

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A	
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		I(64)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	AURA JISELH PACHECO PEDROZA - CAROLINA BUENO PAREDES		
FACULTAD	DE INGENIERIAS		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERÍA CIVIL		
DIRECTOR	Esp. JONATHAN BECERRA CARRASCAL		
TÍTULO DE LA TESIS	EL USO DE POLÍMEROS "CAUCHO RECICLADO" COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LA ELABORACIÓN DE ASFALTO MODIFICADO.		
RESUMEN			
(70 palabras aproximadamente)			
<p>SE PRESENTA UNA REVISION LITERARIA DEL CAUCHO RECICLADO USADO COMO MATERIAL LIGANTE EN LA ELABORACION DE ASFALTOS MODIFICADOS MEDIANTE UNA METODOLOGIA DESCRIPTIVA NO EXPERIMENTAL. DE LA REVISION ELABORADA SE PRESENTAN CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS QUE TOMA ESTE SUSTRATO (CAUCHO) AL INCORPORARSE A MEZCLAS ASFALTICAS CONVENCIONALES. DE LA REVISION SE LOGRO DETERMINAR QUE LA INCORPORACION DE ESTE TIPO DE MATERIAL RECICLADO FAVORECE LAS CARACTERISTICAS REOLOGICAS, DE POROSIDAD Y PENETRACION DE MEZCLAS.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 62	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 17	CD-ROM:1



**EL USO DE POLÍMEROS "CAUCHO RECICLADO" COMO MATERIAL
ALTERNATIVO PARA LA ELABORACIÓN DE ASFALTO MODIFICADO**

AUTORES:

CAROLINA BUENO PAREDES

AURA JISELH PACHECO PEDROZA

Monografía Para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director:

Esp. JONATHAN BECERRA CARRASCAL

Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERIAS

PLAN DE ESTUDIO DE INGENIERIA CIVIL

Ocaña, Colombia

Octubre de 2020

Dedicatoria

Primeramente dedico este trabajo a Dios, por permitirme haber llegado hasta este momento tan importante para mi vida, por ser mi fortaleza, mi apoyo incondicional y brindarme siempre su bendición.

A mis padres, José del Carmen Bueno Bayona y Herlinda Paredes Vargas, a mi hermana Tatiana Bueno Paredes, por ser el pilar más importante en mi vida, demostrándome siempre que con esfuerzo y dedicación todo se puede lograr, gracias por el amor y sacrificio durante todos estos años pues gracias a eso he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que hoy soy una INGENIERA CIVIL.

A mi novio y abogado Raúl Galván Gómez por su colaboración y apoyo incondicional, por ser esa persona que me impulsa a seguir adelante siendo mejor cada día, gracias a mi compañera y amiga Aura Pacheco Pedroza que con mucho esfuerzo logramos este título, por su valiosa amistad y acogerme siempre en su familia.

Carolina Bueno Paredes.

Agradecer primero a Dios por todas las metas cumplidas y bendiciones que me ha dado hasta el momento. A mi mamá Ninfa Rosa Pedroza que siempre me inculcó la fortaleza de una mujer guerrera e independiente a mi padre Bolmar Alonso Pacheco que con sus palabras siempre me apoyo hacer cada día mejor, a mis hermanos Nasly Marcela Pacheco y Volmar Andrés Pacheco que son mis compañeros de vida y son los que siempre me acompañan con sus consejos y palabras de aliento.

A mi pareja Wbeimar Trigos que es quien me apoyo en todo el cursar de mi carrera y estuvo siempre ahí de la mano Y por último y no menos importante a todos los amigos que calaron en mi carrera y futuro como Ingeniera Civil, especialmente a mí compañera Carolina Bueno y a Yuliana Peñaranda que siempre tuvieron una amistad desinteresada y siendo una parte de la familia demasiado importante.

Aura Jiselh Pacheco Pedroza.

Índice

	Pág.
Capítulo 1. Asfalto convencional.....	1
1.1 Origen del asfalto y su uso en carreteras.....	1
1.2 Normatividad colombiana del asfalto convencional.....	6
1.3 Caracterización reológica y térmica del asfalto convencional	13
1.4 Porosidad y permeabilidad del asfalto convencional.....	16
1.5 Penetración del asfalto convencional y punto de ablandamiento.....	18
Capítulo 2. Asfalto modificado con caucho reciclado.....	22
2.1 Caucho molido de llantas recicladas como modificador de asfalto.....	22
2.1 Composición del neumático usos y reciclado	22
2.2 Preparación del asfalto modificado con caucho	24
2.3 Caracterización reológica y térmica del asfalto modificado con caucho.....	28
2.3.1 Caracterización reológica de asfaltos modificados con caucho.....	28
2.3.2 Caracterización térmica de asfaltos modificados con caucho.	31
2.4 Porosidad y penetración de asfaltos modificados con caucho.	31
Capítulo 3. Comparación técnica del asfalto convencional y modificado con caucho.....	37
3.1 Comparación de las características reológicas del asfalto convencional y modificado con caucho.....	37
4. Conclusiones.....	41
5. Recomendaciones	43
Referentes bibliográficos	44
Apéndice.....	48

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Generalidades del Cemento Asfáltico Convencional según INVIAS-COLOMBIA.....	6
Tabla 2. Características generales de asfaltos convencionales 60-70.....	18
Tabla 3. Ejemplos de propiedades físicas de cementos asfálticos con y sin adición de caucho reciclado.....	27
Tabla 4 Conclusiones de la monografía..	41

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Asfalto de petróleo. Fuente: (Adatao, 2019).	4
Figura 2. Ensayo por penetración. Fuentes: A. (Múnera, 2012) p.42. y B. (Castro, 2018) p.57....	7
Figura 3. Punto de ablandamiento. Fuentes: A. (Múnera, 2012) p.43 y (Castro, 2018) p.57.	8
Figura 4. Equipo Rice. Fuente (Castro, 2018) p. 74.	9
Figura 5. Equipo Cleveland de copa abierta. Fuente: (Durán, 2016) p.48.....	9
Figura 6. Prueba de ductilidad. Fuente: (Flórez, Gómez & Cely, 2018) p. 11.....	10
Figura 7. Equipos utilizados para determinar una curva reológica en una muestra asfáltica. Fuente: (García, 2013) p. 54.....	11
Figura 8. Principales defectos de los pavimentos de asfalto. a. Deformación permanente y b. Agrietamiento por fatiga o variación térmica. Fuente: Elaboración propia.	13
Figura 9. Penetración y punto de ablandamiento del asfalto crudo. Fuente: Múnera, (2012) p.54.	20
Figura 10. Composición de una llanta. Fuente: (Albañil & Ortega, 2019).	23
Figura 11. Procedimiento para fabricar el asfalto-caucho por Vía Húmeda. Fuente: Ramírez, Ladino & Rosas, (2014), p.17.....	25
Figura 12. Reporte de Calidad de Asfalto Modificado Con Caucho (7.3 AL 7.7%). Fuente (Ramírez, et al., 2014) P.33.	30
Figura 13. Niveles de ruido por rodadura por contacto mecánico del neumático-pavimento. Fuente: Morcillo et al, (2008). p.4.	32
Figura 14. Incremento del nivel de ruido de rodadura por efecto de la fricción. Fuente: Morcillo et al, (2008). p.5.	34
Figura 15. A. Diagrama de Campbell para determinar el ruido de rodadura de un asfalto. Fuente: Morcillo et al, (2008). p.10.....	35
Figura 16. Sensibilidad Térmica de un Ligante Termoplástico “Ideal”. Fuente: Cremades (S/A).	38
Figura 17. Susceptibilidad a un tiempo de carga de un ligante ideal. Fuente: Cremades (S/A). ..	39

Introducción

Las carreteras son consideradas como uno de los primeros signos de desarrollo económico presentado por las civilizaciones organizadas a lo largo de la historia. Evidencias arqueológicas colocan a los pueblos de China y Egipto como las primeras culturas en construir sistemas carretables diseñados para facilitar el transporte entre sus diferentes regiones y asentamientos humanos. Este fenómeno lleva a considerar a estas estructuras (las carreteras) como piezas fundamentales para la intercomunicación de sus habitantes, así como el elemento de cruce de servicios y bienes que las convierten en patrimonios valiosos para las naciones y gobiernos que las construyen dado que a partir de estas, se fortalece el intercambio económico y social de los diferentes asentamientos humanos a las cuales logran comunicar.

Para su fabricación, el ingenio del hombre ha utilizado diversos tipos de materiales que van desde estructuras sólidas y duras como la piedra, sustancias maleables y plásticas como el barro que permitió la creación de adoquines, mezclas de diferentes agregados compuestos por arenas y triturados acompañados de cemento (concretos) o sustancias pétreas derivadas de yacimientos petrolíferos que permitieron el desarrollo del asfalto.

Este último material, (asfalto) desde sus orígenes y primeros tramos desarrollados ha visto un desarrollo tecnológico y científico tendiente a mejorar su comportamiento y durabilidad y en consecuencia; Incrementar la durabilidad y calidad de las carreteras asfaltadas. Para ello, en las mezclas de sus agregados se han incorporado diferentes polímeros o sustancias orientadas a que se mejoren las características fisicoquímicas de este material y con ello mejorar parámetros

específicos tales como la resistencia al agrietamiento, la deformación, el daño por humedad, la tracción o disminución de los efectos de daño mecánico asociado con la temperatura a la que se ven sometidos en su día a día.

Los daños que sufre este material una vez que este es incorporado al suelo para la construcción de vías se traducen en que al final de su vida útil, las carreteras elaboradas a partir del asfalto terminaran presentando fallas estructurales asociadas a su deterioro físico y químico que terminaran impactando no solo a la vía en si sino, que afectará a quienes utilicen estos caminos para su movilidad incrementado los costos de transporte y mantenimiento tanto de los vehículos automotores como de las carreteras deterioradas.

En Colombia, el sistema de la Red Vial Nacional de Carreteras se encuentra conformada por una enorme serie de avenidas, transversales y troncales diseñadas para brindar el acceso a las capitales de los 40 departamentos del país y cuya función elemental es la de integrar a las zonas de producción más destacadas y de producción o consumo del país así como su vinculación a los países vecinos. Esta Red Vial, está constituida en un alto porcentaje por vías asfálticas debido a los beneficios que brinda este material en la construcción de carreteras.

Sin embargo, este sistema vial, presenta diversas problemáticas que afectan el tiempo de vida útil de estas estructuras dentro de las cuales los factores climáticos, las características topográficas, las características geológicas, e incluso, el tipo y calidad de las materias primas con que se elaboran hacen que la fabricación de este tipo de vías sea una labor altamente exigente, demandante y costosa.

Por ello, crece la necesidad urgente de implementar materiales, procedimientos y técnicas novedosas que permitan emplear sustratos eficientes que abaraten los costos de producción y a su vez permitan obtener asfaltos de alta calidad que contemplen las normas nacionales regidas y direccionadas por las políticas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

En este sentido, uno de los materiales que se ha venido implementando en la generación de asfaltos modificados corresponde al caucho obtenido por reciclaje debido a que este material se ha convertido en primer lugar como una problemática ambiental dado el volumen, tratamiento y disposición final al que se somete en los centros urbanos y a su vez, ha mostrado características técnicas y físico-químicas que favorecen los parámetros de resistencia de los asfaltos donde se incorpora este material como son la estabilidad máxima, la resistencia al agrietamiento térmico, la deformación, el incremento de la resistencia por tracción y el mejoramiento de los parámetros volumétricos de los asfaltos donde es incorporado.

Debido a lo anterior, el uso del caucho reciclado en la elaboración de carpetas asfálticas se convierte en un tema interesante para ser objeto de investigación en la Ingeniería Civil y de esta forma exponer en la presente monografía las características que este tipo de material puede generar sobre los parámetros de reología, porosidad, durabilidad y costos de producción al compararlo con sistemas de asfalto tradicional que no emplean caucho entre sus componentes y agregados.

A partir de lo expuesto anteriormente surge como pregunta de investigación el siguiente cuestionamiento: ¿Cuáles son las características reológicas, de porosidad y penetración que genera

el agregar partículas de caucho obtenidas por reciclaje como agregado en la elaboración de pavimentos asfálticos modificados?

Es por ello que para dar respuesta a este cuestionamiento se hace necesario realizar una revisión literaria de estudios técnicos y científicos que conlleven a demostrar si el uso de este material (el caucho reciclado) en la elaboración de asfaltos mejora las características físicas y químicas donde se utiliza planteando como objetivo general de la monografía el “efectuar una revisión y análisis documental sobre las características técnicas del asfalto modificado con caucho” y como objetivos específicos: 1. Identificar las características reológicas, de porosidad y penetración del asfalto modificado con caucho. 2. Hacer una comparación entre el asfalto modificado con caucho y el asfalto convencional y 3. Evaluar normas colombianas vigentes para la elaboración de asfaltos convencionales y modificados con materiales reciclados usando una metodología descriptiva no experimental que permita establecer las diferencias y similitudes entre ambos tipos de asfaltos abarcando para ello un periodo de 8 semanas de revisión, clasificación y selección de material bibliográfico.

Los resultados encontrados luego de la revisión literaria mostraron que el uso del caucho como materia prima en la elaboración de asfaltos favorece las características reológicas del mismo sin embargo, este material reciclado debe cumplir con parámetros de granulometría y concentración adecuados para lograr una mejor eficiencia y homogeneidad en el asfalto modificado donde se agregue. Además se favorecen los índices de fragilidad y flexibilidad al igual que su comportamiento ante cambios de temperatura donde se aplique. Finalmente, los costos de producción de este material son semejantes a los del asfalto convencional por lo que no se debe

pensar en su utilización como motivo financiero sino como un mecanismo para mejorar las condiciones reológicas del asfalto a desarrollar.

Capítulo 1. Asfalto convencional

1.1 Origen del asfalto y su uso en carreteras

El asfalto se ha empleado como materia prima para la elaboración de carreteras y construcciones a lo largo de la historia humana y en la era moderna lo ubica entre el fin del siglo diecinueve y principio del siglo veinte como la materia prima de mayor uso para la fabricación de vías, siendo potencializado por el avance vertiginoso de la industria automotriz. (Aduato, 2019).

Esta sustancia también se conoce como betún, dado que se considera como un material de características altas de impermeabilización, adherencia y cohesividad, que es capaz de resistir ante grandes esfuerzos mecánicos y cargas permanentes que al ser usado junto a materiales duros como la arena o gravilla lo convierten en una mezcla excelente para pavimentar calles o carreteras. (Ramírez, 2016).

Ballena, (2016) expresa que el vocablo asfalto, deriva de la lengua Asiria “Acadio”, presente a orillas del río Tigris superior (1400 a 600 A.C.). El significado de “Sphalto” se interpreta como “lo que hace caer”. De allí, dicho vocablo se abrió paso al griego, el latín y finalmente, al francés (asphalte), siguiendo al español (asfalto) y finalmente a el inglés (asphalt). De otra parte, diversos estudios arqueológicos, reportan que este material, es uno de los elementos más antiguos usado por las civilizaciones de los que se tenga reporte al ser usado como material para construcción por sus propiedades adhesivas.

Arboleda & Gutiérrez (2015), lo definen como aquel pavimento conformado por una capa o varias capas ubicadas entre el nivel superior de las terracerías y la zona superficial destinada al desplazamiento vehicular, y la cual está conformada por materiales inertes, donde su función principal es la de brindar una superficie homogénea de color y textura apropiada que permita el tránsito de vehículos (livianos o pesados) que posee alta resistencia al desgaste producido por el clima y las cargas a las que es sometido.

En ingeniería civil, los asfaltos convencionales, son considerados como estructuras flexibles conformadas por una serie de capas que les otorgan una serie de beneficios para soportar las cargas a los cuales se ven sometidos por el transporte de tráfico, las condiciones climáticas y las condiciones geológicas. Los métodos de diseño de pavimentos consideran que estas estructuras serán sometidas a deformaciones en la subrasante. Por ello, las vías construidas por capas asfálticas delgadas debido a que serán destinadas como vías de bajo tráfico, sus capas granulares llegarán a soportar todo el esfuerzo lo que derivará en altos valores de deformación permanente. (Arboleda & Gutiérrez, 2015).

Estructuralmente, estos asfaltos, se consideran como una sustancia coloidal constituida por varias fracciones o componentes, dentro de las cuales se destacan los asfáltenos, maltenos, carbenos y algunas resinas. En primer lugar, Los asfáltenos se consideran sustancias de alto peso molecular (>5000), las cuales conforman conjuntos de partículas sólidas que dan origen a la fase coloidal dispersa en el asfalto. (Arboleda & Gutiérrez, 2015).

Estos compuestos (asfáltenos) pertenecen por lo general a hidrocarburos aromáticos ramificados con cadenas laterales provistos de parafinas que varían en su estructura y composición dependiendo de las condiciones de elaboración del asfalto y del origen del crudo del cual fue desarrollado y los cuales les confieren la dureza al asfalto. (Mercado, et al., 2008).

Los maltenos identificados como hidrocarburos de bajo peso molecular a temperatura ambiente toman una fase aceitosa a temperatura ambiente y que conforman la fase continua de este sistema coloidal y que le proporcionan al asfalto propiedades de adhesividad y ductilidad. Los carbenos son compuestos aromáticos que representan la parte insoluble del asfalto al tratarse con Sulfuro de Carbono. (Mercado, et al., 2008).

Por su parte, las resinas se consideran sustancias semisólidas o de consistencia pastosa de tonos más claros que los asfáltenos y de menor peso molecular que los asfáltenos las cuales se encuentran dispersas en el crudo. (Mercado, et al., 2008).

Alonso (2017), describe que para crudos muy pesados de altos rendimientos de asfalto, estos se obtienen mediante una destilación al vacío. En el caso de crudos de rendimientos intermedios de asfalto se tendrán que hacer dos etapas de destilación: la primera a presión atmosférica y la segunda al vacío.

Finalmente, para crudos muy livianos y de bajo rendimiento de asfalto se requiere realizar una etapa extra a las dos anteriores, que se conoce como la etapa de extracción.

El proceso de obtención del asfalto se muestra en la Figura 1, donde se explica el origen de este material proveniente principalmente del fraccionamiento y destilación del petróleo.

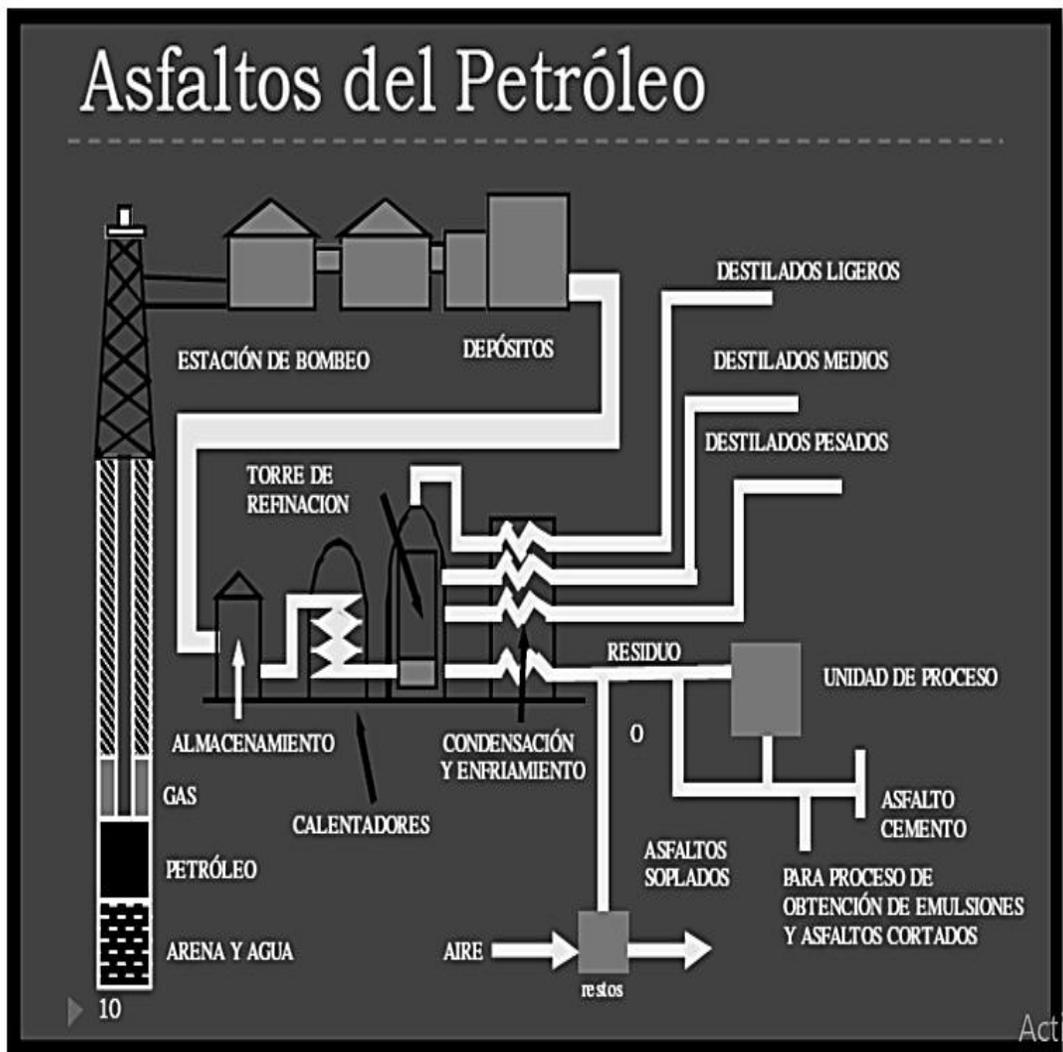


Figura 1. Asfalto de petróleo. Fuente: (Aduato, 2019).

Para destilar el crudo de petróleo este se calienta aproximadamente a 343°C , con lo que se logra la vaporización parcial de sus componentes. Seguidamente, el material remanente se transfiere a una torre de destilación para continuar con los procesos de separación de sus

componentes a diferentes alturas y posteriormente por condensación se separan los compuestos gracias a sus diferencias en los puntos de ebullición. (Alonso, 2017).

Del componente intermedio se obtiene el kerosene y diésel y de los residuos se producen los aceites pesados. Luego aplicando una presión reducida a la torre de vacío se permite inflamar los aceites pesados logrando obtener el cemento asfáltico (Alonso, 2017).

Químicamente, al referirnos a los asfaltos encontramos que estos son considerados mezclas complejas de hidrocarburos constituidos por Oxígeno (O_2), Azufre (S_2) y Nitrógeno (N_2), algunos metales como el Níquel (Ni) y el Vanadio (V) y algunas sales orgánicas solubles (microcristales) que les confieren un alto peso molecular y que le brindan a este material una serie de características físicas, reológicas, coloidales y de durabilidad. (Mercado, Bracho & Avendaño, 2008).

En el diseño de pavimentos, las diversas metodologías usadas en la ingeniería civil, tienen presente la deformación que sufren las diferentes capas que conforman la matriz de agregados con el fin de lograr presagiar el comportamiento que tendrán los asfaltos elaborados luego de colocarse a diversas trayectorias de carga.

Es por ello que de forma básica y funcional, para su estudio, los pavimentos se clasifican en asfaltos flexibles y asfaltos rígidos. Sin embargo, los parámetros de rigidez y flexibilidad que adopta un pavimento no son fáciles de definir lo cual hace compleja su diferenciación. (Arboleda & Gutiérrez, 2015).

1.2 Normatividad colombiana del asfalto convencional.

En Colombia se estima que el 70% de las vías nacionales y el 35% de las vías capitalinas están constituidas por asfalto. De esta Red Vial, en 2013 el INVIAS presentó un informe que sostenía que el 52,4% de los 8.313 kilómetros de las carpetas asfálticas a su cargo se encontraban en mal estado. (Jiménez, Lizcano, Daza & Loría, 2013).

En la Tabla 1, se muestran los valores recomendados por el INVIAS para la elaboración de asfaltos convencionales.

Tabla 1.

Generalidades del Cemento Asfáltico Convencional según INVIAS-COLOMBIA.

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	NORMA DE ENSAYO INV	60-70		80-100	
			mín.	Máx.	mín.	Máx.
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	E-706	60	70	80	100
Índice de penetración	-	E-724	-1	+1	-1	+1
Viscosidad absoluta (60° C)	P	E-716 o E-717	1500	-	1000	-
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	Cm	E-702	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99	-	99	-
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	-	0.2
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	E-709	230	-	230	-
Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163°C, 75 minutos)	%	E-720	-	1.0	-	1.0
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento (E-720), en % de la penetración original	%	E-706	52	-	48	-
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento (E-720).	°C	E-712	-	5	-	5

Fuente: (Suárez, 2019) P. 39.

Para comprender mejor las características que debe cumplir un asfalto convencional a continuación se exponen diversos ensayos de laboratorio desarrollados para la medición de sus características:

1. Penetración: Es una prueba que permite determinar el grado de dureza del asfalto a una determinada temperatura. Para ello, se toma una muestra o disco de asfalto de prueba y se somete a una prueba mecánica donde mediante la presión de una aguja de punta cónica sobre la superficie del asfalto a evaluar y se le aplica una fuerza constante durante un tiempo específico. Por lo general se aplican cargas de cien gramos por espacio de cinco minutos y los resultados obtenidos son expresados por el hundimiento que recibe la muestra tratada a 25°C en decimas de milímetro. La prueba se puede repetir variando alguno de los parámetros evaluados por ejemplo la temperatura de manera tal que estos cambios permitan evaluar la susceptibilidad de la muestra tratada. Al comparar dos muestras de asfalto bajo esta técnica de laboratorio, se considera a la que presente el menor índice de susceptibilidad a la temperatura evaluada la de mayor calidad. (Mercado, et al., 2008). En la Figura 2 se presenta el equipo utilizado para esta prueba de laboratorio.

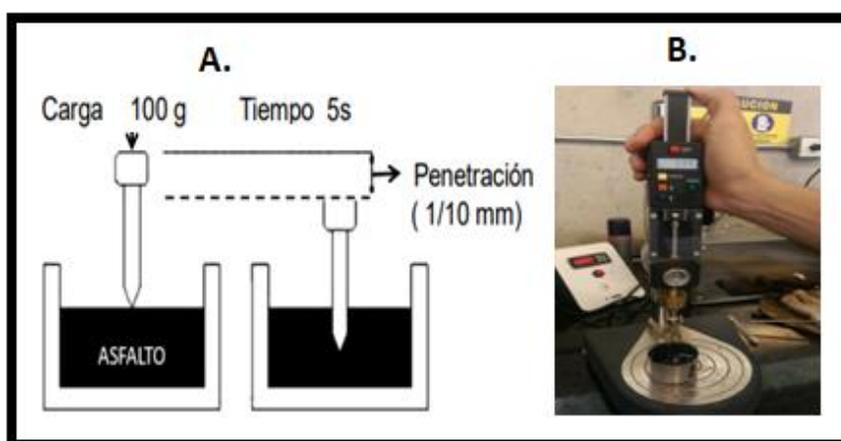


Figura 2. Ensayo por penetración. Fuentes: A. (Múniera, 2012) p.42. y B. (Castro, 2018) p.57.

2. Punto de ablandamiento: Esta prueba permite identificar la temperatura a la cual una muestra de asfalto sometida a un incremento gradual de temperatura (de 5 °C por minuto) cambia de estado sólido (a temperatura ambiente) y se convierte en una mezcla maleable y viscosa (estado líquido). (Mercado, et al., 2008). En la Figura 3 se presenta la imagen y fotografía del proceso realizado para evaluar el punto de ablandamiento de las muestras de asfalto en el laboratorio.

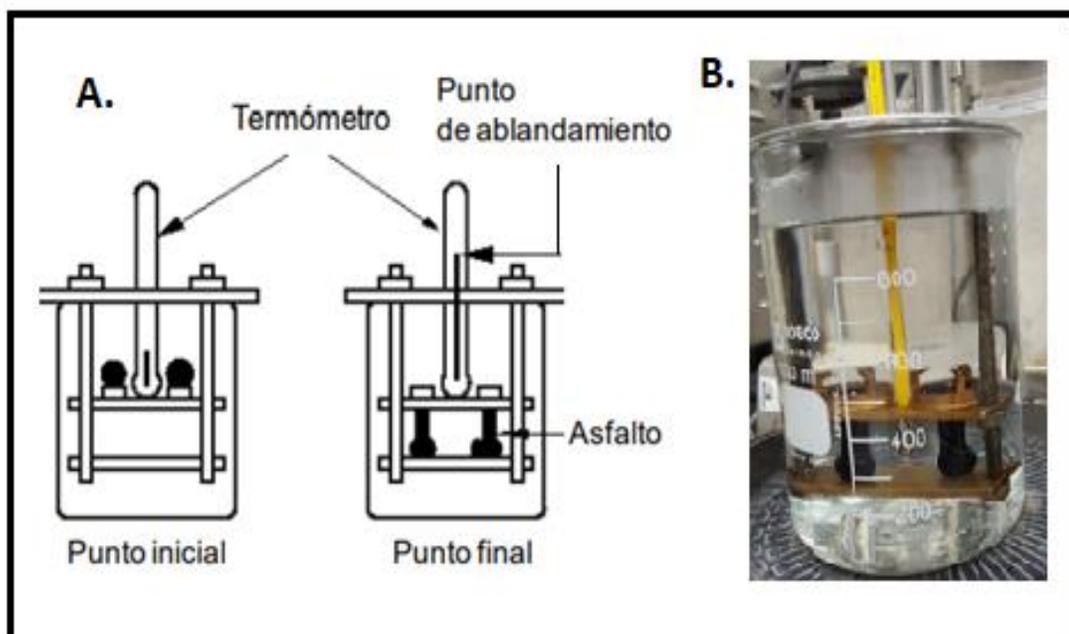


Figura 3. Punto de ablandamiento. Fuentes: A. (Múniera, 2012) p.43 y (Castro, 2018) p.57.

3. Gravedad específica máxima teórica (Gmm): Castro (2018) menciona que la gravedad específica máxima teórica (*Gmm*) se considera como la máxima densidad relativa que puede tener una mezcla cuando todos sus vacíos se encuentren llenos. Para poder calcularla se requiere un equipo que se encuentra conformado por un picnómetro, un manómetro, una bomba de vacío y una mesa vibratoria que permiten la extracción de los vacíos de aire que posee la muestra valorada.

En la Figura 4 se presenta un modelo de equipo Rice empleado para la realización de esta prueba de laboratorio.



Figura 4. Equipo Rice. Fuente (Castro, 2018) p. 74.

4. Punto de Inflamación: conjunto de condiciones de presión y temperatura a la cual el asfalto puede arder al mezclarse con aire y un incremento de calor o someterse a una fuente de ignición. Por lo general se aplica el método Cleveland o de copa abierta para realizar este tipo de prueba de laboratorio. (Mercado, et al., 2008). En la Figura 5 se presenta un equipo Cleveland de copa abierta



Figura 5. Equipo Cleveland de copa abierta. Fuente: (Durán, 2016) p.48.

5. Ductilidad: Es la capacidad que tiene una sustancia de estirarse progresivamente formando un hilo hasta alcanzar el punto de rompimiento. La muestra de asfalto a evaluar se coloca a baño de maría a 25 °C y se estira a razón de 5 cm/min. La prueba de ductilidad permite determinar la susceptibilidad a las flexiones, impactos, vibraciones o compresiones que pueden sufrir las carpetas asfálticas, viendo afectada su estructura. (Mercado, et al., 2008). En la Figura 6 se presenta un modelo de muestra asfáltica sometida a la prueba de ductilidad.

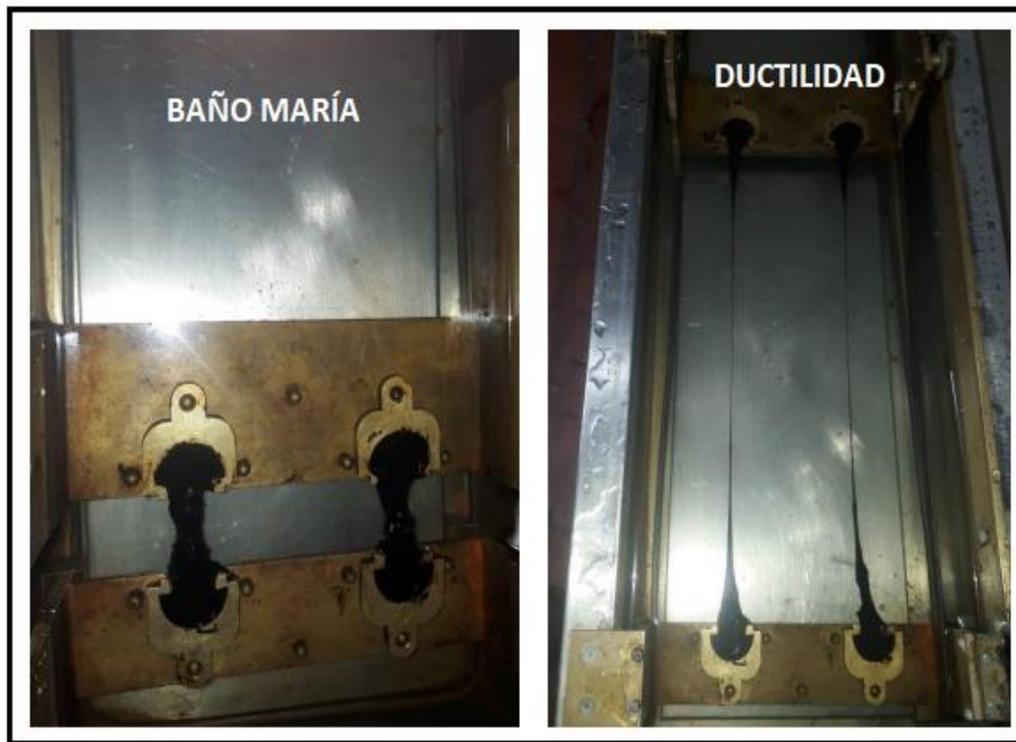


Figura 6. Prueba de ductilidad. Fuente: (Flórez, Gómez & Cely, 2018) p. 11.

La prueba de ductilidad mide las propiedades a tensión del asfalto, y consiste en estirar la muestra de Asfalto hasta su punto de ruptura. La distancia medida en centímetros entre el punto inicial y el punto de ruptura se reporta como la ductilidad del material.

6. Viscosidad: El asfalto es sólido a temperatura ambiente (30 °C) por lo tanto, esta prueba se hace en rangos de 100 a 150°C en un viscosímetro Couette (Brookfield) o Saybolt. Esta propiedad permite identificar el comportamiento que puede sufrir el asfalto a someterse a condiciones climáticas con altas temperaturas. (Mercado, et al., 2008).

En la Figura 7 se presenta un viscosímetro Brookfield, una balanza digital, un porta muestra, aguja y herramientas utilizadas para la determinación de una curva reológica en una muestra asfáltica.

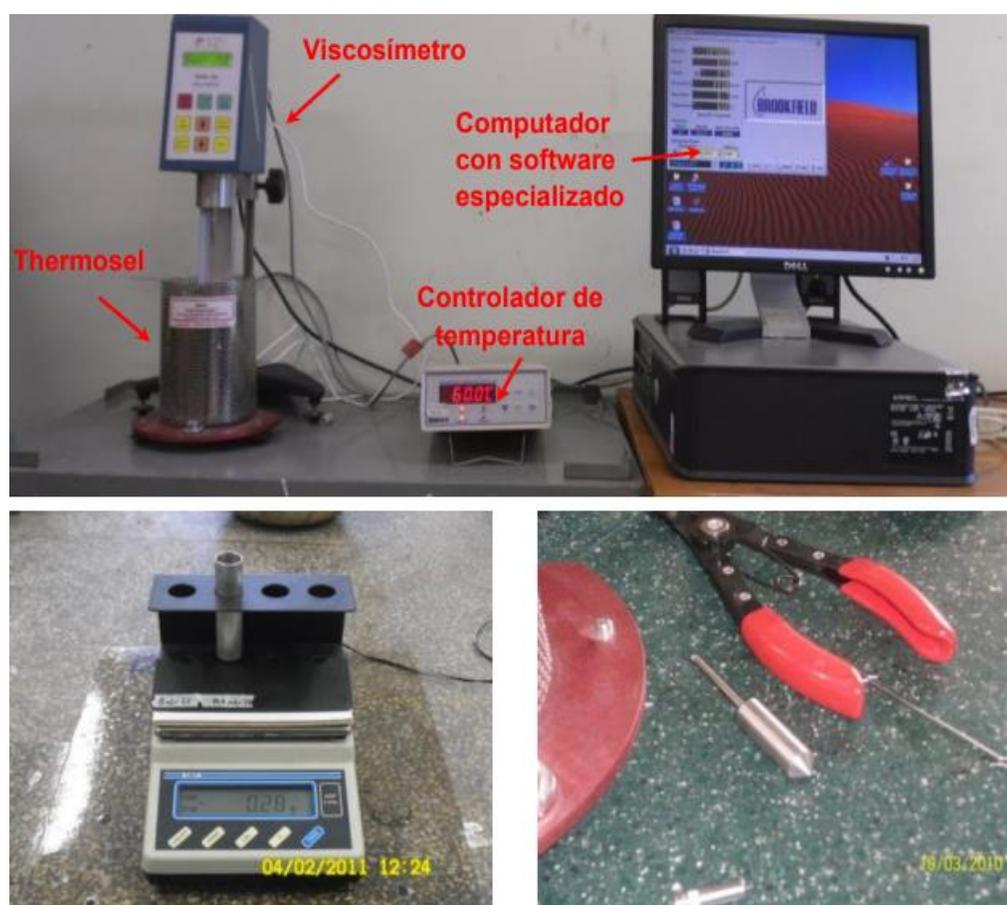


Figura 7. Equipos utilizados para determinar una curva reológica en una muestra asfáltica.
Fuente: (García, 2013) p. 54.

7. Resistencia al impacto: La prueba mide la resistencia que tiene ante un impacto mecánico una muestra de asfalto. Para ello, sobre una muestra de asfalto de dimensiones específicas se deja caer un peso muerto a diferentes alturas determinándose la altura mínima necesaria para la fractura del asfalto evaluado. (Mercado, et al., 2008).

8. Solubilidad: Esta prueba permite determinar la dureza de un asfalto y permite su clasificación en asfaltos duros y asfaltos blandos dependiendo de su composición química y estructural de acuerdo a los porcentajes o proporciones de asfáltenos, maltenos, carbenos y resinas de la muestra evaluada. (Mercado, et al., 2008).

En Colombia, la normatividad relacionada con la elaboración de asfaltos convencionales se encuentra orientada hacia vías de baja demanda de tránsito y las de alta demanda de tránsito.

La Resolución 10099 del 27 de diciembre de 2017 a cargo del Ministerio del Transporte en cabeza del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) contempla las especificaciones particulares y de construcción usadas como alternativas de pavimentación que empleen asfalto natural en vías de bajo volumen de tránsito categoría NT1. (Ministerio de Transporte, 2017).

Para ello, el INVIAS planteó la necesidad de realizar un estudio para determinar la caracterización de los materiales constitutivos de los asfaltos naturales trabajados en Colombia (ligantes, material pétreo y otros componentes) y el diseño de mezclas por considerarse de materiales no convencionales que pueden ser utilizados en el desarrollo de vías terciarias de menor volumen vehicular por lo que se requiere hacer un trabajo para implementar unos parámetros de

referencia general para su utilización, mediante una evaluación comparativa de sus componentes técnicos, ambientales y económicos de este tipo de asfaltos con los denominados asfaltos convencionales en harás a abordar el principio de economía y de esta manera los recursos estatales puedan ser aprovechados en mayor medida para el desarrollo de la red vial nacional. (Ministerio de Transporte, 2017).

1.3 Caracterización reológica y térmica del asfalto convencional

En el asfalto, sus propiedades reológicas cambian a merced de las fracciones o porcentajes en que están presentes sus componentes, así como por la naturaleza u origen de los crudos de petróleo de donde se obtienen. Por este motivo, el comportamiento reológico de la sustancia ligante influye de manera significativa sobre el conjunto de propiedades de que se dan entre la mezcla del asfalto y los demás agregados que lo conforman y a su vez sobre el comportamiento que esta mezcla toma sobre el ahuellamiento, la fatiga o la susceptibilidad térmica que pueda sufrir el pavimento. (Cárdenas & Fonseca, 2010). En la Figura 8 se presentan dos defectos asociados a los pavimentos de asfalto conocidos como deformación aparente y el agrietamiento por fatiga.

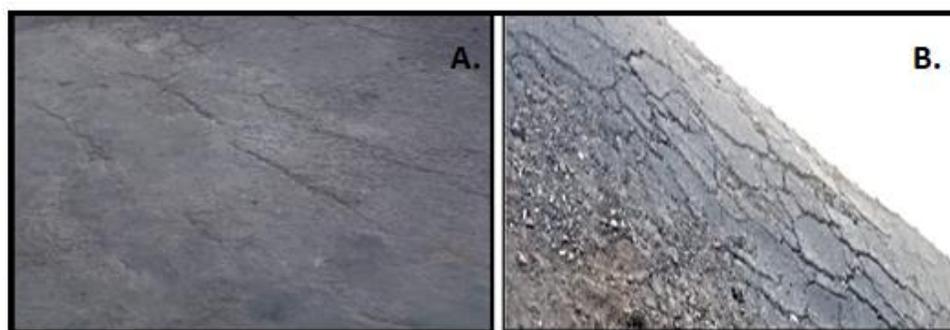


Figura 8. Principales defectos de los pavimentos de asfalto. a. Deformación permanente y b. Agrietamiento por fatiga o variación térmica. Fuente: Elaboración propia.

Castro, Rondón & Barrero, (2016) sostienen que el ensayo de Reología con DSR es utilizado para evaluar el comportamiento visco-elástico que experimenta el cemento asfáltico (CA) a temperaturas intermedias y altas temperaturas.

Por ello, esta prueba utiliza un Reómetro dinámico de corte (DSR) que permite medir el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). Estos parámetros pueden ser considerados como la resistencia que presenta una muestra a deformarse debido a esfuerzos repetidos de corte y el ángulo de fase se considera como el desfase resultante entre el esfuerzo cortante aplicado y la deformación de corte obtenidas durante la prueba técnica. (Castro et al., 2016).

Para entender su valor, se asume que a mayor δ , mayor viscosidad del asfalto. Por lo tanto, un asfalto de comportamiento totalmente elástico poseerá un $\delta=0^\circ$ y uno exclusivamente viscoso poseerá un $\delta=90^\circ$. Es por esto que los parámetros G^* y δ se determinan con el fin de determinar la resistencia al ahuellamiento y el agrietamiento por fatiga que puede sufrir una muestra de asfalto. (Castro et al., 2016).

En ingeniería civil, el desarrollo de asfaltos convencionales tiene dentro de sus prioridades disminuir al máximo el ahuellamiento, por lo tanto, se busca que los ligantes asfálticos deben ser altamente rígidos (bajo corte) y elásticos, por lo que el factor matemático $G^*/\sin\delta$ es alto. La relación de los parámetros $G^*/\sin\delta$ oscilaran en el rango mínimo de 1 kPa y 2.2 kPa cuando se utilice como ligante sin envejecimiento Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT). (Castro et al., 2016).

Por otro lado, para reducir o evitar el agrietamiento por fatiga de un asfalto, la mezcla de sus componentes deberá ser elástica evitando tener altos índices de rigidez para evitar que se convierta en una mezcla frágil y tome características de ductilidad que la favorezcan.; por lo tanto, el valor de $G^* \sin \delta$ deberá estar por valores cercanos a los 5000 kPa. (Castro et al., 2016).

Castro et al., (2016) consideran que la Termogravimetría (TGA) es una técnica que registra la variabilidad de los porcentajes de masa de una muestra asfáltica, ya sea como una función de la variación entre la temperatura y el tiempo, o como una función de la variación del tiempo durante el cual la muestra permanece a una temperatura constante en un proceso termodinámico de características isotérmicas.

Por medio de la Termogravimetría Castro et al., (2016) menciona que es posible determinar los cambios de la masa de una muestra de asfalto, la sublimación, sus reacciones de oxidación y descomposición, su vaporización, y la desorción.

Otra técnica usada para determinar asfaltos convencionales en sus aspectos reológicos y térmicos es la conocida como la DSC (calorimetría diferencial de barrido) que permite determinar la cantidad de calor que puede absorber o liberar una muestra o patrón, cuando es sometida a una temperatura constante por un espacio de un tiempo específico, o cuando la muestra tratada es calentada o enfriada a una velocidad constante, en un rango de temperatura estandarizado. (Castro et al., 2016).

Además, Castro et al. (2016), reconocen que conocer la estabilidad térmica del asfalto y la caracterización de las transiciones, es fundamental para determinar el posible potencial de este material en las aplicaciones industriales a las que se ve sometido.

El uso de la DSC permite identificar la influencia que se obtiene a partir del historial térmico de los materiales que componen el asfalto en su estructura microscópica y de esta forma esta técnica de laboratorio se convierte en una herramienta procedimental que permite calcular la correlación que existe entre el comportamiento microscópico de sus materiales y el comportamiento macroscópico de los agregados o componentes de la muestra asfáltica evaluada. (Castro et al., 2016).

Con la estabilidad térmica, Castro et al., (2016) estiman que se pueden determinar las diversas transiciones de fase de orden primario las cuales pueden ser aplicadas cuando se calculen las medidas de capacidad calorífica aparente (fenómenos de relajación estructural. Se determinen las temperaturas de transformación o transición (transición vítrea, transición ferro-paramagnética, cristalización, transformaciones polimórficas, fusión, ebullición, sublimación, descomposición e isomerización), se de la estabilidad térmica de los compuestos o agregados y se obtenga el cálculo de la cinética de cristalización de los agregados.

1.4 Porosidad y permeabilidad del asfalto convencional

Los factores de porosidad y permeabilidad de una carpeta asfáltica son similares a los que toma un fluido circundante por un medio poroso. De esta forma, Ramírez, (2017) sostiene que el comportamiento hidráulico de este tipo de mezcla se ve afectado entre otros factores por el

contenido y la forma de poros en el sustrato al igual a su distribución en la mezcla, los vacíos existentes de aire y la conectividad resultante entre los diferentes agregados de la mezcla asfáltica desarrollada.

De acuerdo a la cantidad de vacíos existentes Ramírez, (2017) las mezclas asfálticas se clasifican en:

1. Densas o cerradas (<6%),
2. Semidensa (6-10%),
3. Abierta (>10%) y
4. Drenante o porosa (>20%).

De esta manera, Ramírez, (2017) menciona que existen 2 mezclas asfálticas (densas y semidensas) las cuales son caracterizadas gracias a los contenidos de vacíos que se producen entre sus agregados donde predomina el material fino y escasea el material grueso, lo que le da esta característica de densidad alta. Este tipo de asfaltos es desarrollado para soportar tráfico pesado.

Por su parte, las mezclas abiertas y drenante poseen en su estructura grandes cantidades de vacíos lo cual hace que estas sean menos densas y compactas lo cual no las hace aptas para soportar tráfico pero si para la evacuación de aguas lluvias por lo que son óptimas en estructuras de drenado mejorando la maniobrabilidad de los vehículos en condiciones de lluvia y humedad evitando la formación de zonas de encharcamiento o pozos en las vías donde son utilizados. (Ramírez, 2017).

En Colombia, las carpetas asfálticas de características densas son las más frecuentes en y utilizadas al desarrollar estructuras de pavimentos y asfaltos convencionales debido a que este

material ofrece mayor rigidez y soporte a cargas elevadas lo cual las hace idóneas para el tráfico vehicular (López, 2013).

1.5 Penetración del asfalto convencional y punto de ablandamiento

Para Garzón & Cárdenas, (2013) una prueba técnica a la que se ven sometidos los asfaltos convencionales está relacionada con la prueba de penetración, la cual consiste en generar una tensión o fuerza superficial sobre una muestra de asfalto para determinar el grado de flexibilización o ahuellamiento que se da por el sometimiento a este tipo de fuerzas.

En la Tabla 2 se presentan las características generales de asfaltos convencionales 60-70 descritas por Castro, Rondón & Barrero, (2016).

Tabla 2.

Características generales de asfaltos convencionales 60-70.

Ensayo	Método	Unidad	Recomendado INVIAS [25]	Resultado
Ensayos sobre el asfalto original				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	60-70	65

Fuente: (Castro, Rondón & Barrero, 2016). P.10.

La prueba de penetración, busca poner a prueba los materiales asfálticos que se verán expuestos a condiciones climáticas, cambios de temperatura ambiente lo cual puede contribuir a su deterioro progresivo. (Garzón & Cárdenas, 2013).

Diversos estudios se han enfocado en evaluar la relación existente entre la temperatura y la presión de contacto sobre el ahuellamiento que dan sobre el asfalto que intervienen. Como ejemplo del comportamiento que sufre el asfalto ante este tipo de variables Reyes, Reyes & Troncoso, (2006) determinaron el efecto de la temperatura sobre la presión de contacto y la resultante en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica cerrada de granulometría 0/10 y asfalto CA60/70, bajo una presión de 0.9 Mpa y una temperatura constante de 60°C.

Reyes et al., (2006) caracterizaron el material granular y el asfalto determinado su porcentaje óptimo bajo la Prueba Marshall. Para ello, realizaron los ensayos de ahuellamiento en los laboratorios de ingeniería Universidad Javeriana. En su ensayo, variaron la presión de contacto en el rango de 0,18 Mpa a 0,9 Mpa, con aumentos porcentuales de 0.18 Mpa. Del mismo modo, para el factor de la temperatura vario entre el rango de los 40 °C hasta los 70 °C, con intervalos de 10 °C. De su estudio, determinaron que existe una correlación directa entre el incremento de la temperatura y la presión de contacto que se traduce en la deformación permanente del asfalto; Concluyendo que en este tipo de mezclas, la formación de huellas o deformaciones está dada por el impacto que generan tanto la magnitud, el clima y la frecuencia de carga a las que se somete diariamente una estructura asfáltica. Finalmente, sostienen que las características reológicas que toma el ligante asfáltico sobre el pavimento influye de manera significativa sobre el comportamiento plástico al que puede acceder el asfalto.

Por otra parte, Múnera (2012) investigó la modificación polimérica de los asfaltos crudos y determinó los valores medios de penetración (Pen) y el punto de ablandamiento (PA) donde los

valores promedios utilizados en aplicaciones ingenieriles oscilan entre los 30 a 200dmm alcanzando los 83 dmm lo que significa que los asfaltos crudos utilizados de materia prima colombiana evidencio que este asfalto se comporta como un asfalto blando. Dado que un número de penetración alto ($> 100\text{dmm}$) corresponde a un asfalto blando, mientras que un número bajo ($< 30\text{dmm}$) corresponde a un asfalto duro. Por otra parte, al evaluar el punto de ablandamiento (PA) del asfalto crudo, el estudio de Múnera (2012) arrojo como resultado una PA de $45.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mencionan que el rango de temperaturas de ablandamiento en asfaltos comerciales oscila entre 35 a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Consideran que un asfalto de características duras estará cerca de los 60°C mientras que si se trata de asfaltos blandos, su PA se encontrará cerca de 40°C .

En la Figura 9 se presentan los resultados propuestos por Múnera, (2012):

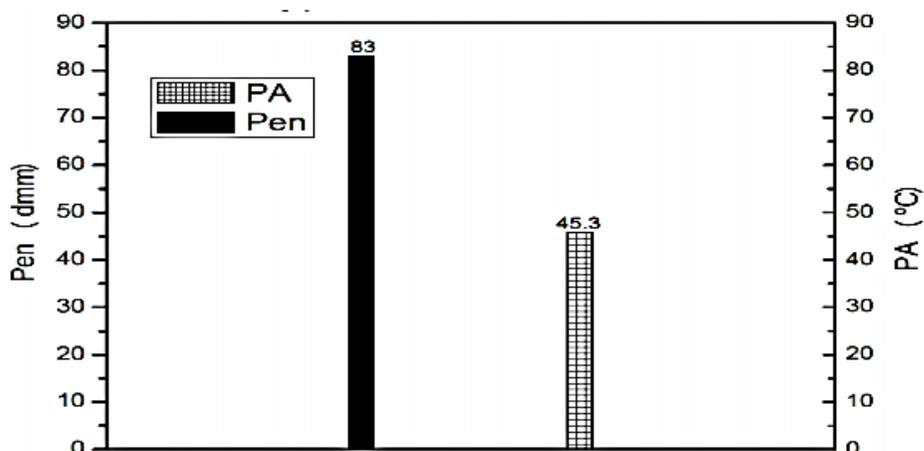


Figura 9. Penetración y punto de ablandamiento del asfalto crudo. Fuente: Múnera, (2012) p.54.

De la Figura 9, podemos inferir que los asfaltos crudos pueden comportarse de forma que sean poco rígidos y altamente susceptibles a la temperatura, es decir, que disminuyan de manera amplia su viscosidad con cambios de temperatura pequeños que pueden derivar en fallas de agrietamientos a temperaturas cercanas a los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ o deformaciones permanentes a temperaturas

ambientales entre los 30 a 45 °C cuando son utilizados como carpetas viales.

Es por ello, que desde hace décadas se ha buscado implementar diferentes metodologías para mejorar estas condiciones que afectan a los asfaltos convencionales siendo el caucho reciclado una de las alternativas de mayor uso y demanda en la actualidad para generar asfaltos modificados como se mostrará en el Capítulo 2.

Capítulo 2. Asfalto modificado con caucho reciclado

2.1 Caucho molido de llantas recicladas como modificador de asfalto

Múnera (2012) sostiene que el caucho molido de llanta puede considerarse como el primer polímero utilizado como modificador del asfalto aunque inicialmente lo que se buscaba era una salida ambiental debido a las grandes cantidades de llantas acumuladas en depósitos y rellenos sanitarios.

Sin embargo, diversos estudios en el mundo han demostrado que el caucho molido de llanta posee propiedades capaces de modificar el asfalto mejorando su calidad. Esta incorporación se ha planteado por diferentes metodologías tanto en procesos en seco o por vía húmeda donde las partículas de caucho representan en relación peso a peso de sus componentes un valor comprendido entre el 0.5 al 3% de los agregados en tratamientos en seco y hasta del 20% en los tratamientos húmedos.

2.1 Composición del neumático usos y reciclado

Pieza toroidal, diseñada a partir de caucho de origen natural o sintético que se emplea en los rines de vehículos y maquinarias tales como: automóviles, camiones, aviones y avionetas, bicicletas y motocicletas, maquinaria agrícola como tractores, carretillas entre otros. Su función es facilitar la adherencia del vehículo al suelo donde se desplaza permitiendo su movimiento, arranque y frenado. La Figura 10 presenta la composición general de un neumático.



Figura 10. Composición de una llanta. Fuente: (Albañil & Ortega, 2019).

De estos materiales, el polímero de caucho está conformado por una gran cantidad de monómeros concatenados de un hidrocarburo elástico conocido como el isopreno C_5H_8 el cual puede originarse de manera natural como una sustancia lechosa y viscosa en la savia de algunas plantas y denominada como látex o de manera sintética por medio de la polimerización química de otros compuestos. (Albañil & Ortega, 2019).

La ventaja de este material está dada por su capacidad elástica y que soporta diferentes grados de presión y al dejar de estar bajo esta presión puede retomar su forma original sin sufrir deformaciones. (Albañil & Ortega, 2019).

En los últimos años, la generación y acumulamiento de residuos sólidos; ha ido aumentando debido al prolongado periodo de degradación de la mayoría de estos, por ello son considerados altamente contaminantes; tal es el caso de los neumáticos, que después de cumplir su periodo de vida útil son desechados en ríos, quebradas, e incluso incinerados; sumado esto al desinterés de la sociedad por el cuidado del medio ambiente, acrecientan los problemas medioambientales; siendo el problema principal el cambio climático, afectando así tanto al hombre como a su entorno.

Sin embargo, al tener el caucho una serie de propiedades elásticas (producto del proceso químico de vulcanización) se propone este material como un agregado valioso para la modificación del asfalto mejorando sus condiciones mecánicas favoreciendo el comportamiento elástico del mismo y a su vez afectar de manera positiva las características térmicas y acústicas del pavimento donde es incorporado.

2.2 Preparación del asfalto modificado con caucho

El caucho proveniente del reciclaje de llantas usadas puede ser utilizado en la preparación de mezclas asfálticas mediante dos métodos conocidos como el proceso en seco o vía seca y el proceso en húmedo o de vía húmeda. (Ramírez, Ladino & Rosas, 2014).

En el primer caso (vía seca) Ramírez y colaboradores en 2014 mencionaron que el caucho se usa como una fracción del agregado fino y en el segundo proceso este material actúa como un agente que modifica las características del ligante. Una de las principales características que genera

el uso del GCR es el incremento de la viscosidad resultante con lo cual el asfalto se torna de flexibilidad menor a bajas temperaturas y pierde plasticidad ante temperaturas más elevadas con lo cual se mejora la acción deformante permanente, la acción de fatiga y resistencia de fisurado a temperaturas cercanas al cero absoluto. (Ramírez, et al, 2014).

La Figura 11 presenta el procedimiento general para fabricar asfalto-caucho por vía húmeda.



Figura 11. Procedimiento para fabricar el asfalto-caucho por Vía Húmeda. Fuente: Ramírez, Ladino & Rosas, (2014), p.17.

Pereda & Cubas, (2015) sostienen que la fuerte investigación que se viene desarrollando en diferentes países como Brasil y Estados Unidos en los últimos años al incluir el caucho como material ligante en la producción de carpetas asfálticas ha logrado que este material haya sido

reglamentado dentro de la norma ASTM (American Society for Testing and Materials), logrando que este material fuese aprobado como un agente modificador del asfalto.

Dentro de las ventajas del caucho, Conejo & Vargas (2017) mencionan entre otras que su uso contribuye a obtener mezclas de mayor resistencia a los fenómenos de fatiga y de ahilamiento, incrementa la resistencia al envejecimiento y oxidación del ligante asfáltico, incrementa la resistencia de la mezcla del agrietamiento por bajas temperaturas, hace más flexible la mezcla asfalto-caucho en altas y bajas temperaturas, incrementa la resistencia del asfalto a el efecto de humedad, hace mayor la elasticidad del ligante, maximiza la resistencia al desgaste por el efecto abrasivo debido a que genera mezclas porosas, abiertas y/o drenantes, Minimiza el efecto del ruido por rodadura, hace mezclas más duraderas y de menor mantenimiento, hace menor el espesor de la capa asfáltica y disminuye el impacto ambiental generado por las llantas usadas.

En el caso colombiano, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) desde 2001 han desarrollado investigaciones orientadas al mejoramiento de las capas asfálticas usando caucho reciclado (GCR), con el fin de identificar sus ventajas y desventajas al ser aplicadas como agregados en las carpetas asfálticas de la ciudad de Bogotá. (Martínez, Caicedo, González, Celis, Fuentes & Torres, 2018).

El origen que llevo a esta entidad a desarrollar una tecnología para la implementación del caucho en sus mezclas asfálticas convencionales derivó de los resultados que arrojó un estudio sobre impacto ambiental en el Distrito Capital que demostró que en Bogotá, el impacto ambiental

por desechos sólidos evidencio que las llantas usadas por el parque automotor se convierten en un grave problema de contaminación ambiental en la capital colombiana. (Martínez, et al, 2018).

En la Tabla 3 se presentan propiedades físicas de los cementos asfálticos con y sin la adición de GCR:

Tabla 3.

Ejemplos de propiedades físicas de cementos asfálticos con y sin adición de caucho reciclado.

Código	Ductilidad	Recuperación Elástica	Penetración	Punto Ablandamiento	Densidad	Pérdida de masa
	[25°C]	[25°C, 50 mm/min, 20 cm]	[25°C, 100 g, 5 s]		[25°C]	
	ASTM D113	ASTM T-301-95	ASTM D5	ASTM D 36	ASTM D70	ASTM D2872
	[cm]	[%]	[1/10 mm]	[°C]	[g/cm ³]	[%]
Cemento asfáltico original						
A	> 100	6.25	65	51	1.02	-
B	> 100	5	71	44.8	1.02	-
Residuo RTFO						
A	48.5	-	45	51.7	0.97	1.14
B	> 100	-	54	48.8	1.03	1
Residuo RTFO+PAV						
A	9.9	-	38	62.3	0.89	-
B	7.75	-	18	66.9	0.99	-

Fuente: Martínez, et al, (2018) p. 43.

De la Tabla 3, Martínez y colaboradores en 2018 evidencian que en comparación a las características físicas del cemento asfáltico original (asfalto convencional) la adición de partículas de caucho reciclado mejoraron las condiciones de ductilidad, el punto de ablandamiento, la densidad de las mezclas asfálticas modificadas y la capacidad de penetración.

Como conclusión Martínez y colaboradores en 2018 sugieren como el reciclado de llantas como una acción sustentable para la obtención de grano de caucho convirtiendo un elemento contaminante en un material valioso para la infraestructura vial, el cual podría mejorar la calidad de los pavimentos donde se empleara permitiendo mejoras en el desempeño y propiedades mecánicas y químicas del asfalto.

2.3 Caracterización reológica y térmica del asfalto modificado con caucho.

2.3.1 Caracterización reológica de asfaltos modificados con caucho.

Cárdenas & Fonseca, (2009) mencionan que:

“Las propiedades reológicas del asfalto dependen de las proporciones en que están presentes sus componentes, las cuales varían de acuerdo con el origen de los crudos de petróleo. El comportamiento reológico del ligante tiene una influencia significativa en las propiedades de la mezcla asfalto-agregado (ahuellamiento, fatiga y susceptibilidad térmica)” p.1.

En su estudio, Cárdenas & Fonseca, (2009) modificaron asfalto 70-90 proveniente del complejo industrial de Barrancabermeja ubicado en el departamento de Santander (Colombia) mediante la incorporación de poliestireno expandido (1%) y llanta de caucho reciclada (14%) molidos en un primer ensayo. A su vez en un segundo tratamiento, optimizaron la granulometría de estos dos compuestos homogenizando el poliestireno expandido en un rango de tamiz del número 10 al número 40 y en el caso del caucho en un tamaño menor a los 40 μm usando tamiz de malla número 40 con el fin de que se lograra crear una red de polímeros homogénea con el

asfalto y los compuestos modificadores (poliestireno expandido y caucho) como se ha demostrado en revisiones de microscopía electrónica.

Este estudio presentó como conclusiones que en comparación al asfalto original, el asfalto modificado con estos ligantes (poliestireno expandido y caucho reciclado) incrementa de manera significativa los valores de viscosidad del asfalto modificado sin embargo, se hace indispensable manejar una granulometría controlada para garantizar la homogenización de la mezcla para evitar que este se tome un aspecto heterogéneo y multifásico y de esta forma se logre obtener un asfalto con unas condiciones reológicas óptimas que garanticen su calidad al momento de ser utilizados en la creación de vías. En el apéndice A se presentan las curvas de los asfaltos convencionales y modificados con grano de caucho efectuados por Cárdenas & Fonseca, (2009) donde se presenta la viscosidad alcanzada obtenida bajo Arrhenius truncado (0,9945 y 0,9968).

Por otra parte, Ramírez, Ladino & Rosas, (2014) diseñaron un estudio para evaluar una mezcla asfáltica con asfalto caucho usando la tecnología GAP GRADED en la ciudad de Bogotá. En su estudio, modificaron asfalto convencional con la adición de grano de caucho (7.3 AL 7.7%) obteniendo un punto de ablandamiento de 65.5. En la Figura 12 se presenta el resultado analítico de las pruebas reológica efectuadas en sus muestras valoradas.

R DT 88 N.R: 1				MANUFACTURAS Y PROCESOS INDUSTRIALES LTDA			
REPORTE DE CALIDAD DE ASFALTOS MODIFICADOS CON CAUCHO							
FECHA: <u>12 de Enero de 2011</u>		COCHADA No. <u>N.A.</u>					
CLIENTE: <u>CONSTRUCTORA LHS</u>		DESPACHO No. <u>N.A.</u>					
TIPO DE ASFALTO:		<u>TIPO III MODIFICADO CON CAUCHO.</u>					
PROPIEDAD	NORMA DE REFERENCIA	ESPECIFICACION		REPORTE DE CONTROL DE CALIDAD	FRECUENCIA DE ENSAYO	FECHA ULTIMO ENSAYO	RESPONSABLE ENSAYO
		A.S.T.M. D-6114-97					
		MIN	MAX				
Penetración @ 25°C, 100 gr, 5 seg, (mm/10)	ASTMD-5	50	100	62	POR COCHADA	07/12/2010	MPI
Penetración @ 4°C, 200 gr, 60 seg, (mm/10)	ASTMD-5	25	----	35	POR COCHADA	07/12/2010	MPI
Punto de ablandamiento, (°C)	ASTMD-36	51,7	----	65,5	POR COCHADA	07/12/2010	MPI
Resiliencia @ 25°C, %	ASTMD-5329	10	----	30	POR COCHADA	07/12/2010	MPI
Viscosidad Haake @ 175°C (347°F), cP	ASTMD-2196	1500	5000	2800	POR COCHADA	07/12/2010	MPI
Peso Específico	INV E-707	----	----	1.016	TRIMESTRAL	07/12/2010	MPI
Punto de Chispa, (°C)	ASTMD-93	232,2	----	282	POR COCHADA	07/12/2010	MPI
PRUEBAS AL RESIDUO TFOT							
Pérdida por Calentamiento en película en Movimiento @ 163°C, 5 horas (%)	ASTMD-1754	----	1	0,45	SEMANAL	07/12/2010	MPI
Penetración del residuo después de la pérdida por calentamiento, % de la penetración original	ASTMD-5	75	----	79,0	SEMANAL	07/12/2010	MPI

Figura 12. Reporte de Calidad de Asfalto Modificado Con Caucho (7.3 AL 7.7%). Fuente (Ramírez, et al., 2014) P.33.

2.3.2 Caracterización térmica de asfaltos modificados con caucho.

Múnera, (2012) menciona que el objetivo de caracterizar térmicamente los asfaltos se basan en establecer los valores pertinentes de la temperatura de transición vítrea (T_g) que tiene una estrecha relación con los parámetros de peso molecular, rigidez, polaridad y la aromaticidad propia de estas estructuras moleculares. Al identificar estas transiciones vítreas se puede determinar o estimar la temperatura a la cual este compuesto se torna frágil o llega a presentar fases amorfas que se traducen en una menor resistencia al agrietamiento. Para ello, se utilizan pruebas calorimétricas como la MDSC (prueba de calorimetría diferencial de barrido modulado) que mide las temperaturas y el flujo de calor que sufren los materiales o componentes del asfalto y que miden la absorción de calor (proceso endotérmico) o el desprendimiento de calor (proceso exotérmico). La caracterización térmica permite obtener los valores de la temperaturas de transición vítrea y cristalización, el punto de fusión y ebullición, el calor específico, la oxidación, la pureza y estabilidad térmica del material entre otros parámetros fisicoquímicos empleados para evaluar la calidad de los asfaltos a emplear en la construcción de vías.

2.4 Porosidad y penetración de asfaltos modificados con caucho.

El reciclado de caucho destinado para la elaboración de vías asfálticas ha sido implementado en los Estados Unidos desde hace treinta años. (Campaña, Galeas & Guerrero, 2015).

La adición de caucho a este tipo de asfaltos modificados afectan de forma positiva la durabilidad de los mismos debido a que este material disminuye el agrietamiento del cemento

asfáltico, se aumenta la capacidad de adherencia en superficies húmedas con lo que se disminuye la accidentabilidad vehicular y se logra una reducción sonora (disminución de ruido) a través del uso de este tipo de vías. (Morcillo, González, Hernández & Hidalgo, 2008).

Precisamente sobre esta reducción sonora, el ruido de rodadura vehicular genera un alto grado de contaminación en los asfaltos convencionales y se ve disminuido adecuadamente en los asfaltos modificados con caucho al generarse cambios estructurales y físicos en el aspecto de porosidad. (Morcillo et al, 2008).

En su estudio Morcillo et al, (2008) manifestaron que:

“El ruido de rodadura se caracteriza por presentar diferentes contribuciones en su generación. En primer lugar, se comenta la generación mecánica cuyo efecto se manifiesta en forma de vibraciones radiales y tangenciales debidas a los impactos y choques resultantes del contacto entre el perfil de la rueda y el pavimento”. p.4.

La Figura 13 muestra la generación de ruido de rodadura que se da al girar sobre el pavimento el neumático vehicular.

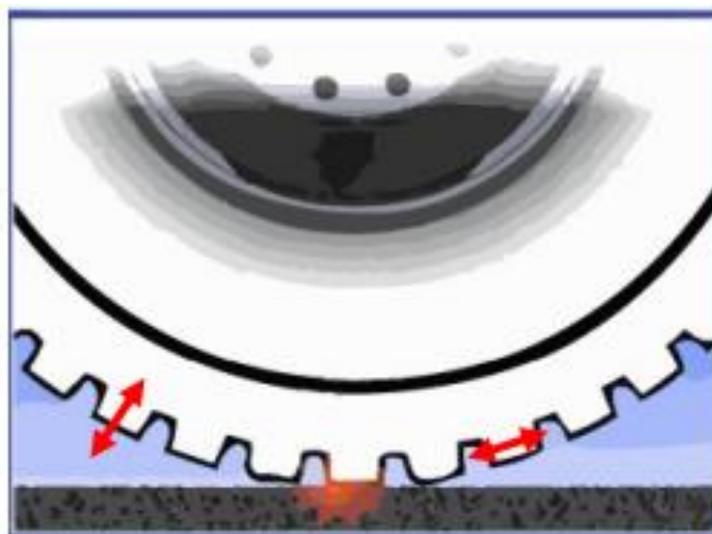


Figura 13. Niveles de ruido por rodadura por contacto mecánico del neumático-pavimento. Fuente: Morcillo et al, (2008). p.4.

Estas vibraciones se originan cuando el neumático en rozamiento genera por su movimiento cinético sonidos agudos o graves que de acuerdo a sus patrones de vibración y radiación pueden afectar el oído. Esto se da cuando las dos superficies expuestas (asfalto y rueda) presentan alto grado de dureza.

De otra forma, también se genera un ruido por cuestiones aerodinámicas debido a la fuerza del flujo de aire que atraviesa los surcos de las ruedas y que al girar circularmente se orientan a chocar contra el pavimento generando una onda de choque “air pumping” que se encuentra coartado por la resistencia que ofrece el pavimento al movimiento de giro de la rueda.

Sin embargo, cuando se presenta un pavimento denso o duro las presiones alcanzadas se elevan de forma exponencial y de esta manera el ruido crece; por el contrario, si el pavimento posee una menor resistencia es decir se trata de pavimentos flexibles o porosos como es el caso de los pavimentos modificados con caucho, su nivel de ruido disminuye ostensiblemente, llegando incluso a ubicarse en el segmento de 1 KHz a 3 KHz.

En el caso de la fricción, la Figura 14 presenta el contacto existente entre el pavimento y la rueda lo que genera características adhesivas y micro movimiento entre el labrado del neumático y la carretera.

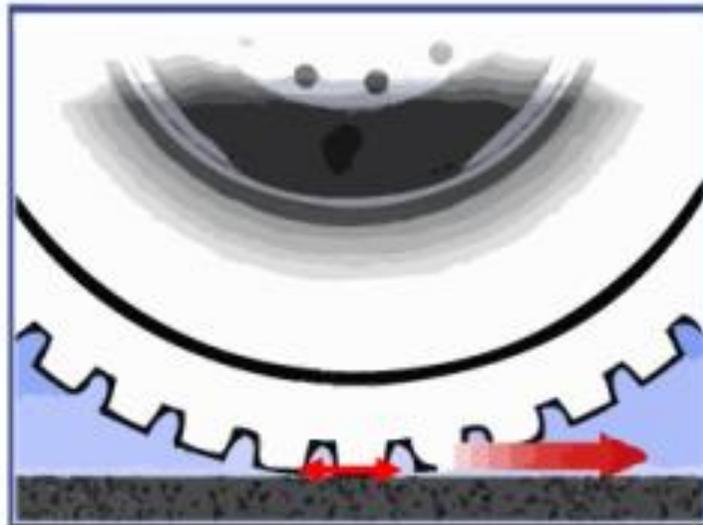
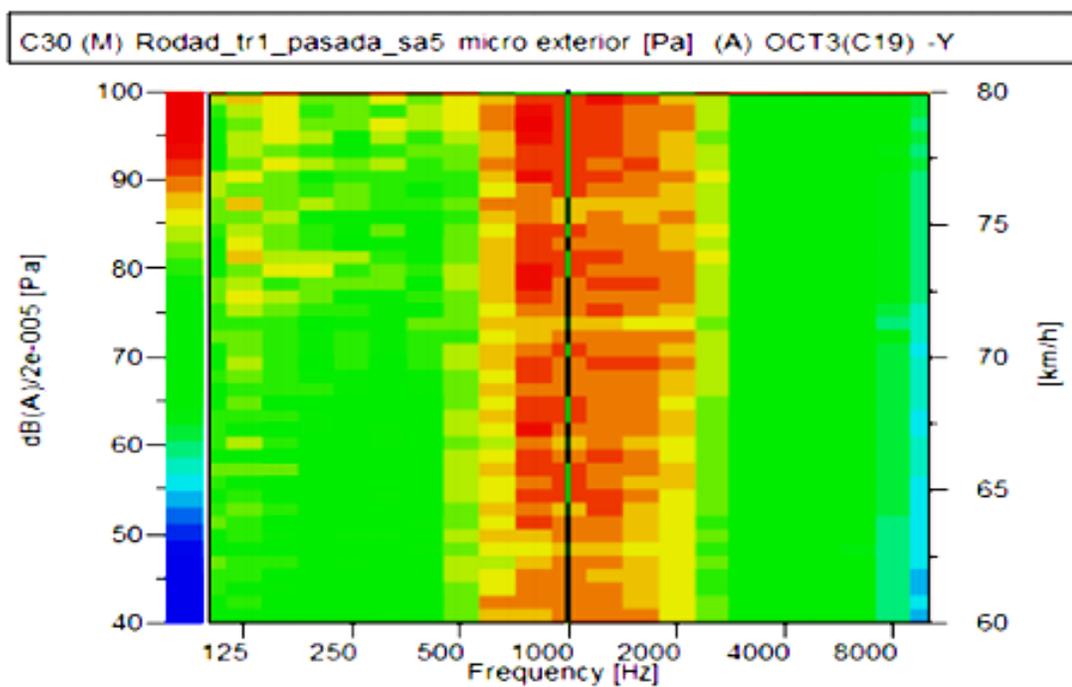


Figura 14. Incremento del nivel de ruido de rodadura por efecto de la fricción. Fuente: Morcillo et al, (2008). p.5.

Esta fricción se considera como aquellos fenómenos acústicos asociados al stick-slip y el stick-snap alcanzando valores de frecuencia superiores a 1 KHz. Para evidenciar la influencia de la porosidad del asfalto modificado con caucho, se pueden realizar pruebas auditivas siguiendo la campana de Cambell. De esta forma Morcillo et al, (2008) presentan los resultados de una prueba comparativa entre los niveles de ruido obtenidos entre un asfalto convencional y uno modificado con caucho se evidencian a continuación en la Figura 15.

A. Asfalto convencional



B. Asfalto modificado con caucho

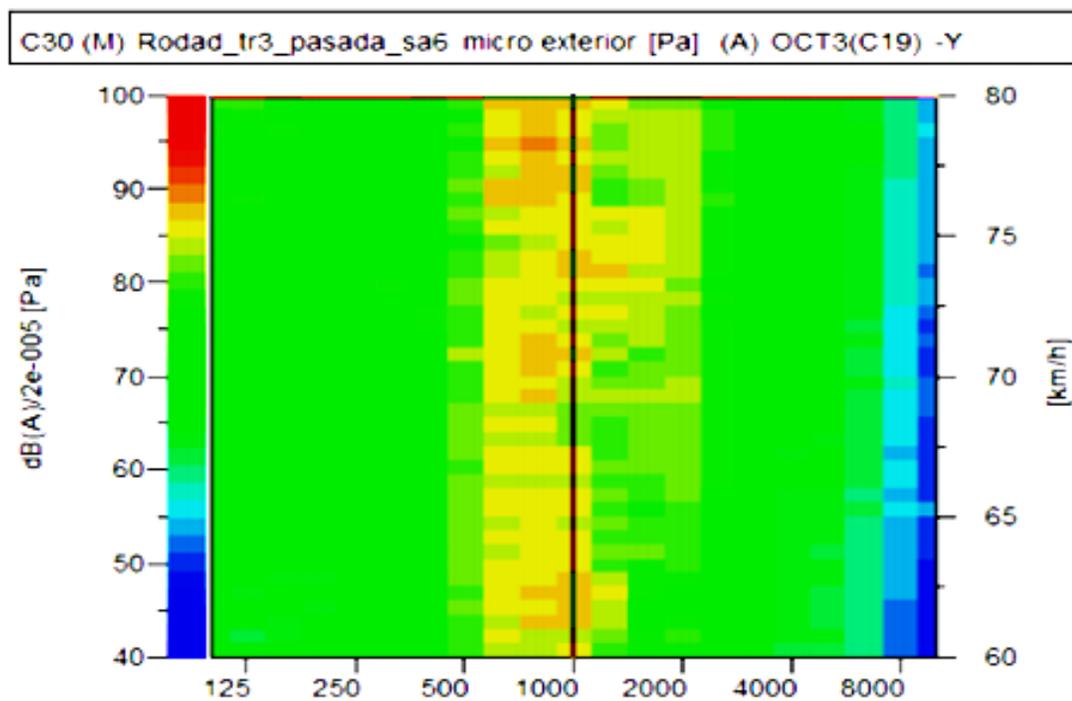


Figura 15. A. Diagrama de Campbell para determinar el ruido de rodadura de un asfalto. Fuente: Morcillo et al, (2008). p.10.

De la Figura 15 se puede evidenciar que la incorporación de caucho a la carpeta asfáltica reduce los decibeles que impactan de forma negativa sobre el nivel de ruido que soportan las vías durante su tránsito vehicular por lo tanto, la adición de este material se convierte en un agregado positivo para el mejoramiento de la calidad de este material.

Capítulo 3. Comparación técnica del asfalto convencional y modificado con caucho.

3.1 Comparación de las características reológicas del asfalto convencional y modificado con caucho.

“Uno de los principales objetivos de un asfalto modificado es aumentar la resistencia a la deformación en temperaturas de servicio altas, sin afectar adversamente las propiedades a otras temperaturas. Esto se puede lograr incrementando el stiffness del asfalto para que la respuesta viscoelástica total se reduzca y, por tanto, se presente una reducción en la deformación permanente, o aumentando la componente elástica del asfalto, y por tanto disminuyendo la componente viscosa, lo que origina también una reducción en la deformación permanente”. (Infante & Vásquez, 2016). P. 67.

Nuestro país, se encuentra ubicado en la zona ecuatorial y se caracteriza por temperaturas cálidas por la incidencia de la luz solar en esta zona del planeta. Sin embargo, debido a la presencia de las cordillera de Los Andes que atraviesan el territorio y conforman tres cadenas montañosas (cordillera oriental, central y occidental) nuestro país presenta diversidad de pisos térmicos que van desde el cálido hasta el páramo lo que dificulta el desarrollo de mezclas asfálticas basadas en un solo tipo de componentes debido a que estas condiciones geológicas y geográficas propias del territorio colombiano hacen necesario adaptarlas de acuerdo a los parámetros ambientales (temperatura, humedad, precipitación) y de tránsito a las que se van a desarrollar.

Infante & Vásquez, (2016) sostienen que existen casos donde las características propias de las mezclas asfálticas convencionales no soportan las acciones conjuntas derivadas del clima y el tránsito al que se ven sometidos por lo que se emplean con mayor frecuencia ligantes que mejoren las propiedades reológicas y de esta forma se logre mejorar la adherencia, la resistencia al

envejecimiento y disminuir la susceptibilidad de este tipo de asfaltos a las condiciones térmicas siendo el caucho uno de los materiales que se adapta a este tipo de mejoramientos.

Cremades, (S/A) sostiene que los asfaltos convencionales presentan características que limitan su utilización en vías para tránsito vehicular por lo que en la fabricación de recubrimientos con características realmente modificadas, se hace necesario comprender lo que significa tener un ligante o asfalto ideal que mejore la susceptibilidad térmica que se adapte a la variabilidad que pueda generarse por las condiciones climáticas o el tráfico vehicular al que se vea sometido la vía asfáltica. De esta manera se debe conocer las características fisicoquímicas de la mezcla a trabajar con el fin de evitar efectos de deformación permanente, fatiga o agrietamiento luego de ser utilizado en las obras civiles. En la Figura 16 se presenta la prueba de sensibilidad térmica de un ligante considerado como ideal.

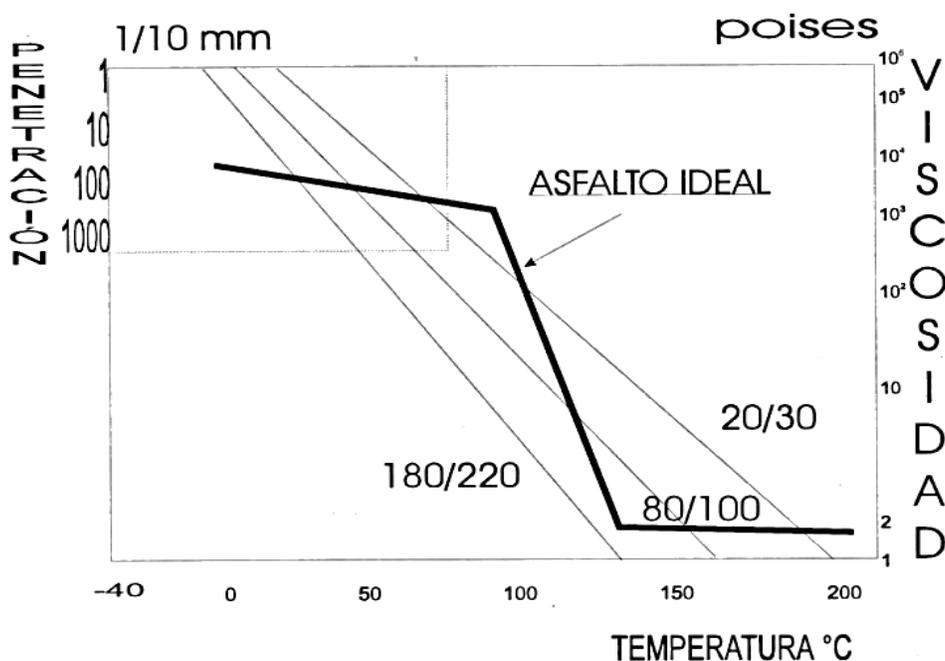


Figura 16. Sensibilidad Térmica de un Ligante Termoplástico "Ideal". Fuente: Cremades (S/A).

Por otra parte, Cremades (S/A) menciona que en un asfalto modificado se debe preservar las propiedades de adhesión activa y pasiva de los ligantes tradicionales al igual que fortalecer su resistencia al envejecimiento con el fin de disminuir los mantenimientos de las obras civiles destinadas a la fabricación de carreteras. En el Apéndice B se presentan las propiedades físicas del cemento asfáltico modificado con caucho reciclado y en la Figura 17 se presenta un gráfico que simula la susceptibilidad a un tiempo de carga de un ligante ideal.

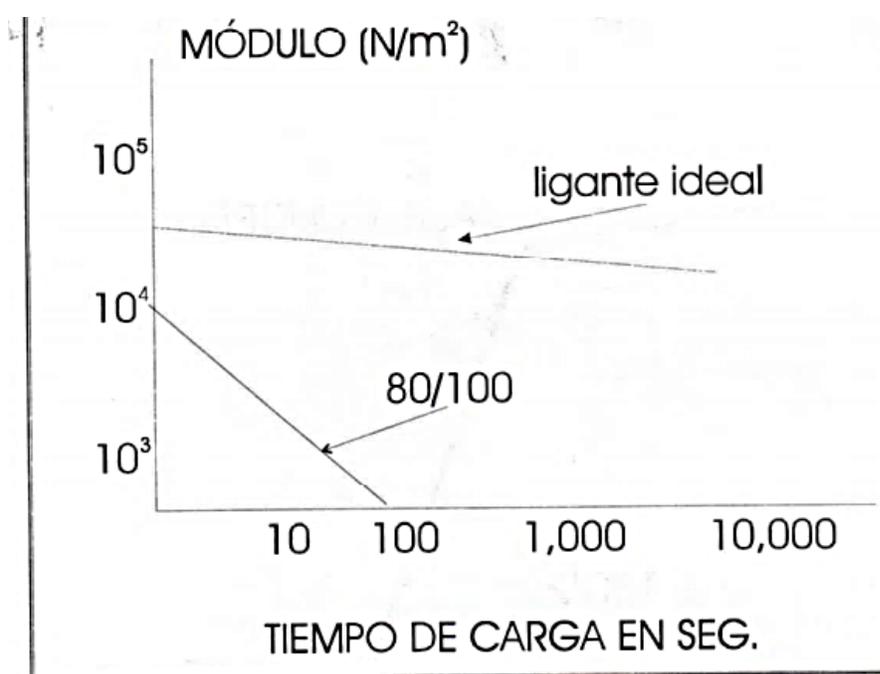


Figura 17. Susceptibilidad a un tiempo de carga de un ligante ideal. Fuente: Cremades (S/A).

Estas cualidades (adhesividad y de adherencia activa y pasiva) permiten a la capa asfáltica modificada una disminución de su deformación plástica a temperaturas elevadas, así como presentar una mejor respuesta de comportamiento a temperaturas bajas y a su vez presentar un mejoramiento de la carpeta asfáltica al ser sometida a cargas pesadas y con cargas repetidas debido al flujo y tráfico al que se vean sometidas en su tiempo de servicio.

En cuanto a la temperatura de compactación, Rondón, Molano & Tenjo, (2012) sostienen que la disminución de la temperatura de compactación en mezclas de asfalto convencional (sin agentes modificadores) frente a mezclas de asfalto modificado por vía húmeda usando grano de caucho reciclado son menores en un 20% a 34% lo cual repercute en fases dispersas y amorfas que disminuyen la calidad del asfalto.

4. Conclusiones

En la Tabla 4 se condensan las conclusiones originadas a partir de la presente monografía:

Tabla 4.

Conclusiones de la monografía.

REFERENTE	CARACTERISTIC A O PRUEBA DE LABORATORIO EVALUADA	ASFALTO CONVENCIONAL	ASFALTO MODIFICAD O CON GRANO DE CAUCHO	COMPARACION
Suárez, (2019)	Penetración Norma E-706 .1 mm de penetración en asfaltos 60-70 /80-100 (25°C, 100 g, 5 s)	65		Los valores Porcentajes presentados por Suárez corresponden a la norma E-706 y al compararlos con los resultados de Ramírez, et al (2014) se obtuvo valores similares para ambos tipos de asfalto (convencional y modificado con caucho) en porcentajes del 7.3 a 7.7%
Ramírez, Ladino & Rosas, (2014)	Penetración NormaASTDM-5 (25°C, 100g, 5s) mm/10		62,5	
Castro, Rondón & Barrero, (2015)	Punto de ablandamiento	50		La diferencia reportada entre ambos estudios fue de 13.75 con lo cual se evidencia que el asfalto caucho posee mayor punto de flexión ante cambios de temperatura
Ramírez, Ladino & Rosas, (2014)	Punto de ablandamiento		63,75	
Martínez, et al, (2018)	Ductilidad (25° C) Norma ASTM D113	100		Los valores obtenidos en los estudios llevados a cabo por Martínez y colaboradores en (2018), se puede evidenciar que ambos estudios poseen la misma capacidad dúctil logrando obtener
Martínez y colaboradores en (2018)	Ductilidad		100	

				valores similares capaces de soportar deformaciones antes llegar al punto de rompimiento.
Martínez, et al, (2018)	Densidad (25°) ATM D70	1.02		En comparación de los cementos asfálticos convencionales y modificados se puede confirmar que gracias a la incorporación de GCR a mezclas asfálticas mejoran la densidad de las mezclas obteniendo una mejor calidad en el betún.
Martínez y colaboradores en (2018)	Densidad		1.03	
Suárez, (2019)	Pérdida de masa E-720 %	1		Al comparar los estudios presentados se puede observar que la pérdida de masa para asfaltos convencionales y asfaltos modificados con GCR sufre pérdidas de masa debido a la pérdida de compuestos y absorción de los componentes por parte de agregados produciendo un asfalto más duro.
Martínez, et al, (2018)	Pérdida de masa ASTM D2872		1	

Fuente: Elaboración propia.

5. Recomendaciones

Al usar caucho como agente ligante para la producción de asfaltos modificados se debe tener en cuenta la granulometría de sus partículas con el fin de lograr una mezcla homogénea con lo cual su viscosidad y resistencia no se vea afectada generando problemas futuros asociados a las características reológicas de este tipo de material al ser usadas en el desarrollo de vial.

Al favorecer su porosidad, flexibilidad, reducción al impacto sonoro y mejoramiento a los cambios de temperatura asociada a cambios climáticos y fortalecer los índices de adhesión la adición de gránulos de caucho para la generación de asfaltos modificados, puede ser una alternativa viable a tener en cuenta por los diferentes agentes prestadores de servicio para el desarrollo de vías en el territorio nacional en procura de ofrecer vías de mayor calidad y seguridad para los ciudadanos colombianos.

Referentes bibliográficos

- Adauto, R. (2019). Comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica en caliente con adición de ceniza de caña de maíz. Universidad Ricardo Palma. Escuela de Posgrado Maestría en Ingeniería Vial con Mención en Carreteras, Puentes y Túneles. 218 p.
- Albañil, J. & Ortega, C. (2019). Evaluación Del Aprovechamiento de Caucho de Neumáticos Reciclados Para la Fabricación de Mampuestos Termo – Acústicos. Universidad Piloto de Colombia Facultad de Ingeniería Seccional Alto Magdalena. Girardot – Cundinamarca. 125 p.
- Alonso, J.P. (2017). Obtención de Asfalto desde petróleo. Madrid – España
<https://asfaltomadrid.com/asfalto-y-petroleo/>
- Arboleda, E. & Gutiérrez A. (2015). Estudio Comparativo de las Normas Técnicas Para la Construcción de Pavimentos Flexibles en Colombia y Brasil. Universidad Libre Seccional Pereira Facultad De Ingenierías Ingeniería Civil. Pereira, Colombia. 65 p.
- Ballena, C. (2016). Utilización de fibras de polietileno de botellas de plástico para su aplicación en el diseño de mezclas asfálticas ecológicas en frío (tesis de pregrado). Universidad Señor de Sipán. Chiclayo, Perú.
- Brindis, E. (2002). Propiedades básicas de los polímeros. 46 p. Consultado el 09 de diciembre de 2019 de:
http://www.bibliociencias.cu/gsd/collect/libros/import/Polimeros_Propiedades_Basicas.pdf
- Campaña, O., Galeas, S. & Guerrero, V. (2015). Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. Revista Politécnica. Septiembre 2015, Vol. 36, No. 3. 7 p.
- Cárdenas, J. & Fonseca, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 12, p. 125-137. Diciembre 2009 Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia).
- Castro, A. (2018). Investigación Sobre Mezclas Asfálticas en Frío 100% Recicladas Con Adición de Residuos Sólidos. Universidad del Norte. Tesis de Grado Para Optar Por El Título De Magister En Ingeniería Civil. 161 p.
- Castro, W., Rondón, H. & Barrero, J. (2016). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. Ingeniería [en línea]. 2016, 21(1), 7-18[fecha de Consulta 4 de Mayo de 2020]. ISSN: 0121-750X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=498853952002>

- Conejo, D. & Vargas, S. (2017). Análisis comparativo del comportamiento mecánico de mezclas de concreto asfáltico tipo 2 (mdc-19) con adición de polímeros. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. 68 p.
- Cruz, D. & Salazar, W. (2019). Estudio del desempeño mecánico de una mezcla asfáltica natural, proveniente de la mina de pavas, en el departamento del Caquetá. Universidad Católica de Colombia Facultad De Ingeniería. Especialización En Ingeniería De Pavimentos Bogotá D.C. Consultado el 15 de febrero de 2020 en <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23403/1/Estudio%20del%20desempe%C3%B1o%20mec%C3%A1nico%20de%20una%20mezcla%20asf%C3%A1ltica%20natural.pdf>
- Durán, F. (2016). Validación de los métodos de ensayo de punto de inflamación en cemento asfáltico, gasóleo y jet fuel. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Química Carrera de Ingeniería Química. Tesis de grado. 68 p.
- Florez, J., Gómez, S. & Cely, N. (2018). Caracterización Física y Reológica del Asfalto Modificado Con Aceite de Coco. Universidad Católica De Colombia. Especialización En Ingeniería de Pavimentos. Bogotá D.C. Tesis de grado 48 p.
- Forigua, J. & Pedraza, E. (2014). *Diseño de mezclas Asfálticas Modificadas Mediante La Adición De Desperdicios Plásticos*. Bogota D.C: Universidad Católica De Colombia.
- Goicochea, F. (2019). Estudio de un asfalto con adición de caucho de neumático reciclado como polímero base, Chachapoyas – Amazonas. Facultad De Ingeniería Civil y Ambiental Escuela Profesional de Ingeniería Civil Tesis Para Obtener El Título Profesional De Ingeniero Civil. Chachapoyas – Perú. Consulta en línea el 15 de febrero de 2019 en: <http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1627/Goicochea%20Fernandez%200Fredy.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García, W. (2013). Estudio de la influencia del asfalto envejecido en el comportamiento mecánico de una mezcla de concreto asfáltico producida en caliente. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Tesis de grado. 341 p.
- Garzón, E. & Cárdenas, A. (2013). Variación de temperatura de los componentes de una mezcla densa en caliente tipo 3 con cemento asfáltico 80-100. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa De Ingeniería Civil Bogotá D.C. Tesis de grado Ingeniería Civil. 87 p.
- Infante, C. & Vásquez, D. (2016). Estudio Comparativo del Método Convencional y Uso de los Polímeros EVA y SBS en la Aplicación de Mezclas Asfálticas. Universidad Señor de SIPIAN. Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil. Tesis de grado. 260 p.
- Jiménez, A., Reyes, F., Daza, C. & Loría, L. (2013). Mejoramiento del asfalto 60/70 y la mezcla MDC-2 con nanotubos de carbono obtenidos a partir de Metano Vía Catalítica. Programa

- Infraestructura del Transporte (PITRA), Lanamme UCR.
- López, C. (2013). Comportamiento mecánico de mezcla asfáltica drenante. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería Civil y Agrícola Bogotá, Colombia. Maestría en Geotecnia. 185 p.
- Martínez, 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://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000100041>
- Mercado, R., Bracho, C. & Avendaño, J. (2008). Emulsiones asfálticas usos-rompimiento. Cuaderno FIRPS365-A. Módulo de enseñanza en fenómenos interfaciales. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Laboratorio de formulación Interfases Reología y Procesos. Mérida, Venezuela. 46 p.
- Ministerio de Transporte. Instituto Nacional de Vías INVIAS, (2017). Resolución 10099 del 27 de diciembre de 2017. Consultado el 10 de mayo de 2020 en: <https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/resoluciones-circulares-otros/6987-resolucion-10099-del-27-de-diciembre-de-2017/file>
- Morcillo, M.; González, J.; Hernández, M. & Hidalgo, A. (2008). Influencia de la porosidad de los asfaltos en la generación del ruido de rodadura. Universidad de Coimbra, Portugal. 12 p.
- Múnera, J. (2012). Modificación polimérica de asfaltos. Universidad EAFIT. Escuela de ingeniería Medellín. Colombia. 120 p.
- Ramírez, A., Ladino, I. & Rosas, J. (2014). Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología GAP GRADED para la ciudad de Bogotá. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Especialización en Ingeniería de Pavimentos, Bogotá D.C. 91 p.
- Ramírez, O. (2016). Análisis Comparativo del Proyecto de Norma DE044-16 Con La Especificación IDU 560 – 11 y Con El Artículo INVIAS 467-13 y La Norma INV – E – 824 -13 de Mezclas Asfálticas Con Grano De Caucho Mejorado. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad De Ingeniería. Especialización En Ingeniería De Pavimentos Bogotá D.C Diciembre 2016. 97 p.
- Ramírez, S. (2017). Caracterización hidráulica de mezclas asfálticas abiertas mediante la técnica de Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola Bogotá, Colombia. . Maestría en Geotecnia. 163 p..
- Reyes, O., Reyes, F. & Troncoso, J. (2006). Efecto de la presión de contacto y la temperatura en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica. *Revista de Ingeniería y Universidad*. Enero-junio,

2006, no. 10, p. 29-44.

Restrepo, H. & Stephens S. (2015). Reciclaje de Pavimentos Estudio de las Ventajas Económicas del Reciclaje en Frío In Situ de Pavimentos Asfálticos. Universidad de Medellín. Especialización en Vías y Transporte. Medellín. 86 p.

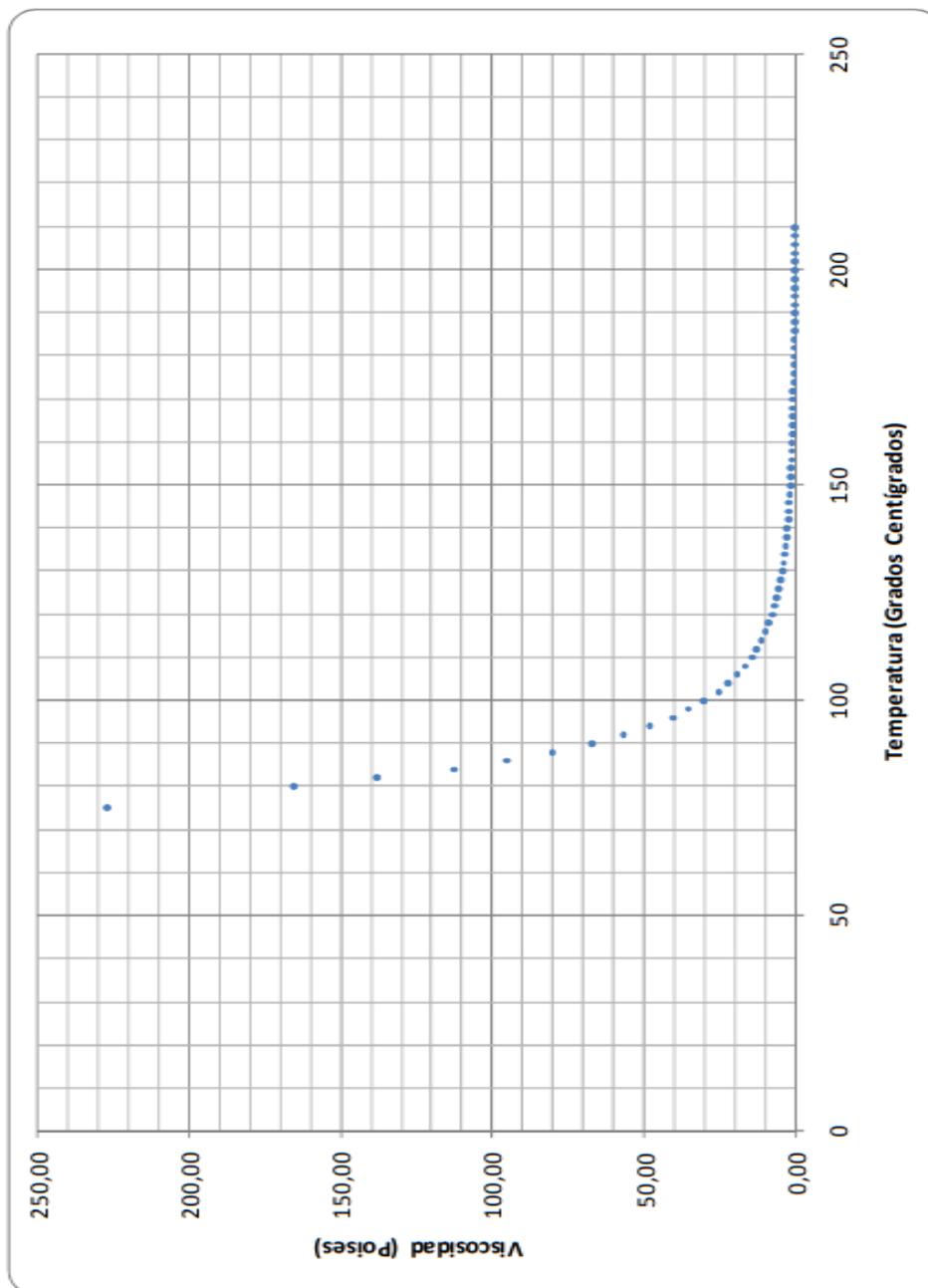
Rondón, H., Molano, Y. & Tenjo, A. (2012). Influencia de la Temperatura de Compactación Sobre la Resistencia Bajo Carga Monotónica de Mezclas Asfálticas Modificadas con Grano de Caucho Reciclado de Llantas. Rev. Tecno Lógicas No. 29, ISSN 0123-7799, julio-diciembre de 2012, pp. 13-31.

Rondón, H. & Reyes, F. (2015). Pavimentos. Materiales, construcción y diseño. 574 p.

Suárez, A. (2019) Análisis monotónico de mezclas densas en caliente con asfalto modificado con 50% de caucho y 50% de cuero. Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería Civil. Tesis de grado. 139 P.

Apéndice

Apéndice A. Ejemplos de curvas reológicas de asfalto convencional y modificado con caucho.



Fuente: Cárdenas & Fonseca, (2009) P. 130

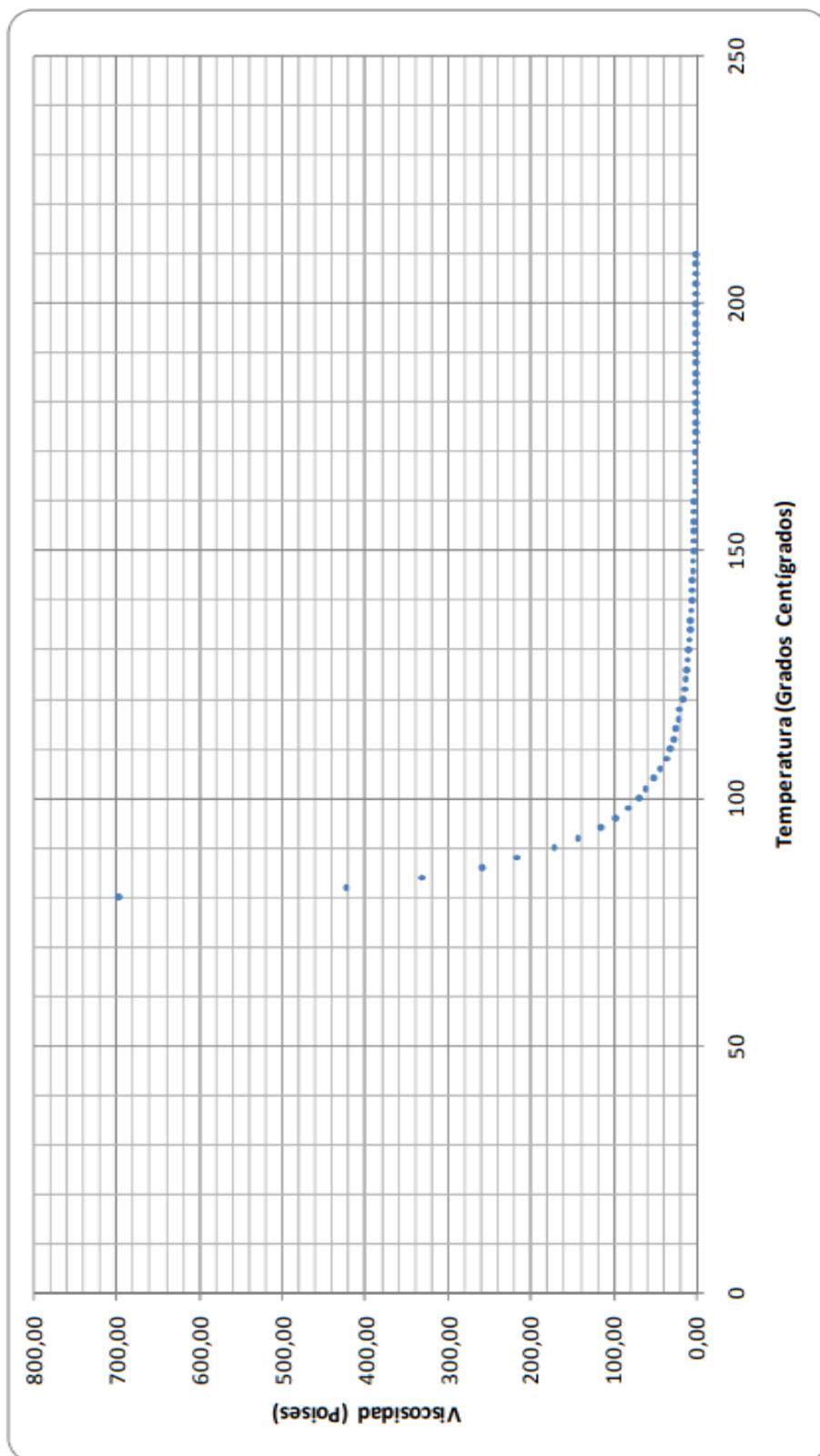


Figura 2. Curva reológica del asfalto CIB modificado sin granulometría controlada

Fuente: Cárdenas & Fonseca, (2009) P. 130

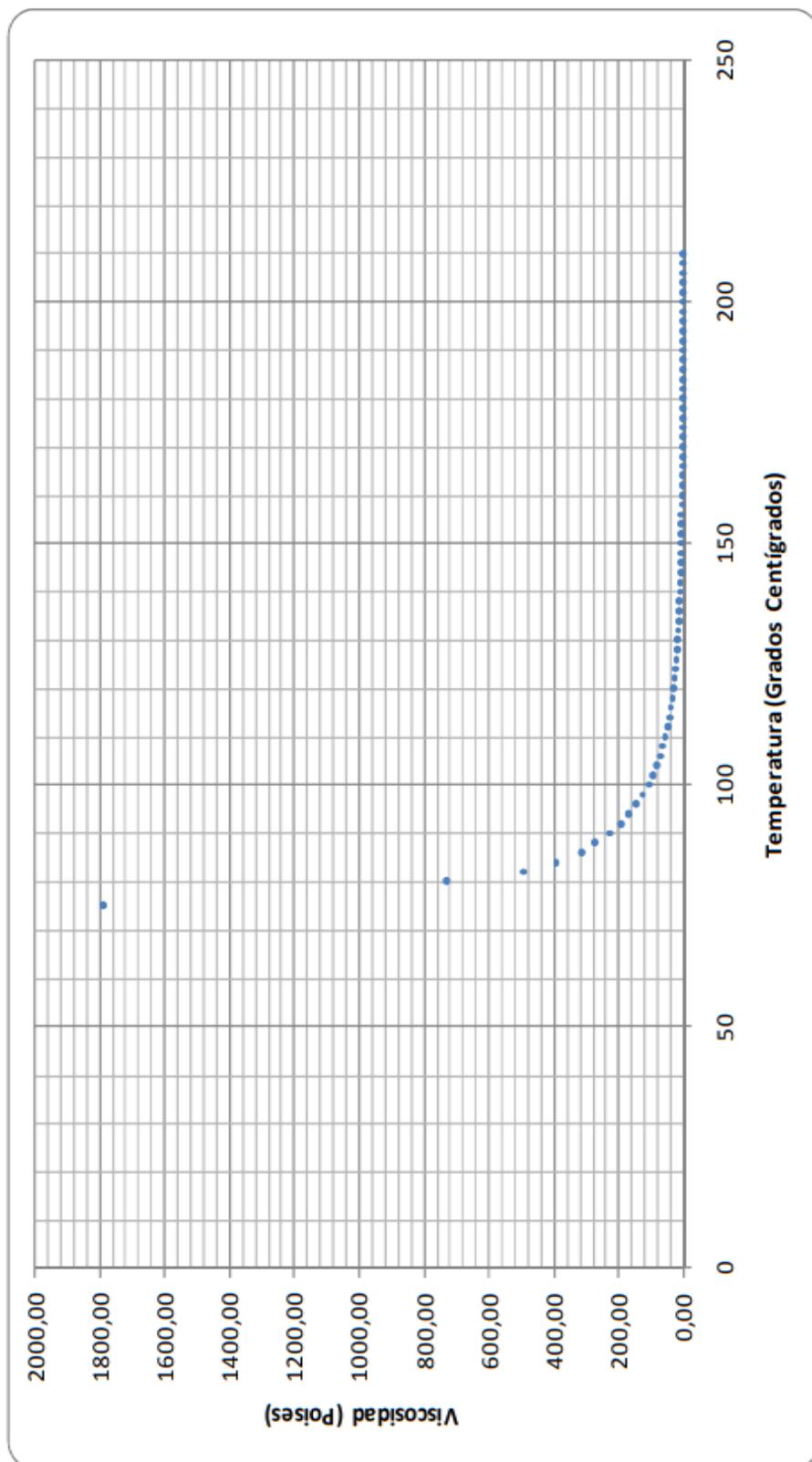


Figura 3. Curva reológica del asfalto CIB modificado con granulometría controlada

Fuente: Cárdenas & Fonseca, (2009) P. 130

Apéndice B. Lista de especificaciones físicas del asfalto modificado con caucho reciclado

PROPIEDADES	NORMA DE ENSAYO	TIPO DE ASFALTO-CAUCHO					
		TIPO I		TIPO II		TIPO III	
		Mín	Max	Min	Max	Min	Max
Viscosidad aparente a 175°C (Pa.s)	ASTM D-2196 Método A Modificado según ASTM D-6114	1.5	5.0	1.5	5.0	1.5	5.0
Penetración a 25 °C, 100g, 5s (1/10mm)	INV E-706	25	75	25	75	50	100
Penetración a 4 °C, 200g, 60s (1/10mm)	INV E-706	10	-	15	-	25	-
Punto de ablandamiento (°C)	INV E-712	57	-	54	-	52	-
Resiliencia a 25 °C (%)	ASTM D-5329	25	-	20	-	10	-
Punto ignición mediante copa abierta de Cleveland (°C)	INV E-709	230	-	230	-	230	-
Acondicionamiento en prueba de película delgada	INV E-720						
Penetración del residuo luego del acondicionamiento en prueba de película delgada, % de la penetración original	INV E-706	75	-	75	-	75	-

Tomado de:

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14348/3/Anexo%20E.%20Norma%20I NVIAS%20-%20Capitulo%204.pdf>