

**Revisión del estado del arte del uso de materiales reciclados en la construcción de  
carreteras**

**Carolina Padilla García, Nazly Roxana Durán Meneses**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniera Civil**

**Director**

**Sandra Milena Cote Vargas**

**Magíster en Ingeniería Civil**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2020**

### **Dedicatoria**

*A mi madre Ana Meneses por darme la oportunidad de estudiar, por ser mi apoyo en los días difíciles, por ser mi motor para seguir adelante, por confiar en mí y por soportar la distancia.*

*A mis hermanos Enrique, Diana y Kelly por ser mi ejemplo de superación, por ser mi motivación para seguir adelante, por ayudarme en los momentos difíciles, por creer en mí y por enseñarme que con dedicación las metas se pueden lograr.*

*A mis amigos más cercanos por ser mi compañía, por ayudarme en situaciones de tensión y por apoyarme en este proceso.*

*Me siento afortunada de tenerlos en mi vida.*

***Nazly Roxana Durán Meneses***

*La culminación de este proyecto representa el final de una de las etapas más importantes y enriquecedoras de nuestras vidas. Agradecemos a Dios, a nuestras familias, a la Universidad, a nuestra directora de trabajo de grado y a quienes creyeron en nosotras aún en los momentos más difíciles e inesperados. Nos queda el sentimiento de haber dado lo mejor de nosotras para la culminación de nuestra carrera.*

*Carolina Padilla García*

*Nazly Roxana Durán Meneses*

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	18
1. Metodología .....	19
1.1 Seleccionar y organizar las diferentes fuentes de información.....	19
2. Marco teórico .....	24
2.1 Antecedentes .....	24
2.1.1 Aparición de áridos a nivel internacional. ....	25
2.1.2 Aparición del plástico como árido para carreteras.....	26
2.1.3 Aparición del GCR como árido para carreteras. ....	26
2.2 Asfaltos .....	27
2.2.1 Propiedades físicas.....	27
2.2.2 Composición Química. ....	28
2.2.3. Clasificación de los asfaltos.....	29
2.3 Pavimento .....	30
2.4 Grano de Caucho Reciclado (GCR).....	31
2.4.1. Composición de llantas. ....	31
2.4.2. Procesos de obtención del grano de caucho reciclado. ....	32
2.4.2.1. Proceso Ambiental.....	33
2.4.2.2. Proceso criogénico. ....	34

2.4.2.3. Otros procesos.....	36
2.5 Asfaltos modificados .....	36
2.5.1. Forma de utilización de polímeros como modificador. ....	37
3. Desarrollo de la investigación.....	39
3.1 Influencia de los aditivos en el asfalto .....	40
3.1.1 Influencia del GCR en el asfalto.....	40
3.1.2 Influencia del plástico en el asfalto.....	42
3.2 Métodos de adición de modificadores a la mezcla asfáltica .....	45
3.2.1 Vía húmeda. ....	45
3.2.2.1 Tecnología continua.....	47
3.2.2.2 Tecnología terminal: .....	47
3.2.2.3 Mezclado en campo. ....	47
3.2.3 Vía seca.....	48
3.2.3.1 Tecnología PlusRide. ....	49
3.2.3.2 Tecnología Genérica. ....	49
3.2.3.3 Tecnología convencional .....	49
3.3 Implementación del asfalto modificado con materiales reciclados .....	51
3.3.1 A nivel nacional. ....	51
3.3.2 A nivel internacional.....	57
3.3.2.1 Plástico en la construcción de carreteras. ....	57
3.3.2.2 Caucho en la construcción de carreteras. ....	63
3.4 Comparación.....	65
4. Conclusiones.....	67

Referencias Bibliográficas ..... 69

Apéndices..... 73

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Publicaciones por año .....	23
<i>Figura 2.</i> Publicaciones por país .....	24
<i>Figura 3.</i> Capas constitutivas de un pavimento.....	30
<i>Figura 4.</i> Proceso ambiental. / .....	34
<i>Figura 5.</i> Proceso criogénico.....	35
<i>Figura 6.</i> Susceptibilidad térmica de un betún ideal y uno convencional. ....	38
<i>Figura 7.</i> Estado de la red vial segundo semestre de 2019.....	40
<i>Figura 8.</i> Proceso de modificación por vía húmeda. ....	46
<i>Figura 9.</i> Proceso de modificación por vía seca.....	48
<i>Figura 10.</i> Cambios en las propiedades de penetración y punto de ablandamiento.....	52
<i>Figura 11.</i> Resistencia a flexión para cada porcentaje de fibra a 14 días de edad. ....	54
<i>Figura 12.</i> Resultados de ahuellamiento en las cuatro mezclas analizadas.....	55
<i>Figura 13.</i> Estabilidad Marshall. ....	57
<i>Figura 14.</i> Flujo Marshall.....	58
<i>Figura 15.</i> Variación de la viscosidad Brookfield a 163°C respecto al tiempo de mezclado, para los diseños A-13-165 Y B15-155 .....	73
<i>Figura 16.</i> Factor de fatiga para los asfaltos colombianos modificados con GCR vs otros modificadores con polímeros.....	74

*Figura 17.* Prueba a escala real carrusel de fatiga Universidad de los Andes. .... 75

*Figura 18.* Densidad de fisuración durante (4) años de servicio para mezcla convencional 80-100, asfalto modificado con GCR vía húmeda y con polímeros. .... 76

*Figura 19.* Evolución del módulo complejo  $G^*$  para el asfalto crudo y modificado a) 3%: b) 6%; c) 9% y d)15% p/p. .... 78

*Figura 20.* Curva reológica del asfalto CIB original. .... 79

*Figura 21.* Curva reológica del asfalto CIB modificado con granulometría controlada. .... 80

*Figura 22.* Palillos reciclados de PEBD. .... 82

*Figura 23.* Termograma del CA 60-70 convencional (sin aditivo) y del modificado (PEB/CA=5%). .... 85

*Figura 24.* Resistencia a compresión para cada porcentaje de fibra a los 14 días de edad. .... 86

*Figura 25.* Resistencia a flexión para cada porcentaje de fibra a los 14 días de edad. .... 87

*Figura 26.* Módulo de elasticidad para cada porcentaje de fibra a los 14 días de edad. .... 87

*Figura 27.* Estabilidad vs. Porcentaje de trozos de desperdicios plásticos. .... 92

*Figura 28.* Flujo vs. trozos de desperdicios plásticos. .... 92

*Figura 29.* Peso unitario de mezcla vs. Trozos de desperdicios plásticos. .... 93

*Figura 30.* Módulo de rigidez vs. Trozos de desperdicios plásticos. . .... 93

*Figura 31.* Densidades Bulk de Mezclas experimentales y Mezcla de control. .... 95

*Figura 32.* Cociente de Marshall. .... 97

*Figura 33.* Fuerza de tensión. .... 98

*Figura 34.* Energía de fractura. .... 98

*Figura 35.* Comparación % Óptimo de PET. .... 100

*Figura 36.* Comparación de estabildades. .... 100

<i>Figura 37.</i> Comparación de flujos.....	101
<i>Figura 38.</i> Áreas optimas dé % de vacíos y Estabilidad. ....	102
<i>Figura 39.</i> Área optima de flujo y % de vacíos en el agregado mineral. ....	102
<i>Figura 40.</i> Área optima dé % de vacíos llenos de asfalto. ....	103
<i>Figura 41.</i> Efecto del tamaño de CRM sobre la viscosidad máxima de CRMA.....	104
<i>Figura 42.</i> Efecto del contenido de CRM sobre la viscosidad. ....	104
<i>Figura 43.</i> Variación de la densidad respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170° C por dos horas. ....	105
<i>Figura 44.</i> Variación de la estabilidad respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170° C por dos horas. ....	106
<i>Figura 45.</i> Variación de la fluidez respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170° C por dos horas. ....	107
<i>Figura 46.</i> Variación de los huecos en la mezcla respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170°C por dos horas.....	108
<i>Figura 47.</i> Variación de vacíos en el agregado mineral respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170° C por dos horas. ....	109
<i>Figura 48.</i> Variación del Módulo Resiliente con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 25° C. ....	109
<i>Figura 49.</i> Curva de Fatiga para mezclas con distinto porcentaje de adición de caucho. F.....	110

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Artículos consultados para la revisión del estado del arte</i> .....	20
Tabla 2. <i>Tabla de propiedades de asfalto base y con caucho reciclado</i> .....	61
Tabla 3. <i>Comparación entre asfalto modificado con caucho y asfalto modificado con plástico.</i>	66
Tabla 4. <i>Desempeño del carrusel de fatiga después 210.000 repeticiones de 8.2 toneladas.</i> .....	75
Tabla 5 <i>Resultados del análisis SARA realizado al asfalto CIB convencional y modificado.</i> .....	80
Tabla 6. <i>Características generales del CA 60-70.</i> .....	83
Tabla 7. <i>Características generales del CA 60-70 modificado con PEBD.</i> .....	83
Tabla 8. <i>Características reológicas del CA 60-70.</i> .....	84
Tabla 9. <i>Características reológicas del CA 60-70 modificado.</i> .....	84
Tabla 10. <i>Resistencia con respecto al concreto sin fibras a los 14 días de edad.</i> .....	88
Tabla 11. <i>Resultados de las pruebas en el asfalto con SBS.</i> .....	89
Tabla 12. <i>Resultados de las pruebas en el asfalto con Elvaloy.</i> .....	89
Tabla 13. <i>Resultados de las pruebas en el asfalto con caucho.</i> .....	90
Tabla 14. <i>Resultados y Exigencias.</i> .....	90
Tabla 15. <i>Resumen de parámetros Marshall en función del porcentaje de desperdicio plástico.</i>	91
Tabla 16. <i>Temperaturas de producción y compactación de las mezclas empleadas en el experimento.</i> .....	96

Tabla 17. *Reducción de las temperaturas de fabricación y compactación empleando los ácidos grasos de origen natural en las mezclas asfálticas experimentales. ....* 96

Tabla 18. *Grados de correlación de cada factor con viscosidad. Tomado de (Sun & Li, 2010).* 97

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Resumen de los resultados de (Martinez Arguelles et al., 2018).....	73
Apéndice B. Resultados del ensayo realizado por (Múnera & Ossa, 2014).....	77
Apéndice C. Resultados del ensayo realizado por (Cárdenas Poblador & Fonseca Santanilla, 2009). .....	79
Apéndice D. Resultados del ensayo realizado por (Castro López et al., 2016).....	82
Apéndice E. Resultados del ensayo realizado por (Boada Marcano & Reyes Lizcano, 2013) ....	86
Apéndice F. Resultados del ensayo realizado por (Vila Romaní & Jaramillo Briceño, 2018).....	89
Apéndice G. Resultados del ensayo realizado por (Forigua & Pedraza, 2014).....	91
Apéndice H. Resultados del ensayo realizado por (Lemus Ballesteros et al., 2018).....	94
Apéndice I. Resultados del ensayo realizado por (Angelone et al., 2016) .....	97
Apéndice J. Resultado del ensayo realizado por (Huertas Cadena & Cazar Ruiz, 2013).....	99
Apéndice K. Resultados del ensayo realizado por (Sun & Li, 2010) .....	104
Apéndice L. Resultados del ensayo realizado por (Ramírez Palma, 2006).....	105

## Resumen

**Título:** Revisión del estado del arte del uso de materiales reciclados en la construcción de carreteras\*

**Autoras:** Carolina Padilla García  
Nazly Roxana Durán Meneses\*\*

**Palabras clave:** GCR, Plástico, Mezcla asfáltica modificada, Polímeros, Grano de caucho.

### Descripción:

El uso de nuevas tecnologías para mejorar las propiedades de los pavimentos ha sido un tema estudiado durante muchos años, los agentes modificadores como los materiales reciclados son una buena alternativa para resolver problemas relacionados con el rendimiento de los asfaltos y los problemas ambientales generados por el mal manejo de las basuras. Al agregar GCR (Granulo de Caucho Reciclado) y plásticos a la mezcla de asfalto, se producen una gran cantidad de beneficios, estos dos materiales son productos que se desechan, se reciclan y se convierten en aditivos para la mezcla. La investigación llevada a cabo muestra que la modificación del asfalto con estos aditivos con respecto a la mezcla convencional tiene algunas de las siguientes ventajas: aumenta su durabilidad, es más resistente al envejecimiento, disminuye el ruido, los costos de mantenimiento son menores, tiene mejor comportamiento a la fatiga, entre muchos beneficios más. Este proyecto presenta una revisión bibliográfica del uso de GCR y plástico en mezclas de asfalto, resume las ventajas y desventajas que pueden causar, las formas de implementarlos y las diferentes pruebas realizadas a nivel nacional e internacional. La información recopilada permitió hacer una comparación en ciertos aspectos de la influencia que estos dos componentes tienen en los pavimentos.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Sandra Milena Cote Vargas, Magíster Ingeniería Civil

## Abstract

**Title:** Review of the state of the art of the use of recycled materials in road construction\*

**Authors:** Carolina Padilla García  
Nazly Roxana Durán Meneses\*\*

**Description:**

**Keywords:** GCR, Plastic, modified asphalt mixture, Polymers, Rubber grain.

The use of new technologies to improve the properties of pavements has been a subject studied for many years, modifying agents such as recycled materials are a good alternative to solve problems related to asphalt performance and environmental problems caused by bad waste management. By adding GCR (Recycled Rubber Granule) and plastics to the asphalt mix, a lot of benefits are produced, these two materials are products that are discarded, recycled and become additives to the mix. The research carried out shows that the modification of the asphalt with these additives with respect to the conventional mix has some of the following advantages: it increases its durability, it is more resistant to aging, it decreases noise, maintenance costs are lower, it has better fatigue behavior, among many other benefits. This project presents a bibliographic review of the use of GCR and plastic in asphalt mixtures, summarizes the advantages and disadvantages that they can cause, the ways of implementing them and the different tests carried out at national and international level. The information collected allowed a comparison to be made in certain aspects of the influence that these two components have on the pavements.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Sandra Milena Cote Vargas, Master Civil Engineering

## Introducción

El presente trabajo de investigación hace referencia al uso de nuevas tecnologías en la construcción de carreteras, en este caso, el enfoque va dirigido hacia la adición de materiales reciclados (caucho y plástico) a la mezcla asfáltica. Con el paso de los años se ha hecho evidente que las carreteras construidas de manera convencional tienen poca vida útil, lo que hace que constantemente se tengan que realizar intervenciones en ellas ya sea para rehabilitarlas o para reconstruirlas, por lo cual, es necesario investigar alternativas para la construcción de carreteras que ayuden a mejorar el rendimiento que estas llegan a tener y a disminuir los niveles de contaminación.

La generación de desechos plásticos y cauchos es un problema de orden mundial debido a que estos están compuestos de materiales que se demoran muchos años en degradarse, por lo cual, es común encontrarse con muchos de estos productos arrojados en las calles, lugares deshabitados y fuentes hídricas. La fabricación de grandes cantidades de estos productos y los problemas que se ocasionan en su recolección y disposición ocasiona graves problemas medioambientales.

El reciclaje de productos es un proceso que permite la recuperación y reutilización de los materiales que no son amigables con el medio ambiente, a partir de este proceso, el plástico y el caucho han llegado a transformarse en tubos, baldosas, muebles, ladrillos, como parte de aislamiento acústico y como aditivo en pavimentos. En Colombia se generan 1 millón de toneladas de residuos plásticos al año y 61 mil toneladas de residuos de neumáticos de los cuales solo se recicla el 7% de estos, lo que nos hace ver que hay grandes cantidades de estos materiales que nos pueden servir como materia prima en la elaboración de diversos productos, pero principalmente

en la elaboración de mezclas asfálticas para la construcción o rehabilitación de una vía. Por lo anterior, a través de una revisión del estado del arte queremos dar a conocer cuáles son las cualidades, dificultades, métodos de adición y ejemplos de aplicación que encontramos acerca del uso de materiales reciclados en la construcción de carreteras.

## **1. Metodología**

A continuación, se describe el proceso de investigación y clasificación de la información empleada en el desarrollo del siguiente trabajo.

### **1.1 Seleccionar y organizar las diferentes fuentes de información**

Este proyecto se desarrolló recopilando y clasificando la información encontrada de las diferentes fuentes disponibles incluyendo libros, revistas y artículos provenientes de la base de datos de la Universidad Industrial de Santander, así como de sitios web oficiales de centros de investigación que estén a la vanguardia con el tema de los materiales reciclados usados en la construcción de carreteras.

Mediante el uso de la aplicación online y de escritorio llamada Mendeley, se facilitó el almacenamiento y la organización de los documentos de la presente investigación, y así mismo fue una excelente herramienta en la gestión de referencias bibliográficas. En la Tabla 1 se presentan los artículos consultados en la siguiente investigación organizados según el año de publicación, en

la Figura 1 se presenta el número de publicaciones por año y en la Figura 2 el número de publicaciones por país.

Tabla 1.

*Artículos consultados para la revisión del estado del arte*

Autor (Año, País)	Descripción	Material	
		GCR	Plástico
Reyes Ortiz (2000, Colombia)	“Empleo de basura para mejorar las propiedades mecánicas de una estructura de pavimento”.	x	X
Chevez Alderete (2005, México)	“Estudio de factibilidad tecnico-economica entre un pavimento de asfalto convencional y uno modificado con agregado de caucho”.	x	
Angulo Rodríguez & Duarte Ayala (2005, Colombia)	“Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos”.	x	
Ramírez Palma (2006, Chile)	“Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco”.	x	
Mataute Heredia & Casas Orozco (2009, Colombia)	“Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos”.		X
Cárdenas Poblador & Fonseca Santanilla (2009, Colombia)	“Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura”.	x	
Figueroa Infante, Fonseca Santanilla & Reyes Lizcano (2009, Colombia)	“Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado”.	x	

Autor (Año, País)	Descripción	Material	
		GCR	Plástico
Valero Martínez, Zamora Álvarez, Natividad Vivó & Cerdá Casanoves (2010, España)	“Estudio prenормativo y elaboración de una guía para prescriptores de pavimentos de caucho. Primeros resultados”.	x	
Sun & Li (2010, China)	“Factors affecting the viscosity of crumb rubber-modified asphalt”.	x	
Pyeong JunYoo, Byung Sik Ohm, Ji Young Choi. (2012, Corea)	“Toughening Characteristics of Plastic Fiber-reinforced Hot-Mix Asphalt Mixtures”.		X
Reyes Lizcano, Madrid Ahumada & Salas Callejas (2012, Colombia)	“Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100)”.	x	X
Gawande, Zamare, Renge, Tayde & Bharsakale (2012, India)	“An overview on waste plastic utilization in asphaltting of roads”.		X
Romero Flores, Bonifaz García, Huertas Cadena, Cazar Ruiz. (2013, Ecuador)	Diseño de un pavimento flexible adicionando tereftalato de polietileno como material constitutivo junto con ligante AC-20.		X
Boada Marcano & Reyes Lizcano (2013, Venezuela)	Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas.	x	X
Múnera & Ossa (2014, Colombia)	“Estudio de mezclas binarias Asfalto – Polímero”.	x	
Forigua Orjuela & Díaz (2014, Colombia)	“Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos”.		X

Autor (Año, País)	Descripción	Material	
		GCR	Plástico
Angelone, Cauhapé Casaux, Borghi & Martinez (2016, Argentina)	“Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures”.		X
Zhang & Hu (2016, Hungría)	“The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt Feng”.		X
Sulyman, Haponiuk, & Formela (2016, Polonia)	“Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials: A Review”.		X
Castro López, Rondón Quintana & Barrero Calixto (2016, Colombia)	“Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD”.		X
Jaime Hidalgo. (2017, Colombia)	“Métodos de reutilización de llantas usadas: selección y elaboración de nuevos productos”.	x	
Perilla Cindy. (2017, Colombia)	“Estudio de alternativa al proceso de reciclaje del plástico PET en la Universidad Católica de Colombia”.		X
Sojobi, Nwobodo & Aladegboye (2016, Nigeria)	“Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete”.	x	X
Díaz Claros & Castro Celis (2017, Colombia)	“Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá”.	x	
Peláez Arroyave, Velásquez Restrepo & Giraldo Vásquez (2017, Colombia)	“Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura”.	x	

Autor (Año, País)	Descripción	Material	
		GCR	Plástico
Lemus Ballesteros, Mosquera Benavides, Virviescas Barbosa. (2018, Colombia)	“Estudio de mezclas asfálticas densas con adición de materiales alternativos”.	x	X
Ullauri, Friend & Barzola (2018, Ecuador)	“Análisis físico-mecánico de morteros asfálticos compuestos a partir de materiales reciclados”.	x	X
Vila Romaní & Jaramillo Briceño (2018, Colombia)	“Incidencia del empleo de polímeros como modificadores del asfalto”.	x	
Martínez Arguelles et al. (2018, Colombia)	“Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos”.	x	
Correa Lesmes (2018, Colombia)	“Implementación de mezcla asfáltica modificada con granulo de caucho en el barrio San Carlos de la localidad de Tunjuelito”.	x	



Figura 1. Publicaciones por año

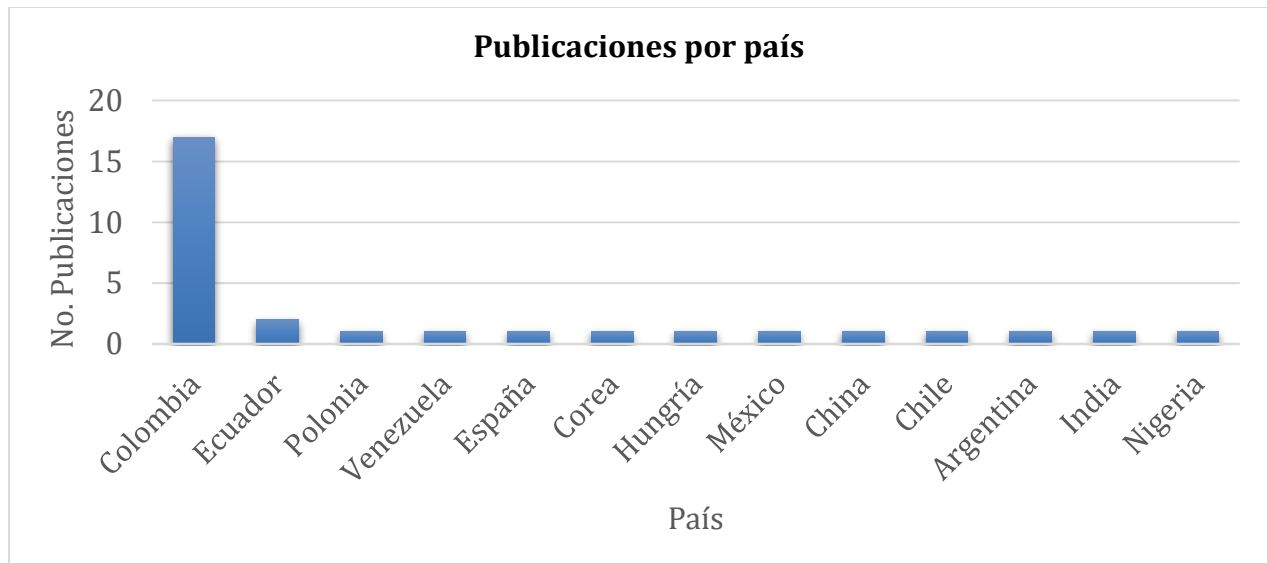


Figura 2. Publicaciones por país

## 2. Marco teórico

### 2.1 Antecedentes

Junto con la aparición de las primeras civilizaciones, los residuos (basura) de la actividad humana, se han incrementado, “a lo largo de la historia se han presentado enfermedades, contaminación y empeoramiento de las condiciones de vida de algunas comunidades, no solo humanas sino también de otras especies”. (Reyes & Cornejo, 2014)

En los últimos años se han venido adelantando investigaciones con respecto a la disposición de los desperdicios, muchas de estas investigaciones van encaminadas al uso de estos en la construcción, pues de esta forma se obtendrían beneficios para el medio ambiente y para todo el sector de la construcción, beneficiando principalmente las comunidades.

**2.1.1 Aparición de áridos a nivel internacional.** El “empleo de áridos reciclados en la construcción de carreteras se ha venido enfocando más en las líneas de mezclas bituminosas y en las de hormigón elaborado con material reciclado "en Alemania donde actualmente se producen 60 millones de toneladas año de áridos reciclados, de las cuales, más de 40 millones, se destinan al mantenimiento y construcción de bases y subbases de carreteras y vías urbanas. A partir del año 1993, la Directriz RG Min-STB 93 facilitó el crecimiento del sector del reciclaje en Alemania y permitieron demostrar que los áridos reciclados son muy competitivos en los mercados de los materiales granulares destinados a la construcción de bases y subbases de carreteras”. (Torres et al., 2014)

España ha sido pionera en cuanto a reciclado in situ, una de sus plantas está montada en Barajas, esta empezó su funcionamiento febrero del año 2000, “la planta ha permitido aprovechar los materiales pétreos procedentes de la demolición de hormigones y asfaltos de losas del aeropuerto. Esta experiencia no es aplicable a las obras en las cuales el material reciclado debe provenir de una planta de tratamiento de residuos de construcción y demolición, en la cual los residuos pueden tener distintas procedencias, debiéndose aplicar estrictos controles en la calidad del material reciclado resultante”. (Torres et al., 2014)

El uso final que se le da a las llantas es perjudicial para el medio ambiente, aunque existen diversos usos cotidianos para estos residuos como: la construcción de muros de contención, materas para jardines, sillas, adornos para parques etc. gran parte de la sociedad incinera estos residuos perjudicando el ambiente, acabando con la calidad del aire que respiramos, esto se convierte en un problema de salud, por esto a pesar de los diversos usos que actualmente tienen, surge la idea de mezclarlos con asfalto y ver qué beneficios puede aportar esta nueva mezcla.

**2.1.2 Aparición del plástico como árido para carreteras.** En el año 2016 en India, se inventó un método de reciclaje sostenible para fabricar asfaltos a partir de botellas y residuos de plástico, obteniendo resultados sorprendentes y llegando a la conclusión que el uso de plástico mejora notablemente la vida útil de las carreteras, el nuevo asfalto modificado resulta alrededor del 8% más económico en la construcción y es amigable con el medio ambiente.

En Europa la empresa MacRebur utiliza una metodología similar para la fabricación de asfaltos con plástico reciclado, Inglaterra utiliza esta mezcla para tapar baches y asfaltar una que otra carretera, por otro lado, la empresa VolkerWessels de Holanda lo utiliza en construcción de ciclo rutas, ellos fabrican paneles que se pueden armar en forma de legos los cuales hacen que estos tramos puedan ser intervenidos en cualquier momento sin necesidad de destruir la infraestructura vial, Vancouver usa un método parecido, el cual resulta bueno ante temperaturas bajas.

**2.1.3 Aparición del GCR como árido para carreteras.** El proceso de reciclado de neumáticos que se desarrolla en España tiene como finalidad la obtención de grano de caucho reciclado sacado de neumáticos usados; teniendo como fundamento importante la protección del medio ambiente. Cuando se reciclan neumáticos, lo que básicamente se hace es separar sus componentes, para obtener así el grano de caucho vulcanizado este grano tiene diferentes tamaños, diferentes aceros y fibras textiles, este grano sirve para aplicarlo como polvo de goma para pavimentos de carreteras, también suelos de antideslizantes, parques recreacionales, pistas entre otros usos.

## 2.2 Asfaltos

El asfalto es un material de especial interés en la construcción de carreteras puesto que, es un “aglomerante resistente, adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es importante mencionar que es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Es altamente resistente a la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. A pesar de ser una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por la exposición al calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación”. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

**2.2.1 Propiedades físicas.** El asfalto “es un producto bituminoso semisólido a temperatura ambiente, preparado a partir de hidrocarburos naturales mediante un proceso de destilación, el cual contiene una proporción muy baja de productos volátiles, posee propiedades aglomerantes y es esencialmente soluble en tricloroetileno, este es un material visco-elasto-plástico, lo que quiere decir que su comportamiento tiene que ver directamente con la temperatura y la frecuencia con la que se le apliquen las cargas, con deformaciones recuperables (elásticas) y no recuperables (plásticas)”. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

“Es una sustancia plástica que da gran flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina. Su color es plomo (gris oscuro), de consistencia sólida, semisólida o líquida, esto dependiendo de la temperatura a la que es expuesto”. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

**2.2.2 Composición Química.** “La composición química de un asfalto es muy compleja, al igual que el petróleo crudo, es una mezcla de numerosos hidrocarburos, parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos”. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

“Los hidrocarburos que hacen parte del asfalto forman una solución líquida en la que un grupo de moléculas de hidrocarburos pesados (asfáltenos) se encuentran dispersas en un medio aceitoso más ligero (máltenos) compuesto por hidrocarburos saturados, resinas y aromáticos, sin que exista una separación entre estas dos fases sino una transición”. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

El asfalto “es disuelto en n-heptano, los materiales duros son precipitados, estos materiales son llamados asfáltenos. Existen otras fracciones asfálticas precipitadas por otros solventes, pero esta es la mejor manera de distinguir a estos materiales como insolubles en n- pentano” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

- **Asfáltenos:** "Son sustancias que están constituidos por compuestos aromáticos, de color negro o marrón que contienen elementos químicos como el nitrógeno, azufre, carbono, oxígeno. Son compuestos polares, solubles en benceno” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).
- **Máltenos:** "Son sustancias constituidas principalmente por resinas, saturadas y aromáticas. Muy polares y al igual que los asfáltenos, son compuestos de carbón, hidrogeno y con cantidades menores de hidrogeno, oxígeno y azufre”. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).
- **Aromáticos:** "Estos constituyen entre el 40 y el 65% de la composición total de los asfaltos, son compuestos en los que sobresalen las moléculas insaturadas, de color amarillo o rojo a temperatura ambiente”. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

- **Saturados:** "Son líquidos incoloros compuestos de cadenas lineales, ramificadas con trazas de ciclo parafinas. Los hidrocarburos saturados actúan como antioxidantes e impermeabilizantes, tienen menor poder de adherencia y causan deformidades al asfalto en el pavimento" (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

**2.2.3. Clasificación de los asfaltos.** Los asfaltos se clasifican según su uso o aplicación así:

- Pavimentación: "Mezclas cerradas (Stone Mastic Asphalt), mezclas abiertas (Gap Graded), drenantes y base asfáltica".
- Riegos: Matapolvos, imprimaciones, riegos de liga.
- "Tratamientos y lechadas: sellos de arena, tratamientos superficiales".

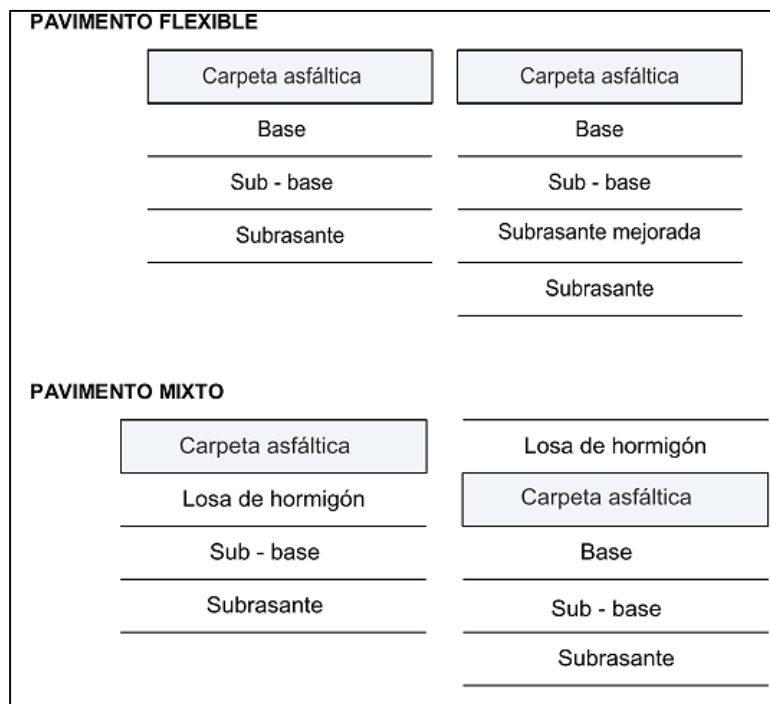
Clasificación de los asfaltos en pavimentación:

- **Asfaltos líquidos:** "Compuestos de una base asfáltica (cemento asfáltico) y un fluidificante volátil, en el cual es agregado el solvente para disminuir la viscosidad del asfalto y de esta manera poderlo mezclar con los agregados" (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).
- **Cemento asfáltico:** "Es el más común y utilizado. Es un material visco elástico rígido a bajas temperaturas (bajo cero) y fluido a altas temperaturas, es obtenido mediante la refinación del petróleo, en las etapas de destilación" (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).
- **Emulsiones asfálticas:** "Es un sistema heterogéneo de dos fases inmiscibles, como el asfalto y el agua, a la que se le incorpora un activador de superficie" (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).
- **Naturaleza reológica del asfalto:** "La reología es una ciencia que estudia las deformaciones y el flujo de la materia. Es importante conocer los estudios reológicos del asfalto ya que estos correlacionan la estructura física de sus componentes con su

composición química para lograr un flujo característico” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

### 2.3 Pavimento

“El pavimento es una estructura que reposa sobre un suelo de fundación (subrasante) y está constituido por una o más capas construidas con materiales seleccionados y un proceso constructivo (estipulado y controlado), cuya función principal es la de transmitir de manera adecuada los esfuerzos a la subrasante” (Mataute & Casas, 2009).



*Figura 3.* Capas constitutivas de un pavimento. Adaptado de Mataute, D., & Casas, D. (2009). Desarrollo de una mezcla asfáltica utilizando residuos plásticos. Universidad EAFIT, Medellín, 2009, 45(1), 1–19. <https://doi.org/10.7202/1016404ar>

“Existen varios tipos de pavimentos: flexibles, rígidos, de adoquines, mixtos y semi rígidos. La Figura 3 muestra la distribución de capas para dos tipos distintos de pavimentos. En los pavimentos flexibles, la capa superior de materiales (capa de rodadura) está compuesta por una mezcla asfáltica. Los pavimentos mixtos también tienen una carpeta asfáltica como capa de rodadura o antes de ésta” (Mataute & Casas, 2009).

“La mezcla asfáltica está constituida por materiales pétreos (llamados agregados) y materiales asfálticos (ligantes). La dosificación material asfáltico - agregado es muy importante y requiere de un control muy riguroso. Una mezcla con exceso de asfalto provoca una superficie inestable y un bajo contenido de éste, produce una capa áspera propensa a la desintegración, disminuyendo sus características de impermeabilidad y durabilidad” (Mataute & Casas, 2009).

## **2.4 Grano de Caucho Reciclado (GCR)**

“El GCR es un material obtenido de las llantas en desuso de topo tipo de vehículos, que por lo general tiene un destino no muy controlado ambientalmente, rellenos sanitarios, plantas térmicas, basureros a cielo abierto, entre otros, que generan un daño ambiental importante; Se obtiene mediante procesos de molienda de llantas usadas, disminuido en tamaño, este material es utilizado en diferentes obras de ingeniería civil” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

**2.4.1. Composición de llantas.** “Están compuestas por tres productos básicamente: caucho natural y sintético, acero y fibra textil. Este caucho que se utiliza en la producción de las llantas está compuesto por un grupo de polímeros (compuestos químicos con un elevado peso molecular)

como lo son el polisopreno sintético, el polibutadieno y el más común que es el estireno-butadieno, todos usados en hidrocarburos” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

“El caucho sintético es el más importante y utilizado debido a sus grandes propiedades y a su bajo costo. Este tipo de elastómero es un material que presenta propiedades mecánicas como el poder sufrir mayores deformaciones elásticas bajo tensión con respecto a otros materiales y aun así recupera su tamaño original sin una deformación permanente. Es utilizado como un remplazo del caucho natural, en especial cuando se necesita mejorar las propiedades de los materiales. El caucho SBR (estireno-butadieno) tiene mayor resistencia al desgaste y presenta mayor generación de calor” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

El GCR tiene componentes que pueden contribuir al buen desempeño del asfalto, estos son:

- **Negro de humo:** Es un componente que actúa contra el desgaste de las llantas cuando estas tienen contacto con la superficie del pavimento, esto permite que las llantas de los vehículos duren más. Por otro lado, la propiedad del negro humo al en la mezcla asfáltica hace que el cemento asfáltico sea más resistente ayudando a disminuir el envejecimiento.
- **Antioxidantes:** hacen que el efecto de deterioro por oxidación se retarde.
- **Aminas:** “hacen que el caucho no tenga endurecimiento progresivo del caucho, aumento de su fragilidad y pérdida de elasticidad” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).
- **Aceites aromáticos:** Prolongan la vida de las mezclas asfálticas modificadas con GCR.

**2.4.2. Procesos de obtención del grano de caucho reciclado.** La finalidad de los procesos de molienda es adquirir un tamaño máximo de partícula de  $\frac{1}{4}$  “. estos se diferencian por la forma y la textura del Grano de caucho reciclado. Cada proceso se debe evaluar teniendo en cuenta los costos, también se debe garantizar que las partículas de grano de caucho estén libres de acero y de

productos que afecten negativamente la calidad del grano. A continuación, se identifican tres diferentes formas de molienda de las llantas:

**2.4.2.1. Proceso Ambiental.** “Como se muestra en la Figura 4, el proceso ambiental cuenta con la utilización de una serie de granuladores que disminuyen el tamaño del caucho mediante el corte por la acción de cuchillas. Son molinos construidos que se usan para para separar los componentes metálicos y así evitar dañarlos, la parte textil se elimina con el uso de cintas o bandejas vibratorias que originan la compresión de las fibras, estas son separadas por tamices. El tamaño de las partículas se controla usando tamices ubicados dentro de la maquina; pero, estos tamices pueden ser reemplazados para dar un tamaño esperado” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

“La temperatura de los neumáticos inicialmente es equivalente a la temperatura ambiente, pero esta aumenta considerablemente en el proceso de molienda en la fricción de los neumáticos con las cuchillas” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

En “este proceso, se encuentran presentes varios pares de molinos para dar el tamaño esperado (2 o 3 molinos). Los rodillos están uno en frente del otro, con una distancia específica que es la que le da el tamaño al grano de caucho. El caucho pasa por esta variedad de molinos con el fin de facilitar la separación de los demás materiales que se presentan en las llantas desechadas” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

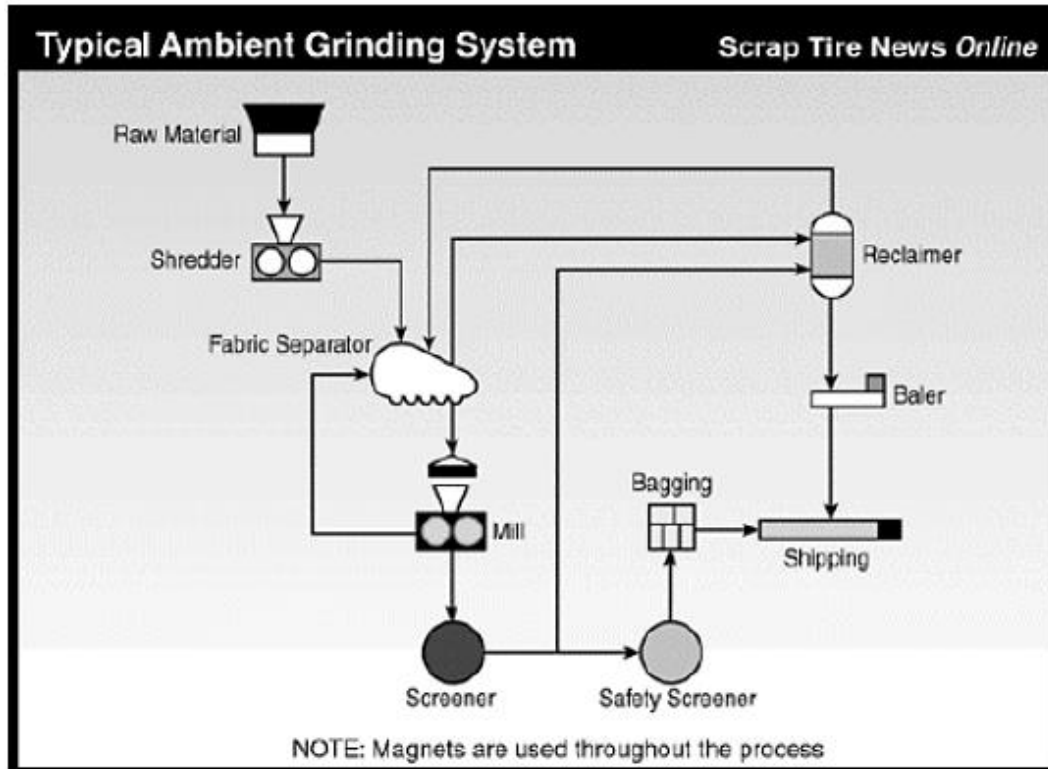


Figura 4. Proceso ambiental. Adaptado de Crumb Rubber, por Scrap Tire News. Recuperado de <https://scraptirenews.com/information-center/crumb-rubber/>

**2.4.2.2. Proceso criogénico.** “Este proceso, como se observa en la Figura 5, busca obtener las partículas en los tamaños mínimos esperados, utilizando un método para disminuir la temperatura del neumático a una temperatura muy baja. Se emplea nitrógeno u otros materiales que disminuyan considerablemente la temperatura del neumático. Se reduce el caucho a partículas entre tamaños de ¼” a mínimo tamiz número 30. En la molienda criogénica, los materiales son enfriados mediante nitrógeno o dióxido de carbono a muy bajas temperaturas (-80 °F, -62°C aproximadamente)” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

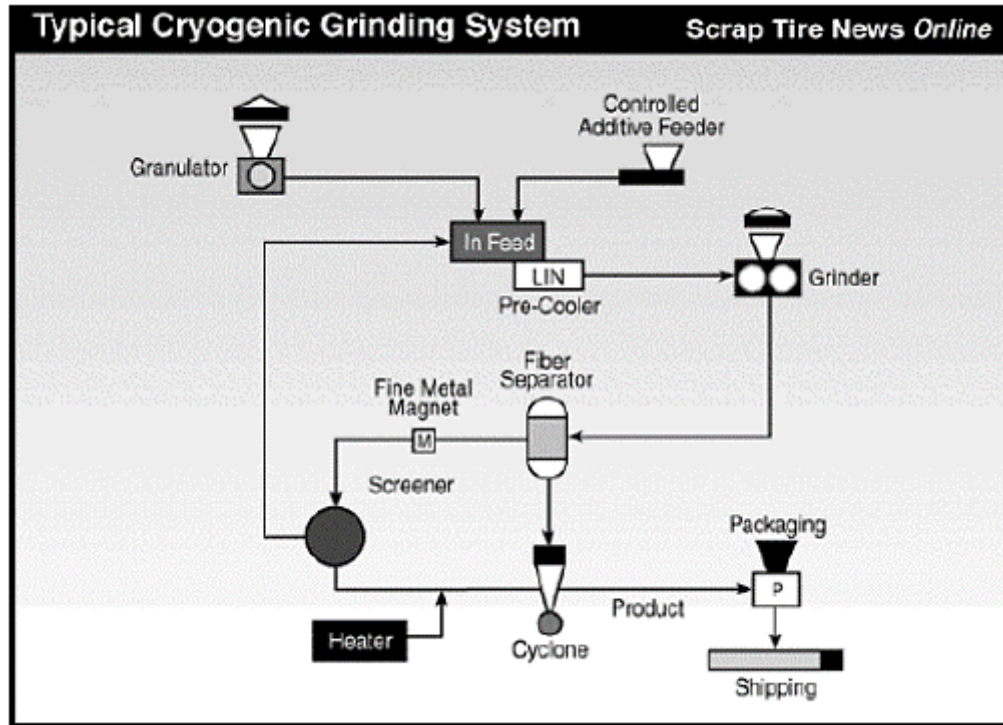


Figura 5. Proceso criogénico. Adaptado de Crumb Rubber, por Scrap Tire News. Recuperado de <https://scraptirenews.com/information-center/crumb-rubber/>

En “el proceso de molienda criogénico se hace uso de temperaturas criogénicas (conjunto de técnicas que son utilizadas para enfriar un material a la temperatura de ebullición del nitrógeno o a temperaturas más bajas), en donde se puede aplicar en cualquier etapa de la reducción del neumático. El material se puede enfriar en una cámara de estilo túnel, sumergido en un baño de nitrógeno líquido para reducir la temperatura del grano de caucho” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

“El caucho enfriado se muele en una unidad de reducción de tipo impacto, en un molino de martillo. La molienda criogénica evita la degradación térmica del caucho y produce un alto rendimiento del producto que queda libre de casi toda la fibra o de acero, que son liberados mientras el proceso” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

**2.4.2.3. Otros procesos.** “Existen otros procesos de molienda en los cuales se desarrolla una molienda- húmeda, siendo utilizadas para producir tamaño de granos finos (Tamiz 40 y 60) y muy finos (Tamiz 60) donde requiere de una segunda etapa de intensidad molienda” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

“Este proceso es conocido como micro molienda, es un proceso de molienda que está patentado en donde las partículas diminutas de caucho son reducidas a un tamaño menor por molienda entre dos ruedas muy juntas en un medio líquido, este medio líquido, en el mayor de los casos es agua” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

## **2.5 Asfaltos modificados**

“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: susceptibilidad a la temperatura, intervalo de plasticidad, cohesión, respuesta elástica, resistencia al agua y al envejecimiento” (Forigua & Pedraza, 2014).

“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” (Forigua & Pedraza, 2014).

Se ha comprobado que “los ligantes asfálticos tradicionales tienen limitaciones en su respuesta a las cargas que día a día aumentan su frecuencia y su intensidad, la acción del clima en muchos proyectos genera ondulamientos y agrietamientos prematuros.es por esto que es necesario buscar

y desarrollar materiales más resistentes que alarguen el periodo de servicio y disminuyan los gastos de conservación” (Forigua & Pedraza, 2014).

**2.5.1. Forma de utilización de polímeros como modificador.** “La incorporación de un polímero a un betún es un proceso complejo, puede decirse que, en una primera etapa, el polímero se dispersa en la masa del betún, pero sin ejercer efectos importantes sobre sus propiedades, posteriormente, las partículas de polímero absorben aceites de los máltenos, hinchándose de una manera importante, para dispersarse finalmente en forma molecular, siendo en esta etapa cuando realmente tienen lugar los cambios reológicos más significativos sobre el asfalto. La composición de los asfaltos tiene una importancia decisiva en las propiedades de los asfaltos modificados, en forma muy especial en lo que concierne a la aromaticidad de los maltenos y al contenido de asfaltenos. Cuanto menor sea el contenido de asfaltenos de un asfalto, tanto más compatible será dicho asfalto con el polímero” (Forigua & Pedraza, 2014).

“La fabricación de un asfalto modificado consiste en incorporar el polímero al asfalto a temperatura elevada, haciéndolo pasar por un molino coloidal dotado de una gran capacidad para desarrollar altos esfuerzos de corte o de cizallamiento, durante un tiempo determinado, que dependerá de la naturaleza y tipo de cada uno de los componentes” (Forigua & Pedraza, 2014).

“En la Figura 6 puede apreciarse cómo un asfalto convencional empleado en pavimentación presenta una variación lineal de su consistencia con la temperatura. Por el contrario, el mismo asfalto modificado con SBS muestra un comportamiento no lineal. Esta diferenciación en el comportamiento de estos materiales justifica las ventajas de utilización de este tipo de productos” (Forigua & Pedraza, 2014).

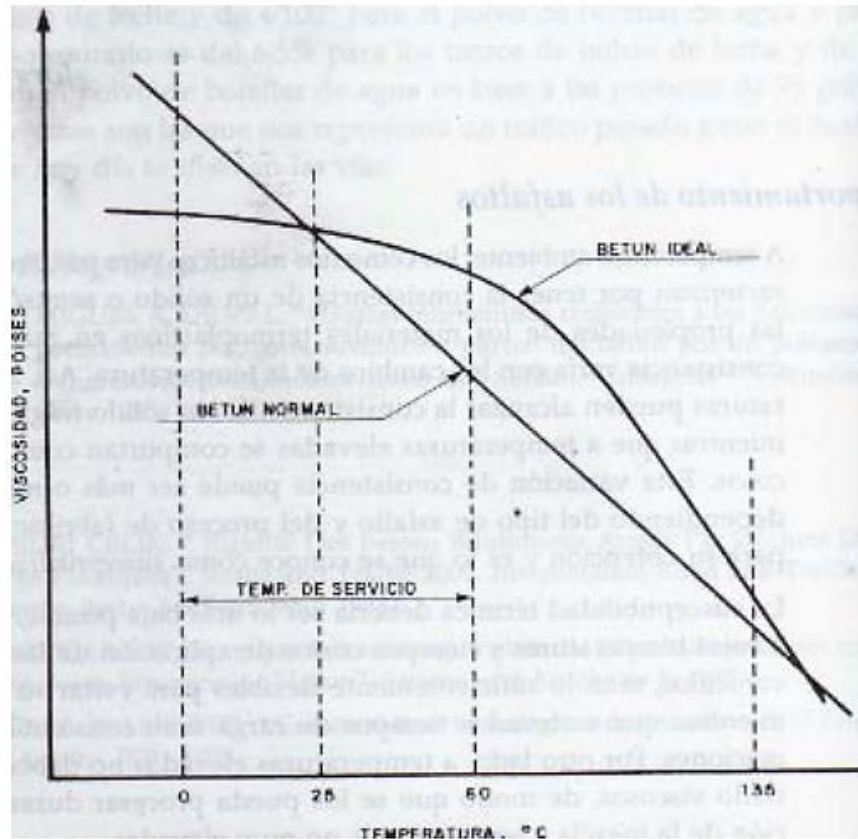


Figura 6. Susceptibilidad térmica de un betún ideal y uno convencional. Adaptado de “Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos” por Forigua, J., & Pedraza, E. 2014, p. 1–32. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2575/1/Dise%C3%B1o-mezclas-asf%C3%A1lticas-modificadas-adici%C3%B3n-desperdicios-pl%C3%A1sticos.pdf>

“Tal como se aprecia en las zonas de bajas temperaturas el asfalto modificado presenta mejores características de flexibilidad que el asfalto convencional como lo indican los valores más bajos de consistencia” (Vásquez & Infante, 2016).

“En el rango de temperaturas de servicio, 60-70 °C, el asfalto modificado presenta menor susceptibilidad térmica, con consistencias elevadas, lo que asegura una buena resistencia de las mezclas asfálticas a las deformaciones permanentes” (Vásquez & Infante, 2016).

“En la zona de temperaturas de mezclado en planta, el asfalto modificado presenta una viscosidad algo mayor que la del asfalto convencional, pero de ninguna manera dificulta las operaciones de preparación de las mezclas” (Vásquez & Infante, 2016).

### **3. Desarrollo de la investigación**

En el área de la infraestructura vial existen diversas alternativas que son factibles para la adecuación de pavimentos asfálticos mediante el uso de nuevas tecnologías. Para garantizar el adecuado uso de estas, es necesario “la capacitación del recurso humano directamente involucrado y el acatamiento de la legislación ambiental” (Peláez Arroyave et al., 2017). En Colombia, el uso de estos nuevos elementos incentiva la recuperación de la red vial nacional que hasta el año 2019 no presenta un cuadro positivo como se puede ver en la Figura 7.

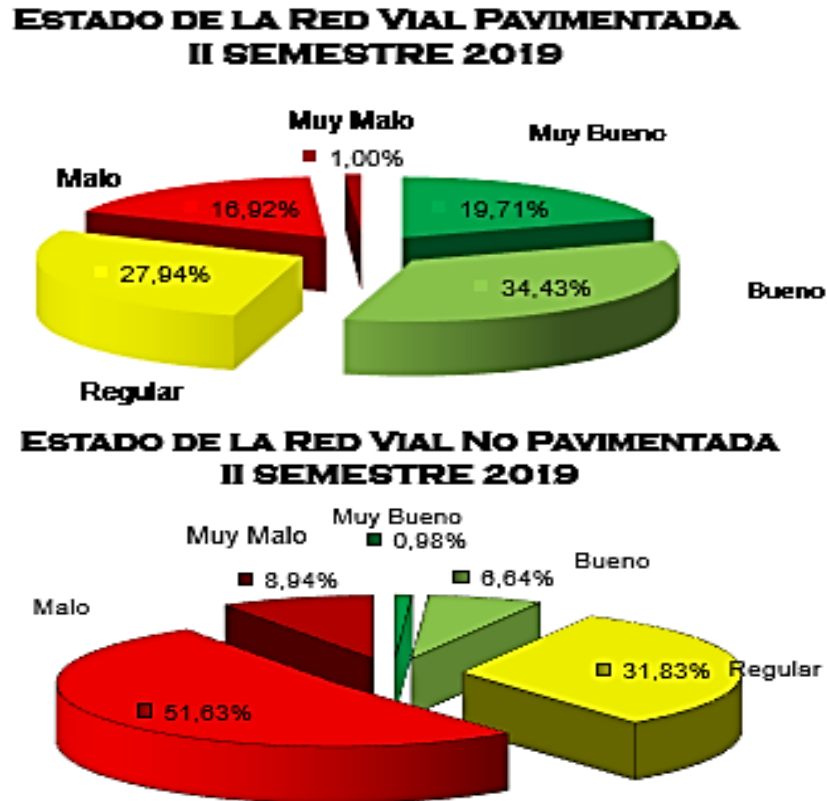


Figura 7. Estado de la red vial segundo semestre de 2019. Adaptado de “Estado de la red vial”, por Invias, 2019. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/component/content/article/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>

### 3.1 Influencia de los aditivos en el asfalto

**3.1.1 Influencia del GCR en el asfalto.** Los aditivos y modificadores que se agregan al asfalto tienen la capacidad de cambiar sus propiedades físicas y reológicas, de tal manera que “aumenta la resistencia a la deformación y a la fatiga, y así mismo, reduce el agrietamiento y la susceptibilidad a las variaciones de temperatura” (Figuroa Infante et al., 2009)

Además de las variaciones mencionadas anteriormente, los asfaltos modificados con polímeros mejoran otras propiedades como lo son: su intervalo de plasticidad aumenta, tiene

mayor cohesión, así como mejora su respuesta elástica, aumenta su resistencia al agua y al envejecimiento.

Las características quizá más importantes que presenta el cemento asfáltico modificado con Grano de Caucho Reciclado es que a bajas temperaturas se hace más flexible y a temperaturas elevadas se hace menos plástico. Los pavimentos se ven beneficiados con estos modificadores debido a que mejora en la deformación permanente, tiene buen comportamiento a la fatiga y es más resistente a al fisuramiento a bajas temperaturas.

Otras de las ventajas que genera el uso de GCR son las siguientes:

- No presenta solubilidad, “este material no cambia dentro del cemento asfáltico al ser sobrecalentado” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).
- Al ser mezclado con el cemento asfáltico a altas temperaturas atrae componentes livianos del mismo, esto hace que genere un manto asfalto-caucho que resulta ser más resistente al fisuramiento.
- “El GCR contiene componentes como el negro de humo que “ha demostrado aumentar las propiedades de refuerzo del ligante y ayuda a disminuir el envejecimiento” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017), “en la mezcla asfáltica. Las aminas evitan el endurecimiento progresivo del caucho, el aumento de su fragilidad y la pérdida de la elasticidad. Y, por último, aceites aromáticos los cuales prolongan la vida del asfalto-caucho” (Figueroa Infante et al., 2009).
- Mejora la resistencia del pavimento de asfalto a la formación de grietas, grietas por fatiga y grietas a baja temperatura, lo que le permite funcionar mejor que las carreteras de asfalto convencionales. (Sojobi et al., 2016)

- “Promedio de ruido reportado en diversos estudios es de aproximadamente 4 a 10 decibeles” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

El uso de caucho de llanta en el asfalto en los últimos años ha venido convirtiéndose en un elemento ecológicamente útil, debido al creciente número de llantas desechadas. Sin embargo, presenta algunas desventajas que pueden ser solucionadas. Algunas de las desventajas que se presentan son:

- Al modificar el ligante con Grano de Caucho Reciclado la mezcla que resulta experimenta un aumento de viscosidad. Este incremento hace que la mezcla no sea apta para usarse en aplicaciones que requieran que el ligante sea fluido. Pero esto se puede solucionar ablandando la mezcla asfalto-caucho con kerosén.
- Las partículas de caucho captan aceites del cemento asfáltico y esto afecta de manera desfavorable las propiedades de cohesividad y adhesividad del ligante. Si se afectan estas propiedades, la mezcla presentara dificultad para unirse con las superficies de la estructura del pavimento o con los agregados. Este problema tiene una solución sencilla, se usan ligantes más blandos ricos en aceites, sin embargo, hay que tener en cuenta que la mezcla podría ser muy blanda. (Angulo Rodríguez & Duarte Ayala, 2005).

En Colombia, “los asfaltos modificados tienen un precio entre 2 y 3 veces el del asfalto virgen, sin embargo, el mayor costo es compensado con una mayor vida útil de la mezcla asfáltica que llega a ser del orden de hasta 3 veces la del asfalto convencional” (Angulo Rodríguez & Duarte Ayala, 2005).

**3.1.2 Influencia del plástico en el asfalto.** Los elastómeros, como el GCR, experimentan una “recuperación importante en la deformación bajo carga, por lo que al ser agregados al asfalto

mejora la recuperación elástica de la mezcla cuando son solicitadas a ciclos de carga y descarga. Cuando la mezcla se modifica con aditivos elastomérico, como el polietileno, se obtiene un incremento en la resistencia mecánica de la mezcla, debido a que el asfalto se vuelve rígido” (Castro López et al., 2016).

El polietileno de baja densidad (PEBD) es un material de alta resistencia térmica y química. De acuerdo con (Diario Occidente, 2019), en Colombia el sector plástico genera anualmente 1.2 millones de toneladas de residuos y solo un 7% de este es reciclado.

Además del mejoramiento de las propiedades mecánicas en el pavimento, el empleo de estos productos de desechos plásticos, cuyo tiempo de degradación es muy alto, contribuye a disminuir la contaminación ambiental que diariamente crece sin control alguno. (Reyes Ortiz, 2000)

“Agregar materiales plásticos al asfalto puede crear tres efectos que dependen de la naturaleza química, de la talla y de las características físicas del material plástico” (Forigua & Pedraza, 2014).

- “El efecto sobre el ligante: la disolución o la dispersión del estado fundido de material plástico en la mezcla hace que aumente la viscosidad del ligante”.
- “El efecto de estructura: las tiras plásticas o también llamadas fibras crean uniones entre los granos del granular”.
- “El efecto bloqueante: las fibras en los granos pueden llenar los vacíos del esqueleto granulométrico a la hora de compactar” (Forigua & Pedraza, 2014).

“Estos efectos solos o juntos producen los siguientes resultados”: (Forigua & Pedraza, 2014).

- Mejora en la susceptibilidad térmica.
- Aumento de la compactación.
- Aumento de la resistencia de la capa asfáltica.
- Disminución del consumo de energía por la fabricación de la mezcla.

“El objetivo de modificar asfaltos con polímeros puede resumirse así”: (Forigua & Pedraza, 2014)

1. Disminuir la susceptibilidad térmica a altas temperaturas.
2. Aumentar la cohesión interna.
3. Mejorar la flexibilidad y la elasticidad a bajas temperaturas.
4. Mejorar el comportamiento a la fatiga.
5. Aumentar la adhesividad del material granular y el ligante.
6. Aumentar la resistencia al envejecimiento.

Otras características que presentan las mezclas asfálticas modificadas con plástico:

- En pavimentos flexibles la mezcla de betún modificado con plástico residual muestra una mejor propiedad de unión, estabilidad, densidad y más resistencia al agua.
- (Gawande et al., 2012) indicaron que las pruebas de campo del asfalto con plástico reciclado resistieron el estrés y demostraron que los desechos plásticos utilizados después del procesamiento adecuado como aditivo mejorarían la vida útil de las carreteras y también resolverían los problemas ambientales.
- (Mataute Heredia & Casas Orozco, 2009) afirman que “a menor tamaño de partícula el polímero se incorpora mejor a la mezcla, a su vez la adición de polímero aumenta el flujo, teniendo que disminuirse la cantidad de este para cumplir con el valor máximo reportado en la norma colombiana el cual es (3.5 mm)”.
- El LDPE (por sus siglas en inglés, Low Density PolyEthylene) reciclado de un tamaño entre 0,30 y 0,92 mm que reemplaza el 15% de los agregados en la superficie de asfalto logra casi duplicar el cociente de Marshall y aumentar la estabilidad retenida en un 15%, lo que implica una mejor resistencia al enrutamiento y al agua. (Gawande et al., 2012)

### 3.2 Métodos de adición de modificadores a la mezcla asfáltica

Los modificadores generalmente se aplican al material asfáltico de manera directa, es importantes que sea antes de mezclarlo con el material pétreo. “Las características que adquiere el pavimento varían según el modo por el cual se va a adicionar a la mezcla” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017). “La cantidad de material modificador que se adiciona al asfalto determina las características fisicoquímicas y a su vez, el desempeño de las mezclas elaboradas con el ligante modificado” (Figuroa Infante et al., 2009).

“Estos materiales se pueden adicionar a las mezclas asfálticas mediante dos procesos, mezclándolo con el ligante (proceso húmedo) y mezclándolo con los agregados (proceso seco)” (Figuroa Infante et al., 2009).

**3.2.1 Vía húmeda.** “En el proceso por vía húmeda, el GCR se mezcla con el ligante para producir una mezcla asfalto-caucho que se usa de la misma manera que un ligante modificado. La proporción de GCR agregado varía entre el 14% y el 20% dependiendo del ligante” (Figuroa Infante et al., 2009).

Este proceso “aumenta la viscosidad del cemento asfáltico, disminuye la plasticidad a altas temperaturas (evitando el Ahuellamiento) y aumenta la flexibilidad a bajas temperaturas (evitando problemas por fisuración). Factores como el tamaño, la textura y la proporción del Grano de Caucho Reciclado, el tipo de cemento asfáltico, el tiempo y la temperatura de mezclado, entre otros, son decisivos en el resultado esperado” (Correa Lesmes, 2018).

**Proceso Adición Polvo NFU al Asfalto por Vía Húmeda**

Figura 8. Proceso de modificación por vía húmeda. Adaptado de “Llantas usadas en pavimento”, por R, Bisso Fernández, 2010. Recuperado de <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

“En la Figura 8 se describe el proceso de modificación por vía húmeda o también conocido como proceso McDonald, el cual consta de un tanque en donde se mezcla cemento asfáltico con GCR y con una serie de tornillos para asegurar la circulación de la mezcla (3)” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017), este proceso se hace en un periodo de 45 a 60 minutos. De manera alternativa se calientan los agregados pétreos (5) “para que posteriormente sea mezclado con el asfalto modificado (6) y poder ser transportado al lugar de construcción. En el transporte se debe mantener una temperatura entre los 160°C a los 190°C, para evitar problemas de manejabilidad” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

Existen 3 tipos de tecnologías que varían según la especificación del proyecto.

**3.2.2.1 Tecnología continua.** "Consiste en un sistema de producción de mezclado de asfalto y caucho de manera continua. En este proceso se usa un tamaño de fino que pasa por el tamiz No. 80 para el GCR, se emplean porcentajes entre 8% y 10%, disminuye la temperatura de mezclado y se acorta el tiempo de reacción" (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

**3.2.2.2 Tecnología terminal:** "Es un proceso que brinda la capacidad de mezclar el asfalto con el GCR y conservar el producto durante amplios periodos de tiempo. El producto tiene una amplia duración de almacenamiento y puede ser mezclado en el lugar en donde se produce por cualquier tecnología, continua o por bacheadas" (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

**3.2.2.3 Mezclado en campo.** "Se implementa con remolques que se puedan transportar con el fin de crear mezclas in situ con el fin de ahorrar costos en transporte. Estos equipos móviles llevan a cabo el proceso de modificación del asfalto" (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

Según (Gawande et al., 2012) este proceso puede utilizarse para reciclar cualquier tipo, tamaño y forma de material de desecho (plástico, caucho, etc.). Sin embargo, el proceso húmedo tiene las siguientes desventajas.

- Consume más tiempo: más energía para mezclar.
- Se requiere una mecánica potente.
- Se requiere enfriamiento adicional ya que la adición inadecuada de betún puede causar bolsas de aire en las carreteras.
- El porcentaje máximo de residuos de plástico se puede agregar alrededor del 8%

**3.2.3 Vía seca.** En el proceso por vía seca se puede adicionar el GCR de manera directa a la mezcla asfáltica en caliente y se usa como agregado final que comúnmente se mezcla con los áridos antes de adicionar el ligante. “En este proceso (que se puede ver en la Figura 9), la cantidad de ligante tiende a aumentar y se requiere un proceso especial para adicionar el GCR en la planta además de un mayor tiempo de compactación en obra. El proceso por vía seca puede usarse para mezclas asfálticas en caliente con granulometrías densas, abiertas o discontinuas, su aplicación en mezclas en frío no es conveniente debido a que es un proceso en el que no se modifica completamente el ligante” (Figuroa Infante et al., 2009).



Figura 9. Proceso de modificación por vía seca. Adaptado de “Llantas usadas en pavimento”, por R, Bisso Fernández, 2010. Recuperado de <http://ligante-asfaltico.blogspot.com/p/llantas-usadas-en-pavimentos.html>

“Este tipo de proceso tiene inconvenientes técnicos. La falta de estándares de calidad y del rendimiento inconsistente genera desconfianza para los profesionales en aceptar este tipo de modificación, por lo cual se inclinan por el proceso por vía húmeda" (Correa Lesmes, 2018).

"En la modificación por vía seca el GCR sustituye entre el 1% y el 3% del peso total de los agregados y su aplicación ocurre antes de agregar el cemento asfáltico a la mezcla, justo cuando los agregados alcanzan una temperatura específica” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

Existen tecnologías utilizadas para el proceso por vía seca como las siguientes:

**3.2.3.1 Tecnología PlusRide.** “El CR se agrega a la mezcla en proporciones de 1% al 3% del peso total de los agregados. El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe estar entre el 2% y el 4%, y generalmente son obtenidos con contenidos de ligante entre el 7.5% y el 9%” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

**3.2.3.2 Tecnología Genérica.** “El GCR se emplea en dos fracciones (una gruesa y una fina) con el fin de emparejar la granulometría de los agregados. La parte fina es usada para interactuar con el cemento asfáltico mientras que la parte gruesa se comporta como un agregado elástico en la mezcla” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

**3.2.3.3 Tecnología convencional** “No se requieren grandes cantidades de cemento asfáltico y la cantidad de GCR es de aproximadamente un 2% del peso total de los agregados para poder obtener resultados favorables” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

Hay que tener en cuenta que la maquinaria usada para “los pavimentos con presencia de GCR, requiere una limpieza especial y repetitiva ya que los residuos del material tiendes a quedar pegados” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

Según (Gawande et al., 2012) el proceso en seco tiene muchas ventajas las cuales se mencionan a continuación.

- El plástico está recubierto sobre piedras, lo que mejora la propiedad superficial de los agregados.
- El recubrimiento es fácil y la temperatura requerida es la misma que la temperatura de colocación de la carretera.
- Es posible el uso de residuos plásticos en más del 15%.
- Se pueden usar películas flexibles de todo tipo de plásticos.
- Duplica la propiedad vinculante de los agregados.
- Los agregados recubiertos muestran mayor resistencia.
- No hay degradación de las carreteras, incluso después de 5-6 años de la construcción.
- Se puede practicar en todo tipo de condiciones climáticas.
- No hay evolución de gases tóxicos ya que la temperatura máxima es de 180°C.
- No se requiere equipo nuevo.
- Como es posible reemplazar el betún en más del 15% hay una mayor rentabilidad.

De acuerdo con la literatura, “el proceso de modificación por vía húmeda presenta un mejor comportamiento que el proceso por vía seca. Aunque el proceso por vía húmeda presenta un mayor costo inicial de la mezcla y un aumento de la temperatura de mezclado, y el proceso por vía seca tiene un mayor tiempo de compactación y mayor cantidad de ligante asfáltico” (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

### 3.3 Implementación del asfalto modificado con materiales reciclados

**3.3.1 A nivel nacional.** El Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) contrato a la Universidad de los Andes para realizar “diferentes estudios con el fin de desarrollar una metodología de diseño de mezclas, modificando asfaltos nacionales, y así obtener mezclas asfálticas mejoradas con llantas desechadas” (Martínez Arguelles et al., 2018).

Los resultados obtenidos en este estudio “llevaron al IDU a llevar a cabo la segunda etapa de este proyecto y construir a escala real un tramo de prueba en la ciudad de Bogotá. La longitud del tramo de prueba fue de 270 m, este tramo fue diseñado para una vida útil estimada de un año con las condiciones de tráfico existentes en el corredor” (Martínez Arguelles et al., 2018). Los resultados del estudio de este tramo se encuentran en el Apéndice A.

En el año 2011 el gobierno distrital de Bogotá emite la Resolución 6981 del 27 de diciembre de 2011 “Por medio de la cual se dictan lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, y llantas no conforme en el Distrito Capital”, esta Resolución establece en el artículo 4º, la siguiente obligación: “A partir del segundo semestre del 2012, toda persona que ejecute y adelante procesos constructivos de obras de infraestructura del transporte urbano de Distrito Capital deberán prever el uso de materiales provenientes del aprovechamiento de llantas o neumáticos usado o llantas no conforme, en un porcentaje no inferior 5% de metros cuadrados por cada contrato de obra, con excepción de aquellos que a la entrada en vigencia de la presente resolución tengan estudios y diseños aprobados” (Resolución 6981 de 2011, 2011).

“El IDU, para incentivar la aplicación de esta tecnología eco-sostenible desde el año 2012, ha incluido en los pliegos de condiciones de las Licitaciones Públicas, para efectos de la calificación

del factor de evaluación denominado CALIDAD, otorgar un valor adicional a los proponentes que se comprometan con el uso de esta nueva tecnología” (Martínez Arguelles et al., 2018).

Múnera & Alexander Ossa, (2014) analizaron mezclas de asfalto con tres diferentes polímeros, entre ellos el caucho molido proveniente de llantas desechadas con el objetivo de identificar los niveles de modificación y cambios en las propiedades del asfalto. Con las pruebas realizadas se determinó que la penetración disminuyó en todas las mezclas respecto al asfalto convencional (ver Figura 10), por lo cual se pudo inferir que las mezclas presentaban mayor dureza debido a la relación inversa que se presenta entre estas. “El aumento de la dureza se relaciona con la resistencia a las deformaciones permanentes, es decir, mayor rigidez. Por otro lado, el punto de ablandamiento aumento en todas las mezclas, por lo que este valor aumenta el rango de temperaturas de aplicación del material” (Múnera & Ossa, 2014). Los resultados de este ensayo se encuentran en el Apéndice B.

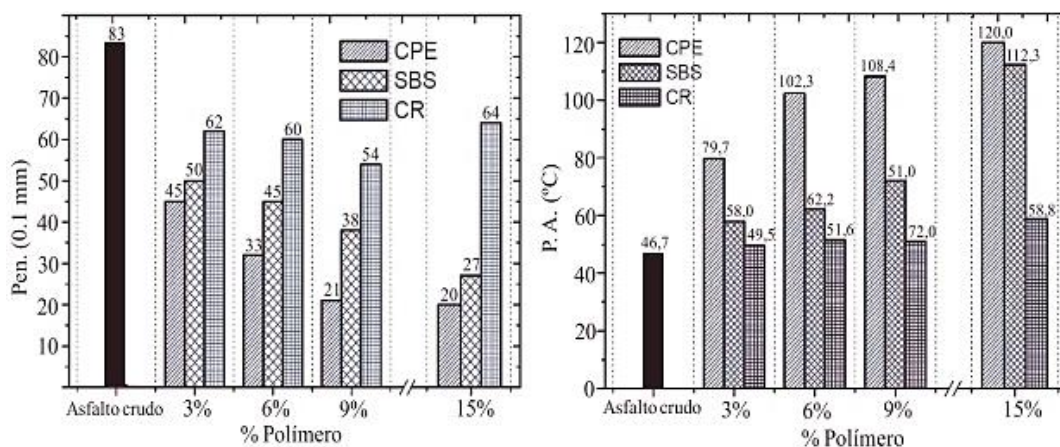


Figura 10. Cambios en las propiedades de penetración y punto de ablandamiento. Adaptado de “Estudio de mezclas binarias Asfalto-Polímero” por Múnera & Ossa, 2014, *Revista Facultad de Ingeniería*, 70, p. 18-33. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/430/43030033002.pdf>

(Cárdenas Poblador & Fonseca Santanilla, 2009) “compararon las propiedades reológicas de un asfalto convencional y un asfalto modificado. El comportamiento reológico del ligante tiene influencia en las propiedades de la mezcla asfalto-agregado, estas propiedades reológicas dependen de las proporciones de sus componentes (los cuales varían de acuerdo con el origen de los crudos pétreos)”.

El comportamiento reológico de las dos muestras permite ver que el comportamiento temperatura-viscosidad es muy similar, sin embargo, “el asfalto modificado presenta valores mayores de viscosidad en el mismo intervalo de tiempo. Además, como el asfalto modificado contiene un mayor porcentaje de asfaltenos y menos saturados que el asfalto convencional, se puede decir que el primero es más rígido” (Cárdenas Poblador & Fonseca Santanilla, 2009). Los resultados de este ensayo se encuentran en el Apéndice C.

(Castro López et al., 2016) realizaron un ensayo con el “propósito de evaluar la respuesta que experimenta el ligante asfáltico cuando se modifica con un desecho plastomérico”. Sobre el asfalto modificado “se realizaron ensayos de caracterización como el de penetración, punto de ablandamiento y ductilidad. Con estos ensayos se pudo determinar que el aditivo tiende a rigidizar el asfalto, es decir, que incrementa el punto de ablandamiento y disminuye la penetración, y por lo tanto la ductilidad disminuye debido al enfriamiento del asfalto modificado. También incrementa su resistencia a inflammar a altas temperaturas y es más resistente a la pérdida de masa. El grado de desempeño a altas temperaturas de servicio aumentó, lo cual indica que el ligante es más resistente a fenómenos como el ahuellamiento en altas temperaturas” (Castro López et al., 2016). Los resultados de este ensayo se encuentran en el Apéndice D.

(Boada Marcano & Reyes Lizcano, 2013) analizaron el desempeño en fatiga de los asfaltos modificados debido a que este es uno de los problemas recurrentes en el pavimento ocasionado

por el exceso repetitivo de cargas de tránsito. Para ello se emplearon 3 tipos de aditivos: fibras de polipropileno, tiras de llanta de caucho y bolsas de leche.

Los ensayos de laboratorio mostraron que la resistencia a compresión a los 14 días de un asfalto convencional fue superior que las muestras modificadas, por otro lado, la resistencia a flexión de las muestras modificadas mostró una mejora con respecto al asfalto convencional como se muestra en la Figura 11. La muestra modificada con bolsas de leche presentó el mejor comportamiento a flexión a los 14 días. Los módulos de elasticidad se redujeron en las muestras modificadas excepto para la muestra con bolsas de leche. (Boada Marcano & Reyes Lizcano, 2013)

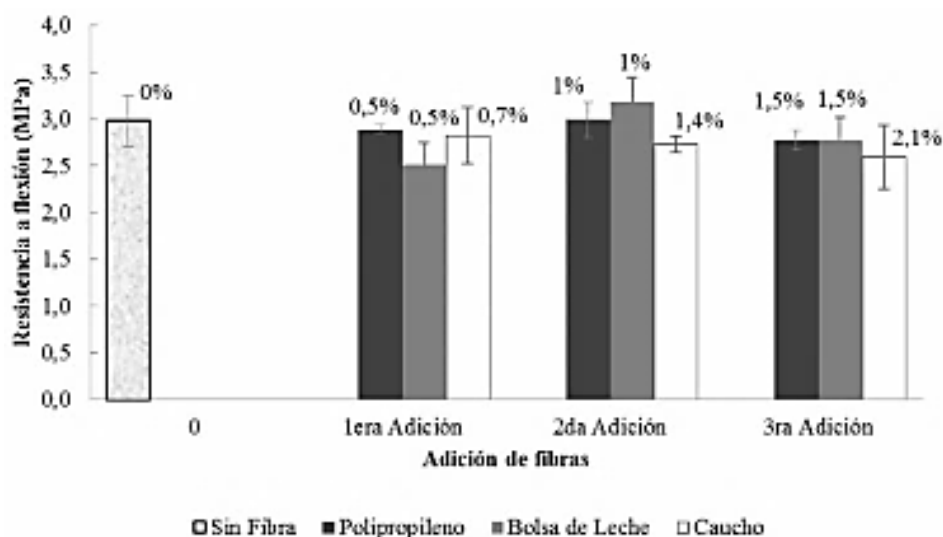


Figura 11. Resistencia a flexión para cada porcentaje de fibra a 14 días de edad. Adaptado de “Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR- 3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas” por Boada Marcano & Reyes Lizcano, 2013, *Revista Ciencia e Ingeniería*, 34 (1), p. 13-20. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/5075/507550798002.pdf>

“El ensayo de resistencia a compresión muestra que la falla en el concreto convencional fue súbita, mientras que en las muestras modificadas se produjo una mayor absorción de energía. Debido a que los módulos de elasticidad disminuyeron, se generan mayores deformaciones y hay

mayor capacidad de absorción de impactos. A los 28 días, el concreto modificado tiende a ser menos rígido por lo que hay menor probabilidad de que ocurra agrietamiento. La mezcla modificada con bolsas de leche presento un mejor comportamiento a la fatiga lo que trae como consecuencia menores espesores en el diseño y así mismo una disminución de costos en la construcción” (Boada Marcano & Reyes Lizcano, 2013). Los resultados de este ensayo se encuentran en el Apéndice E.

(Reyes Lizcano et al., 2012) realizaron pruebas de ahuellamiento sobre asfaltos modificados con GCR, plástico y caucho 75% con plástico 25%.

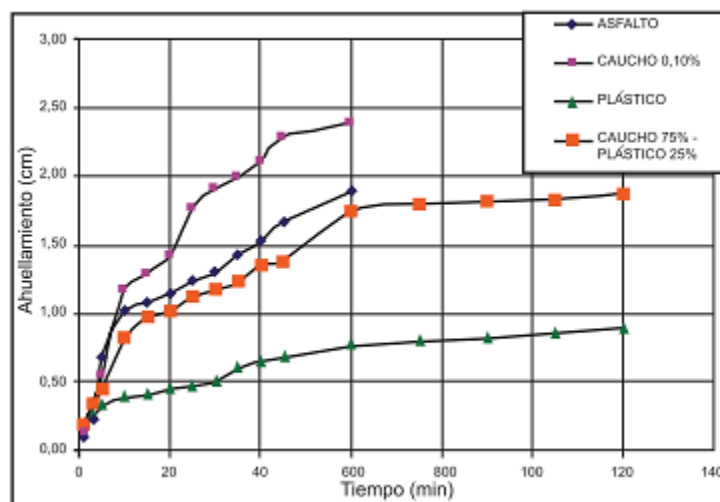


Figura 12. Resultados de ahuellamiento en las cuatro mezclas analizadas. Adaptado de “Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100)” por Reyes Lizcano, Madrid Ahumada & Salas Callejas, 2012, *Infraestructura Vial*, 9(17), p. 25–34. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/277171116\\_Mezclas\\_asfalticas\\_modificadas\\_con\\_un\\_elastomero\\_caucho\\_y\\_un\\_plastomero\\_tiras\\_de\\_bolsas\\_de\\_leche\\_con\\_asfalto\\_80-100](https://www.researchgate.net/publication/277171116_Mezclas_asfalticas_modificadas_con_un_elastomero_caucho_y_un_plastomero_tiras_de_bolsas_de_leche_con_asfalto_80-100)

En la Figura 12 se evidencia que la mezcla modificada solo con plástico es la que presenta el mejor comportamiento a largo plazo debido a que durante las dos horas (120 min) de ensayo

obtuvo menos de un centímetro (1 cm) de deformación. Las deformaciones debidas al ahuellamiento en esta mezcla disminuyen en un 59% a los 60 min de iniciado el ensayo. En este ensayo la mezcla modificada con GCR no presentó un buen comportamiento, a los 60 min tuvo una deformación de aproximadamente 2.4 cm. La mezcla modificada con caucho y plástico presenta un buen comportamiento, alcanzando un 8% de reducción de ahuellamiento a los 60 min de iniciado el ensayo. (Reyes Lizcano et al., 2012)

(Forigua & Pedraza, 2014) “realizaron un proyecto con el cual buscan un mejor desempeño de los pavimentos mediante el uso de desechos plásticos. A las muestras modificadas se les realizo el ensayo Marshall y se les calculó el peso unitario, la estabilidad, el flujo y el módulo para determinar el porcentaje óptimo”.

De acuerdo con los resultados, se concluye que “el porcentaje optimo que mejora las propiedades mecánicas del asfalto es de alrededor 0.4% del porcentaje de desechos plásticos con respecto al peso de la muestra. Se aprecian mejoras en las propiedades de la mezcla, sin embargo, la mezcla es sensible a la dosificación del material plástico. Al evidenciar las mejoras se confirma el aumento en la durabilidad de la mezcla que puede ser afectada por agentes externos” (Forigua & Pedraza, 2014). Los resultados de estos ensayos se pueden ver en el Apéndice G.

(Lemus Ballesteros et al., 2018) “buscaron determinar el porcentaje óptimo de cemento asfaltico por medio de la metodología de Marshall cumpliendo la respectiva especificación del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Con base en los resultados del estudio que se muestran en el Apéndice H, se determinó que el porcentaje óptimo de cemento asfaltico es de 6.5% por medio de la metodología Marshall cumpliendo la respectiva especificación del INVIAS, en su artículo 450 – 07”.

### 3.3.2 A nivel internacional.

**3.3.2.1 Plástico en la construcción de carreteras.** (Angelone et al., 2016) desarrollaron una investigación con 3 tipos de residuos de plástico, (SBF) Escamas de Polietileno, (SBP) Bolsas de silo de pellets de polietileno y chips de polipropileno (PPC), en la cual se buscó concluir cuál de los 3 materiales funcionaba mejor en la mezcla asfáltica, luego de analizar las mezclas se llegó a la conclusión de que la mezcla con un 2% de (SBF) se ajusta a casi todos los valores de las normas, tiene mejor rendimiento y reduce los costos de producción del asfalto (Figuras 13 y 14). Los otros resultados obtenidos en este ensayo se pueden encontrar en el Apéndice I.

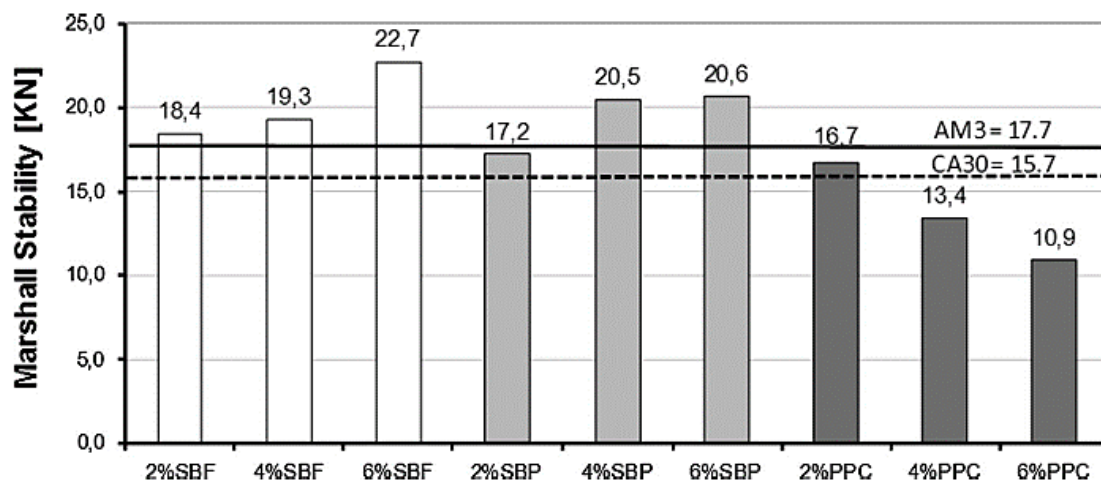


Figura 13. Estabilidad Marshall. Adaptado de “Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures” por Angelone, Cauhapé Casaux, Borghi & Martínez, 2016, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(5), p. 1655–1665. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-015-0602-x>

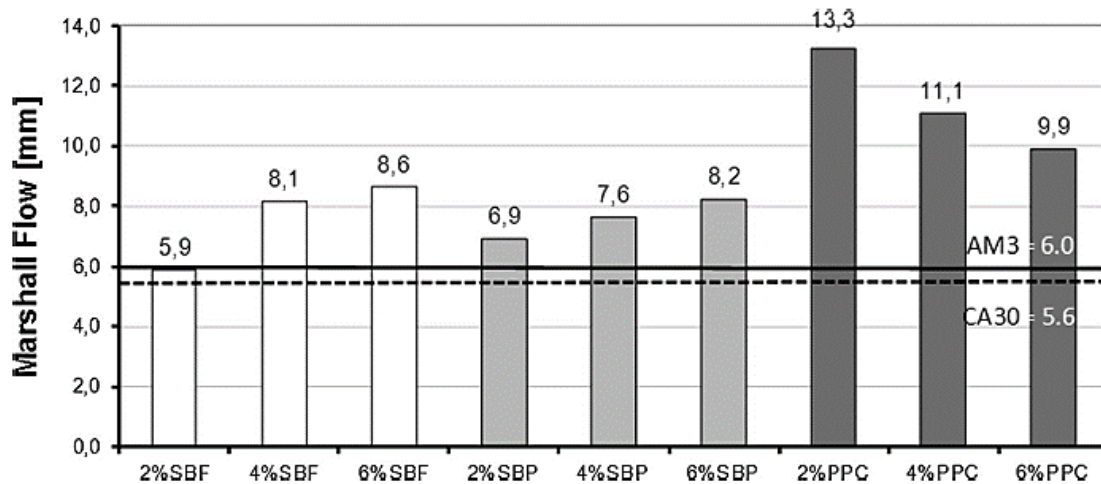


Figura 14. Flujo Marshall. Adaptado de “Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures” por Angelone, Cauhapé Casaux, Borghi & Martínez, 2016, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(5), p. 1655–1665. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-015-0602-x>

El KSCE Journal of Civil Engineering es un diario técnico mensual de la Sociedad Coreana de Ingenieros Civiles, donde se publicó un artículo llamado “Toughening Characteristics of Plastic Fiber-reinforced Hot-Mix Asphalt Mixtures”, este articulo nace de la necesidad que vieron los autores de realizar un estudio para investigar algunas mejoras en el HMA (asfalto mezclado en caliente) , puesto que este presenta inconvenientes en las técnicas químicas y mecánicas que han sido utilizadas para mejorar el rendimiento del HMA como modificaciones de polímeros o sistemas de capas intermedias, la modificación de un aglutinante puede dar como resultado un aglutinante demasiado rígido, de modo que el potencial de daño por fatiga es altamente susceptible a los cambios de temperatura, incluso en comparación con un HMA convencional, con el fin de compensar esos inconvenientes, en sistemas de capa intermedia o con modificaciones de polímeros y proporcionar un refuerzo más efectivo en (HMA) reforzado con fibra propusieron este estudio. (Yoo et al., 2012)

El estudio se realizó utilizando dos fibras diferentes, las fibras plásticas monocatenarias y las fibras fibriladas finas. Se desarrollaron mezclas con ambas fibras dando como resultado que la fibra delgada no funcionaba puesto que en la mezcla se formaban bolas dificultando así la dispersión de la fibra lo que más adelante afectaría la calidad del asfalto, mientras que las gruesas resultaron libres de bolas de fibra y estas fueron las que se tomaron para hacer las pruebas, se hizo una comparación para distinguir el cumplimiento de la fluencia entre el HMA reforzado con fibra y las mezclas simples de HMA las cuales resultaron apenas distinguibles entre sí, “la adición de una pequeña cantidad de fibras a las mezclas de HMA condujo a un aumento significativo en la vida fenomenológica indirecta y la fatiga del haz de flexión en comparación con las mezclas de HMA convencionales. Los índices de resistencia más altos de las mezclas de HMA reforzadas con fibra en comparación con el HMA simple significaron que la capacidad de carga puede prolongar la vida útil de HMA con el efecto del puente de la fibra a través de la superficie del agregado o área dañada, aunque más experimentos en diferentes temperaturas y condiciones de carga debe hacerse para verificar esos efectos en puntos de vista más analíticos” (Yoo et al., 2012).

Más adelante recomendaron el uso de nanotubos de carbono (CNT) bien dispersos con alta resistencia a la tracción para reducir la generación y propagación de microgrietas, para mejorar el módulo elástico y la deformación permanente del (HMA), y mejorar la vida útil de la fatiga. (Sojobi et al., 2016)

En el estado de Kwara, Nigeria, se desarrolló el diseño de una mezcla que consiste en 60/70 concreto asfáltico de grado de penetración (5%), las propiedades de ingeniería probadas fueron la estabilidad, densidad, porcentaje de vacíos de aire, flujo y estabilidad de Marshall, llegando a concluir que el concreto asfáltico bituminoso (BAC) modificado con agregado recubierto de polímero (PCA) optimiza más el reciclaje de PET en BAC con un contenido óptimo de betún

(OBC) más alto de 16.7% en comparación con el 9% de OBC logrado con BAC modificado con PMB, a pesar de que el BAC modificado con PMB registró una mayor estabilidad Marshall en los contenidos plásticos correspondientes. Se pueden usar ambos, pero es preferible la utilización de los desechos de botellas de plástico PET en BAC modificado con agregado recubierto de polímero. (Sojobi et al., 2016)

El asfalto como aglutinante de agregado ha sido ampliamente utilizado en el pavimento de carreteras, desafortunadamente el enrutamiento a alta temperatura y el agrietamiento a baja temperatura del cemento asfáltico o la capa de recubrimiento limitan su aplicación, es por esto que surge una investigación en la cual se realizaron varias pruebas adicionándole al asfalto residuos de llantas y de plástico reciclado, se utilizaron pruebas reológicas para estudiar las propiedades de alta y baja temperatura y las características estructurales del aglutinante modificado, los resultados de las pruebas se resumen en la Tabla 2 donde se pueden ver las propiedades físicas del asfalto base y los asfaltos con diferentes mallas de goma de caucho reciclado (CR) (malla 40, 80, 120), se observa que las principales propiedades físicas del asfalto base incluyen punto de reblandecimiento, recuperación elástica, ductilidad, tenacidad, entre otras, la tenacidad se mejoró enormemente mediante la adición de CR en comparación con el asfalto base. Los asfaltos con CR poseen mejores propiedades, adherencia y elasticidad a altas y bajas temperaturas. (Zhang & Hu, 2016)

Tabla 2.

*Tabla de propiedades de asfalto base y con caucho reciclado*

	AH-70	CRM/40	CRM/80	CRM/120
Softening point/°C	49.1	58	56.4	53
Penetration/25 °C/0.1 mm	61.0	36.5	38.7	40.5
Viscosity/135 °C/Pa s	0.77	5.6	4.2	3.8
/177 °C/Pa s	–	1.12	0.99	0.85
Ductility/5 °C/cm	0	5.3	9.9	10.3
Flexibility/5 °C/cm/N	0	0.09	0.14	0.2
Toughness/25 °C/N m	5.1	16.1	15.2	14.9
Tenacity/25 °C/N m	0	4.2	5.1	5.4
Elasticity/25 °C/%/3 min	10	60	42	38
/25 °C/%/1 h	18.5	92	83	75
Softening point difference/°C	–	–7.1	–2.4	–1.2
<i>After TFOT ageing</i>				
Softening point/°C	54.3	67.8	62.6	57.9
Penetration/25 °C/0.1 mm	34	30.7	36.3	41
Ductility/5 °C/cm	0	6.2	7.9	8.3
Flexibility/5 °C/cm/N	0	0.053	0.076	0.087
Toughness/25 °C/N m	8.9	17.3	14	14.5
Tenacity/25 °C/N m	0	3.1	4.6	4.3
Elasticity/25 °C/%/5 min	7	62	62	41
/25 °C/%/1 h	28	80	77	65

Nota: Adaptado de “The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt” por Zhang & Hu, 2016, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 124(2), p. 729–741. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5198-4>

Por otra parte investigaciones y aplicaciones anteriores demostraron que el asfalto con (GCR) tenía algunas buenas características, como un mayor punto de reblandecimiento, agrietamiento por fatiga, mayor durabilidad y menores costos de mantenimiento del pavimento, así como también se estudiaron y compararon las propiedades físicas de cada asfalto modificado, y se confirmó que el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) era el modificador adecuado para mejorar el rendimiento a altas temperaturas. (Zhang & Hu, 2016)

(Gawande et al., 2012) realizaron estudios de laboratorio donde se usó el plástico como un aditivo con betún calentado en diferentes proporciones (que van del 0-12% en peso de betún). Los resultados de las investigaciones de laboratorio indicaron que, la adición de plástico procesado de aproximadamente 8,8% en peso de betún, ayuda a mejorar sustancialmente la estabilidad, la

resistencia, la vida a la fatiga y otras propiedades deseables de la mezcla de hormigón bituminoso, incluso en condiciones adversas de acumulación de agua.

En Tamil Nadu, India, la longitud de las carreteras de alrededor de 1000 m en varios tramos se construyó utilizando plástico de desecho como aditivo en la mezcla bituminosa bajo el esquema "1000 km Plastic Tar Road" y descubrieron que el rendimiento de todos los tramos de la carretera es satisfactorio, el desempeño de los tramos de carretera construidos con plástico de desperdicio en Karnataka también es satisfactorio. (Gawande et al., 2012)

(Huertas Cadena & Cazar Ruiz, 2013) desarrollaron una “investigación basada en la metodología de la prueba y error, diseñando mezclas bajo los lineamientos propuestos por las normas para ensayo Marshall ASTM D 6926 y ASTM D 6927”, estas mezclas se desarrollaron con el fin de comparar un pavimento flexible adicionándole PET Tipo I como componente adicional de las mezclas tradicionales para el pavimento flexible comparándolo a su vez con un pavimento convencional. La conclusión de la investigación se basó en la capacidad de resistencia y deformación otorgados por el material plástico a la mezcla, “las conclusiones a las cuales llegaron con este estudio no fueron las esperadas así que los autores recomendaron que al manejar e introducir el PET tipo fibra se tengan dimensiones mayores a 3 mm de ancho pues dimensiones menores no resisten el calor de la mezcla y compactación de una briqueta y por ende de un pavimento en caliente, ocasionando que las fibras se deformen en exceso y pierdan desde su longitud hasta su consistencia” (Huertas Cadena & Cazar Ruiz, 2013). Los resultados de esta investigación se encuentran en el Apéndice J.

(Sulyman et al., 2016) realizaron un resumen de experimentos en los cuales se utilizó PET en pavimentos, cementos y hormigones. Para el caso de los pavimentos se encuentran con que la mezcla asfáltica presenta gran susceptibilidad a la temperatura lo que lleva a que se de formación

de surcos a alta temperatura, fatiga a temperatura media y daños por grietas a bajas temperaturas. Las principales razones para modificar asfaltos con plásticos son obtener mezclas más suaves a bajas temperaturas de servicio, reducir el agrietamiento, obtener mezclas más rígidas a altas temperaturas, reducir la formación de surcos, reducir la viscosidad, aumentar la estabilidad y resistencia de las mezclas, mejorar la resistencia a la abrasión, la resistencia a la fatiga y la resistencia a la oxidación y al envejecimiento, reducir el espesor estructural y los costos de vida de los pavimentos. Los estudios consultados demostraron que se pueden lograr mejoras en el pavimento de carreteras y en la construcción de hormigones mediante la adición de pequeñas cantidades de polímeros.

**3.3.2.2 *Caucho en la construcción de carreteras.*** La viscosidad es muy importante para medir el rendimiento del asfalto modificado con caucho desmenuzado, así como también para la interacción entre cemento asfáltico y el modificador de caucho desmenuzado. (Sun & Li, 2010) realizaron un artículo en el cual investigaron el cambio gradual en la viscosidad de asfalto modificado a lo largo del tiempo a diferentes temperaturas elevadas y analizaron las influencias del método de mezcla, el tamaño de las partículas de caucho desmenuzado y el contenido en la viscosidad.

En cuanto al efecto del contenido de GCR en la viscosidad (Sun & Li, 2010) “indicaron que los datos muestran que la viscosidad del asfalto modificado aumenta a medida que aumenta el contenido de GCR; Además, cuando el contenido de GCR es inferior al 15%, el efecto del contenido de GCR sobre la viscosidad no es significativo, cuando el contenido de GCR es superior al 15%, la viscosidad aumenta rápidamente, para los materiales dados y la condición de reacción, hay un punto crítico en el contenido de GCR (al 15%) que afecta la velocidad de aumento de la

viscosidad. El punto crítico en el contenido de GCR es valioso para seleccionar un contenido de GCR factible para la producción y aplicación del asfalto modificado”. Los resultados se pueden ver en el Apéndice K.

La dirección regional de viabilidad de Chile, inspecciono problemas de agrietamiento térmico y deformaciones debido a las condiciones climáticas de la región de Aysén y “decidió pavimentar un tramo de prueba de 500 m de longitud, utilizando un pavimento con una mezcla asfáltica con ligante modificado con migas de caucho, con el fin de evaluar posteriormente la posibilidad de aplicarlo con mayor frecuencia en los programas de pavimentación” (Ramírez Palma, 2006). Después de realizar una serie de “estudios determinaron que la temperatura de digestión que otorga mejores resultados para las mezclas con caucho es a la máxima posible, en este caso a 170°C. Por esto analizaron los parámetros Marshall, para determinar el valor óptimo de asfalto para los diseños con esta temperatura y los distintos porcentajes de adición de caucho. Los resultados experimentales de este estudio se encuentran en el Apéndice L. Las conclusiones de este estudio fueron”: (Ramírez Palma, 2006).

- “El mayor valor para resistencia diametral se logra para 0.5% de caucho.
- Según el método CEN a 25°C, los valores mayores de Módulo Resiliente se obtienen para 0.5% de caucho y para 40°C se obtienen con 1%.
- Según el método ASTM, los valores mayores de Módulo Resiliente se tienen entre 0.5% y 1% de caucho.
- Las mezclas con 0.5% de caucho, presentan menor sensibilidad al cambio en el número de ciclos, por aumento de carga” (Ramírez Palma, 2006).

“Un laboratorio de análisis y diagnóstico medioambiental realizó un estudio que muestra que el caucho no se considera peligroso para la salud humana o el medioambiente y que los lixiviados

que el material pudiera generar no se considera peligroso para el suelo o el agua subterránea” (Valero Martínez et al., 2010).

En Ecuador se realizaron modificaciones al asfalto mediante el empleo de tres polímeros: SBS, Elvaloy y caucho de llantas. Los efectos que producen los polímeros sobre algunas propiedades del asfalto se pueden ver en el Apéndice F, además, se los mejores resultados se dan en los asfaltos modificados con SBS Y GCR. (Vila Romaní & Jaramillo Briceño, 2018)

Con la finalidad de comparar la resistencia mecánica que pueden aportar los materiales reciclados al asfalto, (Ullauri et al., 2018) realizaron un trabajo de investigación en el que se compara el comportamiento del asfalto con caucho reciclado al 30% y con la mezcla de PET reciclado al 30%.

Los porcentajes de adición son sugeridos debido a que al ser menor al 30%, los cambios en las propiedades mecánicas del nuevo material tienden a ser mínimos. “Del análisis de resultados se puede evidenciar que la deformación del asfalto-caucho es menor comparado con el asfalto-PET, lo cual indica que tiene mayor resistencia a la deformación y podría decirse que mejores propiedades mecánicas” (Ullauri et al., 2018).

### **3.4 Comparación**

A partir de la Tabla 3 se puede conocer de manera clara las diferencias y similitudes que existen con el uso del plástico o del caucho en la modificación de asfaltos.

Tabla 3.

*Comparación entre asfalto modificado con caucho y asfalto modificado con plástico.*

<b>Asfalto modificado con caucho</b>	<b>Asfalto modificado con plástico</b>
Se puede incorporar a la mezcla por vía húmeda y vía seca.	Se puede incorporar a la mezcla por vía húmeda y vía seca.
Aumenta la viscosidad de la mezcla.	Aumenta la viscosidad del ligante.
Aumenta la resistencia a la deformación y a la fatiga.	Mejora la recuperación elástica de la mezcla ante ciclos de carga y descarga.
Mayor respuesta elástica, mayor resistencia al agua y al envejecimiento.	Incremento en la resistencia mecánica, asfalto más rígido y más resistencia al agua.
Flexible a bajas temperaturas y menos plástica a altas temperaturas.	Mejora en la susceptibilidad térmica.
Mejora la resistencia al fisuramiento a bajas temperaturas.	Alta resistencia a la tracción a altas temperaturas.
Disminuye el espesor del pavimento.	Reduce el espesor estructural.
Mayor durabilidad.	Mayor durabilidad.
Menores costos de mantenimiento.	Reduce los costos de vida de los pavimentos.

#### 4. Conclusiones

- A partir de la información recopilada, se evidencia que Colombia es uno de los países que más ha avanzado en la investigación en estos nuevos métodos.
- En la presente revisión del estado del arte, a través de los estudios realizados por varios autores se demuestran que la adición de GCR y de plástico a las mezclas asfálticas, independientemente de su proceso de adición, mejora considerablemente los comportamientos mecánicos de los pavimentos.
- A partir de la Tabla 3 se puede inferir que el caucho reciclado y el plástico son unas fuentes confiables para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, usándolos como agregado mediante el proceso seco o proceso húmedo, la importancia que tiene el reciclaje de neumáticos y plásticos es vital para disminuir la contaminación y reducir notablemente los costos en la construcción de carreteras.
- De acuerdo con los ensayos realizados de fatiga, penetración y ahuellamiento, se puede evidenciar que los materiales presentan comportamientos similares.
- También se puede apreciar que hay beneficios económicos con la implementación de estos materiales en las mezclas, partiendo de que se produce un aumento de la vida útil de los pavimentos (lo que genera una reducción en el mantenimiento de las vías) y de la sustitución del contenido de finos por los materiales reciclados. Sin embargo, estos beneficios se ven reflejados a largo plazo.

- Las investigaciones demuestran que con la implementación de estos materiales se tendrían como resultado vías más durables, reduciendo gastos, mejorando la seguridad y generando un aumento en la mitigación del impacto ambiental.

### Referencias Bibliográficas

- Angelone, S., Cauhapé Casaux, M., Borghi, M., & Martinez, F. O. (2016). Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(5), 1655–1665. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0602-x>
- Angulo Rodriguez, R. A., & Duarte Ayala, J. L. (2005). *Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos*.
- Boada Marcano, M. de los Á., & Reyes Lizcano, F. A. (2013). Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR- 3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 34(1), 13–20.
- Cárdenas Poblador, J., & Fonseca Santanilla, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. *Revista EIA*, 12, 125–137.
- Castro López, W., Rondón Quintana, H., & Barrero Calixto, J. (2016). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Ingeniería*, 21(1), 3. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.1.a01>
- Correa Lesmes, C. A. (2018). *Implementación de mezcla asfáltica modificada con granulo de caucho en el barrio San Carlos de la localidad de Tunjuelito*.
- Diario Occidente. (2019). En Colombia se recicla solo el 7% del plástico. *Diario Occidente*, 6327, 2.
- Díaz Claros, C. M., & Castro Celis, L. C. (2017). Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejoras las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá. In *Universitas Nusantara PGRI Kediri* (Vol. 01).

- Figueroa Infante, A., Fonseca Santanilla, E., & Reyes Lizcano, F. (2009). Caracterización físicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. *Ingeniería y Universidad*, 13(1), 45–70.
- Forigua, J., & Pedraza, E. (2014). *DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS MEDIANTE LA ADICIÓN DE DESPERDICIOS PLÁSTICOS*. 1–32.
- Gawande, A., Zamare, G., Renge, V. C., Tayde, S., & Bharsakale, G. (2012). AN OVERVIEW ON WASTE PLASTIC UTILIZATION IN ASPHALTING OF ROADS Address for Correspondence. *Journal of Engineering Research*, III(II), 1–5.
- Huertas Cadena, G. J., & Cazar Ruiz, J. D. (2013). *Diseño de un pavimento flexible adicionando Tereftalato de Polietileno como material constitutivo junto con ligante asfáltico Ac-20*.
- Resolución 6981 de 2011, 1 (2011).
- Lemus Ballesteros, E. A., Mosquera Benavides, J. L., & Virviescas Barbosa, X. A. (2018). *Estudio de mezclas asfálticas densas con adición de materiales alternativos* (Issue 1). <https://doi.org/1037/0033-2909.I26.1.78>
- Martinez Arguelles, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2018). Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 41–50. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732018000100041>
- Mataute, D., & Casas, D. (2009). DESARROLLO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA UTILIZANDO RESIDUOS PLÁSTICOS. *UNIVERSIDAD EAFIT MEDELLIN*, 2009, 45(1), 1–19. <https://doi.org/10.7202/1016404ar>
- Múnera, J. C., & Ossa, E. A. (2014). Estudio de mezclas binarias Asfalto-Polímero. *Revista Facultad de Ingeniería*, 70, 18–33.
- Peláez Arroyave, G. J., Velásquez Restrepo, S. M., & Giraldo Vásquez, D. H. (2017). Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la literatura. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 27–50. <https://doi.org/10.18359/rcin.2143>

- Ramírez Palma, N. I. (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. In *Universidad de Chile*.
- Reyes, F., & Cornejo, A. (2014). *ESTADO DEL ARTE DE LA CONSTRUCCION CON MATERIAL RECICLABLE*. 1.97.
- Reyes Lizcano, F. A., Madrid Ahumada, M. F., & Salas Callejas, S. X. (2012). Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100. *Infraestructura Vial*, 9(17), 25–34.
- Reyes Ortiz, O. J. (2000). Empleo de basura para mejorar las propiedades mecánicas de una estructura de pavimento. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 9, 85–89. <https://doi.org/10.18359/rcin.1400>
- Sojobi, A. O., Nwobodo, S. E., & Aladegboye, O. J. (2016). Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete. *Cogent Engineering*, 3(1), 1–28. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1133480>
- Sulyman, M., Haponiuk, J., & Formela, K. (2016). Utilization of recycled polyethylene terephthalate (PET) in engineering materials: A review. *International Journal of Environmental Science and Development*, 7(2), 100–108. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2016.v7.749>
- Sun, D. Q., & Li, L. H. (2010). Factors affecting the viscosity of crumb rubber-modified asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 28(15), 1555–1566. <https://doi.org/10.1080/10916466.2010.497007>
- Torres, R., Flores, P., Flores, M., Flores, V., & Mairon, K. (2014). Mezclas asfálticas con materiales reciclados de construcción y demolición para la reparación de pavimentos. *Artículo Revista DeAplicaciones de La Ingeniería Diciembre*, 1(1), 1–100.
- Ullauri, A., Friend, N., & Barzola, J. (2018). Análisis físico-mecánico de morteros asfálticos compuestos a partir de materiales reciclados. *Universidad y Sociedad*, 10(1), 245–254. <https://doi.org/10.3182/20120611-3-IE-4029.00015>

- Valero Martínez, M., Zamora Álvarez, T., Natividad Vivó, P., & Cerdá Casanoves, M. (2010). Estudio prenornativo y elaboración de una guía para prescriptores de pavimentos de caucho: primeros resultados. *Revista de Biomecánica*, 53, 25–27.
- Vásquez, D., & Infante, C. (2016). “ESTUDIO COMPARATIVO DEL MÉTODO CONVENCIONAL Y USO DE LOS POLÍMEROS EVA Y SBS EN LA APLICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.” 1–260.
- Vila Romaní, R., & Jaramillo Briceño, J. G. (2018). Incidencia del empleo de polímeros como modificadores del asfalto. *Revista Lasallista de Investigación*, 15(2), 315–326. <https://doi.org/10.22507/rli.v15n2a24>
- Yoo, P. J., Ohm, B. S., & Choi, J. Y. (2012). Toughening characteristics of plastic fiber-reinforced hot-mix asphalt mixtures. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(5), 751–758. <https://doi.org/10.1007/s12205-012-1384-0>
- Zhang, F., & Hu, C. (2016). The research for crumb rubber/waste plastic compound modified asphalt. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 124(2), 729–741. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5198-4>

## Apéndices

### Apéndice A. Resumen de los resultados de (Martínez Arguelles et al., 2018)

#### 1. Fase inicial

La denominación de los asfaltos modificados fue definida por la combinación de variables involucradas de la siguiente manera: el diseño A-13-165-55 consiste en un asfalto de la refinería de Apiay (A). 13% de GCR, modificado a 165°C durante 55 minutos. Los diseños fueron sometidos a un ensayo de viscosidad, como se puede ver en la Figura 15.

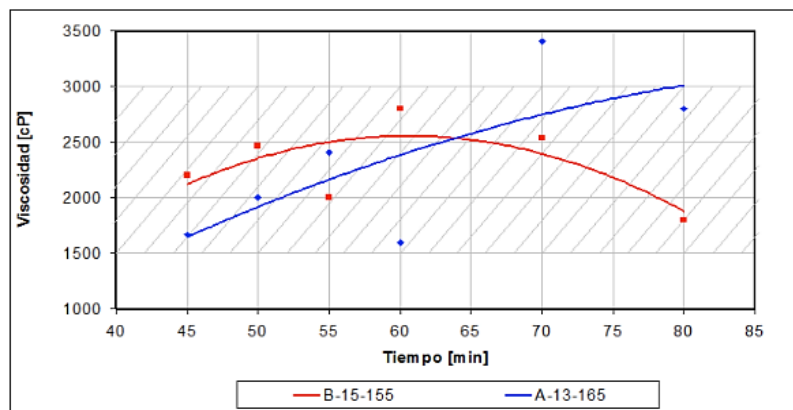


Figura 15. Variación de la viscosidad Brookfield a 163°C respecto al tiempo de mezclado, para los diseños A-13-165 Y B15-155. Adaptado de Martínez Arguelles, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2018). Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 41–50. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732018000100041>

$G^* \sin \delta$  es considerado un indicador del comportamiento en cuanto a la fatiga, menores valores de este indican un menor desempeño frente a este tipo de deterioro. Los asfaltos modificados con GCR presentan mejor indicador que otros asfaltos modificados, como se puede observar en la Figura 16.

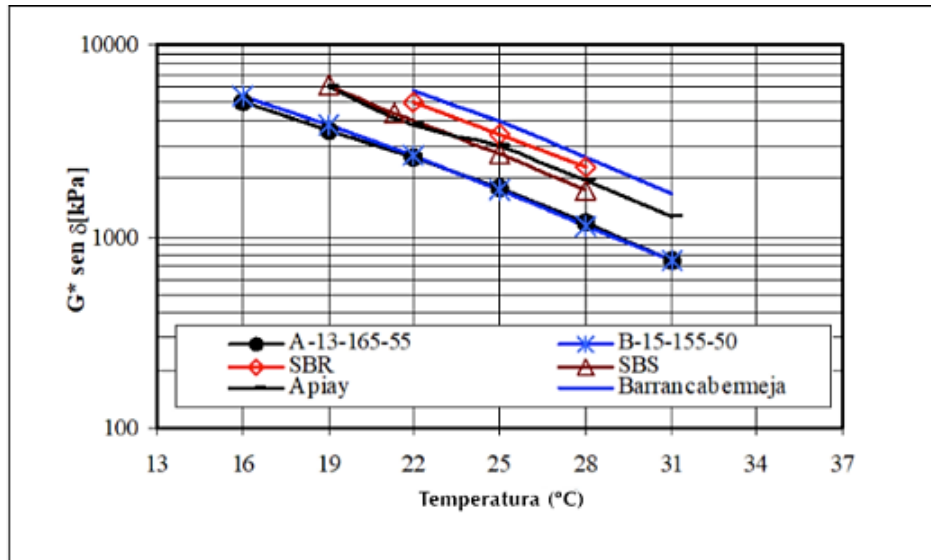


Figura 16. Factor de fatiga para los asfaltos colombianos modificados con GCR vs otros modificadores con polímeros. Adaptado de Martínez Arguelles, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2018). Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 41–50. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732018000100041>

## 2. Fase dos

El carrusel de fatiga (ver Figura 17) está constituido por una pista de prueba de 7 MDC-2 (mezcla densa en caliente tipo 2), sobre la cual se hicieron circular cerca de 210.000 repeticiones de carga de 8.2 ton.

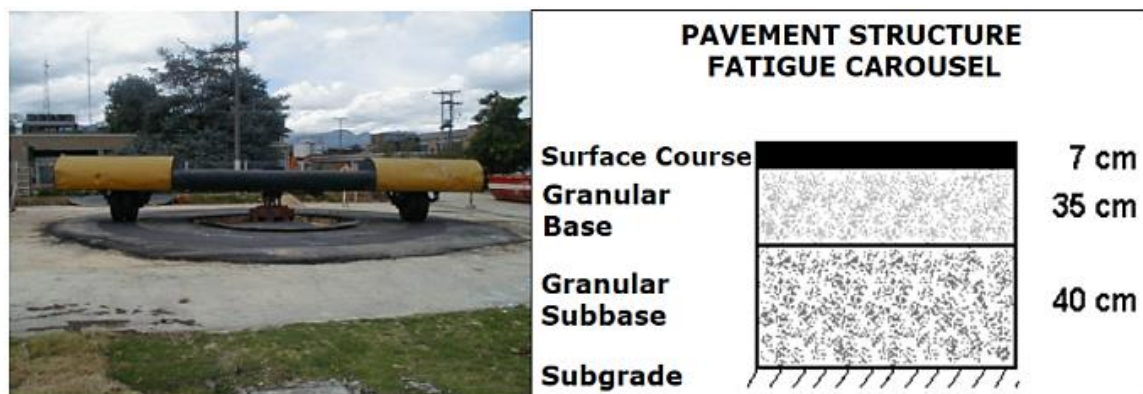


Figura 17. Prueba a escala real carrusel de fatiga Universidad de los Andes. Fuente: Adoptado de Martínez Arguelles, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2018). Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 41–50. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732018000100041>

La Tabla 4 muestra el desempeño que tuvo la mezcla con GCR al 1%, el ahuellamiento de la mezcla convencional fue 5 veces mayor y la densidad de fisuración como indicador de la fatiga mostro diferencias del orden de 8 veces frente al tramo modificado.

Tabla 4.

*Desempeño del carrusel de fatiga después 210.000 repeticiones de 8.2 toneladas.*

Diseño	MDC-2 0%GCR	MDC-2 + 1% GCR
Ensayo	Valores máximos	
Ahuellamiento, mm	49.28	9.96
Deflexión, 10 <sup>-3</sup> mm	254.1	160.8
Densidad de fisuración, cm/m <sup>2</sup>	931	127
Temperatura registrada, °C	48	45

El desempeño del tramo de prueba fue estudiado en una primera etapa durante un año. En la Figura 18, AM indica mezcla con asfalto convencional, ARW indica asfalto modificado con GCR por vía húmeda, PMSBR y PMSBS indican asfaltos comerciales modificados con polímeros. Después de 4 años de servicio, la sección con asfalto convencional presentó la mayor densidad de fisuración, las otras secciones mostraron un desempeño similar demostrando que esta técnica eco-sostenible funciona.

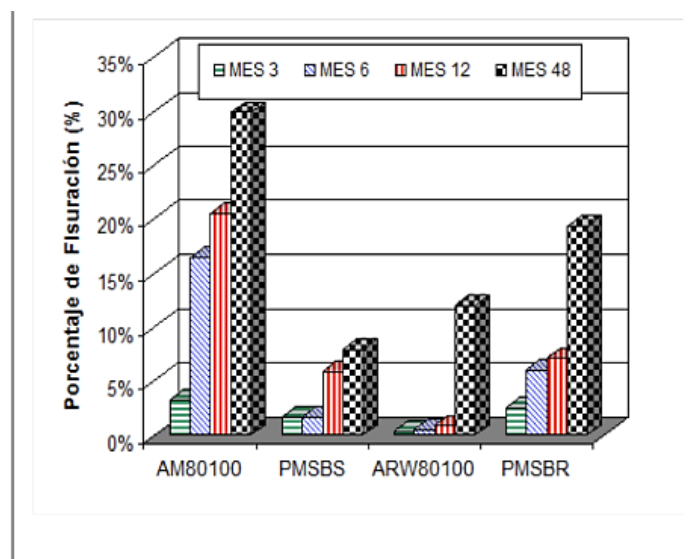


Figura 18. Densidad de fisuración durante (4) años de servicio para mezcla convencional 80-100, asfalto modificado con GCR vía húmeda y con polímeros. Fuente: Adaptado de Martínez Arguelles, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2018). Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 41–50. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732018000100041>

## Apéndice B. Resultados del ensayo realizado por (Múnera & Ossa, 2014)

### 1. *Procedimiento experimental*

Como material base para la modificación se utilizó un asfalto con un grado de penetración 80/100, lo que significa que posee una penetración entre un rango de 80 a 100 dmm. El tamaño de partícula de GCR usado es el retenido en una malla No. 25.

### 2. *Procedimiento de preparación de mezclas*

Las mezclas fueron preparadas a una velocidad de agitación de  $2000 \pm 10$  rpm por un periodo de dos horas a una temperatura entre 180 y 190°C.

### 3. *Pruebas de penetración y punto de ablandamiento*

Los asfaltos con penetración inferior a 30 dmm se consideran asfaltos duros, por lo cual, todas las mezclas modificadas analizadas se consideran duras. Para este caso, con un 15% p/p de GCR se consigue una disminución de alrededor 20 dmm y para el punto de ablandamiento con igual porcentaje se consigue un aumento de 12°C.

La variación de las mezclas del módulo complejo ( $G^*$ ) en un rango de frecuencias ( $\omega$ ), a una temperatura constante de 40°C. En todas las gráficas el módulo complejo aumenta con respecto al aumento del contenido de polímero y las mezclas con 15% de polímero lograron los valores más altos de este módulo.

Como el módulo complejo es una medida de rigidez, el asfalto modificado generó materiales con mayor resistencia a deformarse bajo las condiciones de carga establecidas en este ensayo, como se puede ver en la Figura 19.

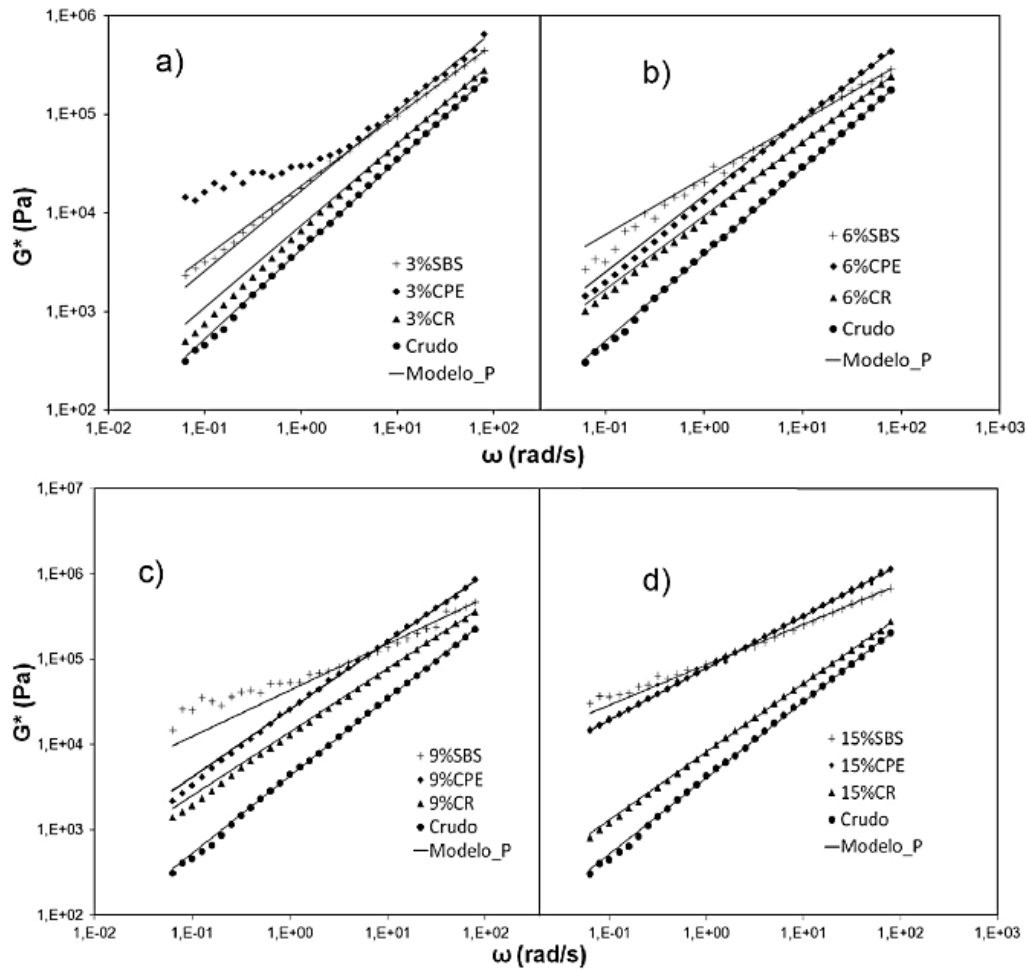
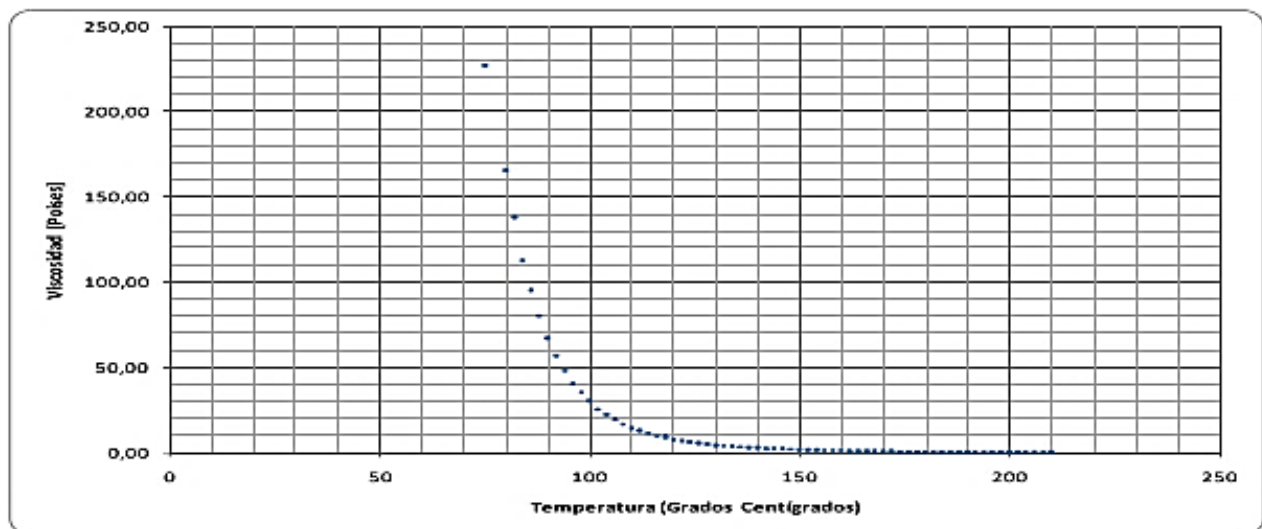


Figura 19. Evolución del módulo complejo  $G^*$  para el asfalto crudo y modificado a) 3%: b) 6%; c) 9% y d) 15% p/p. Fuente: Adoptado de Múnera, J. C., & Ossa, E. A. (2014). Estudio de mezclas binarias Asfalto-Polímero. *Revista Facultad de Ingeniería*, 70, 18–33.

**Apéndice C. Resultados del ensayo realizado por (Cárdenas Poblador & Fonseca Santanilla, 2009).**

El asfalto convencional empleado cuenta con una penetración 70-90 y el asfalto modificado se realizó con un 14% de GCR y 1% de poliestireno. El tamaño de partícula para el poliestireno expandido se encuentra entre el tamiz No. 10 y el tamiz No. 40, y para el GCR el tamaño fue inferior a el tamiz No. 40.

Para realizar el análisis comparativo se tomaron lecturas de viscosidad cada 2°C entre 80 y 200°C, los resultados se presentan en las Figuras 20, 21.



*Figura 20.* Curva reológica del asfalto CIB original. Fuente: Adaptado de Cárdenas Poblador, J., & Fonseca Santanilla, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. *Revista EIA*, 12, 125–137.

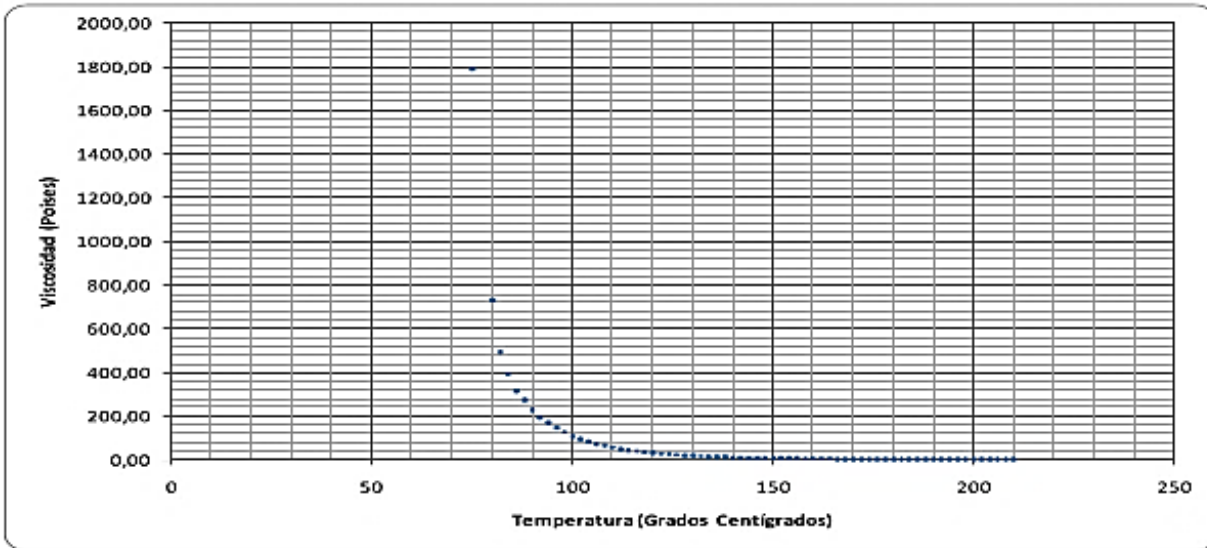


Figura 21. Curva reológica del asfalto CIB modificado con granulometría controlada. Fuente: Adaptado de Cárdenas Poblador, J., & Fonseca Santanilla, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. *Revista EIA*, 12, 125–137.

En la Tabla 5, se presentan los resultados obtenidos en el fraccionamiento por el método SARA (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos).

Tabla 5

*Resultados del análisis SARA realizado al asfalto CIB convencional y modificado.*

Asfalto	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos	Maltenos	IC
CIB convencional	25,16	37,62	28,83	8,39	91,61	0,50
CIB modificado	13,75	20,98	47,43	17,84	82,16	0,46

Con estos resultados se espera que el asfalto modificado presente temperaturas equiviscosas más elevadas que el asfalto convencional y, en consecuencia, mayores temperaturas de mezclado y compactación.

## Apéndice D. Resultados del ensayo realizado por (Castro López et al., 2016).

### 1. Preparación del asfalto modificado

El desecho de polietileno fue obtenido del reciclaje de palillos de coloración blanca, con densidad de  $0.92 \text{ g/cm}^3$  y cortados de tal forma que el tamaño de partícula pasara por el tamiz No. 40 y fuera retenido en el No. 10 (ver Figura 22). Los palillos se mezclaron por vía húmeda en una relación PEBD/CA de 5% a una temperatura entre  $150 \pm 5^\circ\text{C}$  y con un tiempo de mezclado de 40 minutos.



Figura 22. Palillos reciclados de PEBD. Fuente: Adoptado de Castro López, W., Rondón Quintana, H., & Barrero Calixto, J. (2016). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Ingeniería*, 21(1), 3.

### 2. Caracterización del asfalto modificado

Comparación de los resultados del asfalto convencional y el asfalto modificado (ver Tablas 6, 7).

Tabla 6.

*Características generales del CA 60-70.*

Ensayo	Método	Unidad	Recomendado INVIAS [25]	Resultado
<b>Ensayos sobre el asfalto original</b>				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	60-70	65
Índice de penetración	NLT 181/88	-	Entre -1 y +1	-0,8
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1000 mín.	1800
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	>100	>105
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	°C	-	50
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%	>99	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	<0,2	<0,2
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C	232 mínimo	285
<b>Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT</b>				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	1,0 máximo	0,65
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	% (de la penetración original)	48 mínimo	73

Tabla 7.

*Características generales del CA 60-70 modificado con PEBD.*

Ensayo	Método	Unidad	CA 60-70 modificado
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	35
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	55
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	°C	61
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	0,4
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C	301

### 3. Caracterización reológica

Los resultados indican que el grado de desempeño a altas y bajas temperaturas de servicio del asfalto convencional es de 58°C y cuando se modifica con PEBD el grado de desempeño a altas temperaturas aumenta a 70°C como se puede ver en las Tablas 8, 9.

Tabla 8.

*Características reológicas del CA 60-70.*

Temperatura [°C]	Frecuencia [rad/s]	$\delta$ [°]	$G^*$ [Pa]	$ G^* /\sin\delta$ [kPa]	$ G^*  \cdot \sin\delta$ [kPa]
<b>CA 60-70, sin envejecer</b>					
58	10	87	2470	2.473	2.467
64	10	88	1002	1.00	1.00

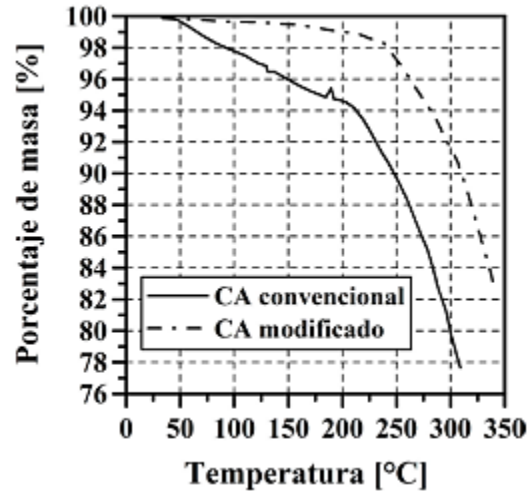
Tabla 9.

*Características reológicas del CA 60-70 modificado.*

Temperatura [°C]	Frecuencia [rad/s]	$\delta$ [°]	$G^*$ [Pa]	$ G^* /\sin\delta$ [kPa]	$ G^*  \cdot \sin\delta$ [kPa]
<b>CA 60-70 modificado con PEBD/CA=5%, sin envejecer</b>					
64	10	68	2566,7	2,77	2,38
70	10	69	1294,3	1,39	1,21

#### 4. Ensayo de termogravimetría (TGA)

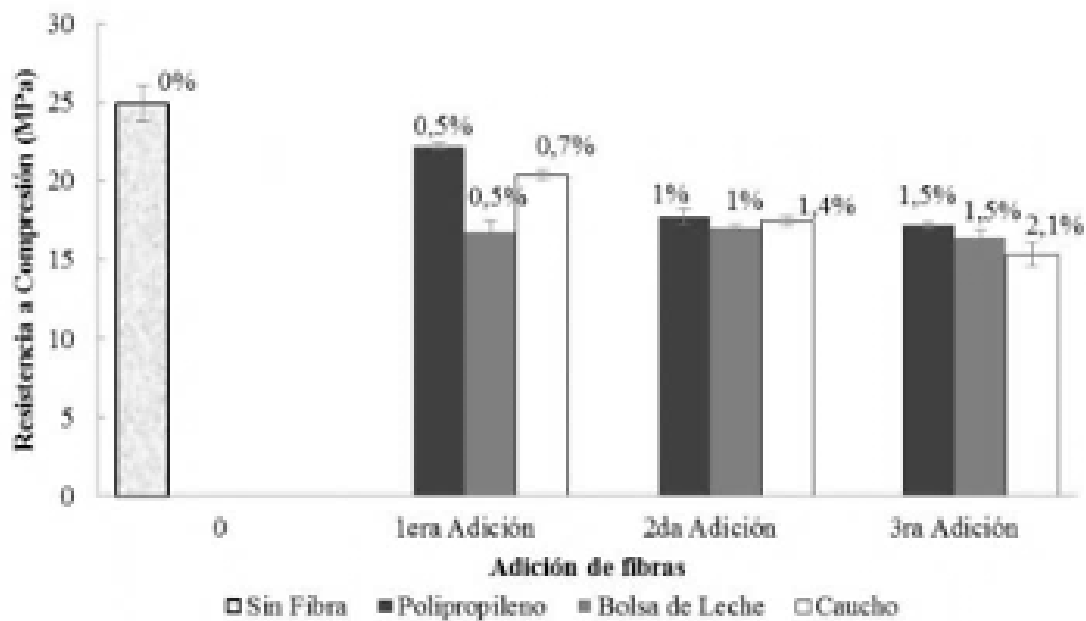
Con este ensayo se evidencia que el asfalto modificado es más estable en todo el rango de temperaturas y puede experimentar menor oxidación y por ende envejecimiento (ver Figura 23).



*Figura 23.* Termograma del CA 60-70 convencional (sin aditivo) y del modificado (PEB/CA=5%).  
Fuente: Adoptado de Castro López, W., Rondón Quintana, H., & Barrero Calixto, J. (2016). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Ingeniería*, 21(1), 3.

**Apéndice E. Resultados del ensayo realizado por (Boada Marcano & Reyes Lizcano, 2013)**

Con cemento Portland tipo III de ARGOS se realizaron 9 diferentes mezclas de las cuales 6 tienen adición de 0.5%, 1% y 1.5% de polipropileno y bolsas de leche, y 3 tienen adición de 0.7%, 1.4% y 2.1% de caucho. Con los diseños de mezcla se elaboraron probetas y vigas para los ensayos.



*Figura 24.* Resistencia a compresión para cada porcentaje de fibra a los 14 días de edad. Fuente: Adoptado de Boada Marcano, M. de los Á., & Reyes Lizcano, F. A. (2013). Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR- 3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 34(1), 13–20.

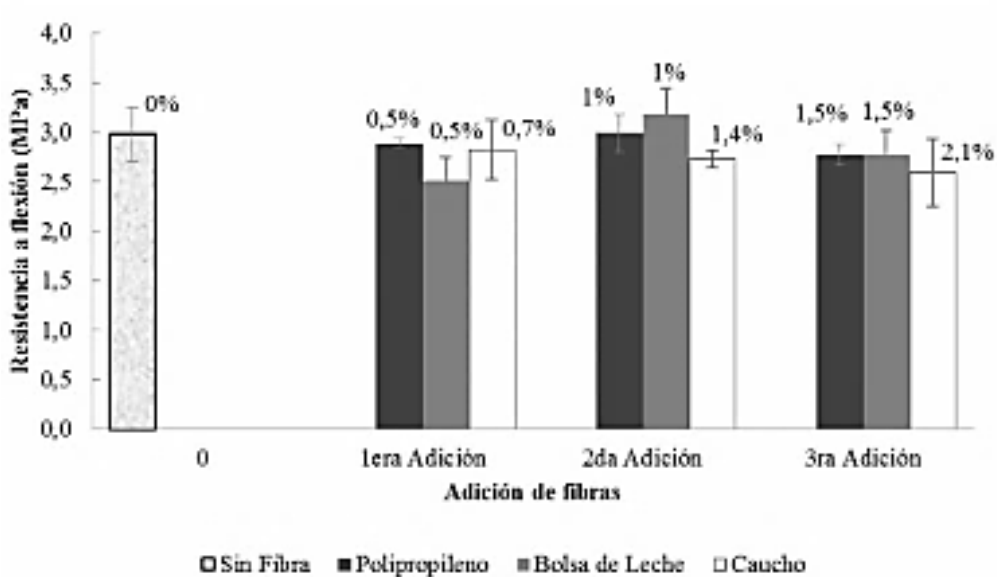


Figura 25. Resistencia a flexión para cada porcentaje de fibra a los 14 días de edad. Fuente: Adoptado de Boada Marcano, M. de los Á., & Reyes Lizcano, F. A. (2013). Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR- 3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 34(1), 13–20.

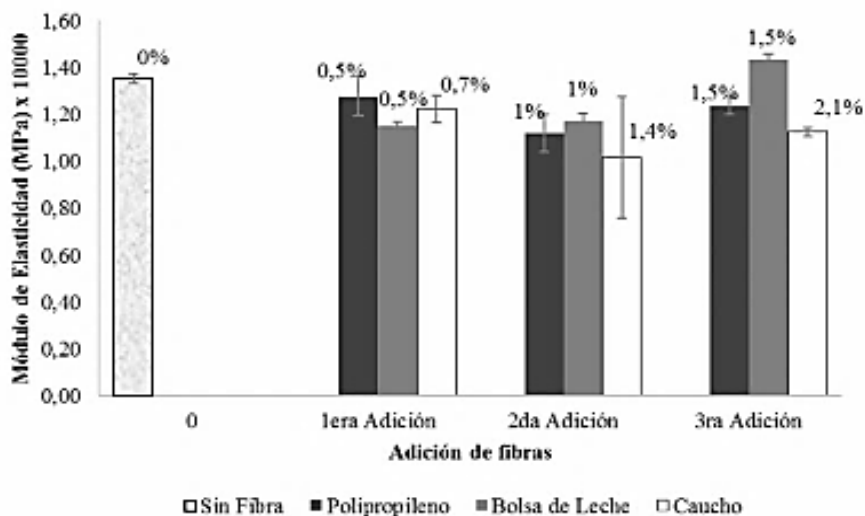


Figura 26. Módulo de elasticidad para cada porcentaje de fibra a los 14 días de edad. Fuente: Adoptado de Boada Marcano, M. de los Á., & Reyes Lizcano, F. A. (2013). Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR- 3.5MPa para pavimento con adición de fibras plásticas. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 34(1), 13–20.

Tabla 10.

*Resistencia con respecto al concreto sin fibras a los 14 días de edad.*

Fibra	% Adición	% Resistencias		% Módulo de elasticidad
		Compresión	Flexión	
Polipropileno	0,5	↓ 10,8%	↓ 2,8%	↓ 5,6%
	1,0	↓ 28,8%	↑ 0,4%	↓ 17,2%
	1,5	↓ 30,9%	↓ 6,8%	↓ 8,6%
Caucho	0,7	↓ 18,2%	↓ 5,2%	↓ 9,7%
	1,4	↓ 29,8%	↓ 8,4%	↓ 25,0%
	2,1	↓ 38,4%	↓ 12,8%	↓ 16,9%
Bolsa de leche	0,5	↓ 32,5%	↓ 15,5%	↓ 14,9%
	1,0	↓ 31,6%	↑ 6,8%	↓ 13,3%
	1,5	↓ 34,3%	↓ 6,8%	↑ 6,0%
		↓: disminución	↑: aumento	

**Apéndice F. Resultados del ensayo realizado por (Vila Romaní & Jaramillo Briceño, 2018)**

Tabla 11.

*Resultados de las pruebas en el asfalto con SBS.*

Propiedades	Unidad	Asfalto con SBS	ASTM D- 5892-00 Designación IV-F	
		mín	máx	
Viscosidad dinámica, 60 °C	Pa.s	1800	800	-
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm <sup>2</sup> /s	1454		3000
Penetración, 25°C, 100 g, 5s	0,1 mm	47	35	-
Punto de inflamación	°C	298	232	-
<b>Residuo RTFO (163°C, 85 min)</b>				
Penetración, 4°C, 200 g, 60s	0,1 mm	39	10	-
Recuperación elástica, 25C, 10 cm elongación	%	70	70	-

Tabla 12.

*Resultados de las pruebas en el asfalto con Elvaloy.*

Propiedades	Unidad	Asfalto con ELVALOY	ASTM D- 5841-00 Designación III-D	
		mín	máx	
Punto de ablandamiento	°C	66	60	-
Penetración, 25°C, 100 g, 5s	0,1 mm	63	30	150
Penetración, 4°C, 200 g, 60s	0,1 mm	45	22	-
Punto de inflamación	°C	293	218	-
<b>Residuo RTFO (163°C, 85 min)</b>				
Penetración, 4°C, 200 g, 60s	0,1 mm	27	11	-

Tabla 13.

Resultados de las pruebas en el asfalto con caucho.

Propiedades	Unidad	Asfalto con CAUCHO mín	ASTM D- 6114-00 TIPO II	
			mín	máx
Punto de ablandamiento	°C	60	54,4	-
Penetración, 25°C, 100 g, 5s	0,1 mm	38	25	75
Penetración, 4°C, 200 g, 60s	0,1 mm	36	15	-
Punto de inflamación	°C	308	232	-
<b>Residuo RTFO (163°C, 85 min)</b>				
Penetración retenida, 4°C	% del original	77	75	-

Tabla 14.

Resultados y Exigencias.

PROPIEDAD		RESULTADOS				EXIGENCIA
		BASE	SBS	ELVALOY	CAUCHO	
		Ligante original				
Punto de inflamación, °C		295	298	293	308	230 mín
Viscosidad, Pa.s	135°C	0,348	1,454	2,383	1,100	3,0 máx
	46°C	18,60	52,70	25,30	38,00	
	52°C	7,86	26,90	13,10	18,20	
	58°C	3,34	13,30	7,20	8,62	
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	64°C	1,47	6,79	4,05	4,51	1,0 mín
	70°C	0,66	3,38	2,38	2,43	
	76°C		1,73	1,45	1,41	
	82°C		0,92	0,92	0,89	
Residuo RTFOT (163°C, 85 min)						
Pérdida de masa, %		-0,02	0,06	0,06	0,07	1,0 máx
	46°C	58,70	125,00	57,90	90,20	
	52°C	25,80	65,30	31,70	43,80	
	58°C	11,00	33,30	17,20	22,20	
Módulo de Corte Dinámico (G* x sinδ, 10 rad/seg), kPa	64°C	4,87	17,30	9,64	10,90	2,2 mín
	70°C	2,20	9,79	5,57	5,83	
	76°C	1,16	5,54	3,39	3,12	
	82°C		3,21	2,14	1,67	
Residuo envejecido PAV (100°C, 300 psi, 20 hr)						
Módulo de Corte Dinámico (G* x sinδ, 10 rad/seg), kPa	37°C		551	392	355	5000 máx
	34°C		759	544	521	
	31°C	708	1070	762	761	
	28°C	1020	1500	1100	1090	
	25°C	1480	2070	1500	1540	
	22°C	2126	2820	2250	2130	
	19°C	3060	3800	3160	2920	
	16°C	4230	5050	4410	3970	
	13°C	5800		6140	5310	
Rigidez, MPa (60 s)	-30°C	728				300 máx
Valor m		0,199				0,300 mín
Rigidez, MPa (60 s)	-24°C	457	271	471	360	300 máx
Valor m		0,262	0,254	0,260	0,269	0,300 mín
Rigidez, MPa (60 s)	-18°C	240	204	218	191	300 máx
Valor m		0,317	0,290	0,316	0,304	0,300 mín
Rigidez, MPa (60 s)	-12°C		100			300 máx
Valor m			0,319			0,300 mín
<b>GRADO PG SUPERPAVE</b>		<b>64-28</b>	<b>76-22</b>	<b>76-28</b>	<b>76-28</b>	<b>XXX</b>

**Apéndice G. Resultados del ensayo realizado por (Forigua & Pedraza, 2014)**

La materia prima utilizada como aditivo en este trabajo consistió en trozos de bolsas plásticas que se dosificaron en 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% y 0.5% para la realización de los ensayos.

Tabla 15.

*Resumen de parámetros Marshall en función del porcentaje de desperdicio plástico.*

% Trozos de bolsas de plástico	Golpes	Estabilidad (Lb)	Flujo (1/100")	Peso Unitario mezcla (Ton/m <sup>3</sup> )	Módulo de Rigidez (kg/cm <sup>2</sup> )
0,1	25	375,47	13,79	2111	14,42
0,2	25	429,74	14,14	2129	103,86
0,3	25	584,65	15,94	2169	125,35
0,4	25	950,65	16,65	2202	195,12
0,5	25	699,25	15,32	2193	155,98
0,1	50	606,55	24,37	2134	85,06
0,2	50	1110,25	22,74	2173	166,85
0,3	50	1939,38	27,85	2240	237,98
0,4	50	2084,28	27,97	2245	254,66
0,5	50	1684,43	24,4	2222	235,92
0,1	75	1339,6	27,64	2188	165,63
0,2	75	1809,97	22,74	2234	272,01
0,3	75	2220,66	26,11	2255	290,66
0,4	75	2591,06	22,78	2256	388,71
0,5	75	2522,87	29,27	2238	294,56

Después de analizar las probetas por medio del ensayo Marshall, se obtuvo que el porcentaje óptimo de asfalto equivalente al 6.73%.

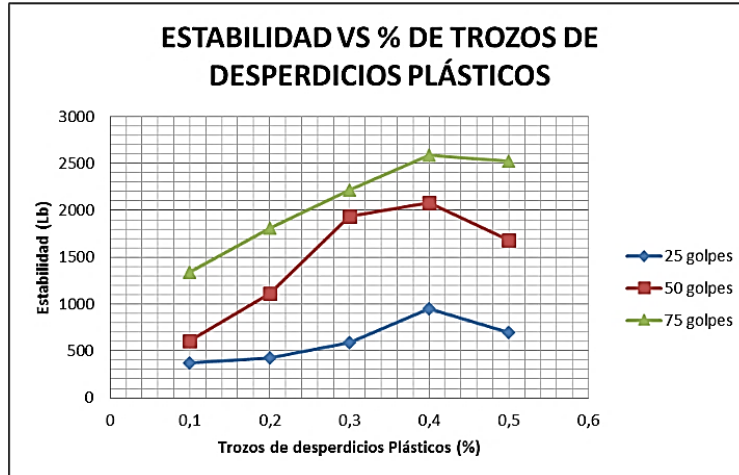


Figura 27. Estabilidad vs. Porcentaje de trozos de desperdicios plásticos. Adoptado de Forigua, J., & Pedraza, E. (2014). Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos. 1–32.

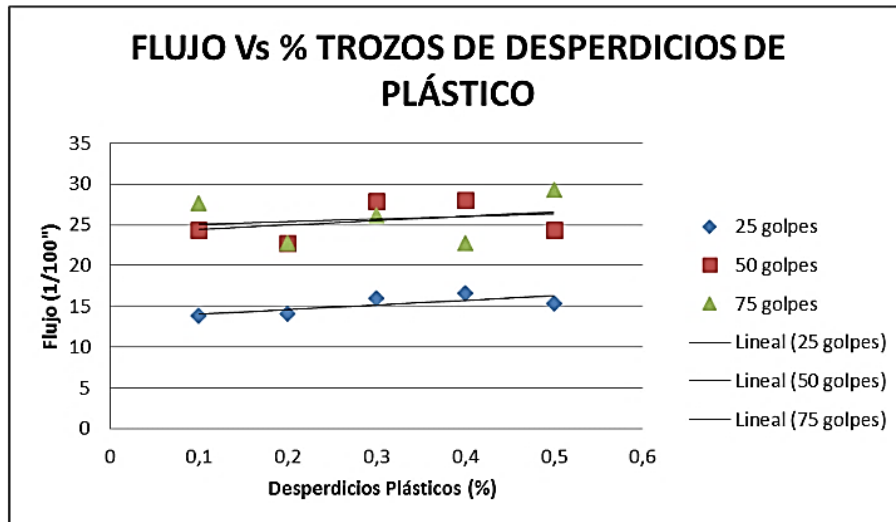


Figura 28. Flujo vs. trozos de desperdicios plásticos. Adoptado de Forigua, J., & Pedraza, E. (2014). Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos. 1–32.

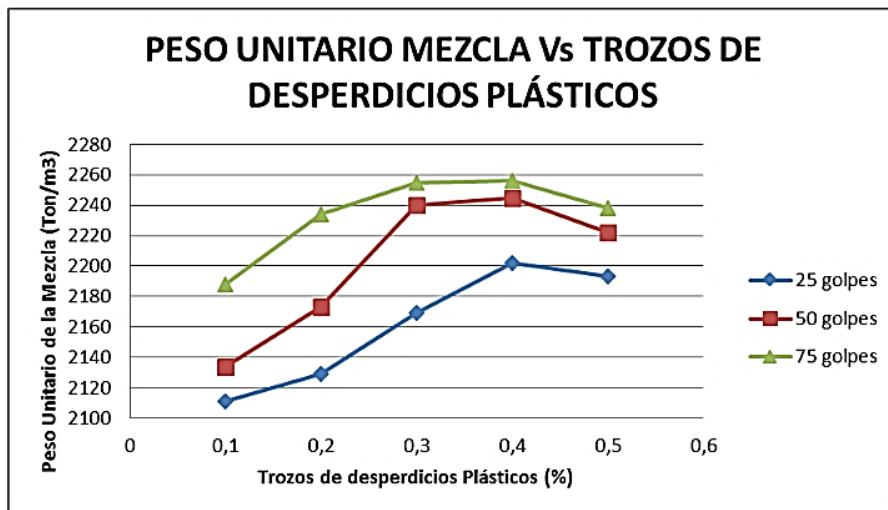


Figura 29. Peso unitario de mezcla vs. Trozos de desperdicios plásticos. Adoptado de Forigua, J., & Pedraza, E. (2014). Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos. 1–32.

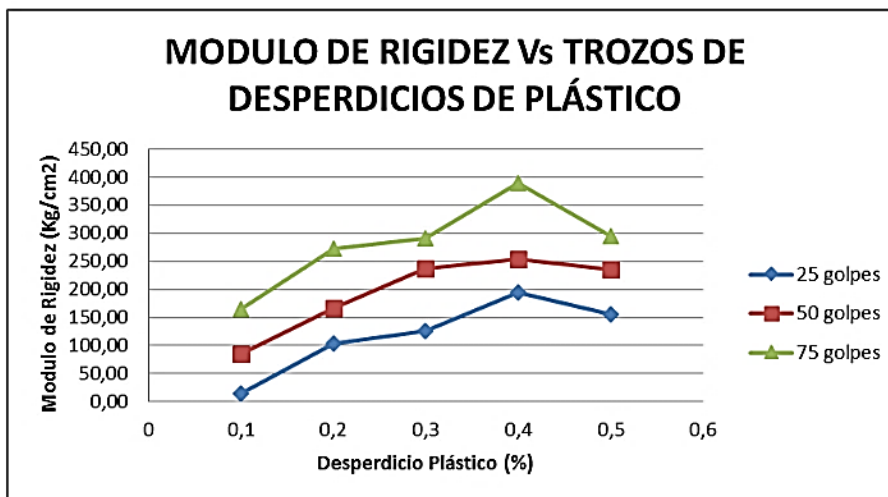


Figura 30. Módulo de rigidez vs. Trozos de desperdicios plásticos. Adoptado de Forigua, J., & Pedraza, E. (2014). Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos. 1–32.

**Apéndice H. Resultados del ensayo realizado por (Lemus Ballesteros et al., 2018)**

Con el fin de determinar la reducción alcanzable de las temperaturas de producción / compactación de mezclas de asfalto caucho (AR), se determinó una mezcla de control la cual tenía un porcentaje de asfalto caucho y de vacíos que fueron la base para realizar la comparación adicionando cera carnauba y aceite de palma. La mezcla de control (MAR) era una mezcla de AR que contenía un 6.5% de asfalto caucho y una relación de volumen de aire del 4%.

Las dos mezclas utilizadas para el experimento fueron mezclas dosificadas, con 6.5% de asfalto caucho y los aditivos utilizados fueron: (MAR+5C) una cera de carnauba (5% del peso del asfalto) y (MAR+1AP) aceite de palma (1% del peso del asfalto).

Para determinar la posible reducción de temperatura que estos aditivos podrían permitir se realizó el estudio de la densidad especifica bulk utilizando el método de saturación superficial seca (SSD), que no tiene en cuenta el contenido de vacío de aire en el área periférica de la muestra, la medición de la densidad especifica bulk se llevó a cabo después de la compactación (75 golpes / lado).

En el estudio de densidad especifica bulk se tomó el mismo contenido de vacío de aire para las mezclas MAR+5C y MAR+1AP que la mezcla de control MAR (4%), los resultados muestran que en el caso de la mezcla MAR+5C, la reducción de temperatura fue aceptable a 15°C y para la mezcla MAR+1AP 10°C.

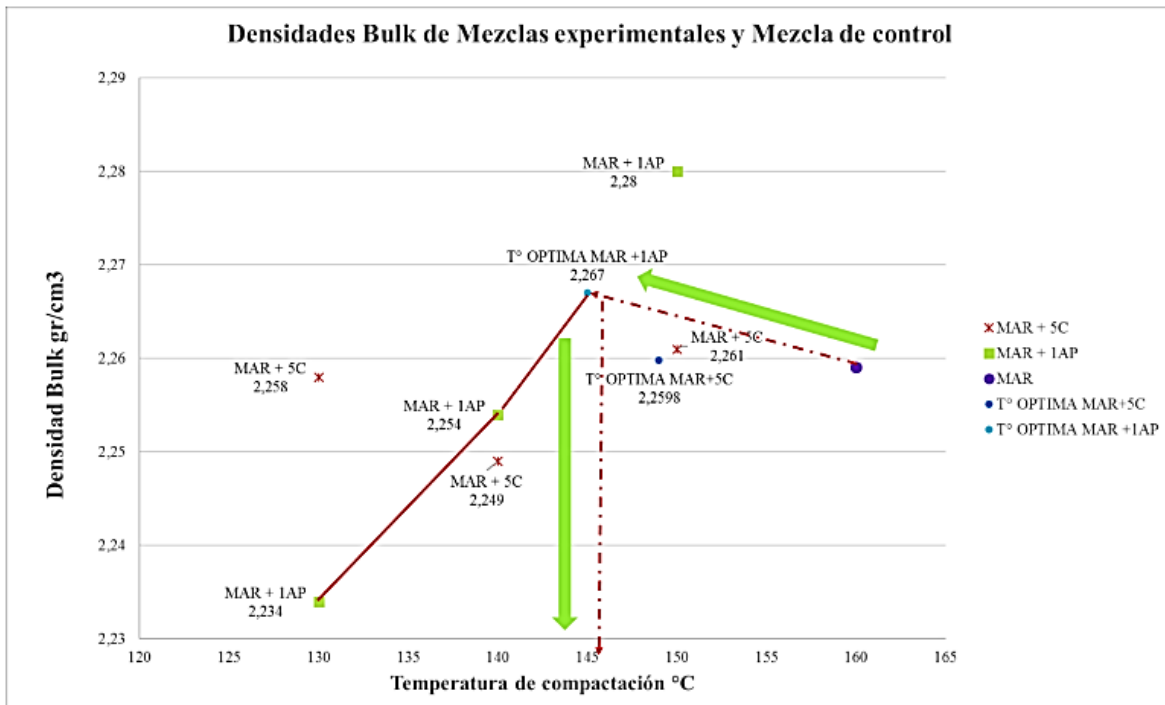


Figura 31. Densidades Bulk de Mezclas experimentales y Mezcla de control. Adoptado de Lemus Ballesteros, E. A., Mosquera Benavides, J. L., & Virviescas Barbosa, X. A. (2018). Estudio de mezclas asfálticas densas con adición de materiales alternativos (Issue 1). <https://doi.org/10.377/0033-2909.I26.1.78>

El modelo experimental se realizó a diferentes temperaturas; estos corresponden a una reducción de 10 ° C, 20 ° C y 30 ° C en comparación con la mezcla de control que se compactó a 160 ° C.

La temperatura de compactación que se determinó como óptima es de 145°C que corresponde a la temperatura que da como resultado un contenido de vacíos con aire similar al de la mezcla de control (4%).

Tabla 16.

*Temperaturas de producción y compactación de las mezclas empleadas en el experimento.*

MEZCLA	T°m °C	T°c °C	D. Bulk g/cm <sup>3</sup>
MAR	170	160	2,259
T° OPTIMA MAR+5C	159	149	2,2598
T° OPTIMA MAR +1AP	155	145	2,267
	140	130	2,258
MAR + 5C	150	140	2,249
	160	150	2,261
	140	130	2,234
MAR + 1AP	150	140	2,254
	160	150	2,280

Para la mezcla MAR+5C las temperaturas de producción / compactación podrían reducirse hasta en 10°C ya que se mantiene en un rango de densidad similar al de la mezcla de control, y es donde encontramos la temperatura óptima de compactación.

Para la mezcla MAR+1AP la reducción es de aproximadamente 15°C dando el resultado óptimo de este estudio, en donde se determina que gracias a la adición de aceite de palma en un porcentaje del 1% respecto al peso del asfalto, se logra disminuir la temperatura de compactación y mezclado.

Tabla 17.

*Reducción de las temperaturas de fabricación y compactación empleando los ácidos grasos de origen natural en las mezclas asfálticas experimentales.*

MEZCLA	REDUCCION EN TEMPERATURA DE COMPACTACION / PRODUCCION
MAR + 5C	10°C
MAR + 1AP	15°C

## Apéndice I. Resultados del ensayo realizado por (Angelone et al., 2016)

Tabla 18.

Grados de correlación de cada factor con viscosidad. Tomado de (Sun & Li, 2010)

Correlation degrees of each factor with viscosity	
Factors	Correlation degree
Curing temperature	0.8192
Mixing time	0.6915
CRM particle size	0.7867
CRM content	0.8476

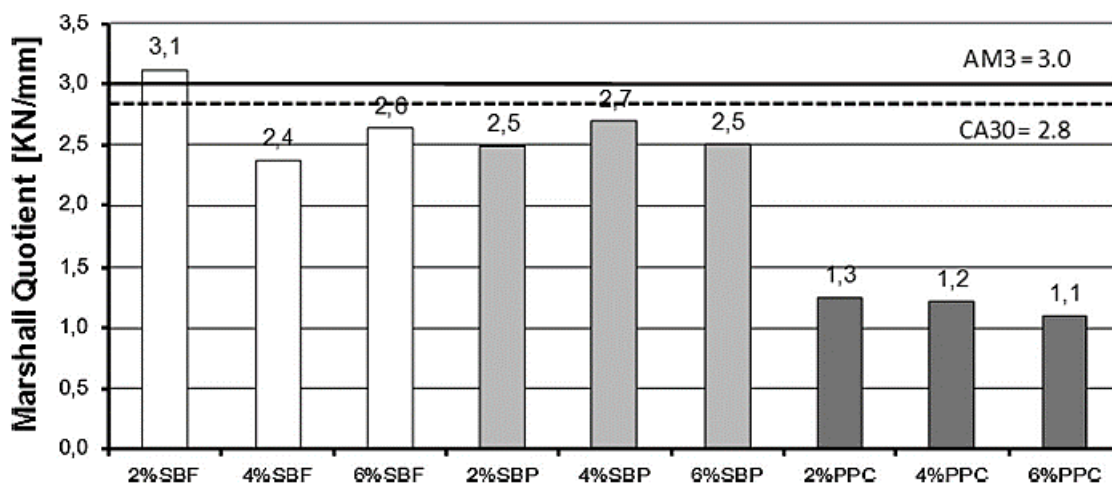


Figura 32. Cociente de Marshall. Adoptado de Angelone, S., Cauhapé Casaux, M., Borghi, M., & Martínez, F. O. (2016). Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(5), 1655–1665. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0602-x>

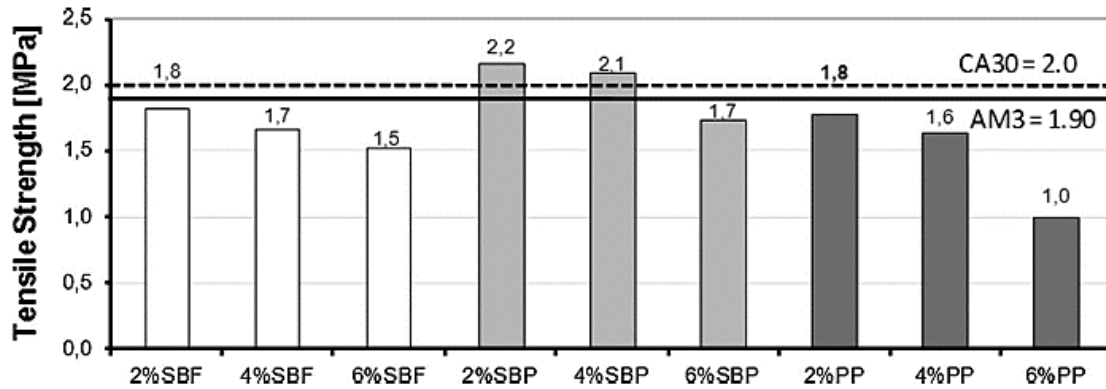


Figura 33. Fuerza de tensión. Adaptado de Angelone, S., Cauhapé Casaux, M., Borghi, M., & Martínez, F. O. (2016). Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(5), 1655–1665. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0602-x>

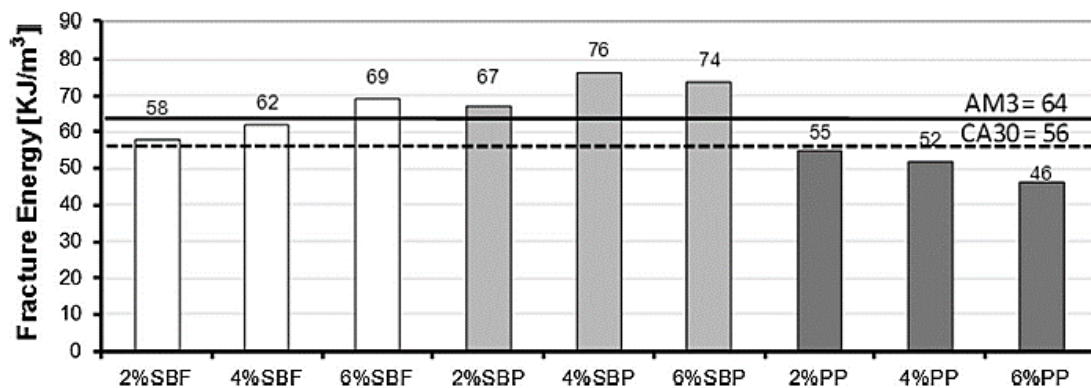


Figura 34. Energia de fractura. Adaptado de Angelone, S., Cauhapé Casaux, M., Borghi, M., & Martínez, F. O. (2016). Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(5), 1655–1665. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0602-x>

**Apéndice J. Resultado del ensayo realizado por (Huertas Cadena & Cazar Ruiz, 2013)**

Se pudo observar que el PET triturado retenido en el tamiz #4 y pasante del tamiz 3/8", con un porcentaje de vacíos del 4% en la mezcla, presenta valores menores en estabilidad al compararlo con una briqueta tradicional con un porcentaje óptimo de asfalto de 6.5% y al 4% de vacíos, y a su vez muestra valores superiores en flujo tanto para la briqueta normal como para los límites de la norma NEVI-12, por lo tanto, se puede concluir q esta forma de incorporar el Tereftalato de Polietileno no representa una mejora en la estructura del pavimento.

Al comparar briquetas tradicionales las cuales contienen un porcentaje óptimo de asfalto, así como también un 4% de vacíos de diseño, con briquetas a la cuales se le incorporo un porcentaje óptimo de PET tipo fibra para obtener un porcentaje de vacíos del 4%, se observó que las briquetas modificadas con PET presentan valores superiores de estabilidad y flujo, concluyendo así que se obtuvo un pavimento más resistente, pero a su vez con mayor capacidad de deformación.

Con respecto al PET Tipo 1 dispuesto en forma de fibra, se recomienda que sea perpendicular al efecto de la carga de los vehículos para aprovechar en su totalidad la resistencia a flexión y sobre todo a tracción ofrecidos por cada fibra, esto lamentablemente puede dificultar su puesta en obra y por ende su correcta trabajabilidad.

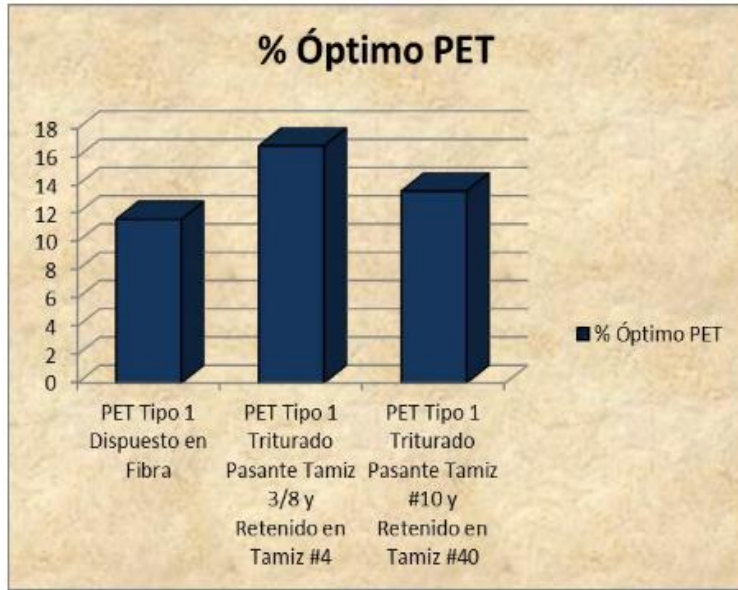


Figura 35. Comparación % Óptimo de PET. Adaptado de Huertas Cadena, G. J., & Cazar Ruiz, J. D. (2013). Diseño de un pavimento flexible adicionando Tereftalato de Polietileno como material constitutivo junto con ligante asfáltico Ac-20.



Figura 36. Comparación de estabilidades. Fuente: Adoptado de Huertas Cadena, G. J., & Cazar Ruiz, J. D. (2013). Diseño de un pavimento flexible adicionando Tereftalato de Polietileno como material constitutivo junto con ligante asfáltico Ac-20.

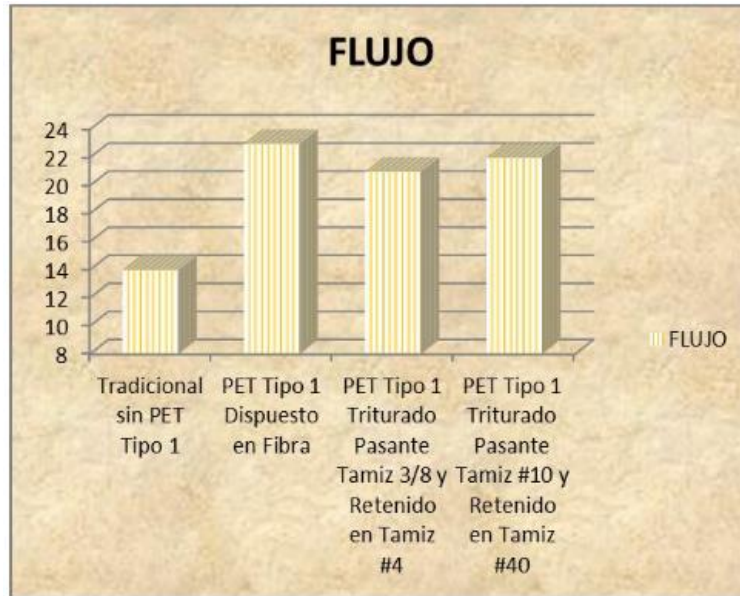


Figura 37. Comparación de flujos. Fuente: Adoptado de Huertas Cadena, G. J., & Cazar Ruiz, J. D. (2013). Diseño de un pavimento flexible adicionando Tereftalato de Polietileno como material constitutivo junto con ligante asfáltico Ac-20.

A grandes rasgos se puede argumentar que se obtuvieron los resultados esperados. Si bien es cierto el plástico provoca una deformación por fuera de la norma hay que tener en cuenta que con el valor aumentado de estabilidad provisto de igual manera por el plástico se va a tener un punto de rotura en un valor más alto. Es decir, que para que la mezcla entre en fluencia y pierda su capacidad dúctil se va a necesitar más carga a pesar de que se deforme en mayor medida luego del dicho punto de fluencia.

En función de los resultados se puede afirmar que la mejor forma de adicionar el PET a la mezcla asfáltica en caliente corresponde al triturado pasante del tamiz #10 y retenido en el tamiz #40 para el cual presentamos los resultados obtenidos y su comparación con la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12:

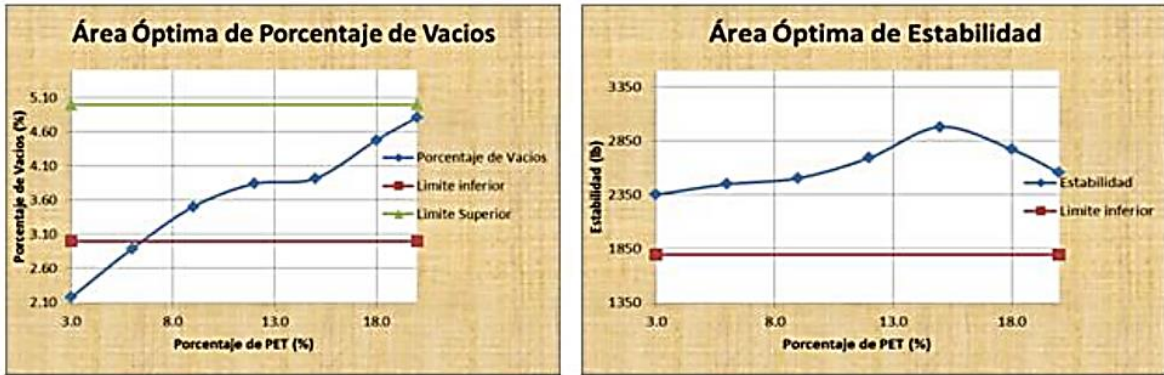


Figura 38. Áreas óptimas de % de vacíos y Estabilidad. Fuente: Adoptado de Huertas Cadena, G. J., & Cazar Ruiz, J. D. (2013). Diseño de un pavimento flexible adicionando Tereftalato de Polietileno como material constitutivo junto con ligante asfáltico Ac-20.

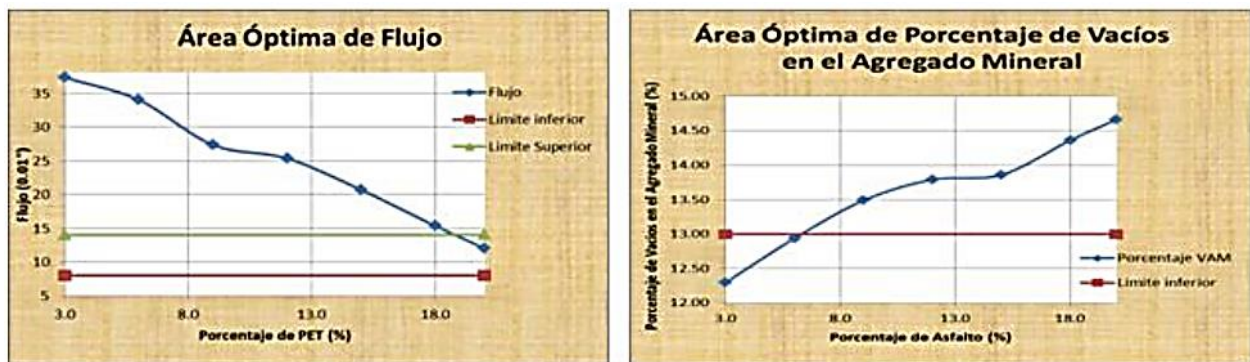


Figura 39. Área óptima de flujo y % de vacíos en el agregado mineral. Fuente: Adoptado de Huertas Cadena, G. J., & Cazar Ruiz, J. D. (2013). Diseño de un pavimento flexible adicionando Tereftalato de Polietileno como material constitutivo junto con ligante asfáltico Ac-20.



Figura 40. Área óptima de % de vacíos llenos de asfalto. Fuente: Adoptado de Huertas Cadena, G. J., & Cazar Ruiz, J. D. (2013). Diseño de un pavimento flexible adicionando Tereftalato de Polietileno como material constitutivo junto con ligante asfáltico Ac-20.

## Apéndice K. Resultados del ensayo realizado por (Sun &amp; Li, 2010)

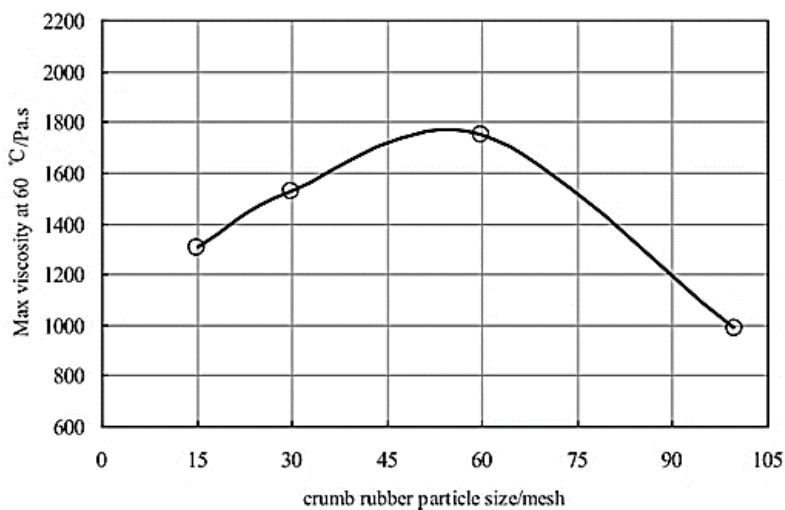


Figura 41. Efecto del tamaño de CRM sobre la viscosidad máxima de CRMA. Adoptado de Sun, D. Q., & Li, L. H. (2010). Factors affecting the viscosity of crumb rubber-modified asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 28(15), 1555–1566. <https://doi.org/10.1080/10916466.2010.497007>

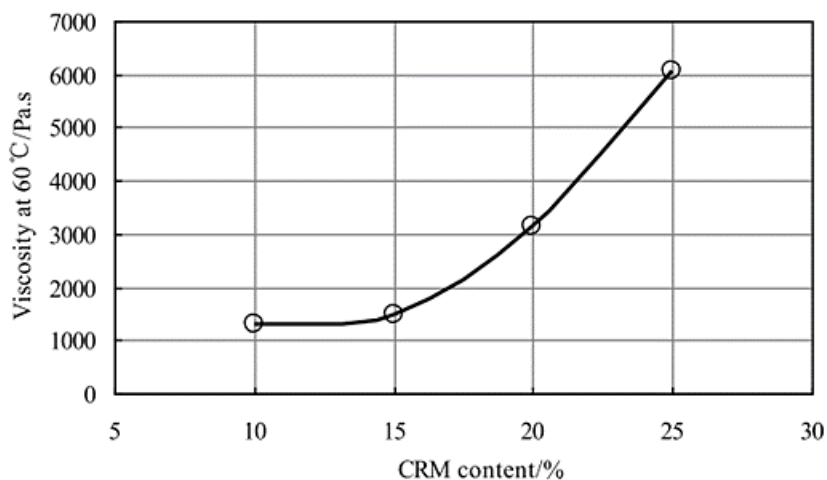
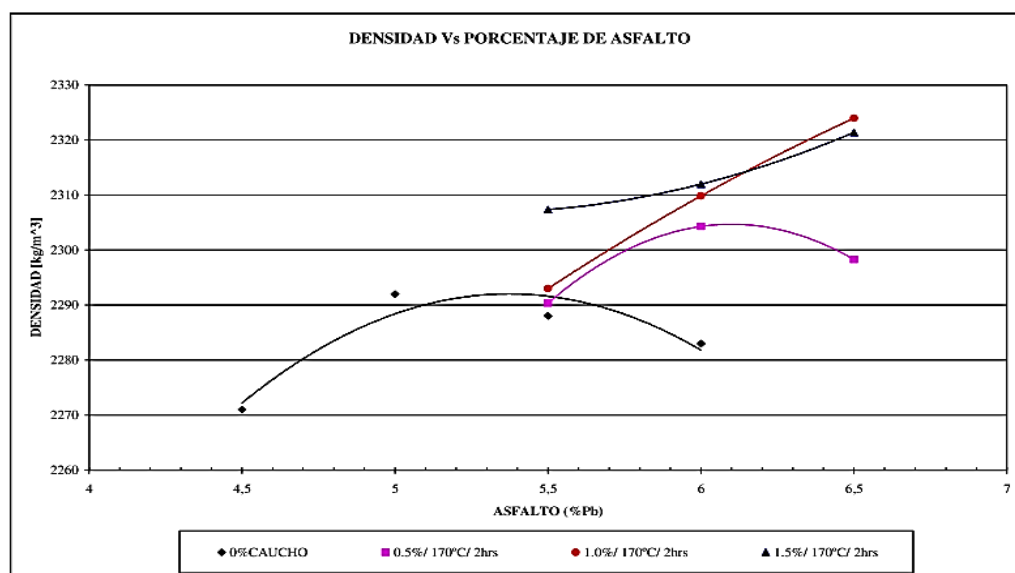


Figura 42. Efecto del contenido de CRM sobre la viscosidad. Adaptado de Sun, D. Q., & Li, L. H. (2010). Factors affecting the viscosity of crumb rubber-modified asphalt. *Petroleum Science and Technology*, 28(15), 1555–1566. <https://doi.org/10.1080/10916466.2010.497007>

**Apéndice L. Resultados del ensayo realizado por (Ramírez Palma, 2006)**

La densidad de las mezclas mejoradas con caucho, fabricadas con una temperatura de digestión de 170° C por dos horas, aumenta a medida que la proporción de caucho se incrementa. El aumento de la densidad puede deberse a que los granos de caucho al interactuar con el ligante se hinchan, aumentando el volumen, por lo que existe mayor recubrimiento de los agregados, lo que lleva a que disminuya la cantidad de huecos.



*Figura 43.* Variación de la densidad respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170° C por dos horas. Adaptado de Ramírez Palma, N. I. (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. En Universidad de Chile.

Las estabilidades obtenidas en la mezcla patrón, cumplen con las especificaciones de la Tabla 4.9. con porcentajes menores a 5.8% de cemento asfáltico (Estabilidad de 9.000 [N]).

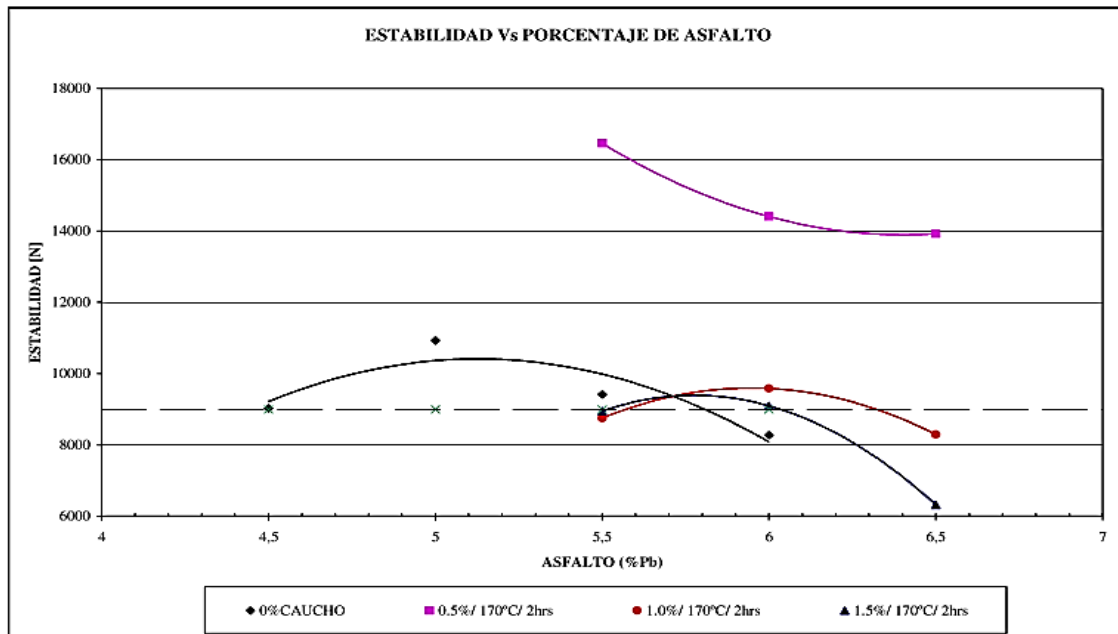


Figura 44. Variación de la estabilidad respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170° C por dos horas. Adaptado de Ramírez Palma, N. I. (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. In Universidad de Chile.

Los valores de fluidez obtenidos se encuentran en el intervalo permitido para carpeta de rodadura, con excepción de la curva con 1% de caucho, que sobrepasa el límite superior especificado a partir de 5.8% de cemento asfáltico.

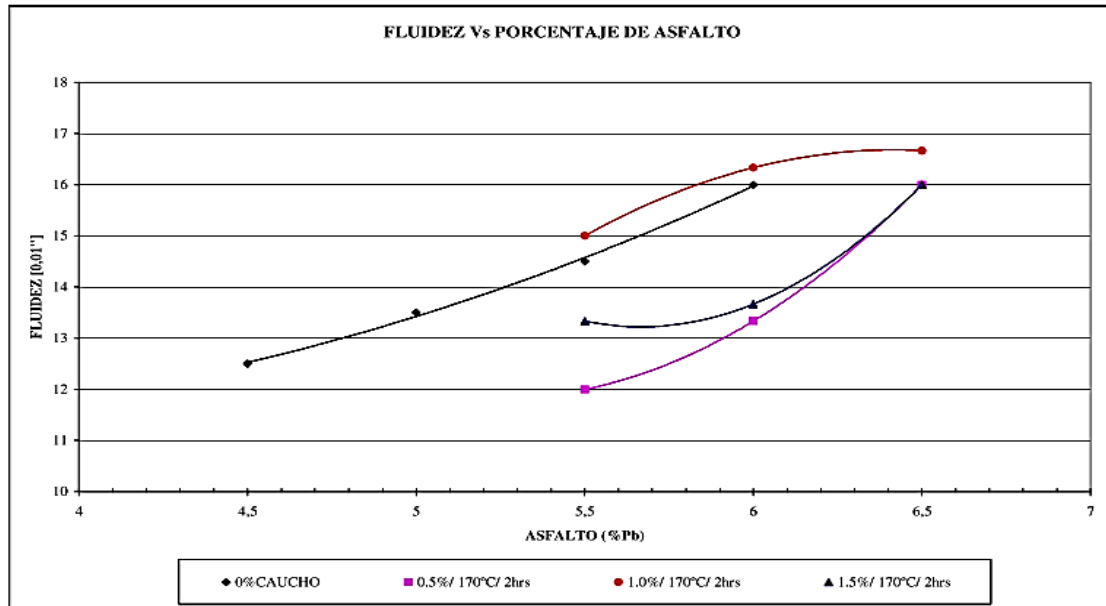


Figura 45. Variación de la fluidez respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170° C por dos horas. Adaptado de Ramírez Palma, N. I. (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. In Universidad de Chile.

La mezcla convencional, patrón, presenta valores para los huecos bastante altos, esto se debe a la granulometría definida por el lado grueso de la banda IV-A-12, a partir del tamiz N°30.

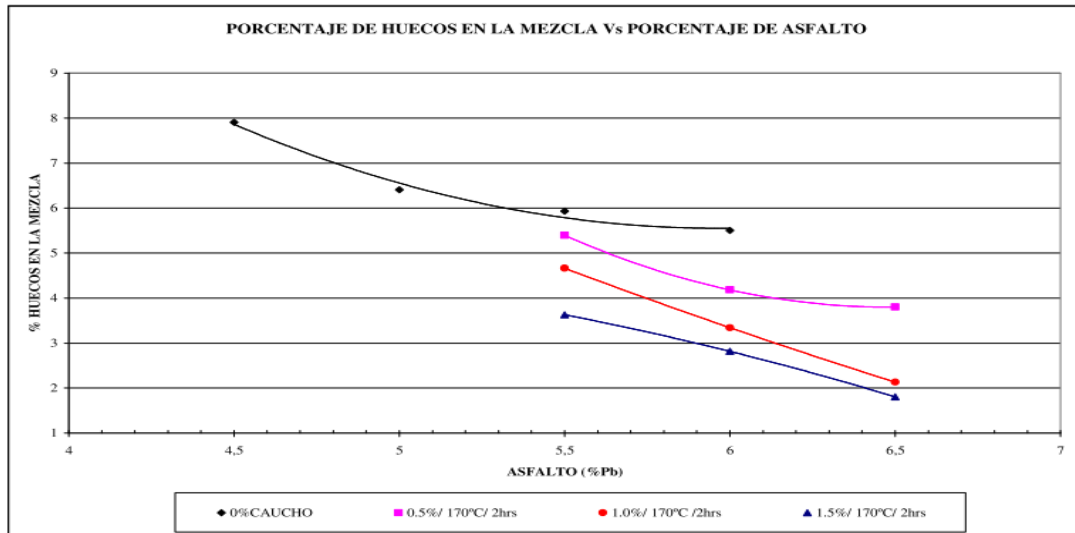


Figura 46. Variación de los huecos en la mezcla respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170°C por dos horas. Adaptado de Ramírez Palma, N. I. (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. In Universidad de Chile.

Se observa que los vacíos en el agregado mineral disminuyen a medida que la proporción de caucho se incrementa. La curva para 0.5% de caucho, tiene la tendencia esperada para este parámetro, al igual que la de la mezcla patrón. Las curvas de 1.0% y 1.5% no tienen la forma esperada.

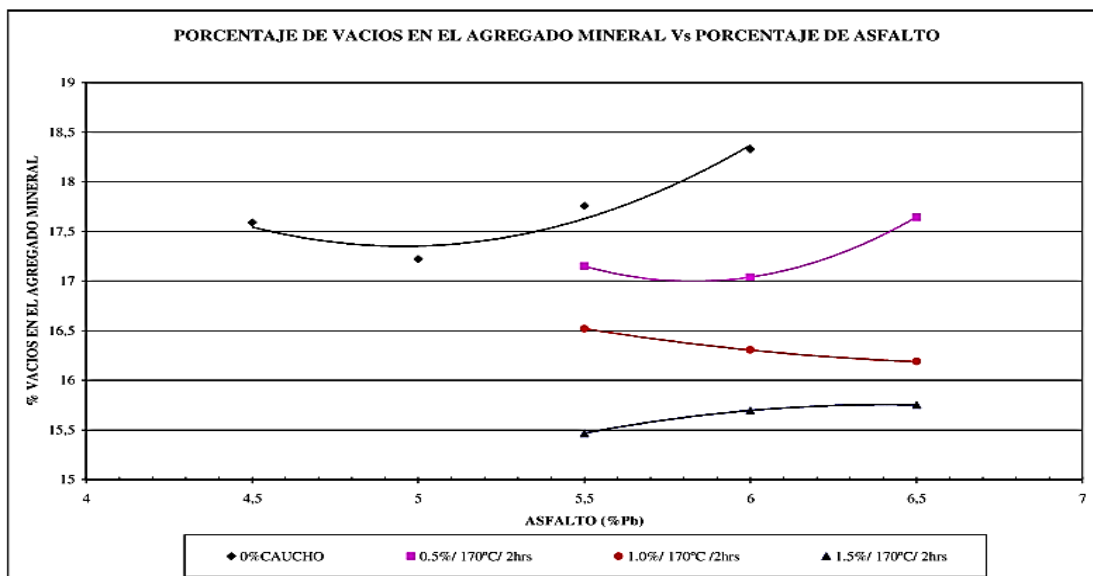


Figura 47. Variación de vacíos en el agregado mineral respecto al porcentaje de cemento asfáltico, para mezclas sin caucho y a 170° C por dos horas. Adaptado de Ramírez Palma, N. I. (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. In Universidad de Chile.

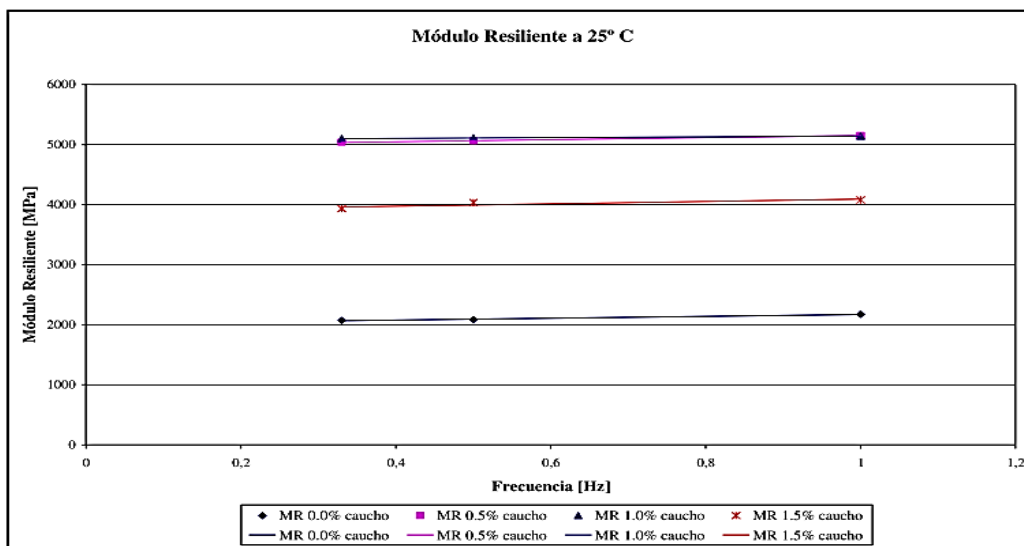


Figura 48. Variación del Módulo Resiliente con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 25° C. Adaptado de Ramírez Palma, N. I. (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. In Universidad de Chile.

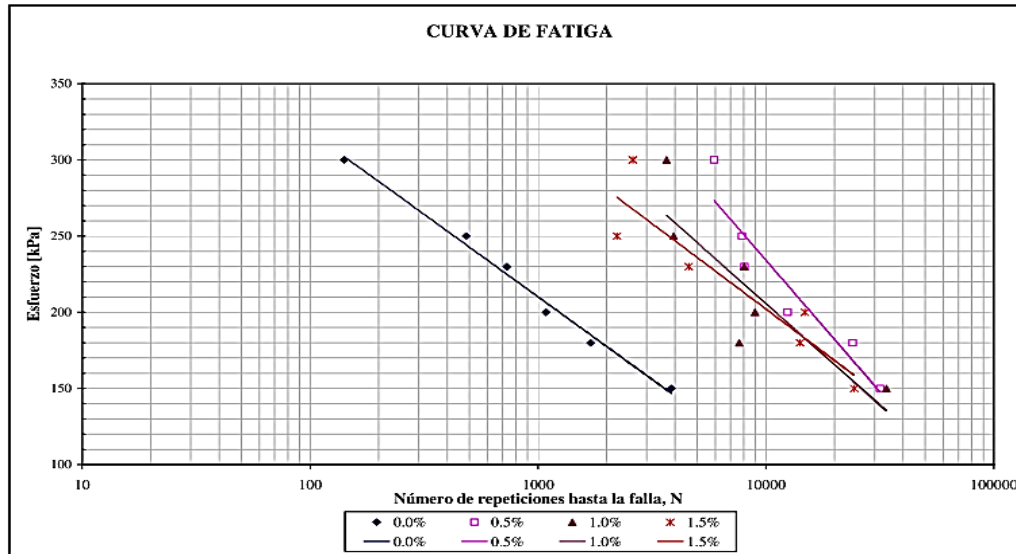


Figura 49. Curva de Fatiga para mezclas con distinto porcentaje de adición de caucho. Fuente: Adaptado de Ramírez Palma, N. I. (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. In Universidad de Chile.