, RTFO, PAV)**

**ASFALTO A-13-165-55**



**ASFALTO B-15-165-50**

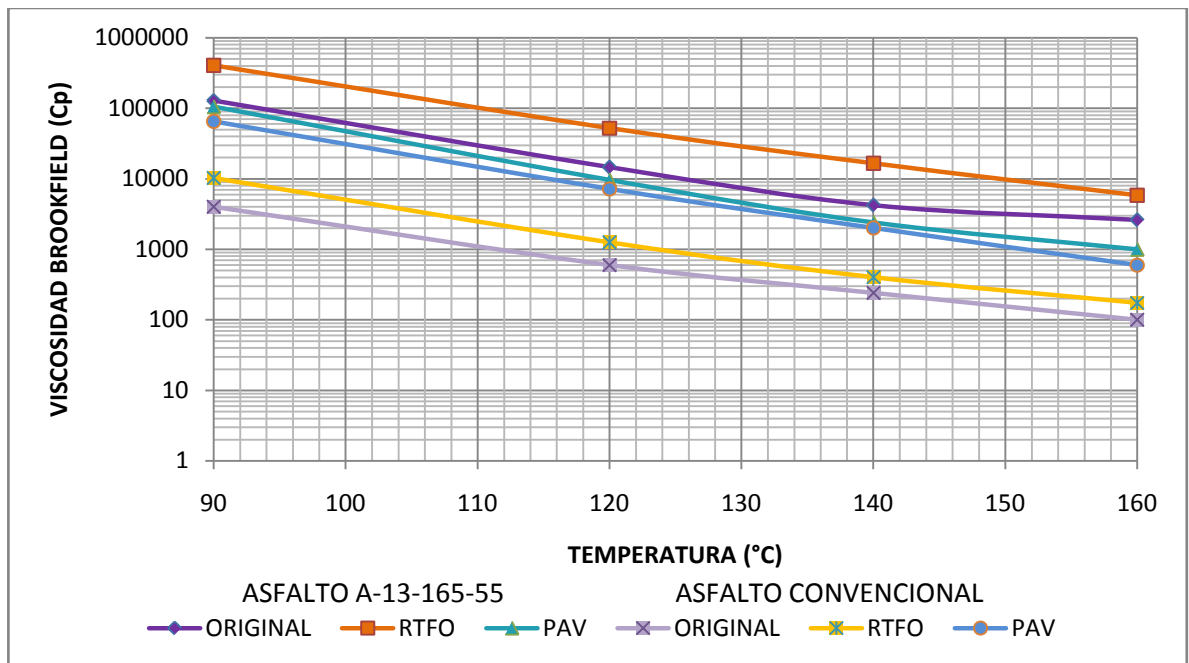


FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes y modificada por los autores del presente trabajo

El asfalto modificado presenta viscosidades mucho más altas que las del presentadas en el asfalto sin modificar, esto se debe a la adición del GCR que proporciona al asfalto mejores propiedades reológicas. Para el asfalto A-13-165-55 presenta mayores viscosidades en el estado RTFO y el asfalto B-15-165-50 las obtiene en estado PAV.

Con el fin de comparar las viscosidades de los asfaltos originales con los asfaltos modificados se elabora la siguiente figura, en la cual se observa:

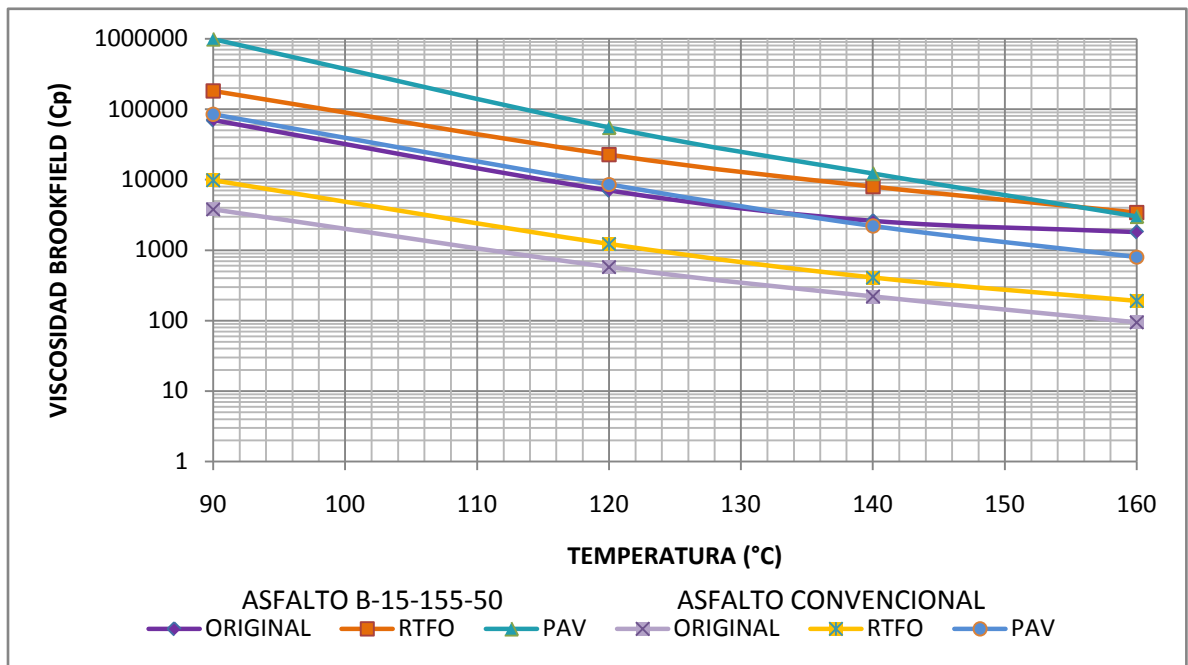
**Figura 18. Comparativo gráfico de la viscosidad Brookfield para los asfaltos A-13-165-55 y Convencional de Apiay en los estados (Original, RTFO, PAV)**



FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes y elaborada por los autores del presente trabajo

En esta gráfica se observa que las viscosidades del asfalto modificado son superiores a las del asfalto convencional; sin embargo ambos asfaltos en el estado PAV obtienen resultados similares, debido a que son más duros.

**Figura 19. Comparativo gráfico de la viscosidad Brookfield para los asfaltos B-15-155-50 y Convencional de Barrancabermeja en los estados (Original, RTFO, PAV)**



FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes y elaborada por los autores del presente trabajo

El comportamiento de este asfalto es diferente al de Apiay, las viscosidades del asfalto modificado son mayores que las del asfalto convencional, pero el asfalto convencional en estado PAV presenta valores similares a las del asfalto modificado en estado original.

En conclusión los asfaltos modificados presentan mejores viscosidades respecto a los asfaltos convencionales debido a la adición del GCR y su proceso de modificación a altas temperaturas a largos períodos de tiempo.

Al realizar el ensayo DSR se analizó el comportamiento del asfalto modificado y luego se compara con los resultados obtenidos en los asfaltos convencionales:

**Tabla 16. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los asfaltos modificados A-13-165-55 y B-15-155-50 en los estados (Original, RTFO, PAV)**

Parámetro	Estado	Temperatura	A-13-165-55	B-15-155-50
G*/Senδ (kPa)	Original	76°C		1.44
		88°C	1.05	
	RTFO	76°C		2.30
		88°C	4.27	
	PAV	19°C	3537.7	3845.3

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes y modificado por los autores del presente trabajo

Los asfaltos modificados adquiridos se vuelven rígidos en el estado PAV, el asfalto de Apiay requiere de mayores temperaturas para obtener los valores viscoelásticos tanto en el estado Original como el RTFO, al compararlos con el asfalto convencional. En cambio el asfalto modificado de Barrancabermeja requiere menor temperatura.

A los asfaltos modificados se les realizaron ensayos convencionales, de los cuales se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 17. Resultados de ensayos convencionales sobre cemento asfáltico no modificado y modificado con GCR**

Código	Ductilidad (25°C)	Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	Recuperación elástica (25°C, 100 g, 5 s)	Punto de ablandamiento	Densidad (25°C)	Pérdida de masa
	INV E-702	INV E-706	ASTM-301-95	INV E-712	INV E-707	INV E- 720
	Promedio (cm)	Promedio (1/10 mm)	(%)	Promedio (°C)	g/cm <sup>3</sup>	(%)
<b>Original</b>						
A-13-165-55	10.25	48	42.5	54.9	1.06	---
B-15-155-50	11.50	52	20.0	54.7	1.03	---
<b>Envejecido en RTFO</b>						
A-13-165-55	13.75	39	72.5	70.3	0.97	0.87
B-15-155-50	18.25	33	22.5	64.0	1.04	0.58
<b>Envejecido en PAV</b>						
A-13-165-55	5.75	28	---	85.9	1.02	---
B-15-155-50	12.75	30	---	94.1	1.05	---

FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes

Al comparar estos resultados con los obtenidos en los asfaltos convencionales, se observa que disminuyen notoriamente; el mejor comportamiento se demuestra con la recuperación elástica obtenida por cada uno de ellos, la cual se incrementa en el estado al envejecimiento PAV. El asfalto modificado de Apiay presenta mayor elasticidad con menor cantidad de GCR adicionado, con respecto al asfalto de Barrancabermeja.

Después de analizar todos los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a los asfaltos estudiados, se selecciona el asfalto B-15-155-50 para la fabricación

de la mezcla asfáltica, por obtener un valor de viscosidad bajo y cumplir con las especificaciones Superpave.

Una vez seleccionado el asfalto modificado, se realizan los siguientes ensayos de laboratorio a la mezcla asfáltica fabricada:

- ∞ Compactación en la máquina de cizallamiento giratorio PCG
- ∞ Determinación del Módulo Dinámico
- ∞ Determinación del contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica
- ∞ Determinación del comportamiento a la fatiga
- ∞ Determinación de la resistencia a la deformación plástica mediante la pista de ensayo de laboratorio

A continuación se resumen los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio anteriormente mencionados:

El % de vacíos con aire en la mezcla total mayor es obtenido para un % de asfalto de 5.5%, pues a medida que se aumenta el porcentaje de asfalto disminuye el % de vacíos en la mezcla.

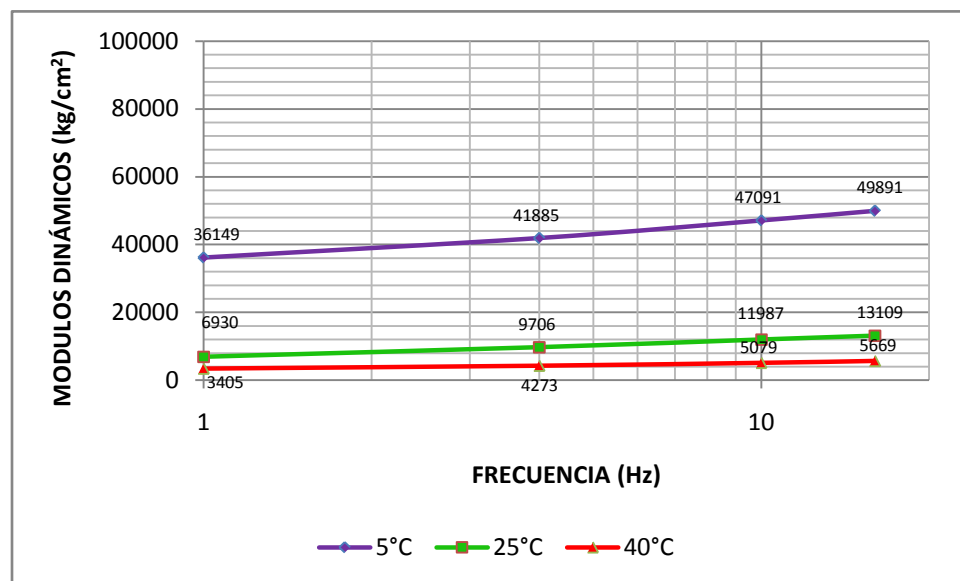
**Tabla 18. Resultados de Módulos dinámicos de la MDC-2 por el proceso húmedo**

Temperatura de ensayo (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo Dinámico (kg/cm <sup>2</sup> )			
		5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
5	1	36149	62135	82107	35963
	4	41885	70857	92342	45784
	10	47091	77637	96926	52325
	16	49891	82234	100908	56120
25	1	6930	13845	14447	9725
	4	9706	19788	22220	14591
	10	11987	24407	28233	17779
	16	13109	26599	31054	19637
40	1	3405	6613	8701	3345
	4	4273	8709	11162	3867
	10	5079	10469	13310	4711
	16	5669	11471	14698	5308

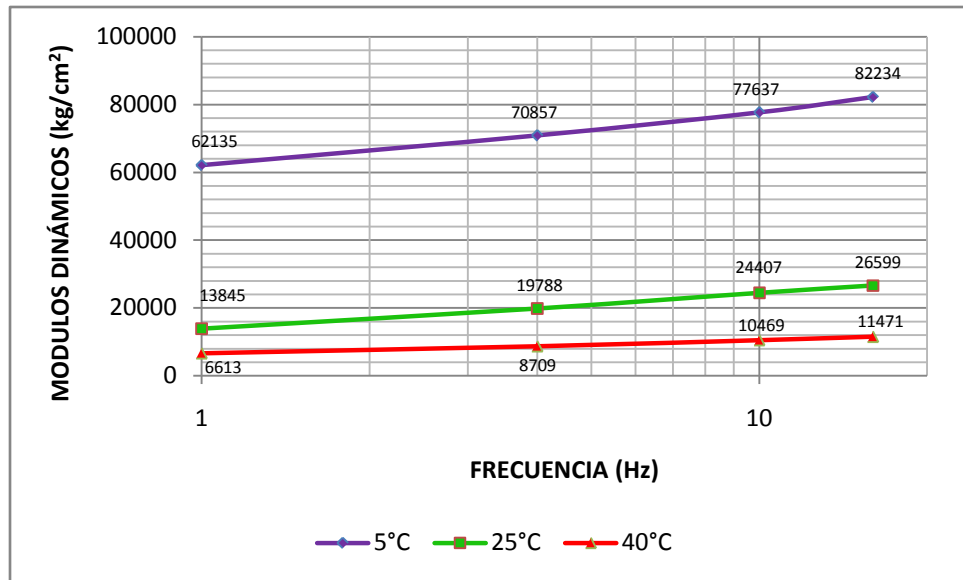
FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes

**Figura 20. Variación de los módulos dinámicos de la mezcla con adición de 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0% de asfalto a temperaturas de 5°C, 25°C y 40°C y frecuencias de 1, 4, 10 y 16 Hz**

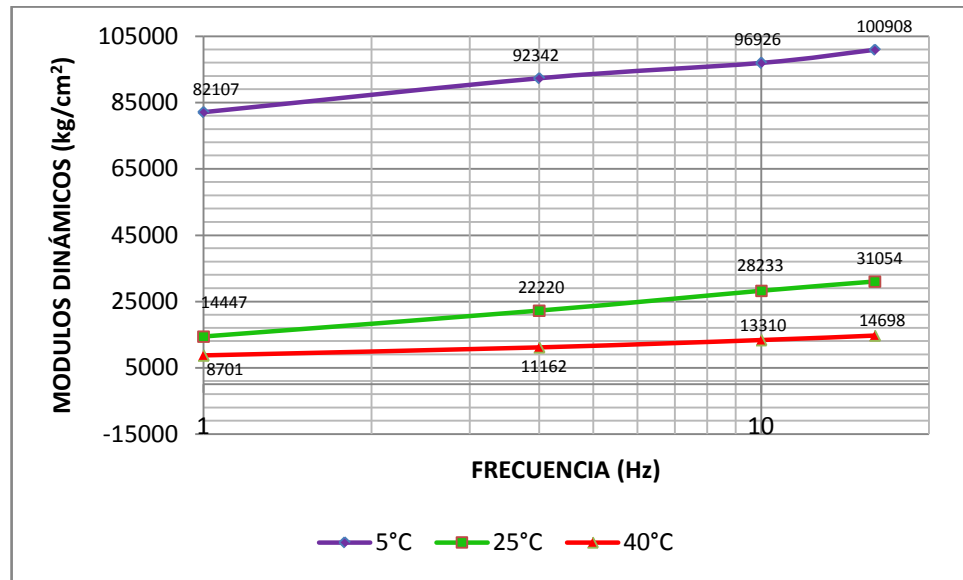
**MEZCLA CON 5.5% DE ASFALTO**



### MEZCLA CON 6.0% DE ASFALTO

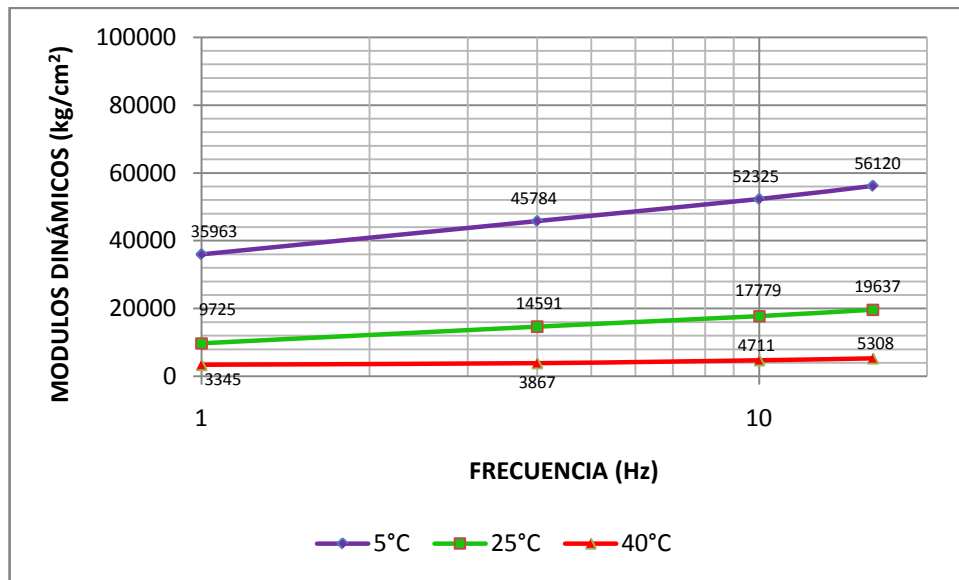


### MEZCLA CON 6.5% DE ASFALTO





### MEZCLA CON 7.0% DE ASFALTO



FUENTE. Tomado del Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas, elaborado por el IDU – Universidad de Los Andes y elaborada por los autores del presente trabajo

De las gráficas anteriores se deduce:

- ∞ Al incrementar el contenido de asfalto, los módulos aumentan progresivamente hasta el 6.5%, a partir del 7.0% vuelven a disminuir.
- ∞ A medida que aumenta la temperatura, disminuyen los módulos. Este comportamiento es similar al obtenido en el proceso por vía seca.
- ∞ La mezcla con adición de 6.5% de asfalto a bajas temperaturas obtiene módulos altos, con los cuales la mezcla tiende a sufrir rompimiento por la fatiga.
- ∞ La mezcla con adición de 5.5% de asfalto presenta módulos intermedios que garantizan un buen comportamiento estructural.

Para la fabricación de la mezcla se empleó material granular con granulometría discontinua.

**6.1.2 Mezcla densa 0/10 fabricada con desperdicio de llanta.**<sup>24</sup>En este estudio, los investigadores adicionan desperdicio de llanta en formas de fibra, polvo y la combinación de ambas.

Para esta mezcla se empleó una granulometría 0/10, asfalto de la refinería de Barrancabermeja y desechos de llantas usadas del parque automotor de Bogotá, con densidad de 0,87 kg/cm<sup>3</sup>. A continuación se resumen los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a los materiales pétreos y asfálticos:

**Tabla 19. Resultados de los ensayos de caracterización del material granular**

<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>
Absorción agregado grueso	ASTM C 127	3,34%
Peso específico aparente	ASTM C 127	2,39
Absorción agregado fino	ASTM C 128	1,77%
Peso específico aparente	ASTM C 128	2,50
Desgaste agregados	ASTM C 535	25,5%

FUENTE. Tomado del libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas p. 38

---

<sup>24</sup>REYES LIZCANO, Fredy Alberto; FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía. Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas. Síntesis de la investigación colombiana. Bogotá D.C. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. 2008. 103 p.

**Tabla 20. Resultados de los ensayos de caracterización del asfalto**

<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>
Penetración a 25°C	ASTM D 5-97	67/70
Ductilidad	ASTM D113-99	125 cm
Viscosidad	ASTM D2170-95	1500
Punto de ablandamiento	ASTM D36-95	45°C
Punto de llama e ignición	ASTM D3143-98	215°C y 232°C

FUENTE. Tomado del libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas p. 39

De los resultados obtenidos en los ensayos Marshall realizados a la mezcla se deduce:

- ∞ La estabilidad de la mezcla elaborada con fibras a 75 golpes, adicionando el 0,15% de GCR, es la más alta respecto a las mezclas fabricadas con polvo y combinación fibras – polvo a 50 y 75 golpes.
- ∞ La estabilidad más baja se presenta en la mezcla elaborada con fibras a 50 golpes con adición de 0,75% de GCR.
- ∞ El mejor comportamiento se presenta en las mezclas fabricadas con adición de caucho en 0,15%, 0,30% y 0,60%, debido a que se genera un incremento en la estabilidad de las mezclas fabricadas en las tres formas de adición del desperdicio de llanta compactadas a 50 golpes.
- ∞ Al adicionar el desperdicio de llanta a la mezcla asfáltica se reduce la densidad sin importar el porcentaje y la forma del caucho.
- ∞ Al adicionar el desperdicio de llanta a la mezcla en cualquiera de las opciones y porcentajes estudiados, la deformación se encuentra dentro del rango permisible.

Adicionalmente a esta mezcla se le realizaron ensayos al ahuellamiento; resultados de los cuales se concluye lo siguiente:

- ∞ Las mezclas con adición del desperdicio de llanta en polvo en un 0,60% y la fabricada con fibra en un 0,45% presentaron menor ahuellamiento, respecto a todas las mezclas fabricadas.
- ∞ Las mezclas fabricadas con caucho en condición combinada fibra – polvo presentan ahuellamientos altos, lo cual no es recomendable pues tiene una facilidad de deformación en un 33%.

**6.1.3 Comparativo de los estudios desarrollados con adición de desecho de llanta.** A continuación se realiza un comparativo entre los dos estudios analizados:

**Tabla 21. Comparativo de las experiencias realizadas por (IDU – Universidad de los Andes) y la presentada en el libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas**

Experiencia 1	Experiencia 2
Al adicionar GCR a la mezcla asfáltica tanto por vía seca como por vía húmeda se mejora el comportamiento mecánico.	La mezcla asfáltica modificada con desecho de llanta presenta menor ahuellamiento cuando se adiciona en forma de polvo y fibras.
Se mejora la resistencia a la fatiga en la mezcla modificada con asfalto; aunque presenta módulos dinámicos bajos y la deformación plástica aumenta con respecto a la mezcla convencional.	Al analizar la resistencia (estabilidad) para los niveles de energía de 50 golpes, ésta se incrementa, respecto a las obtenidas para 75 golpes.
La adición de GCR a la mezcla asfáltica garantiza mayor vida útil de un pavimento; aunque es mejor el comportamiento obtenido por vía húmeda, respecto al obtenido por vía seca.	

FUENTE. Tomado de las experiencias analizadas y elaborada por los autores del presente trabajo

## **6.2 MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE MODIFICADA CON DESECHOSPLASTOMÉRICOS**

Otras de las investigaciones realizadas en Colombia, respecto a la modificación de las mezclas asfálticas es la utilización de desechos plastoméricos como policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (PEAD) y Poliestireno (PS). Los Plastómeros buscan mejorar en las mezclas asfálticas propiedades como:

- ∞ Resistencia a la fisuración y susceptibilidad térmica
- ∞ Resistencia a la deformación permanente
- ∞ Adherencia entre los agregados pétreos
- ∞ Adherencia entre la capa de rodadura y la estructura del pavimento (Base – subbase)
- ∞ Cohesividad
- ∞ Resistencia al envejecimiento
- ∞ Resistencia a la fatiga

A continuación se describen algunas de las investigaciones desarrolladas en Colombia en las cuales se hace uso de este tipo de desechos para la modificación de las mezclas asfálticas densas en caliente:

**6.2.1 Estudio del comportamiento de la mezcla asfáltica modificada con policloruro de vinilo (PVC)<sup>25</sup>.** Al realizar el desarrollo de esta tecnología, se realiza la modificación por vía húmeda a cemento asfáltico y por vía seca a los agregados pétreos, empleando desecho de PVC generado durante el proceso de fabricación del mismo. Para ello se realizarán los ensayos Marshall y de caracterización dinámica para evaluar el módulo y resistencia a la deformación permanente de la mezcla asfáltica convencional; igualmente se realizarán ensayos de caracterización al cemento asfáltico con y sin aditivo modificador como: penetración, viscosidad y punto de ablandamiento.

Para el desarrollo del estudio se emplearon los siguientes materiales:

- ☞ Agregados pétreos de la cantera de Fuzca (Bogotá D.C.)
- ☞ Cemento asfáltico proveniente de Ecopetrol de Barrancabermeja
- ☞ El desecho PVC proviene de la empresa Mexichem – Resinas Colombia S.A.

A los agregados pétreos se les realizaron los ensayos de laboratorio en cumplimiento de las Especificaciones INVIAS 2007:

- ☞ Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos
- ☞ Peso específico y absorción de agregados finos y gruesos
- ☞ Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la máquina de Los Ángeles
- ☞ Partículas fracturadas
- ☞ Equivalente de arena
- ☞ Índice de alargamiento y aplanamiento

---

<sup>25</sup>RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander, REYES LIZCANO, Fredy Alberto y OJEDA MARTINEZ, Blanca Esperanza. Comportamiento de una mezcla asfáltica densa en caliente modificada con desecho de policloruro de vinilo (PVC). 2008. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C. 2008, vol. 18-2. 44 p.

**Tabla 22. Caracterización de los agregados pétreos**

Característica	Valor
Peso específico	2.57
Equivalente de arena	28%
Ataque en sulfato de sodio	11.9%
Caras fracturadas	100%
Índice de alargamiento	13%
Índice de aplanamiento	23%
Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles	26.0%

Fuente. Tomado del estudio Comportamiento de una mezcla densa de asfalto en caliente modificada con desecho de PVC

El cemento asfáltico empleado presenta las siguientes características:

**Tabla 23. Características generales del cemento asfáltico 80 – 100 proveniente de Barrancabermeja**

Ensayo	Método	Unidad	C.A 80 - 100	Resultado
<b>Ensayos para el asfalto original</b>				
Penetración (25°C, 100 g, 5s)	ASTM D-5	0.1 mm	80 - 100	85
Índice de penetración	INV E-724	-	- 1 / + 1	-0.5
Viscosidad Absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1000 min.	1400
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	ASTM D-113	cm	100 min.	> 105
Solubilidad en tricloroetileno	ASTM D-2042	%	99 min.	> 99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	0.2 máx.	< 0.2
Punto de inflamación COC	ASTM D-92	°C	232 min.	295
<b>Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT</b>				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	1.0 máx.	0.2
Penetración del residuo (25°, 100 g, 5s) con respecto a la original	ASTM D-5	%	48 mín.	65

Fuente. Shell de Colombia S.A. Carta técnica Shell Bitumen, 2007

El PVC utilizado presenta una densidad de 0.9 g/cm<sup>3</sup> y partículas de coloración blanca que pasan el tamiz No. 200 en un ensayo de granulometría.

Una vez conocidos los resultados de laboratorio que caracterizan los materiales empleados, se realiza el ensayo Marshall a la mezcla convencional y a la mezcla modificada con PVC tanto por vía seca como húmeda.

**Tabla 24. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica convencional MDC-2 con cemento asfáltico 80 - 100**

<b>Cemento Asfáltico (%)</b>	<b>Peso unitario (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Estabilidad E (kg)</b>	<b>Vacios de la mezcla (%)</b>	<b>Vacios en agregados (%)</b>	<b>Flujo F (mm)</b>	<b>Relación E/F (kg/mm)</b>
4.5%	2.083	1833	11.42	17.68	2.4	764
5.0%	2.081	1998	10.27	17.79	2.7	740
5.5%	2.092	2111	8.71	17.51	3.1	681
6.0%	2.091	2220	6.69	17.19	3.0	740
6.5%	2.100	2237	5.36	17.44	3.3	678
7.0%	2.093	2243	3.94	17.25	3.7	606

Fuente. Tomado del estudio Comportamiento de una mezcla densa de asfalto en caliente modificada con desecho de PVC

**Tabla 25. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PVC por vía húmeda**

<b>PVC (%)</b>	<b>Peso unitario (gr/cm<sup>3</sup>)</b>		<b>Estabilidad E (kg)</b>		<b>Vacios de la mezcla (%)</b>		<b>Flujo F (mm)</b>		<b>Relación E/F (kg/mm)</b>	
	<b>6.0%</b>	<b>6.5%</b>	<b>6.0%</b>	<b>6.5%</b>	<b>6.0%</b>	<b>6.5%</b>	<b>6.0%</b>	<b>6.5%</b>	<b>6.0%</b>	<b>6.5%</b>
0.5	2.131	2.138	3004	2830	7.0	6.6	3.8	3.3	791	858
1.0	2.128	2.125	2916	2895	5.9	6.1	3.6	3.0	810	965
1.5	2.148	2.115	2667	2607	4.3	5.0	3.6	3.5	741	745

Fuente. Tomado del estudio Comportamiento de una mezcla densa de asfalto en caliente modificada con desecho de PVC



**Tabla 26. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PVC por vía seca**

PVC (%)	Peso unitario (gr/cm <sup>3</sup> )		Estabilidad E (kg)		Vacíos de la mezcla (%)		Flujo F (mm)		Relación E/F (kg/mm)	
	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%
2.0	2.131	2.132	2173	2434	5.84	6.27	3.4	4.1	639	594
4.0	2.121	2.114	2383	2410	5.71	5.86	4.1	4.1	581	588
6.0	2.103	2.111	2220	2143	6.14	5.43	4.4	3.6	505	595

Fuente. Tomado del estudio Comportamiento de una mezcla densa de asfalto en caliente modificada con desecho de PVC

De los resultados presentados en las tablas anteriores se analiza lo siguiente:

- ∞ El porcentaje de asfalto óptimo para la fabricación de la mezcla asfáltica convencional es de 6,5% para dar cumplimiento a las Especificaciones INVIAS 2007.
- ∞ Al realizar la modificación del asfalto tanto por vía húmeda como por vía seca a medida que se aumenta el % de PVC adicionado al asfalto, disminuye la estabilidad.
- ∞ Por la vía húmeda a medida que disminuye la estabilidad, aumenta la rigidez al adicionar PVC de 0.5% - 1.0% pero al adicionar el 1.5% vuelve y disminuye.
- ∞ Los mayores valores de estabilidad de las mezclas modificadas se obtienen cuando se adiciona 0.5 y 1.0% de PVC al 6.0 y 6.5% de cemento asfáltico por vía húmeda respectivamente. En los porcentajes de cemento asfáltico y PVC empleados, el incremento de estabilidad alcanzado fue de 35.3% y 29.4% y la rigidez Marshall de 9.5% y 42.3% respectivamente.

- ∞ Los mayores valores de rigidez Marshall se obtienen cuando se adiciona 1.5% de PVC al 6.0% y al 6.5% de cemento asfáltico, en este caso el incremento de rigidez Marshall alcanzado por las mezclas modificadas es de 9.5% y 42.3% respectivamente.
- ∞ En cuanto a la deformación de la mezcla medida de manera indirecta a través del flujo, es mayor cuando se utiliza el 6.0% de cemento asfáltico para cualquier % de PVC y cuando se utiliza 6.5% de cemento asfáltico la deformación es menor en las mezclas modificadas respecto a las convencionales si se adiciona PVC entre 0.5 – 1.0%.
- ∞ El máximo incremento en la estabilidad (8.8%) se obtiene cuando se sustituye un 2.0% de filler por PVC en la mezcla y se utiliza 6.5% de cemento asfáltico. Este proceso es realizado por vía seca
- ∞ La rigidez Marshall en las mezclas modificadas por vía seca es menor en comparación con las mezclas convencionales para cualquier porcentaje de cemento asfáltico y de filler sustituido por PVC.

Al analizar los módulos dinámicos y la deformación permanente de las mezclas diseñadas de la siguiente manera:

- ∞ Mezclas convencionales fabricadas con 6.5% de cemento asfáltico
- ∞ Mezclas modificadas por vía húmeda con 6.5% de cemento asfáltico y 1.0% de PVC
- ∞ Mezclas modificadas por vía seca con 6.5% de cemento asfáltico y 2.0% de PVC

A continuación se resume el comportamiento del módulo dinámico tanto por vía húmeda como por vía seca:

**Tabla 27. Comparativo del comportamiento del módulo dinámico por vía seca y húmeda de la adición de PVC a la mezcla asfáltica**

Vía Húmeda	Vía Seca
<p>El módulo se incrementa al variar la temperatura cuando el asfalto se modifica por vía húmeda con respecto a la mezcla convencional:</p> <p>∞ Para 10°C → 17 y 23%</p> <p>∞ Para 20°C → 49 y 80%</p> <p>∞ Para 30°C → 2.0 y 3.5 veces mayor que en la mezcla convencional</p>	<p>∞ Para 10°C → El módulo disminuye alcanzando valores entre 79 y 90% respecto a la mezcla convencional.</p> <p>∞ Para 20 y 30°C → Tiende a presentar valores similares pero ligeramente mayores a los de las mezclas convencionales.</p>
<p>La adherencia es mejor entre el cemento asfáltico y el agregado pétreo a la temperatura de 10°C, debido a una mejor dispersión entre el PVC y el cemento asfáltico.</p>	<p>El enlace PVC – agregado pétreo se puede romper con facilidad debido a que a bajas temperaturas de servicio las mezclas tienden a presentar microfisuración térmica.</p>

La deformación permanente de las mezclas modificadas es mayor que en las convencionales. Adicionalmente se observa que la mezcla convencional no cumple con el valor máximo de deformación de 1.0% medido a los  $3 \times 10^3$  ciclos de carga; pero al ser modificados por vía seca cumplen con este valor exigido.

Fuente. Tomado del estudio Comportamiento de una mezcla densa de asfalto en caliente modificada con desecho de PVC y elaborada por los autores del presente trabajo

Por último al analizar la caracterización del cemento asfáltico se observa que el asfalto modificado presenta una resistencia a la penetración superior con respecto al convencional para cualquier % de adición de PVC. Los resultados corresponden a:

- ∞ La mayor resistencia a la penetración se presenta cuando se adiciona PVC al 6.0% de cemento asfáltico.

- ∞ El punto de ablandamiento y la viscosidad incrementan cuando se adiciona por vía húmeda PVC al cemento asfáltico.
- ∞ El incremento en la resistencia a la penetración, el punto de ablandamiento y la viscosidad de los asfaltos modificados con PVC permiten predecir menor ahuellamiento de las mezclas a altas temperaturas de servicio, en comparación con las convencionales, debido a que el PVC es un polímero plastomérico que presenta una mayor rigidez que el cemento asfáltico.

Una vez finalizado el desarrollo experimental de la tecnología se exponen a continuación las ventajas de la mezcla modificada con PVC respecto a la mezcla convencional, tanto por vía húmeda como por vía seca:

**Tabla 28. Conclusiones de la mezcla asfáltica modificada por vía seca y húmeda**

Vía Húmeda	Vía Seca
La mezcla presenta mayor resistencia mecánica bajo carga monotónica, rigidez y resistencia a la deformación permanente	Las mezclas presentan menor resistencia mecánica bajo carga monotónica (evaluada a través de la rigidez Marshall)
	Menor módulo dinámico cuando la temperatura del ensayo es de 10°C
	Ligeramente mayor módulo dinámico cuando el ensayo se realiza a 20°C y 30°C
	Mayor resistencia a la deformación permanente

Fuente.Tomado del estudio Comportamiento de una mezcla densa de asfalto en caliente modificada con desecho de PVC y elaborada por los autores del presente trabajo

- ∞ Los asfaltos modificados con PVC presentan mayor resistencia a fluir respecto al convencional. Los resultados de los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad permiten predecir menor ahuellamiento a altas temperaturas.

- ∞ La mezcla asfáltica modificada a bajas temperaturas de servicio podría llegar a tener un comportamiento frágil. Por lo tanto se recomienda utilizarla en climas cálidos y realizar otras investigaciones para analizar su utilización en climas fríos.
- ∞ Agregar desecho de PVC al cemento asfáltico ayuda a disminuir el impacto negativo que produce en el ambiente.

**6.2.2 Análisis del comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas modificadas con desechos de Policloruro de Vinilo (PVC), Polietileno de alta densidad (PEAD) y Poliestireno (PS).**<sup>26</sup> Los investigadores desarrollaron este estudio buscando evaluar en laboratorio el cambio de la resistencia mecánica de mezclas asfálticas modificadas con plastómeros por vía húmeda; a partir de la realización del ensayo Marshall.

Los materiales empleados para el desarrollo de la investigación son:

- ∞ Agregado procedente de la mina La Fiscala ---- Prueba con PVC
- ∞ Agregados de la cantera Conalgre ---- Prueban con PEAD y PS

A estos materiales pétreos se les realizaron los siguientes ensayos de laboratorio con base en las Especificaciones INVIAS 2002:

- ∞ Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos
- ∞ Peso específico y absorción de agregados finos y gruesos

---

<sup>26</sup>RONDON QUINTANA, Hugo Alexander; RODRÍGUEZ RINCÓN, Edgar; MORENO ANSELMÍ, Luis Ángel. Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de Mezclas Densas en Caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de Policloruro de Vinilo (PVC), Polietileno de alta densidad (PEAD) y Poliestireno (PS). En: Revista de Ingenierías, Universidad de Medellín, Julio – Diciembre de 2007, Vol. 6 No. 11, ISSN 1692-3324. 91 – 104 p. Medellín - Colombia

- ∞ Resistencia al desgaste por medio de la máquina Los Ángeles
- ∞ Partículas fracturadas
- ∞ Ensayo para medir el equivalente de arena
- ∞ Índice de alargamiento y aplanamiento

**Tabla 29. Caracterización de los agregados pétreos**

Característica	Conalgre	La Fiscala
Peso específico	2,60	2,55
Equivalente de arena	55,00%	78,90%
Caras fracturadas	86,00%	95,00%
Índice de alargamiento	14,00%	10,00%
Índice de aplanamiento	13,00%	13,00%
Resistencia al desgaste en la máquina de los Ángeles	34,20%	31,50%

Fuente. Tomado del estudio Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de PVC, PEAD, PS

El cemento asfáltico empleado es proveniente de la Refinería de Barrancabermeja, el cual presenta las siguientes características:

**Tabla 30. Características generales del asfalto proveniente de Barrancabermeja**

Ensayo	Método	Unidad	Especificación	Resultado
Penetración a 25°C	ASTM D-5	mm/10	70 - 90	88
Pérdida de masa (RTFOT)	ASTM D 2872	g/100g	1.1 máx.	0.22
Punto de ablandamiento	ASTM D 36	°C	42 - 53	44
Punto de inflamación	ASTM D 92	°C	232 mín.	296
Gravedad API	ASTM D 4052	°API		7.38
Peso específico		kg/m <sup>3</sup>		1.01

Fuente. Ecopetrol

Una vez conocida la caracterización de los agregados pétreos y cemento asfáltico se realiza el diseño Marshall para la mezcla convencional MDC-2 y las mezclas modificadas con PVC, PEAD y PS:

**Tabla 31. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica convencional MDC-2**

Cemento Asfáltico (%)	Peso unitario (gr/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad E (kg)	Vacios de la mezcla (%)	Vacios en agregados (%)	Llenos de asfalto (%)	Flujo F (mm)	Relación E/F (kg/mm)
5.0%	2.12	872.7	10.36	20.88	50.46	3.13	278.82
5.5%	2.16	956.1	8.00	19.79	59.69	3.42	279.60
6.0%	2.19	1251.5	5.96	19.34	67.28	3.48	359.63
6.5%	2.21	967.4	4.81	19.02	74.83	4.43	218.37

Fuente. Tomado del estudio Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de PVC, PEAD, PS

**Tabla 32. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PVC**

PVC (%)	Peso unitario (gr/cm <sup>3</sup> )		Estabilidad E (kg)		Vacios de la mezcla (%)		Vacios en agregados (%)		Llenos de asfalto (%)		Flujo F (mm)		Relación E/F (kg/mm)	
	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%
0.5	2.18	2.16	1691	1398	6.75	6.36	19.80	20.72	64.17	69.42	3.93	4.09	430.3	341.8
1.0	2.20	2.14	2202	1894	5.09	6.51	19.49	21.92	73.95	70.39	4.00	4.11	550.6	460.9
1.5	2.14	2.12	2037	1843	6.70	6.58	21.63	23.03	70.67	71.72	4.22	4.29	482.7	429.7

Fuente. Tomado del estudio Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de PVC, PEAD, PS

**Tabla 33. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PEAD**

PEAD (%)	Peso unitario (gr/cm <sup>3</sup> )		Estabilidad E (kg)		Vacios de la mezcla (%)		Vacios en agregados (%)		Llenos de asfalto (%)		Flujo F (mm)		Relación E/F (kg/mm)	
	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%
0.5	2.16	2.07	1554	823	6.9	10.2	20.9	24.5	67	59	3.0	2.5	519	330
1.0	2.24	2.12	1717	1115	2.8	7.2	18.4	23.1	85	69	3.9	2.7	442	409
1.5	2.26	2.17	1657	1113	1.0	4.3	18.1	21.7	94	81	4.4	3.4	378	325

Fuente. Tomado del estudio Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de PVC, PEAD, PS

**Tabla 34. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PS**

PS (%)	Peso unitario (gr/cm <sup>3</sup> )		Estabilidad E (kg)		Vacíos de la mezcla (%)		Vacíos en agregados (%)		Llenos de asfalto (%)		Flujo F (mm)		Relación E/F (kg/mm)	
	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%
0.5	2.18	2.24	1732	1599	6.28	2.94	20.20	18.35	69.0	84.59	4.28	4.81	404	332
1.0	2.23	2.24	1874	1549	3.14	2.06	18.49	18.58	83.3	89.11	4.89	4.28	383	362
1.5	2.26	2.23	2979	1487	1.54	1.99	18.12	19.48	91.6	90.00	4.94	5.67	604	262

Fuente. Tomado del estudio Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de PVC, PEAD, PS

Una vez obtenidos los resultados del diseño Marshall para la mezcla MDC-2 convencional y las modificadas con PVC, PEAD y PS se puede deducir:

- ∞ El % óptimo de asfalto para la mezcla convencional MDC-2 es de 6.0%, debido que con este porcentaje la mezcla cumple con las exigencias de las Especificaciones INVIAS 2002.
- ∞ Al adicionar PVC a la mezcla asfáltica en cualquier proporción al cemento asfáltico 5.5%, arroja valores mayores que a 6.0% de asfalto.
- ∞ Al adicionar PVC al asfalto, los valores aumentan de 0.5% - 1.0% pero disminuyen al adicionar el 1.5%.
- ∞ La mezcla con adición de PVC que presenta mejor comportamiento mecánico es la modificada con el 1.0% de PVC y 5.5% de contenido de asfalto, ya que la relación estabilidad/asfalto es la más alta.
- ∞ La mezcla modificada con PEAD en cualquier proporción de adición al 6.0% de asfalto, arroja valores mayores que cuando se le adiciona al 6.5% de asfalto.



- ∞ La mezcla modificada con PEAD presenta valores ligeramente inferiores en la estabilidad, al compararlos con los obtenidos en la mezcla modificada con PVC.
- ∞ Esta mezcla tiene un mejor desempeño mecánico que la modificada con PVC, ya que los valores del flujo están dentro de los parámetros del INVIAS garantizando una mezcla un poco más rígida.
- ∞ La mezcla modificada con PEAD presenta mejor comportamiento cuando se adiciona 0.75% al 6.0% de cemento asfáltico.
- ∞ El mejor comportamiento de la mezcla modificada con PS se presenta cuando se adiciona el modificador en cualquier proporción al 6.0% de cemento asfáltico.
- ∞ La mezcla modificada con PS presenta mejor desempeño al adicionar en proporción de 0.5% - 1.0% al 6.0% de cemento asfáltico.

Una vez definidos los asfaltos que presentan mejor desempeño mecánico se realizan los ensayos de caracterización de los asfaltos seleccionados:

**Tabla 35. Resultados de caracterización de los asfaltos**

Ensayo	Método	Unidad	Asfalto Convencional	Asfalto - PVC	Asfalto - PEAD	Asfalto - PS
Penetración a 25°C	INV E-706	0.1 mm	83	50	14.5	91
Punto de ablandamiento anillo y bola	INV E-712	°C	49	60.5	93	94
Ductilidad	INV E-702	cm	≥ 100	≤ 100	≥ 100	≥ 100
Flotación 80°C	NLT 183-85	seg	96	8970	7993	7005

Fuente. Tomado del estudio Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de PVC, PEAD, PS

De los resultados obtenidos de la caracterización de los asfaltos se observa lo siguiente:

- ∞ Los asfaltos modificados con PVC y PEAD presentan una resistencia mayor a la penetración que el asfalto convencional, mientras que con PS disminuye ligeramente.
- ∞ Del ensayo de flotación se puede observar que los asfaltos modificados presentan mayor viscosidad en comparación con el asfalto convencional y deben ser sometidos a mayores temperaturas para ablandarlos.
- ∞ Las mezclas asfálticas modificadas con los plastómeros (PVC, PEAD, PS), presentan un incremento notable de la rigidez.
- ∞ La mezcla asfáltica modificada con PVC presenta mayor viscosidad que el asfalto convencional y muy baja susceptibilidad térmica manifestada a través de los cambios que en penetración se obtienen a distintas temperaturas.
- ∞ Las mezclas asfálticas modificadas con PEAD y PS presentan mejor comportamiento que la convencional especialmente en rigidez, resistencia a la deformación y peso unitario.

Al finalizar el desarrollo de la experiencia se exponen las siguientes conclusiones:

- ∞ Las mezclas modificadas con desechos de plastómeros tienden a poseer un comportamiento rígido.

- ∞ A bajas temperaturas de servicio estas mezclas tienden a tener un comportamiento frágil, lo que les puede garantizar un buen desempeño en climas cálidos.
- ∞ Los valores de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad del asfalto modificado permiten predecir menor ahuellamiento a altas temperaturas de servicio.

**6.2.3 Mejoramiento de la capa asfáltica mediante la inclusión de desechos plásticos.**<sup>27</sup> Los investigadores emplearon poliestireno para modificar las mezclas asfálticas densas, cuyo objetivo es brindar a la mezcla mayor resistencia, menor densidad, mayor porcentaje de vacíos, así como presentar mejoras con relación a la fatiga, módulos dinámicos y deformaciones permanentes.

Para el desarrollo de la experiencia se empleó el siguiente modificador:

- ∞ Poliestireno generado en el proceso de fabricación de pelles en la planta de Dexton S.A, localizada en Cartagena.

A continuación se relacionan las propiedades mecánicas del poliestireno

**Tabla 36. Propiedades mecánicas del poliestireno**

Peso específico	1,05
Resistencia a la tracción libras por $\text{cm}^2$	420 – 450
Modulo de elasticidad $\text{kg/cm}^2 \cdot 10^5$	0,385

<sup>27</sup> REYES LIZCANO, Fredy; ORTIZ, Miguel Ángel. Mejoramiento de la capa asfáltica mediante la inclusión de desechos plásticos. Grupo CECATA. Bogotá, 2002.

Resistencia al choque (Izod), libras – pies por pulgada de ranura	0,2 – 0,3
Resistencia a la compresión, kg/cm <sup>2</sup>	1050
Contracción de moldeo por centímetro	0,002 – 0,007

FUENTE. Tomado del Mejoramiento de la capa asfáltica mediante la inclusión de los desechos plásticos elaborado por el Grupo CECATA

Otra de las propiedades es la probada resistencia al agua.

Para el desarrollo de la experiencia se realizó el diseño Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto para una MDC-2:

**Tabla 37. Metodología de diseño empleada**

Característica	Resultados Iniciales	% Asfalto	Resultados Finales	% Asfalto
Estabilidad, máxima (kg)	2233	6.0	1950	5.7
Flujo (mm)	12	6.0	11.7	5.7
Vacios con aire	3.72	6.0	5.60	5.7
Vacios mínimos en agregados minerales	16.73	6.0	17.70	5.7
Densidad (kg/cm <sup>2</sup> )	2.33	6.0	2.22	5.7

Fuente. Tomado del Mejoramiento de la capa asfáltica mediante la inclusión de los desechos plásticos elaborado por el Grupo CECATA y modificado por los autores del presente trabajo

Una vez estimados los valores del diseño Marshall para la mezcla convencional MDC-2, se determinó el rango con porcentajes de 0.5%, 1%, 5%, 10% y 15% para adicionar el poliestireno a la mezcla y se realiza un nuevo diseño Marshall pero con la inclusión del modificador:

**Tabla 38. Resultados del diseño Marshall con la inclusión del poliestireno**

<b>Característica</b>	<b>Resultados</b>	<b>% Poliestireno</b>
Estabilidad, máxima (kg)	4027	13.0
Flujo (mm)	12	13.0
Vacíos con aire	6.42	13.0
Vacíos mínimos en agregados minerales	31	13.0
Densidad (kg/cm <sup>2</sup> )	1.83	13.0

Fuente. Tomado del Mejoramiento de la capa asfáltica mediante la inclusión de los desechos plásticos elaborado por el Grupo CECATA y modificado por los autores del presente trabajo

Luego se realizaron los ensayos dinámicos para evaluar el comportamiento de las mezclas (convencional y modificada) ante un esfuerzo cíclico producido por el tránsito. Los ensayos realizados son:

- ∞ Módulos dinámicos por deformación controlada
- ∞ Módulos dinámicos por esfuerzo controlado
- ∞ Deformación permanente
- ∞ Fatiga

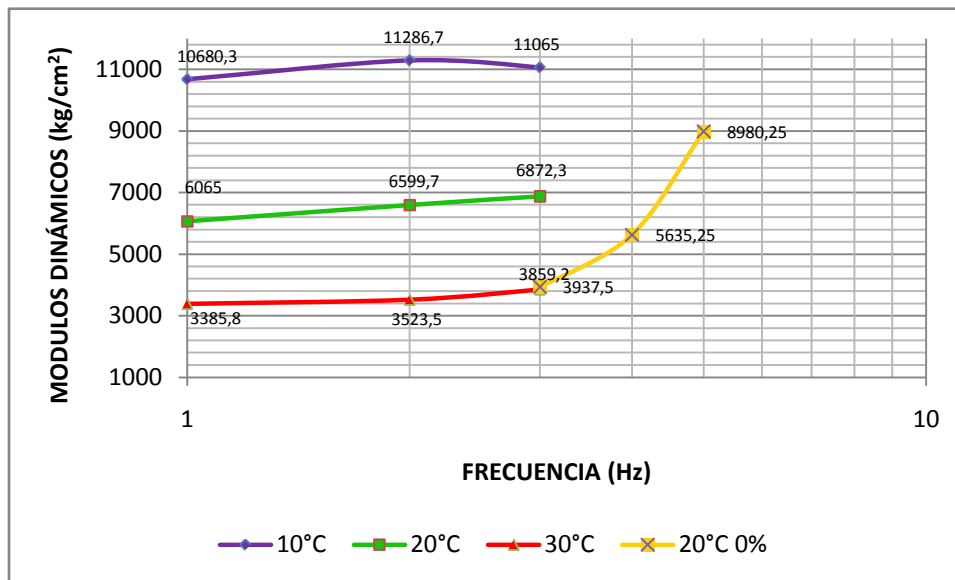
A continuación se relacionan los resultados de los módulos dinámicos determinados en las mezclas convencional a 20°C y modificada a 10°C, 20°C y 30°C:

**Tabla 39. Relación de módulos dinámicos de las mezclas asfálticas**

Temperatura de ensayo (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo Dinámico (kg/cm <sup>2</sup> )	
		MDC-2 0%	MDC-2 13%
10	1.5		10680,3
	2		11286,7
	2.5		11065
20	1.5		6065
	2		6599,7
	2.5	3937,5	6872,3
	5	5635,25	
	10	8980,25	
30	1.5		3385,8
	2		3523,5
	2.5		3859,2

Fuente. Tomado del Mejoramiento de la capa asfáltica mediante la inclusión de los desechos plásticos elaborado por el Grupo CECATA y modificado por los autores del presente trabajo

**Figura 21. Variación de los módulos dinámicos de la mezcla convencional y la modificada a temperaturas 10°C, 20°C, 30°C**



Fuente. Tomado del Mejoramiento de la capa asfáltica mediante la inclusión de los desechos plásticos elaborado por el Grupo CECATA y elaborado por los autores del presente trabajo

En este gráfico se observa que los módulos en la mezcla modificada disminuyen a medida que aumentan la temperatura; mientras que los de la mezcla convencional aumentan notoriamente con la frecuencia.

Otro de los ensayos realizados fue el ensayo de fatiga para el cual se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- ∞ La temperatura escogida fue la de 20°C, tanto para mezclas convencionales como para las mezclas modificadas.
- ∞ Los esfuerzos a los que se sometieron las mezclas fueron:  
 Mezcla convencional: 600 KPa, 350 KPa y 250 KPa  
 Mezcla modificada: 600 KPa, 500 KPa y 350 KPa
- ∞ La frecuencia adoptada para la realización del ensayo fue de 2,5 Hz

Los resultados obtenidos del ensayo de fatiga son:

**Tabla 40. Número de ciclos en la falla debido al esfuerzo aplicado**

<b>Mezcla</b>	<b>600 kPa</b>	<b>550 kPa</b>	<b>500 kPa</b>	<b>350 kPa</b>	<b>250 kPa</b>
Convencional	245			1807	5218
Modificada	1463	21429	254153		

Fuente. Tomado del Mejoramiento de la capa asfáltica mediante la inclusión de los desechos plásticos elaborado por el Grupo CECATA y modificado por los autores del presente trabajo

Para el ensayo de deformación permanente se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros tanto para la mezcla convencional como para la modificada:

- ∞ Temperatura (°C): 40°C
- ∞ Número de pulsos: 3600
- ∞ Esfuerzo aplicado (kPa): 100
- ∞ Frecuencia (Hz): 5.0

Los resultados del ensayo de RLA para las dos mezclas son:

**Tabla 41. Resultados del ensayo de deformación permanente de la mezcla convencional y modificada**

<b>Briqueta No.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>Promedio</b>
Convencional	2.97	3.31	3.14
Modificada	0.48	0.38	0.43

Fuente. Tomado del Mejoramiento de la capa asfáltica mediante la inclusión de los desechos plásticos elaborado por el Grupo CECATA y modificado por los autores del presente trabajo

Al terminar el desarrollo de la investigación, se concluye lo siguiente:

- ∞ El poliestireno seleccionado al reaccionar con el asfalto le incorpora propiedades de rigidez y resistencia, sin ser quebradizo.
- ∞ Para el desarrollo de la experiencia se seleccionó el asfalto de Barrancabermeja, debido a sus propiedades y características que lo hacen desempeñarse bien a altas temperaturas y la facilidad para ser modificado con polímeros.
- ∞ Al adicionar el poliestireno a la mezcla asfáltica, este le brinda mayor adherencia y resistencia, pero sin aumentar demasiado la cantidad, porque sino el efecto no sería el mismo debido a que la cantidad de asfalto no es suficiente para reaccionar con el modificador.
- ∞ La mezcla modificada es mucho más resistente que la mezcla convencional, aunque es una mezcla más liviana.



**6.2.4 Mezcla asfáltica densa en caliente modificada con icopor.**<sup>28</sup>En este caso los investigadores deciden modificar una mezcla asfáltica densa en caliente con poliestireno producto de la trituración de vasos desechables. Para este caso los materiales empleados son:

- ∞ Agregados pétreos de la cantera Patria S.A. ubicada en Vista Hermosa, en los cerros de Mondoñedo
- ∞ Cemento asfáltico de Barrancabermeja
- ∞ Poliestireno producto de vasos desechables

A continuación se resume la caracterización de los materiales a emplear:

**Tabla 42. Caracterización de los agregados pétreos**

Característica	Especificación	Valor Norma	Valor Obtenido
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	INV E-221, 222		2,511
Desgaste en la máquina de los Ángeles (% máx.)	INV E-218, 219	30	28
Caras fracturadas (% mín.)	INV E-227	75	90
Índice de alargamiento (% máx.)	INV E-230	35	18,2
Índice de aplanamiento (% máx.)	INV E-230	35	31,2
Equivalente de arena (% mín.)	INV E-133	50	74

Fuente. Tomado del estudio Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente

<sup>28</sup>FIGUEROA INGANTE, Ana Sofía; REYES LIZCANO, Fredy Alberto; HERNANDEZ BARRERA, Diana; JIMENEZ, Christian y BOHORQUEZ, Natalia. Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. En: Revista Ingeniería e Investigación, Vol. 27 No. 3. Diciembre de 2007. 5 – 15 p.

**Tabla 43. Caracterización del asfalto**

Característica	Especificación	Valor Norma	Valor Obtenido
Penetración a 25°C (0.1 mm)	ASTM D70	80 - 100	81
Ductilidad a 25°C (cm)	ASTM D118	Mín.100	+ 100
Peso específico a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D70		1.012
Viscosidad cinemática a 135°C (cSt)	ASTM D5		303,01
Punto de ignición (°C)	ASTM D92		185
Punto de llama (°C)	ASTM D92		220
Punto de ablandamiento anillo y bola (°C)	ASTM D36		45,20

Fuente. Tomado del estudio Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente

**Tabla 44. Caracterización del poliestireno – Norma NTC 1524**

Ensayo	Valor Obtenido
Temperatura de ablandamiento Vicat mínima (°C)	81
Índice de flujo en fusión mínimo (g/10 min.)	10
Viscosidad a la disolución al 10% en tolueno mínima (cP)	17,6
Contenido máximo de estireno monómero residual (%)	0,2

Fuente. Tomado del estudio Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente

Luego se adiciona el poliestireno al asfalto y se realizan los ensayos de caracterización del asfalto:

**Tabla 45. Caracterización del asfalto modificado con poliestireno comparado con el asfalto convencional**

<b>Característica</b>	<b>Asfalto Convencional</b>	<b>Asfalto Modificado</b>
Penetración a 25°C (0.1 mm)	81	70
Ductilidad a 25°C (cm)	+ 100	+ 37
Peso específico a 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	1.012	1.2
Viscosidad cinemática a 135°C (cSt)	303,01	296
Punto de ignición (°C)	185	180
Punto de llama (°C)	220	220
Viscosidad Brookfield a 135°C (cP)		326,7

Fuente. Tomado del estudio Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente y modificado por los autores del presente trabajo

A partir de la caracterización de los agregados se realizaron los ensayos para determinar la estabilidad Marshall, la deformación plástica (ahuellamiento), la fatiga trapezoidal y el ensayo de módulo dinámico de cada mezcla.

**Tabla 46. Comparación de los resultados obtenidos en la mezcla asfáltica convencional y modificada**

<b>Ensayo</b>	<b>Rango Norma INVIAS</b>	<b>Mezcla Convencional</b>	<b>Mezcla Modificada</b>
Estabilidad, mínima (lb)	1650	2900	4900
Flujo (mm)	2 – 3.5	3.2	3.3
Vacios en la mezcla	4 – 6%	4.9	12.5
Vacios en agregados	Mín. 15%	15.2	14.8
Peso Unitario (g/cm <sup>3</sup> )		2.240	2.168

Fuente. Tomado del estudio Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente

Otros ensayos realizados a las mezclas asfálticas son:

- ∞ Ensayo a la fatiga
- ∞ Ensayo al ahuellamiento
- ∞ Ensayo de módulo dinámico

De los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

- ∞ La mezcla modificada presenta un ahuellamiento muy inferior comparado con el de la mezcla convencional.
- ∞ En el ensayo a la fatiga obtuvo mejor comportamiento la mezcla convencional porque presentó un valor de deformación menor al obtenido en la mezcla modificada.
- ∞ En el ensayo de módulo dinámico se analizaron las mezclas convencional y modificada con la adición del 1% de poliestireno, los resultados son:

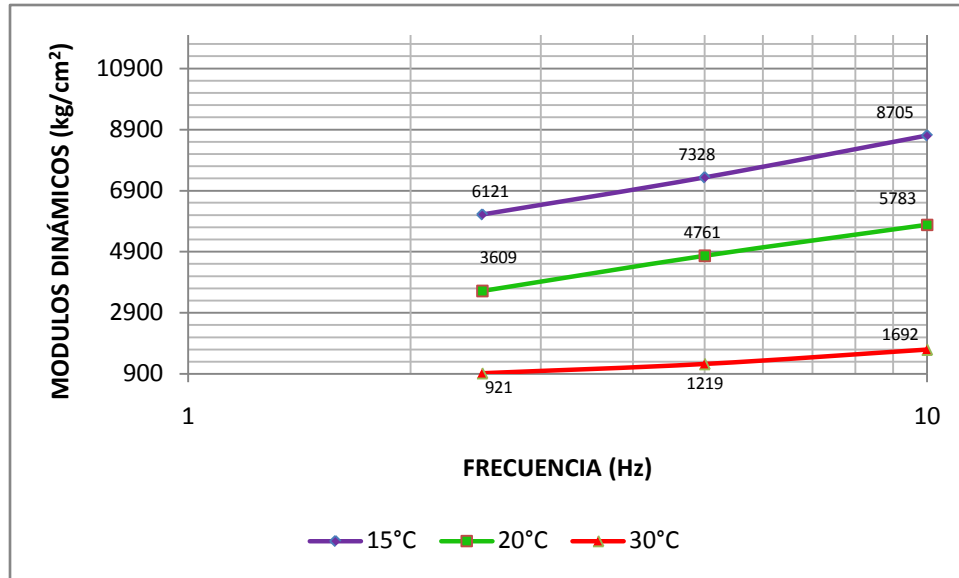
**Tabla 47. Relación de módulos dinámicos de las mezclas asfálticas**

Temperatura de ensayo (°C)	Frecuencia (Hz)	Módulo Dinámico (kg/cm <sup>2</sup> )	
		MDC-2 0%	MDC-2 1%
15	2.5	6121	7417
	5	7328	10250
	10	8705	9625
20	2.5	3609	4982
	5	4761	5644
	10	5783	7384
30	2.5	921	1389
	5	1219	1814
	10	1692	2407

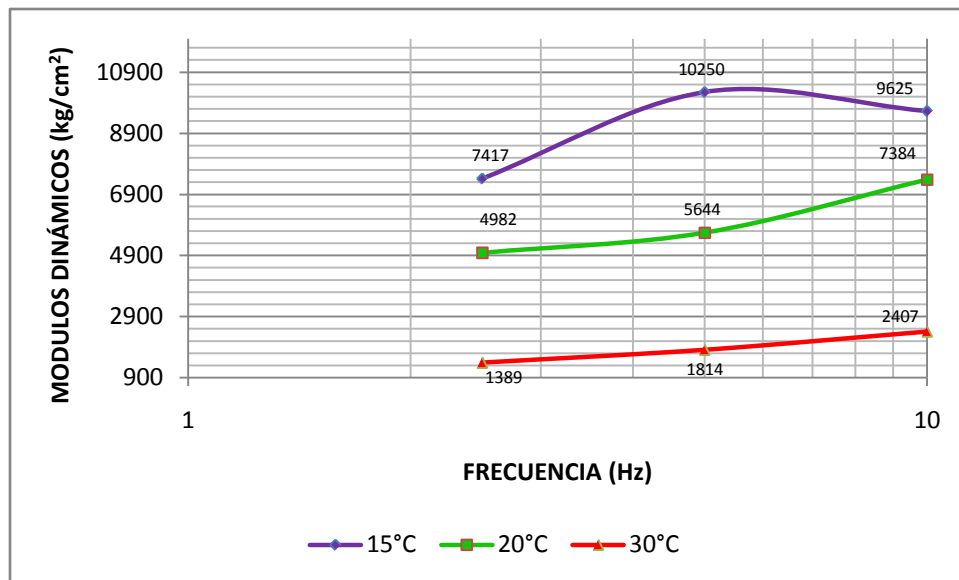
Fuente. Tomado de la experiencia plasmada en el libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas y modificada por los autores del presente trabajo

Figura 22. Variación de los módulos dinámicos de la mezcla convencional y la modificada a temperaturas 10°C, 20°C, 30°C

**MEZCLA CONVENCIONAL**



**MEZCLA MODIFICADA**



Fuente. Tomado de la experiencia plasmada en el libro Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas y elaborada por los autores del presente trabajo

En la mezcla convencional a medida que aumenta la temperatura disminuyen los módulos; en la mezcla modificada también a medida que aumenta la temperatura y la frecuencia aumentan los módulos; a excepción en la temperatura de 15°C porque el módulo aumenta de 2.5 Hz a 5 Hz pero disminuyen al pasa a la frecuencia de 10 Hz.

Al terminar la experiencia se pudo deducir lo siguiente:

- ∞ Al adicionar poliestireno expandido al asfalto se presentó un aumento en la estabilidad de la mezcla asfáltica.
- ∞ Se obtienen menores deformaciones permanentes al modificar el asfalto con poliestireno, debido a que existe un mejoramiento en el ahuellamiento hasta del 70%.
- ∞ En el ensayo a la fatiga se obtuvo un mejor comportamiento para la mezcla convencional, ya que se tiene un valor de deformación mayor para la mezcla modificada para un mismo número de ciclos.

**6.2.5 Comparativo entre las experiencias analizadas.** A continuación se exponen las diferencias, ventajas y desventajas de la utilización de plastómeros para la modificación de mezclas asfálticas por la vía húmeda:

**Tabla 48. Comparativo de las experiencias estudiadas de acuerdo a cada tipo de modificador**

Modificador	Experiencia 1		Experiencia 2	
<p style="text-align: center;"><b>PVC</b></p>	Investigación realizada por: <b>RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander, REYES LIZCANO, Fredy Alberto y OJEDAMARTINEZ, Blanca Esperanza</b>	Se empleó material granular de la cantera de Fuzca	Investigación realizada por: <b>RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander; RODRÍGUEZ RINCÓN, Edgar; MORENO ANSELMI, Luis Ángel</b>	Se empleó material granular de la cantera La Fiscala
		Los asfaltos modificados con PVC presentan mayor resistencia a fluir respecto al asfalto convencional.		Los asfaltos modificados con PVC presentan mayor viscosidad y menor susceptibilidad térmica respecto a la mezcla convencional.
		En esta experiencia el PVC presenta mejor comportamiento al adicionarlo al asfalto en una proporción del 6%.		A diferencia de la experiencia anterior la mezcla presenta mejor comportamiento al adicionar PVC en una proporción de 5.5% de asfalto.
		Los asfaltos modificados con desechos de PVC tienden a tener mejor comportamiento en climas cálidos.		Los valores de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad del asfalto modificado permiten predecir menor ahuellamiento a altas temperaturas de servicio.

Modificador	Experiencia 1	
<p><b>PEAD</b></p>	Investigación realizada por: <b>RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander; RODRÍGUEZ RINCÓN, Edgar; MORENO ANSELMI, Luis Ángel</b>	Se empleó material granular de la cantera de Conalgre
		Los asfaltos modificados con PEAD presentan mejor comportamiento en cuanto a la rigidez y mejor resistencia a la penetración respecto al asfalto convencional.
		En esta experiencia el PEAD presenta mejor comportamiento al adicionarlo al asfalto en una proporción del 6%.
		Como todo plastómero el asfalto modificado con PEAD presenta menor ahuellamiento a altas temperaturas de servicio.

Modificador	Experiencia 1	Experiencia 2	Experiencia 3
PS	Investigación realizada por: RONDON QUINTANA, Hugo Alexander; RODRÍGUEZ RINCÓN, Edgar; MORENO ANSELMI, Luis Ángel	Los asfaltos modificados con PS presentan mejor comportamiento en cuanto a la rigidez, resistencia a la deformación y peso unitario respecto al asfalto convencional.	Investigación realizada por: REYES LIZCANO, Fredy; ORTIZ, Miguel Ángel
	Al igual que todos los plastómeros presenta buen comportamiento en climas cálidos.	El poliestireno le incorpora al asfalto propiedades de rigidez y resistencia sin ser quebradizo.	Investigación realizada por: FIGUEROA INGANTE, Ana Sofía; REYES LIZCANO, Fredy Alberto; HERNANDEZ BARRERA, Diana; JIMENEZ, Christian y BOHORQUEZ,
			Se demuestra mejor comportamiento a la fatiga en la mezcla convencional debido al alto valor de deformación en la mezcla modificada.
			Al adicionar poliestireno al asfalto se observa aumento en la estabilidad de la mezcla asfáltica.

Fuente. Tomado de las experiencias analizadas anteriormente y elaborado por los autores del presente trabajo

### 6.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON LA COMBINACIÓN DE PLASTÓMEROS Y ELASTÓMEROS

Otro tipo de modificaciones realizadas en Colombia a las mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2, es la combinación de un elastómero con un plastómero y así poder analizar el comportamiento mecánico de las mezclas producto de las experiencias.



**6.3.1 Mezcla asfáltica modificada con caucho y tiras de bolsas de leche.**<sup>29</sup>La adición de caucho y plástico a las mezclas asfálticas les brindan un mejor comportamiento mecánico y una mayor duración de vida. Por lo tanto con el desarrollo de esta tecnología se busca poner en práctica reducir, reutilizar y reciclar de la siguiente manera: “Reducir los residuos sólidos y adicionalmente mejorar el desempeño de los pavimentos en Colombia”.

Para ello se debe realizar la caracterización dinámica de la mezcla asfáltica con los óptimos de adición de plástico proveniente de bolsas de leche y de caucho proveniente de llantas usadas, y así poder lograr una reducción del ahuellamiento del 8%, un aumento del modulo dinámico del 14% y por ende un incremento en la durabilidad del 25%.Igualmente se realizarán los ensayos de laboratorio necesarios para la fabricación de la mezcla asfáltica convencional y modificada, así como los ensayos necesarios para la caracterización del cemento asfáltico.

Para la fabricación de la mezcla asfáltica se emplearon los siguientes materiales:

- ∞ Las bolsas empleadas son bolsas de leche larga vida, este plástico es una combinación entre dos clases de polietileno de baja densidad LPDE 503 A LDPE 6411, el plástico fue cortado en tiras de 4 cm x 1 cm.
- ∞ Se emplearon materiales de la Constructora Patria S.A. La cantera de extracción del agregado pétreo se encuentra ubicada en Mondoñedo – Hacienda Vistahermosa.

---

<sup>29</sup> REYES LIZCANO, Fredy Alberto; MADRID AHUMADA, María Fernanda; SALAS CALLEJAS, Sandra Ximena; Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80 – 100). Pontificia Universidad Javeriana. En: Revista Infraestructura vial, No. 17, Febrero 2007. Bogotá D.C. 10 p.

∞ El cemento asfáltico empleado es Asfalto 80 – 100 proveniente de ECOPETROL – Barrancabermeja.

∞ El caucho empleado es producto de la llanta reciclada.

A los agregados pétreos se les realizó el análisis granulométrico y demás ensayos de caracterización, cuyos resultados se resumen a continuación:

**Tabla 49. Resultados de los ensayos de caracterización del agregado**

<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Especificación</b>
Equivalente de arena	%	64.5	INV E-133
Densidad y absorción de agregado grueso	g/cm <sup>3</sup>	2.545	INV E-233
Densidad y absorción de agregado fino	g/cm <sup>3</sup>	2.344	INV E-222
Absorción de agregado grueso	%	4.5	INV E-223
Absorción de agregado fino	%	1.5	INV E-222
Desgaste Máquina de los Ángeles	%	23	INV E-218
Índice de aplanamiento	%	16	INV E-230
Índice de alargamiento	%	39	INV E-230
Porcentaje caras fracturadas	%	100	INV E-227

FUENTE. Tomado del estudio Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80 – 100)

El asfalto utilizado es 80 – 100, asfalto de Ecopetrol refinería de Barrancabermeja y suministrado por la Planta de Asfalto La Patria S.A., al cual se le realizaron los siguientes ensayos de laboratorio:

**Tabla 50. Resultados de los ensayos de caracterización del asfalto**

<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Especificación</b>
Penetración a 25°C	mm/10	84	INV E-706
Ductilidad	cm	----	INV E-706
Peso específico	g/cm <sup>3</sup>	1.015	INV E-706
Viscosidad	SSU	44.56	INV E-706
Punto de ablandamiento	°C	43	INV E-706
Punto de inflamación	°C	356	INV E-706

FUENTE. Tomado del estudio Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80 – 100)

Una vez realizados los ensayos de caracterización de los materiales, se procede a realizar los ensayos de las mezclas asfálticas, tales como:

- ∞ Ensayo Marshall
- ∞ Ahuellamiento
- ∞ Módulo dinámico
- ∞ Ensayo SARA

A continuación se relacionan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las mezclas asfálticas:

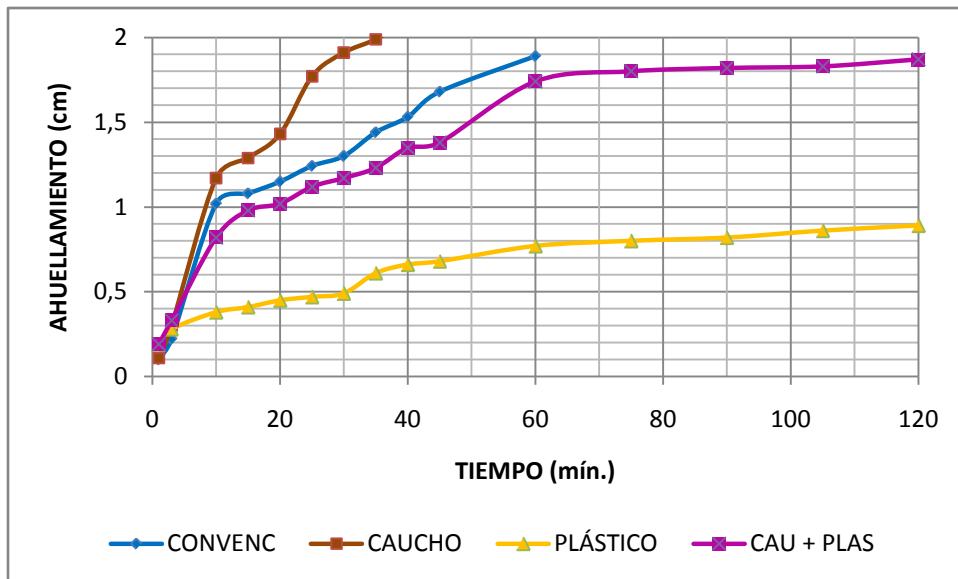
- ∞ Al realizar el ensayo al ahuellamiento, a las cuatro mezclas analizadas: (Convencional, modificada con caucho, modificada con plástico, modificada con caucho + plástico) se observó lo siguiente:

**Tabla 51. Resultados de ahuellamiento en las cuatro mezclas analizadas**

Asfalto		Caucho		Plástico		Caucho + Plástico	
Tiempo (min)	Deformación (cm)	Tiempo (min)	Deformación (cm)	Tiempo (min)	Deformación (cm)	Tiempo (min)	Deformación (cm)
1	0.10	1	0.11	1	0.19	1	0.19
3	0.22	3	0.30	3	0.28	3	0.33
10	1.02	10	1.17	10	0.38	10	0.82
15	1.08	15	1.29	15	0.41	15	0.98
20	1.15	20	1.43	20	0.45	20	1.02
25	1.243	25	1.77	25	0.47	25	1.12
30	1.30	30	1.91	30	0.49	30	1.17
35	1.44	35	1.99	35	0.61	35	1.23
40	1.53	40	2.11	40	0.66	40	1.35
45	1.68	45	2.29	45	0.68	45	1.38
60	1.89	60	2.39	60	0.77	60	1.74
-	---	-	---	75	0.80	75	1.80
-	---	-	---	90	0.82	90	1.82
-	---	-	---	105	0.86	105	1.83
-	---	-	---	120	0.89	120	1.87

FUENTE. Tomado del estudio Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80 – 100)

**Figura 23. Resultados de ahuellamiento en las cuatro mezclas analizadas**



- ∞ De las cuatro mezclas analizadas se puede observar en la figura anterior que la mezcla que tuvo peor comportamiento en la deformación fue la mezcla modificada con caucho por alcanzar una deformación de 2.39 cm a los 60 minutos.
- ∞ La mezcla asfáltica modificada con plástico presenta mejor comportamiento, inferior a un (1) cm de deformación en dos horas.
- ∞ La mezcla conformada por el 75% de caucho y 25% de plástico presenta una curva de menor deformación con respecto a la curva de mezcla convencional, debido a que el plástico logra excelentes resultados en cuanto a la deformación permanente.
- ∞ Según la norma INV E-756 las velocidades de deformación se determinan en los intervalos de tiempo 30/45, 75/90 y 105/120 minutos; por lo tanto al realizar los ensayos, los resultados muestran que para las mezclas modificadas con plástico y con los dos materiales (caucho, plástico), la velocidad de deformación en el intervalo de tiempo 30/45 es mayor y va decreciendo a medida que transcurre el tiempo, alcanzando una velocidad cercana a cero (0), lo que indica que una vez pasadas las dos horas, la deformación permanece casi constante.

Otro de los ensayos realizados es el ensayo de módulo dinámico; del cual se deduce lo siguiente:

- ∞ Se observa que a medida que aumenta la frecuencia aumentan los módulos, comportamiento presentado por las cuatro mezclas ensayadas.

- ∞ La mayor magnitud, en relación con los módulos fue obtenida por la menor temperatura (10°C) y el módulo más alto fue obtenido por la mezcla modificada con plástico a 10°C, con una frecuencia de 10 Hz y un valor de 12553 MPa (Curva amarilla).
- ∞ Los módulos con valores más bajos fueron obtenidos para la temperatura más alta de 30°C, y el caso más crítico fue para las mezclas con plástico con una frecuencia de 2.5 Hz y un valor de 781.5 MPa.

Los datos son analizados por frecuencia y por temperatura, en el análisis de datos por frecuencia se fija la temperatura para obtener gráficas en función de la variación porcentual del módulo y la frecuencia de aplicación de la carga en Hz.

- ∞ Según los resultados obtenidos, se observa que las briquetas con adición del 0.7% de plástico tiene módulos más altos comparados con las mezclas con adición de caucho. El mejor valor del módulo en este caso se tiene para una frecuencia de aplicación de carga de 2.5 Hz, a 20°C, en el caso del caucho los módulos disminuyeron hasta el 46% comparado con los resultados obtenidos para 10°C.
- ∞ Para temperaturas de 10°C y 20°C, los mejores comportamientos se obtuvieron para las briquetas con adición de plástico.
- ∞ El peor resultado de magnitud de los módulos para las mezclas combinadas fue obtenido a la frecuencia más alta (10°C), con un incremento solamente de un 4% frente a un 32% de las mezclas con adición de plástico.
- ∞ A 30°C es mejor el comportamiento de las briquetas combinadas, ya que registran módulos mucho más altos respecto a las mezclas con adición de caucho.

∞ Las briquetas combinadas con los dos materiales a altas temperaturas e independientes de la frecuencia tienen mejores comportamientos que las briquetas a las que se les adiciona un solo modificador.

En el análisis de datos por temperatura se fija la frecuencia para obtener gráficas en función de la variación porcentual del módulo y la temperatura a la que fue ejecutado el ensayo y se obtuvieron los siguientes resultados:

- ∞ El mejor módulo lo presentan las mezclas modificadas con plástico para una frecuencia de 2.5 Hz, presentando un incremento porcentual del 41% para una temperatura de 10°C.
- ∞ Para una frecuencia de 5 Hz, se registró un incremento de un 30% en una mezcla con adición de plástico para una temperatura de 10°C.

Luego se realizó en ensayo SARA para conocer la composición química del asfalto, del cual se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 52. Resultados análisis SARA al asfalto convencional y al asfalto modificado**

Asfalto	Fracción (% peso)				Índice de inestabilidad coloidal IC
	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfáltenos	
Convencional	16.29 ± 1.28	50 ± 2.28	27.08 ± 1.3	6.64 ± 1.1	0.3
Modificado	13.32 ± 1.28	49.79 ± 2.28	27.01 ± 1.3	9.88 ± 1.1	0.3

FUENTE. Tomado del estudio Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80 – 100)

Como se observa en los resultados de los asfaltos 80 – 100 y modificado, los cuales se muestran en las tablas 30 y 31, el índice de inestabilidad coloidal es de

0.30; por lo tanto se determina que el ensayo SARA no es útil para sacar las variaciones químicas del asfalto, pues la modificación que se da por el caucho y el plástico, sólo es posible medirla mediante ensayos mecánicos.

De la experiencia se concluye:

- ∞ El contenido de asfalto determinado por el ensayo Marshall para la mezcla convencional es de 6.3%, conforme a lo establecido en el Artículo 400 – 07 de las normas INVIAS.
- ∞ En la relación estabilidad / flujo del diseño Marshall se estimó el porcentaje de adición del caucho y el plástico empleados para la modificación del asfalto, teniendo como principio que un buen comportamiento de una mezcla asfáltica tiene valores de esta relación entre 300 – 500 para que la mezcla tenga un mejor desempeño a la hora de ser funcional, manteniendo unas características de rigidez ideales, de acuerdo a este análisis. Los porcentajes óptimos de los materiales son: caucho 0.10%, tiras de plástico 0.70% y para la combinación de los dos materiales: caucho 75% y tiras de plástico 25%.
- ∞ En las mezclas modificadas con caucho + plástico se determina que a medida que el porcentaje de caucho y plástico aumenta, los vacíos en la mezcla también, lo que indica que al aumentar las proporciones de los modificadores, se dificulta la unión entre el agregado y el asfalto.
- ∞ El comportamiento de la mezcla modificada con plástico presentó mejora en el ahuellamiento alcanzando una deformación inferior a 1 cm en 120 minutos de haber iniciado el ensayo y las deformaciones disminuyen 59% en 60 minutos, respecto a la mezcla convencional.



- ∞ El peor comportamiento lo presentó la mezcla modificada con caucho debido a que se deforma 2.4 cm en 60 minutos y alcanzó deformaciones del 27% respecto a la mezcla convencional.
- ∞ La mezcla modificada con caucho + plástico presentó mejor comportamiento respecto a la mezcla convencional, presentó un 8% de reducción de ahuellamiento a los 60 minutos de haber iniciado el ensayo.
- ∞ Respecto a las variaciones porcentuales, se observa que la mayor variación porcentual negativa (-46%), obtenida en las mezclas modificadas con caucho para 20°C y 2.5 Hz.
- ∞ Las briquetas con adición de caucho 75% y plástico 25%, obtuvieron incrementos porcentuales del módulo, el más alto (14%) a 2.5 Hz y 10°C.
- ∞ En el análisis de datos por temperatura el mejor comportamiento lo presentan las briquetas modificadas con plástico con un incremento porcentual de 41% para una temperatura de 10°C y una frecuencia de 2.5 Hz; sin embargo es el único incremento bajo estas condiciones, luego para las briquetas con adición de plástico el modulo disminuye y llega al valor más crítico.
- ∞ El ensayo SARA no es recomendable para determinar variaciones químicas de los asfaltos analizados (convencionales y modificados); los asfaltos modificados con caucho + plástico sólo se analizan por métodos mecánicos.

**6.3.2 Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada.**<sup>30</sup>En esta experiencia los investigadores analizan el comportamiento de los modificadores en el asfalto, con el cual al final se llega a fabricar mezcla asfáltica densa en caliente modificada. Para el desarrollo de esta investigación se emplearon los siguientes materiales:

- ∞ Asfalto 80 – 100 de la Refinería de Barrancabermeja
- ∞ Icopor
- ∞ Llanta triturada

Como el proceso de modificación es realizado al asfalto, se realizó por vía húmeda para lograr una mejor integración de la mezcla.

La modificación es realizada a 135°C y 170°C, determinando la temperatura óptima de mezclado a 170°C. Como los investigadores (Figuroa y Reyes) ya habían investigado acerca de la modificación con icopor y se determinó que se adicionaba al asfalto en proporción del 1%; se partió de este principio para determinar el porcentaje de caucho adicional de acuerdo a las siguientes proporciones y seleccionar la ideal:

- ∞ 1% de poliestireno y 12% de GCR
- ∞ 1% de poliestireno y 14% de GCR
- ∞ 1% de poliestireno y 16% de GCR
- ∞ 1% de poliestireno y 18% de GCR

---

<sup>30</sup> FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía; SÁNCHEZ CASTILLO, Arnulfo; REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada. Universidad de La Salle. 2007. En: Épsilon Revista de las facultades de ingeniería. Bogotá.: julio – diciembre 2007, número 009. ISSN: 1692-1259 41 – 55 p.

Con estas proporciones se procedió a realizar los siguientes ensayos de laboratorio a los asfaltos convencional y modificado:

- ∞ Ensayo de ductilidad
- ∞ Ensayo de punto de ignición y llama
- ∞ Ensayo de punto de ablandamiento
- ∞ Ensayo al horno de lámina asfáltica delgada en movimiento
- ∞ Ensayo de viscosidad de Brookfield

Una vez realizados los ensayos de laboratorio se puede deducir lo siguiente:

- ∞ Al analizar la ductilidad en el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada, en la cual los valores arrojados son muy bajos y directamente proporcionales con respecto a la concentración de la llanta, se deduce que el asfalto obtiene alto grado de rigidez y un bajo nivel de susceptibilidad a las deformaciones plásticas.
- ∞ Los valores arrojados para los asfaltos convencional y modificado con el 1% de poliestireno se pueden considerar estos materiales como dúctiles.
- ∞ Los asfaltos modificados con llanta y poliestireno se mostraron como un material con propiedades ligantes inferiores a las del asfalto convencional pero con menor susceptibilidad térmica.
- ∞ El asfalto modificado con poliestireno arroja valores de buen comportamiento a mayor temperatura debido a un mejor mezclado entre el asfalto y el modificador.

- ∞ El asfalto modificado con poliestireno a ambas temperaturas (135°C – 170°C) se considera material dúctil, entonces se puede decir que son materiales con alto grado de adhesividad, brindando excelentes propiedades como ligante.
  
- ∞ En cuanto a la penetración el asfalto convencional arrojó valores superiores a 80 décimas de mm, en cambio los asfaltos modificados se tornaron duros entre mayor concentración de los modificadores.
  
- ∞ El asfalto modificado con 1% de poliestireno presentó una reducción de penetración en comparación con el asfalto convencional y para las modificaciones donde se adicionó GCR se incrementó la concentración, debido a la adición de la llanta; dando un comportamiento de asfaltos duros a medida que se iba incrementando la cantidad de GCR.
  
- ∞ El cemento asfáltico por tener una penetración 80 -100 garantiza baja tendencia al fisuramiento pero alta probabilidad al ahuellamiento; así como alta durabilidad y adherencia.
  
- ∞ El peso específico en los asfaltos modificados con poliestireno y llanta arrojaron valores ligeramente superiores a los arrojados en los asfaltos convencionales; esto debido al aporte dado por la llanta.
  
- ∞ Al analizar el ensayo de punto de ignición y llama en los asfaltos modificados con (poliestireno – llanta) se nota un descenso en la temperatura necesaria para una manipulación segura; lo que indica un menor índice de seguridad.
  
- ∞ En cuanto al punto de ablandamiento se puede deducir que los asfaltos modificados con llanta y poliestireno tienden a generar una rigidización del material.

- ∞ Las viscosidades de Brookfield de los asfaltos modificados con los dos polímeros son mucho mayores que las del ligante convencional, incremento otorgado por el contenido de llanta triturada que hizo parte de la modificación.
- ∞ De acuerdo a las viscosidades la modificación ideal debe tener un contenido igual o superior al 16% de llanta + 1% de poliestireno del peso del asfalto base de la modificación.
- ∞ La reducción de la penetración y la ductilidad, y el incremento del punto de ablandamiento de los asfaltos modificados respecto al convencional muestra que el poliestireno y la llanta triturada actuaron como agentes rigidizadores del asfalto logrando mayor consistencia en el material.

**6.3.3 Comparativo en las experiencias analizadas de acuerdo al comportamiento del GCR con el plastómero adicionado (Plástico bolsas de leche e icopor).** Una vez analizadas las dos experiencias se realiza un cuadro comparativo de ventajas y desventajas al combinar un elastómero y un plastómero en la modificación de asfaltos:

**Tabla 53. Comparativo de las experiencias realizadas: Combinación GCR + Bolsas de leche y GCR + Icopor**

Experiencia 1	Experiencia 2
En las mezclas modificadas con caucho + plástico se determina que a medida que el porcentaje de caucho y plástico aumenta, los vacíos en la mezcla también, lo que indica que al aumentar las proporciones de los modificadores, se dificulta la unión entre el agregado y el asfalto.	Al analizar la ductilidad en la mezcla modificada con caucho + icopor se deduce que el asfalto obtiene alto grado de rigidez y un bajo nivel de susceptibilidad a las deformaciones plásticas.
La mezcla modificada con caucho + plástico	La reducción de la penetración y la ductilidad, y el incremento del punto de ablandamiento de

presentó mejor comportamiento respecto a la mezcla convencional, presentó un 8% de reducción de ahuellamiento a los 60 minutos de haber iniciado el ensayo.	los asfaltos modificados respecto al convencional muestra que el poliestireno y la llanta triturada actuaron como agentes rigidizadores del asfalto logrando mayor consistencia en el material.
La composición química del asfalto modificado con caucho + plástico se analiza únicamente por métodos mecánicos.	La adición de la llanta a la mezcla (asfalto – poliestireno) le otorga un incremento en la viscosidad Brookfield.

FUENTE. Tomado de las experiencias analizadas y elaborada por los autores del presente trabajo

#### **6.4 COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES<sup>31</sup>**

En esta metodología se hará uso de las cenizas volantes que son producidas en las centrales termoeléctricas y han sido empleadas como adición en mezclas de hormigón y en estabilización de bases granulares. Este material será una alternativa de solución para mejorar la capacidad estructural de las mezclas asfálticas y así mitigar el problema ambiental que genera este desperdicio ocasionado por la combustión del carbón; como la reducción de costos para realizar la construcción de obras de infraestructura vial.

---

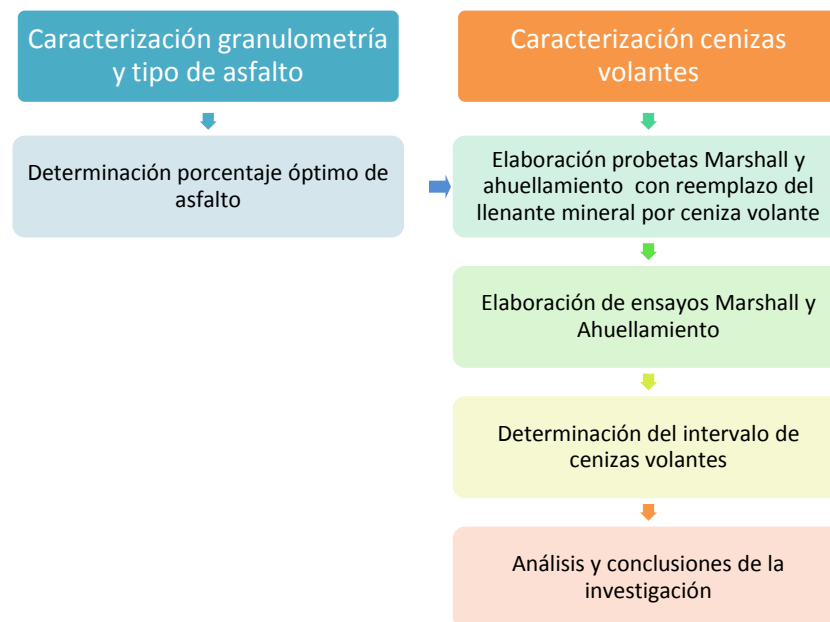
<sup>31</sup> REYES ORTIZ, Oscar Javier, TRONCOSO RIVERA, Juan Ricardo y CAMACHO TAUTA, Javier Fernando. Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes. Pontificia Universidad Javeriana. 2006. En: Ingeniería y Universidad. Revista de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.: enero – junio 2006, vol. 10, número 001. ISSN 0123-2126

Con el desarrollo de la experiencia se busca evaluar la ceniza volante como agente modificador de la resistencia al envejecimiento del asfalto durante la fabricación de la mezcla y la valoración de la aptitud de este material para actuar como agente estabilizante de suelos, como resultado de varios ensayos de resistencia, de caracterización elástica, de comportamiento a la fatiga y de la deformación permanente.

Los ensayos realizados serán en cumplimiento de las Especificaciones INVIAS 2002, vigentes en el momento de realización de la investigación, mediante los cuales se evaluará la rigidez en la mezcla asfáltica, ya que la fisuración prematura de las capas asfálticas depende de la estabilidad y el flujo.

La metodología tenida en cuenta para el desarrollo de la experiencia es la siguiente:

**Figura 24. Diagrama de metodología de la investigación**



FUENTE. Tomado del estudio Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes y modificada por los autores del presente trabajo

Para el desarrollo de la experiencia se emplearon materiales:

- ∞ El material granular fue suministrado por la empresa Murcia Murcia S.A; la grava tiene un tamaño máximo de 2.54 cm y arena con porcentaje de trituración de 70%.
- ∞ El cemento asfáltico empleado es asfalto 60 – 70
- ∞ Las cenizas volantes empleadas son suministradas por la planta generadora de energía eléctrica Termopaipa IV, ubicada al nororiente de Colombia.

A los materiales pétreos se les realizaron los siguientes ensayos de laboratorio para la caracterización:

**Tabla 54. Resultados de la caracterización de los materiales pétreos**

Ensayo	Norma	Resultado
Límite Líquido	INV E-125	N.L
Límite Plástico	INV E-126	N.P
Índice de Plasticidad	INV E-126	N.P
Equivalente de arena	ASTM D 2419	55.8%
Resistencia al desgaste	ASTM C 131	16.0%
Peso específico aparente al agregado fino	ASTM C 128	3.070 gr/cm <sup>3</sup>
Absorción agregado fino	ASTM C 128	3.003%
Peso específico aparente agregado grueso	ASTM C 127	2.641 gr/cm <sup>3</sup>
Absorción agregado grueso	ASTM C 127	0.212%

FUENTE. Tomado del estudio Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes

Igualmente al cemento asfáltico se le realizaron ensayos de caracterización:



**Tabla 55. Resultados de la caracterización del cemento asfáltico**

Ensayo	Norma	Resultado
Punto de llama	ASTM D 3143-98	293°C
Punto de ignición	ASTM D 3143-98	240.5°C
Punto de ablandamiento	ASTM D 36-95	47.5°C
Viscosidad	ASTM D 2170-95	1500
Penetración	ASTM D 5-97	67.5
Peso específico del asfalto sólido	ASTM D 70	0.992 (gr/cm <sup>3</sup> )

FUENTE. Tomado del estudio Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes

La caracterización química de la ceniza volante es:

**Tabla 56. Caracterización química de la ceniza volante**

Porcentaje de óxidos												
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CAO	MGO	NA <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BAO	SRO	MNO
61.3	23.5	4.2	1.2	1.0	0.73	0.53	1.27	0.31	0.68	0.15	0.20	0.02
Inquemados = 7.6%												

FUENTE. Cementos Boyacá

La caracterización física realizada a la ceniza volante arroja como resultado un peso unitario de 2.162 g/cm<sup>3</sup> y una superficie específica de 6381 cm<sup>2</sup>/g para la muestra material de tamiz pasa No. 200.

Para la determinación del porcentaje óptimo del cemento asfáltico, se realizó el diseño Marshall, cuyos resultados se describen a continuación:

**Tabla 57. Diseño del ensayo Marshall**

<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>	
Porcentaje de asfalto	ASTM D 1559	5%	
Densidad	ASTM D 1559	2.358 gr/cm <sup>3</sup>	
Estabilidad	ASTM D 1559	2867 Lbf	1301 Kg
Fluencia (0.01 pulgadas)	ASTM D 1559	11	2.8 mm

FUENTE. Tomado del estudio Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes

Una vez realizados los ensayos Marshall y ahuellamiento para cada reemplazo de llenante mineral por ceniza volante en porcentajes del 0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90% y 100%. Se determinó que el intervalo donde la ceniza volante presenta un comportamiento positivo es entre el 15 - 30%.

- ∞ Al realizar el ensayo Marshall se observó que el mejor comportamiento se presenta al reemplazar el llenante mineral por el 20% - 25% de ceniza. Igualmente existe un descenso relativo de la estabilidad a partir del 45%, presentándose cambios aleatorios poco confiables en el momento del reemplazo del material.
- ∞ Para el análisis correspondiente a la densidad de la mezcla asfáltica se observa que desde el porcentaje de ceniza de 25%, la densidad disminuye gradualmente.
- ∞ Para el análisis correspondiente al flujo de la mezcla asfáltica se concluye que el reemplazo de ceniza volante se mantiene en el rango de las especificaciones INVIAS excepto en porcentajes de adición de ceniza volante mayores al 60%, donde no existe un comportamiento claro de la fluencia en la mezcla asfáltica.

- ∞ El comportamiento de la mezcla asfáltica es positivo en cuanto a sus propiedades mecánicas, especialmente en los porcentajes de reemplazo de llenante mineral por cenizas volantes de 20% y 25%.
- ∞ Al calcular la relación estabilidad – flujo se observa que el reemplazo de llenante mineral por ceniza volante es favorable en el 25%, ya que mejora las propiedades de la relación estabilidad - flujo de la mezcla original y presenta un comportamiento similar respecto al grado de compactación; el flujo obtenido de esta muestra en 75 golpes está fuera del límite superior del flujo comparado con el valor obtenido en el ensayo Marshall óptimo, sin exceder el flujo máximo de 4 mm de las Especificaciones INVIAS.
- ∞ Desde el punto de vista de la velocidad de deformación medida en el intervalo 105 – 120 minutos, se deduce que el porcentaje de ceniza volante que presenta mejor comportamiento es aquel con el reemplazo de llenante mineral en 20% y 25%, por estar por debajo del rango de 20  $\mu\text{m}/\text{min}$ , valor estipulado para una mezcla con temperatura de servicio menor a 24°C.

Con el desarrollo de esta experiencia se determina:

- ∞ Las cenizas volantes aumentan la resistencia de la mezcla asfáltica sin convertirla en una mezcla rígida que puede llegar a presentar fisuración temprana por este aumento de rigidez.
- ∞ El aumento en la resistencia mecánica y dinámica en la mezcla asfáltica, determina que el uso de este material en la intervención en las vías, se convierte en una alternativa económica en el país.

## 6.5 COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE FIBRAS<sup>32</sup>

En esta experiencia se busca analizar en laboratorio el comportamiento de fibras de polipropileno por vía seca sobre las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla.

Los materiales empleados para el desarrollo de la experiencia son:

- ∞ Material granular de una cantera de Bogotá
- ∞ Cemento asfáltico de la Refinería de Barrancabermeja
- ∞ Fibras de polipropileno

A continuación se resumen los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a los materiales pétreos, asfálticos y fibras:

**Tabla 58. Resultados de la caracterización de los materiales pétreos**

Ensayo	Norma	Resultado
Absorción agregado grueso	ASTM C 127	3.34%
Peso específico aparente	ASTM C 127	2.39
Absorción agregado fino	ASTM C 128	1.77%
Peso específico aparente	ASTM C 128	2.50
Desgaste agregados	ASTM C 535	25.6%

FUENTE. Tomado del estudio Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de fibras

<sup>32</sup> REYES ORTIZ, Oscar Javier, TRONCOSO RIVERA, Juan Ricardo y REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de fibras. 2005. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Bogotá.: noviembre 2005, vol. 15, 12 – 29 p.

**Tabla 59. Resultados de la caracterización del cemento asfáltico**

Ensayo	Norma	Resultado
Penetración	ASTM D 5-97	60/70
Ductilidad	ASTM D 113-99	125 cm
Viscosidad	ASTM D 2170-95	1500
Ablandamiento	ASTM D 36-95	45°C
Punto de llama e ignición	ASTM D 3143-98	215°C – 232°C

FUENTE. Tomado del estudio Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de fibras

**Tabla 60. Resultados de la caracterización de las fibras**

Ensayo	Resultado
Índice de fluidez a 230°C	18 g/10 min
Resistencia máxima a la tracción	5250 PSI
Punto de fusión	162°C
Punto de ignición	590°C

FUENTE. Tomado del estudio Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de fibras y elaborada por los autores del presente trabajo

Seguidamente se realizaron los ensayos Marshall, resistencia al ahuellamiento, deformación plástica, módulos dinámicos; de los cuales se deduce:

- ∞ La adición de 0.60 y 0.75% de fibras produce un incremento en la estabilidad en probetas compactadas a 50 y 75 golpes.
- ∞ La adición de fibras en cualquier porcentaje disminuye gradualmente la densidad, disminuyendo la cantidad de material a utilizar con un incremento proporcional de la estabilidad de la mezcla asfáltica.
- ∞ La adición de fibras a la mezcla en cualquier proporción mantiene la deformación, ayudando a mantener la estabilidad de la mezcla asfáltica.

- ∞ Al analizar los resultados de los ensayos de ahuellamiento, los cuales definen la deformación plástica admisible que adquiere la mezcla durante el ciclo de servicio. Los valores de ahuellamiento de la mezcla modificada son inferiores respecto a los valores de la mezcla convencional.

Al finalizar la experiencia se concluye:

- ∞ La mezcla asfáltica modificada con fibras mejora sus propiedades mecánicas y dinámicas.
- ∞ Como la adición de fibra a la mezcla asfáltica por vía seca brinda mejores características, se recomienda analizar el comportamiento pero realizado por la vía húmeda.
- ∞ La velocidad de deformación en las mezclas modificadas cumple con los parámetros para climas inferiores a 24°C.

## 7. RESULTADOS

Una vez analizadas las experiencias realizadas por investigadores del país, se realiza un comparativo de cada una de estas experiencias respecto a las características de las mezclas asfálticas.

En la Tabla 61 se relacionan las ventajas y desventajas de la utilización de uno de los modificadores estudiados:

- ∞ Adición de grano de caucho de llanta GCR
- ∞ Adición de plastómeros
- ∞ Adición combinada de elastómero - plastómero
- ∞ Adición de ceniza volante
- ∞ Adición de fibras

**Tabla 61. Ventajas y desventajas de la utilización de los modificadores estudiados en las mezclas asfálticas**

MODIFICADOR	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p align="center"><b>Grano de caucho de llanta (GCR)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>∞ El GCR da flexibilidad y mejora la susceptibilidad térmica, así como las propiedades mecánicas.</li> <li>∞ El grano de caucho reciclado en el cemento asfáltico actúa como un agente inhibidor del envejecimiento; prolongando la capacidad cohesiva del mismo en el tiempo.</li> <li>∞ La mezcla al ser modificada se vuelve más flexible a bajas temperaturas y a altas logra ser menos plástica.</li> <li>∞ El negro de humo proveniente del GCR previene el desgaste por el roce llanta – pavimento; además refuerza el asfalto y disminuye la oxidación y el envejecimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>∞ El costo de fabricar este tipo de mezclas supera al de las mezclas convencionales.</li> <li>∞ El proceso de modificación por vía seca repercute en mayores costos debido a que se incrementa la cantidad requerida de cemento asfáltico, así como se incrementan los tiempos de compactación en obra.</li> <li>∞ El proceso de modificación por vía húmeda requiere de equipo adicional y cambio de bombas y tuberías, además de un incremento en la energía para calentar la mezcla con tiempos mayores de mezclado.</li> <li>∞ La absorción de aceites del asfalto por el GCR afecta negativamente las propiedades de cohesividad y adhesividad del ligante; convirtiendo la mezcla en una mezcla seca.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>∞ Incremento del módulo dinámico al variar la temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>∞ La mezcla modificada a bajas temperaturas llega a tener un</li> </ul>



<p><b>Plastómeros (PVC, PEAD, PS)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Mejor adherencia entre el cemento asfáltico y el agregado pétreo a 10°C debido a una mejor dispersión entre el PVC y el cemento asfáltico.</li> <li>☞ El incremento de la resistencia a la penetración, punto de ablandamiento y viscosidad del cemento asfáltico permiten menor ahuellamiento a altas temperaturas de servicio; debido a que los plastómeros presenta mayor rigidez que el cemento asfáltico. Por lo tanto se recomienda emplear en climas cálidos.</li> <li>☞ Las mezclas asfálticas modificadas con cualquier plastómero (PVC, PEAD, PS) genera un incremento notorio de la rigidez.</li> <li>☞ Las mezclas asfálticas modificadas con PEAD y PS presentan mejor comportamiento que la convencional especialmente en rigidez, resistencia a la deformación y peso unitario.</li> <li>☞ Las mezclas modificadas con desechos plastoméricos adquieren un comportamiento rígido</li> </ul>	<p>comportamiento frágil; por lo tanto no se recomienda para climas fríos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Los plastómeros al adicionarse al agregado tiende a romper debido a que a bajas temperaturas de servicio las mezclas tienden a presentar microfisuración térmica.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Mejor comportamiento respecto al ahuellamiento, debido a la adición del plástico a la mezcla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Al incrementar la proporción de los modificadores (caucho 75% y plástico 25%), aumentan los vacíos en la mezcla,</li> </ul>

<p><b>Caucho + Plástico de bolsas de leche</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Mejora la respuesta mecánica de la mezcla.</li> <li>☞ La mezcla conformada por el 75% de caucho y 25% de plástico presenta menor deformación frente a una mezcla convencional, debido a que el plástico logra excelentes resultados en cuanto a la deformación permanente.</li> </ul>	<p>parámetro que dificulta la unión agregado – asfalto.</p>
<p><b>Caucho + Icopor</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Al analizar la ductilidad en la mezcla modificada con caucho + icopor se deduce que el asfalto obtiene alto grado de rigidez y un bajo nivel de susceptibilidad a las deformaciones plásticas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ El poliestireno + llanta al ser adicionados a la mezcla asfáltica la convierten en una mezcla muy rígida, lo cual incrementa el riesgo a la fatiga.</li> </ul>
<p><b>Ceniza volante</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Aumenta la resistencia mecánica y dinámica de la mezcla, sin convertirla en una mezcla rígida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Al exceder la proporción de ceniza en la mezcla puede llegar a rigidizarla, generando fisuración.</li> </ul>
<p><b>Fibras</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Mejora las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla.</li> <li>☞ Son recomendables para utilizar en climas inferiores a 24°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ No se recomienda para emplear en climas demasiado cálidos.</li> </ul>

FUENTE. Autores

## 8. CONCLUSIONES

- ∞ La utilización de modificadores buscan la optimización de las propiedades de las mezclas asfálticas con el fin de hacer pavimentos con un significativo aumento de la vida útil.
- ∞ La utilización de los tipos de modificadores presentados nacen de la necesidad de ingresar en cadena productiva aquellas materias prima antes consideradas desechos, dándoles un nuevo uso que a la vez es amigable con el medio ambiente.
- ∞ Varias naciones alrededor del mundo han desarrollado de manera importante este tipo de tecnologías, y las han adoptado en sus especificaciones particulares de pavimentos, a tal punto que en procesos de licitación exigen que las mezclas asfálticas sean modificadas con cierto porcentaje de los modificadores presentados.
- ∞ La mezcla asfáltica modificada, debido a la tecnología que se requiere para la elaboración del asfalto modificado, tiene un costo mayor que la convencional en términos de inversión inicial de un proyecto, pero el costo promedio por año es más económico, porque su vida útil es mucho mayor y es más segura para los usuarios.
- ∞ Durante los últimos 30 años el volumen de tránsito anual se ha triplicado y la agresividad promedio de las cargas de los vehículos pesados, expresada en términos de ejes simples equivalentes de 80 KN, ha pasado de 1.3 a 3.8 durante el mismo periodo de tiempo, lo cual justifica la necesidad de desarrollar tecnologías de modificación de mezclas asfálticas para hacer frente a estas nuevas exigencias y optimizar las inversiones.

- ∞ Para un mismo volumen de tránsito la mezcla asfáltica modificada presenta menores espesores que las mezclas convencionales.
- ∞ Para un mismo espesor de pavimento, la mezcla asfáltica modificada soporta un mayor volumen de tránsito que la mezcla convencional, de tal manera que aumenta la vida útil.
- ∞ La mezcla asfáltica modificada presenta mejores propiedades y desempeño que las mezclas convencionales, lo cual la hace más resistente a factores ambientales que son cada vez más agresivos.
- ∞ La viscosidad de la mezcla asfáltica modificada se aumenta repercutiendo en mayores tiempos de mezclado, mayor temperatura y mayor tiempo de compactación en obra.
- ∞ Una de las principales características de una mezcla modificada es la reducción de la susceptibilidad térmica.
- ∞ Al modificar la mezcla asfáltica se aumentan los módulos dinámicos, se mejora el comportamiento a la fatiga y a la deformación permanente.
- ∞ Al presentarse mayores ciclos de carga la mezcla asfáltica modificada resiste mejor los esfuerzos de fatiga, que una mezcla convencional, porque para una misma deformación a tracción se necesitarían mayores repeticiones.
- ∞ Hay que tener claro el tipo de modificador que se utilizara en la mezcla puesto que como se observó no todos los tipos de modificación mejoran las mismas características y no todos son aptos para climas cálidos y fríos.

## 9. RECOMENDACIONES

1. El desarrollo de las nuevas tecnologías favorece económicamente la infraestructura vial del país debido a que se tienen alternativas para construir pavimentos más durables, con mejores propiedades ante la deformación, ahuellamiento, fisuramiento y otros problemas presentes actualmente.
2. Al implementar estas tecnologías en las vías de Colombia se aporta un grano de arena frente al problema de impacto ambiental, debido a que se pone en práctica el reciclaje y la reutilización de desechos presentes en el ambiente como las llantas usadas, las bolsas plásticas, la ceniza volante, PVC, entre otros materiales.
3. Con el desarrollo de estas tecnologías se han generado nuevas especificaciones técnicas en el país, como es el caso de la especificación técnica de modificación de mezclas asfálticas con adición de grano de caucho por vía húmeda del Instituto de Desarrollo Urbano. Por lo tanto se deja la expectativa de seguir profundizando en estas investigaciones hasta llegar a implementar nuevas especificaciones a nivel nacional.
4. Se deja la expectativa de generar nuevas investigaciones a partir de estas, como es el caso de analizar el comportamiento del PVC en climas fríos, la utilización de otros materiales de desecho, fibras y demás materiales que tengan propiedades admisibles a la hora de modificar los asfaltos y tengan un buen comportamiento con el material granular.

## BIBLIOGRAFIA

ARENAS LOZANO, Hugo León. Tecnología del cemento asfáltico. 5ª. Edición. Popayán, 2006. 304 p.

AVELLÁN CRUZ, Martha Dina. Asfaltos modificados con polímeros. Trabajo de grado Ingeniera Civil. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil, 2007. 91 p.

CAICEDO, Bernardo, GONZALEZ HERRERA, David y OCAMPO, Manuel. Experiencia colombiana sobre el empleo de grano de caucho reciclado proveniente de llantas usadas. Instituto de Desarrollo Urbano IDU – Universidad de Los Andes. 2002. En: III Jornada Internacional del Asfalto. Popayán.:Agosto del 2002.

COMMITTEE EUROPEAN OF NORMALIZATION – CEN. Bituminous mixture test methods for hot mix asphalts – Part25: Cyclic compression tests. 2000

FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía, FONSECA SALTANILLA, Elsa Beatriz y REYES LIZCANO, Freddy Alberto. Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. En: Ing. Univ. Bogotá. Enero – Junio de 2009. 47 p. ISSN 0123-2126

H. L. Robinson. Polymers in Asphalt. United States of America. 2004 15 p.

<http://www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro11c.pdf>

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificaciones Técnicas Generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá D.C. – IDU ET 2005. Bogotá D.C.: El Instituto, 2005.

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificación Técnica para la Aplicación del Grano de Caucho Reciclado (GCR) en Mezclas Asfálticas en Caliente (Vía Húmeda). Bogotá D.C.: El Instituto, 2009.

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO – IDU; UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Contrato IDU – 366 – 01. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Bogotá D.C. 2002. 303 p.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras INVIAS 2007. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007.

N-CMT-4-05-001/00. Materiales para Pavimentos, Calidad de Pavimentos Asfálticos. SCT. 1p

PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. México D.F. Universidad Politécnica de Catalunya. Ingeniería de

Canales, Puertos y Caminos Vecinales. 2004. 45 p. En: Revista de la facultad de ingeniería. EPSILON. Bogotá D.C. 2007, No. 009 ISSN 1962 - 1259

REYES LIZCANO, Freddy Alberto., MADRID AHUMADA, María Fernanda., SALAS CALLEJAS, Sandra Ximena. Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80 – 100). Pontificia Universidad Javeriana. En: Infraestructura vial, Bogotá D.C., Febrero de 2007, No. 17. 34 p.

REYES LIZCANO, Freddy Alberto y FIGUEROA INFANTE, Ana Sofía. Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas. Síntesis de la investigación colombiana. Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2008

REYES ORTIZ, Oscar Javier, TRONCOSO RIVERA, Juan Ricardo y CAMACHO TAUTA, Javier Fernando. Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes. Pontificia Universidad Javeriana. 2006. En: Ingeniería y Universidad. Revista de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.: enero – junio 2006, vol. 10, número 001. ISSN 0123-2126

REYES ORTIZ, Oscar Javier, TRONCOSO RIVERA, Juan Ricardo y REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de fibras. 2005. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Bogotá.: noviembre 2005, vol. 15, 12 – 29 p.



RONDÓN, H.A., HERRERA O., CAICEDO L., DÍAZ D., GUTIÉRREZ A., LANDINO C. Y ÍAZ F., Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con policloruro de vinilo, látex natural y caucho reciclado. En: 4as Jornadas Internacionales del Asfalto, Cartagena, 2004. 20 p.

RONDÓN, H.A. Y RODRÍGUEZ, E. Evaluación del comportamiento de mezclas densas en caliente, tipo MDC-1, elaborada con asfalto modificado con desecho de policloruro de vinilo. En: XV Simposio sobre Ingeniería de Pavimentos. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, 2005.

RONDÓN, H.A., RODRÍGUEZ, E. Y MORENO, L.A., Comportamiento de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desecho de policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (PEAD) y Poliestireno (PS). En: Revista de Ingenierías, Universidad de Medellín No. 11, 91 – 104. Medellín, 2007.

RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander, REYES LIZCANO, Freddy Alberto y OJEDA MARTINEZ, Blanca Esperanza. Comportamiento de una mezcla asfáltica densa en caliente modificada con desecho de policloruro de vinilo (PVC). 2008. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá D.C. 2008, vol. 18-2. 44 p.

RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander, RODRÍGUEZ RINCÓN, Edgar y MORENO ANSELMÍ, Luis Ángel. Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con

desechos de Policloruro de Vinilo (PVC), Polietileno de alta densidad (PEAD) y Poliestireno (PS). En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Medellín, Julio, 2007, vol. 6, No. 11. ISSN 1692-3324

VONK, W. C; BULL, A. L. Phase phenomena and concentration effects in blends of bitumen and cariflex TR. En: IntlRoofingCongress (7°, 1989: Munich)