	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	08-07-2021	B
	Dependencia	Aprobado		Pág.
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		1(73)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Angie Daniela Bastos Becerra Keyla Stefania Alcoser Montaña		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Civil		
DIRECTOR	Mag. Katerine Carreño García		
TÍTULO DE LA TESIS	Influencia de los polímeros termoplásticos en las propiedades físico-mecánicas y reológicas de mezclas asfálticas en caliente		
TITULO EN INGLES	Influence of thermoplastic polymers on the physico-mechanical and rheological properties of hot asphalt mixtures		
RESUMEN (70 palabras)			
Se presenta una revisión literaria de los polímeros termoplásticos como modificador de asfalto para la elaboración de mezclas en caliente. Presentando los cambios que tienen las propiedades físico-mecánicas y reológicas del ligante al incorporar polímeros termoplásticos (elastómeros y plastómeros) a las mezclas convencionales. Donde se logra identificar que las modificaciones realizadas con estos materiales de composición polimérica mejora las propiedades del asfalto, prolongando el tiempo de servicio del pavimento.			
RESUMEN EN INGLES			
A literary review of thermoplastic polymers as an asphalt modifier for hot mix production is presented. Presenting the changes that the physical-mechanical and rheological properties of the binder have when incorporating thermoplastic polymers (elastomers and plastomers) to conventional mixtures. Where it is possible to identify that the modifications made with these polymeric composition materials improve the properties of the asphalt, prolonging the service time of the pavement.			
PALABRAS CLAVES	Polímeros, elastómeros, plastómeros, propiedades físico-mecánicas y reológicas		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Polymers, elastomers, plastomers, physico-mechanical and rheological properties		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 72	PLANOS:0	ILUSTRACIONES:19	CD-ROM:1



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
 Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88
 atencionalciudadano@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

**Influencia de los polímeros termoplásticos en las propiedades físico-mecánicas y reológicas
de mezclas asfálticas en caliente**

Angie Daniela Bastos Becerra

Keyla Stefania Alcoser Montaña

Facultad de ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Civil

Msc. Katerine Carreño García

11 Noviembre del 2021

Índice

Capítulo 1. Generalidades de las mezclas asfálticas	10
1.1 Antecedentes históricos de las mezclas asfálticas	10
1.2 Propiedades Físico-mecánicas de las mezclas asfálticas.....	13
1.2.1 Durabilidad.....	13
1.2.2 Adhesión y cohesión.....	13
1.2.3 Susceptibilidad a la temperatura.....	14
1.2.4 Endurecimiento y envejecimiento	14
1.3 Propiedades Reológicas de las mezclas asfálticas.....	15
Capítulo 2. Asfaltos modificados con polímeros termoplásticos	17
2.1 Polímeros termoplásticos como modificadores de mezclas asfálticas en caliente	17
2.2 Normatividad colombiana en el uso de asfaltos modificados con polímeros	20
2.3 Principales polímeros modificadores utilizados en el asfalto.....	31
2.3.1 Elastómeros	32
2.3.1.1 Estireno-butadieno-estireno (SBS).	33
2.3.1.2 Estireno- butadieno (SBR).	33
2.3.1.3 Grano de caucho reciclado (GCR).	33
2.3.2 Plastómeros.....	34
2.3.2.1 EVA.	34
2.3.2.2 Policloruro de vinilo (PVC).	34

	3
2.3.2.3 Tereftalato de polietileno (PET).	34
2.3.2.4 Polietileno de baja densidad (LDPE).	35
2.4 Propiedades físicas y reológicas en asfaltos modificados con polímeros termoplásticos	35
Capítulo 3. Análisis comparativo de la influencia de polímeros termoplásticos en mezclas asfálticas en caliente	38
3.1 Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas y reológicas de asfaltos convencionales y asfaltos modificados con polímeros termoplásticos en mezclas asfálticas en caliente.	38
3.1.1 Elastómeros.	38
3.1.1.1 Estireno-butadieno-estireno (SBS).	38
3.1.1.2 Caucho estireno-butadieno (SBR).	41
3.1.1.3 Grano de caucho reciclado (GCR).	44
3.1.2 Plastómeros.....	47
3.1.2.1 Etilvinilacetato (EVA).	47
3.1.2.2 Policloruro de vinilo (PVC).	49
3.1.2.3 Polietileno de tereftalato (PET).	52
3.1.2.4 Polietileno de baja densidad (LDPD o PEBD).	54
Conclusiones	56
Referencias	63

Lista de figuras

Figura 1 Esquema del firme empleado por los Babilónicos a mediados de 600 A.C.....	10
Figura 2 Primer pavimento asfáltico (Broad Street, New Jersey).....	11
Figura 3 Esquema del montaje para la obtención de asfalto modificado con polímeros.....	18
Figura 4 Consumo de caucho natural y sintético a nivel mundial de 1990 a 2018.....	19
Figura 5 Causas de la crisis de producción, uso y disposición del plástico de 1950 a 2017 a nivel mundial	20
Figura 6 Ensayo de penetración.....	23
Figura 7 Punto de ablandamiento	24
Figura 8 Ensayo de ductilidad.....	25
Figura 9 Ensayo de recuperación elástica por torsión	26
Figura 10 Esquema del recipiente para el ensayo de estabilidad al almacenamiento.....	27
Figura 11 Montaje con matraz de vidrio y metálico	28
Figura 12 Determinación de punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland.....	29
Figura 13 Horno y recipientes para el ensayo de película delgada rotatoria	30
Figura 14 Clasificación de polímeros	32
Figura 15 Visualización micro estructural para definir compatibilidad asfalto-polímero.....	36
Figura 16 Porcentaje en que aumenta la viscosidad del asfalto modificado.....	58
Figura 17 Porcentaje en el que disminuye la penetración del asfalto modificado.....	59
Figura 18 Porcentaje en que aumenta el punto de ablandamiento del asfalto modificado	59
Figura 19 Porcentaje en el que disminuye la ductilidad del asfalto modificado	60

Lista de tablas

Tabla 1 Especificaciones del asfalto modificado con polímeros	22
Tabla 2 Especificaciones físicas del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado	31
Tabla 3 Comparación de la caracterización del asfalto modificado con SBS	40
Tabla 4 Comparación de la caracterización del asfalto modificado con SBR	43
Tabla 5 Comparación de la caracterización del asfalto modificado con GCR	46
Tabla 6 Comparación de la caracterización del asfalto modificado con EVA	49
Tabla 7 Comparación de la caracterización del asfalto modificado con PVC.....	50
Tabla 8 Comparación de la caracterización del asfalto modificado con PET	53
Tabla 9 Comparación de la caracterización del asfalto modificado con PEBD o LDPE	55
Tabla 10 Porcentajes de aumento o disminución obtenidos en los ensayos de caracterización entre el asfalto convencional y el modificado.....	57
Tabla 11 Desempeño de polímeros elastomérico	61
Tabla 12 Desempeño de polímeros plastoméricos.....	62

Introducción

La construcción de caminos ha sido desde la antigüedad un símbolo de desarrollo económico y cultural, que ha servido principalmente como medio de comunicación y de comercialización. El desarrollo y el aumento de la población en las antiguas civilizaciones, hizo que los seres humanos mejoraran la forma en la cual que se trasladaban de un lado a otro. Por ello, uno de los objetos más importantes creados por el hombre, es la rueda, esto se debe, a que su invención cambió radicalmente la manera en la que los seres humanos se transportaba, paso de recorrer largos trayectos caminando o montando animales para viajar en carretas o carruajes de tracción animal y posteriormente vehículos de tracción mecánica.

Estos hechos generaron grandes cambios en la construcción de caminos, porque, para permitir el paso de los nuevos medios de transporte, era necesario construir tramos más largos y amplios. Los cuales estaban formados por materiales, que a través del tiempo también han ido acoplándose a las necesidades y avances de la época. Por ejemplo, en un principio existían solo caminos de tierra, que después se transformaron en caminos de piedra, adoquines, que ya no eran solamente puestos uno encajado con el otro, sino que comenzaron a utilizar sustancias que hicieran la vez de mortero para mantener todo en su lugar y así de manera progresiva hasta llegar las vías pavimentadas que se tienen en la actualidad. Además, la construcción de carreteras siempre ha tenido como objetivo, que dichas estructuras resistan el paso del tiempo para poder realizar viajes más confortables, en el menor tiempo posible.

En las últimas décadas la industria automotriz ha tenido un gran crecimiento, y como era de esperarse, el incremento en la producción y uso de vehículos, han generado la necesidad de construir carreteras con las características idóneas, que permitan una buena circulación del tránsito vehicular, con vías que soporten las cargas que ejercen los vehículos sobre el pavimento

y los cambios climáticos a los que pueda estar expuesta la estructura, dado que son factores que causan el deterioro de la carpeta asfáltica, ocasionando una disminución significativa en el tiempo de servicio del pavimento y las fallas que este pueda presentar.

Del mismo modo, a la hora de ejecutar una obra de infraestructura vial, también se debe tener en cuenta la calidad de materiales utilizados para la fabricación del pavimento. La forma en la que son procesados, manipulados y almacenados, influyen significativamente en el comportamiento de una mezcla asfáltica. Un mal manejo de los materiales, puede arrojar resultados poco satisfactorios en los ensayos de laboratorio que se le realicen a las muestras asfálticas, lo cual significa una pérdida en las propiedades físicas y reológicas de las mezclas.

Dado lo anterior, se debe reconocer que los asfaltos convencionales poseen buenas propiedades, pero cuando las exigencias del tránsito, el clima y la geografía de la zona en la que se va a realizar la construcción de la carretera son demasiado altas, hace que el rendimiento de estas mezclas en algunos casos sea insuficiente, aun cuando todos los procesos para la construcción se hallan hecho de manera correcta. Por esta razón, desde hace aproximadamente 60 años en todo el mundo se han realizado trabajos de investigación y se han desarrollado métodos que permitan agregar otra variedad de materiales a las mezclas, en la búsqueda de encontrar algún compuesto que pueda aportarles mejores propiedades.

En estas investigaciones se han utilizado gran variedad de materiales, que pueden ser añadidos al ligante o a los agregados, es decir, que pueden ser incorporados por vía húmeda o por vía seca. Pero el material que ha demostrado más compatibilidad y mejor comportamiento al modificar las mezclas asfálticas son los polímeros, de manera concreta los polímeros termoplásticos, los cuales modifican las propiedades físico-mecánicas y reológicas a las mezclas, gracias a las características que poseen este tipo de compuestos, son capaces de soportar cargas

sin sufrir grandes deformaciones y ser expuestos al calor sin perder sus propiedades. Es por esta razón y por los resultados positivos que genera su adición en las mezclas asfálticas, que estos materiales han tenido gran aceptación en la construcción de carreteras, tanto que su uso se ha implementado y ha sido normatizado.

Además, este tipo de polímero (termoplástico) es un material que se encuentra presente en muchos de los objetos que se utilizan en la vida cotidiana, pertenecen a los materiales que comúnmente se conocen como caucho y plástico. Y aunque son de gran utilidad, el mal manejo de estos desechos se ha convertido en una problemática ambiental, que se debe principalmente al tiempo de degradación de estos compuestos, el cual ronda aproximadamente los 100 años. Es por esta razón, que el uso de polímeros termoplásticos para la modificación de mezclas asfálticas, además, de aportar resistencia y durabilidad al pavimento, lo que puede prolongar significativamente su tiempo de servicio y lograr una reducción en obras de mantenimiento vial, también puede ayudar a reducir el impacto ambiental que sus desechos producen en todo el mundo. Obteniendo procesos constructivos más sostenibles y amigables con el ambiente, porque adicionalmente se reduce el uso de materias primas, aun cuando los costos puedan llegar a ser más elevados.

Con base a lo anterior, nace la pregunta ¿Cuáles son los cambios que producen los polímeros termoplásticos en las propiedades físico-mecánicas y reológicas de las mezclas asfálticas en caliente?

Para responder ese cuestionamiento se realizará una recopilación literaria, a estudios de carácter técnico y científico, con el fin de determinar la influencia que tienen los polímeros termoplásticos en las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente. Por ello se plantea como objetivo principal de esta monografía “realizar un análisis a la literatura sobre los cambios que

sufren las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente al ser modificadas con polímeros termoplásticos” y se establecen como objetivos específicos 1. Identificar las propiedades físico-mecánicas y reológicas de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros termoplásticos. 2. Establecer cuáles son los principales modificadores termoplásticos usados en las mezclas asfálticas. 3. Realizar un análisis comparativo de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas con los diferentes materiales termoplásticos.

Finalmente de los siete materiales de composición polimérica tratados en esta monografía, se obtiene que las propiedades físico-mecánicas y reológicas arrojan valores superiores a los alcanzados por mezclas convencionales, el clima es un factor que afecta el desempeño del polímero en la mezcla, y por ese motivo la mayoría de los plastómeros muestran un mejor comportamiento en climas cálidos debido a la rigidez de le proporciona a la mezcla, mientras que los elastómeros ofrecen características más elásticas a temperaturas bajas. Haciendo que la modificación dependa en gran medida de la naturaleza del polímero.

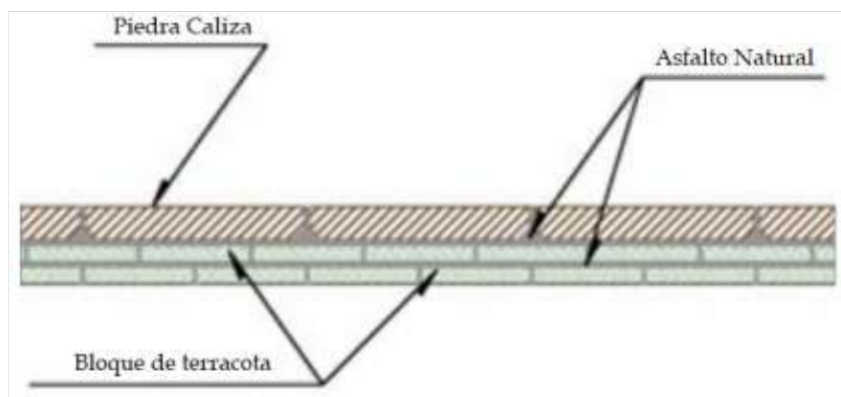
Capítulo 1. Generalidades de las mezclas asfálticas

1.1 Antecedentes históricos de las mezclas asfálticas

El asfalto a lo largo de la historia ha tenido diferentes tipos de usos. En la antigüedad era utilizado principalmente para la producción de morteros, sellantes e impermeabilizantes, así lo revelan descubrimientos arqueológicos realizados en Egipto, el Valle del Indo y Mesopotamia, en donde, los hallazgos indican que estas civilizaciones tenían gran conocimiento del asfalto natural aproximadamente desde el año 3800 A.C. Pero, no es hasta mediados del año 600 A.C que los Babilónicos emplean por primera vez el asfalto natural para la construcción de carreteras; la estructura de estas vías constaba de una base conformada por varias capas de bloques de terracota unidas con asfalto y en la superficie losas de piedra caliza que eran sellada en las juntas con este mismo material bituminoso. (Rama Labrador, 2006)

Figura 1

Esquema del firme empleado por los Babilónicos a mediados de 600 A.C



Fuente: (Rama Labrador, 2006, pág. 41)

Pero el uso del asfalto como material de pavimentación comenzó a tomar fuerza en el siglo XIX, donde entre los años 1800 y 1802 aproximadamente se perfeccionaron vías con rocas

asfálticas, sin embargo, no es hasta 1870 que el químico belga Edmund J. DeSmedt crea el primer pavimento asfáltico en Newark, New Jersey, Estados Unidos. (Constructora Arquintex, 2016)

Figura 2

Primer pavimento asfáltico (Broad Street, New Jersey)



Fuente: *(Timetoast, S.f)*

Desde entonces han sido muchas las investigaciones realizadas con el fin de conocer el comportamiento del asfalto y aprovechar al máximo sus propiedades, para ello, se desarrollaron diferentes métodos y ensayos, con el objetivo de obtener mezclas más estables y resistentes, no obstante, con la evolución y crecimiento de la industria automotriz surgió la necesidad de mejorar las condiciones viales. (Utrilla, 2007). El aumento del tránsito en las carreteras, y los diferentes factores geográficos y climáticos, hicieron necesario buscar alternativas para que las estructuras de pavimento convencionales tuvieran mejores características. En consecuencia, se comienzan a utilizar modificadores asfálticos conformados principalmente por polímeros, buscando perfeccionar las propiedades de las mezclas asfálticas convencionales y de paso aumentar la vida útil del pavimento. (Salazar Delgado, 2008).

Las primeras investigaciones encontradas de asfalto modificado, fueron realizadas con polímeros, comenzando con estudios realizados en Arizona y California, Estados Unidos en el año 1965, en la que se hacía uso de hule molido de neumáticos reciclados para riego de liga y tratamientos superficiales. De manera seguida, se comienza a utilizar caucho sintético y natural para la producción de mezclas asfálticas en frío y en caliente en países como Francia y España en el año 1970. Y aproximadamente en la década de los 80's se comienza a utilizar caucho estireno-butadieno (SBR) y estireno-butadieno-estireno (SBS) como modificadores asfálticos, obteniendo resultados satisfactorios. Así mismo, se encuentran estudios realizados en años posteriores con otra variedad de materiales, como: asfalto natural, fibras y escorias de fundición, cal hidratada y azufre entre otros. (Figuerola, Reyes, Hernández, Jiménez, & Bohórquez, 2007)

En el caso concreto de Colombia, son muchos los estudios que se han realizado sobre la modificación de mezclas asfálticas, pero son pocas las vías que se han construido con esta tecnología. El primero en hacer uso de material polimérico para la construcción vial, fue el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), quienes crearon un proyecto piloto que se llevó a cabo entre 2001 y 2003. Se construyeron tramos de prueba con grano de caucho reciclado (GCR) por vía húmeda y seca, SBS, SBR y asfalto convencional. El seguimiento de estos tramos después de un año de servicio, fue evaluado por la Universidad de los Andes, concluyendo que, esta clase de modificaciones prolonga la vida útil del pavimento, pues los resultados obtenidos fueron satisfactorios a excepción GCR por vía seca. (Lubo Gómez & Martínez Giraldo, 2020)

Finalmente, estos estudios sentaron un precedente de las ventajas que se pueden obtener al modificar el asfalto. Actualmente existen gran cantidad de materiales de composición polimérica, y con cualquiera de ellos se espera mejorar las propiedades del asfalto y obtener una

mejor resistencia ante la deformación, el envejecimiento y los efectos climáticos (Figuroa, Reyes, Hernández, Jiménez, & Bohórquez, 2007)

1.2 Propiedades Físico-mecánicas de las mezclas asfálticas

La conducta de las mezclas asfálticas está basada en la naturaleza visco-elástica del asfalto, por lo cual su comportamiento se encuentra principalmente en función de la carga aplicada y la temperatura a la que sea expuesto, condiciones que conducen al envejecimiento del material asfáltico. (Utrilla, 2007). Cabe destacar que las propiedades físicas más importantes a la hora de elaborar el diseño de mezclas asfálticas para construcción de carreteras son: “durabilidad, adhesión y cohesión, susceptibilidad a la temperatura, endurecimiento y envejecimiento.” (Salamanca Arce, 2007).

1.2.1 Durabilidad

la durabilidad en los asfaltos es la capacidad que tienen de conservar sus propiedades ante la acción de agentes envejecedores, por ello la durabilidad en las mezclas abarca las características que permitan la producción de un pavimento óptimo, dado que esta propiedad es evaluada especialmente por el comportamiento de la estructura de pavimento. Y para verificar la durabilidad del asfalto se realizan la Prueba de Película delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO) (Salamanca Arce, 2007)

1.2.2 Adhesión y cohesión

La adhesión en las mezclas asfálticas es la capacidad que tiene el asfalto para adherirse con los materiales pétreos. Mientras que la cohesión es la capacidad de mantener unidos los agregados en el pavimento. Aunque no hay una prueba que pueda medir estas dos propiedades de

forma directa, existe el ensayo de ductilidad, el cual estudia una propiedad asfáltica que varios consideran es la relación entre adhesión y cohesión. (Araiza Armenta, 2002).

1.2.3 Susceptibilidad a la temperatura

Los asfaltos se tornan de consistencia más viscosa cuando se encuentra a bajas temperaturas, y la viscosidad disminuye cuando su temperatura se eleva. A esto se le conoce como susceptibilidad a la temperatura y es una de las propiedades más importantes del asfalto y es diferente entre asfaltos de diferente origen, aun cuando estos puedan tener el mismo grado de consistencia. Por esta razón, es de vital importancia conocer la viscosidad de un asfalto en diferentes rangos de temperatura, ya que debe tener la fluidez suficiente, para lograr recubrir todas las partículas de agregado en el proceso de mezclado, de esta manera permitir que dichas partículas se muevan unas con otras a lo largo del proceso de compactación, y finalmente deberá ser suficientemente viscoso a temperatura ambiente, para mantener todo unido. (Araiza Armenta, 2002). Cabe destacar que la susceptibilidad térmica del asfalto es determinante, ya que establece la temperatura idónea a la cual debe ser mezclado el asfalto con el agregado, y a la cual se debe llevar a cabo la compactación la mezcla. (Salamanca Arce, 2007).

1.2.4 Endurecimiento y envejecimiento

El endurecimiento en el asfalto es ocasionado principalmente por el proceso de oxidación el cual sucede de forma más fácil cuando el asfalto se encuentra a temperaturas altas. Sin embargo, no todos los asfaltos tienen la misma velocidad de endurecimiento. Por tal motivo, cada asfalto debe ser ensayado por separado, esto con el fin de poder establecer sus características de envejecimiento, y así poder reducir al mínimo el endurecimiento antes del tiempo esperado, como por ejemplo en la etapa de mezclado y compactación del pavimento.

Para lograrlo se deben realizar ajustes tales como, mezclar el asfalto con los agregados a temperaturas bajas y por el tiempo más corto posible. Aun así, el proceso de endurecimiento continúa después de la construcción del pavimento, pero puede ser retardado si se conservan en el pavimento, una pequeña cantidad de vacíos conectados, así como una capa gruesa de asfalto sobre el agregado. (Salamanca Arce, 2007)

1.3 Propiedades Reológicas de las mezclas asfálticas

Las propiedades reológicas estudian la forma en la que se comportan los fluidos bajo aplicación de cargas y variaciones de temperatura. Es importante comprender la reología del asfalto, porque estos logran enlazar la estructura física de un compuesto con la estructura química, y al someterse a cambios (carga y temperatura) se espera que el ligante reaccione dando como resultado un flujo con las características deseadas (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

Cuando el asfalto experimenta temperaturas elevadas se comporta como un fluido viscoso, y cuando es sometido a temperaturas bajas, su comportamiento es el de un sólido con propiedades elásticas (Forero Bernal, García Medina, & Martínez Torres, 2015). Con esto se pretende que el asfalto se deforme lo suficiente para liberar las tensiones producidas, y de esta manera evitar y/o reducir fallas por fractura y deformaciones permanentes en el pavimento. (Cabeza Acosta, Hidalgo Prada, & Valles García, 2013). Razones por las cuales conocer el comportamiento reológico del asfalto ayuda a predecir la vida útil del pavimento, a optimizar recurso, reducir costos y extender el tiempo de servicio de las vías. (Pineda Rodríguez & Rey Moreno, 2012)

Las propiedades reológicas del asfalto más significativas son: consistencia/viscosidad, susceptibilidad térmica, trabajabilidad, seguridad y durabilidad-envejecimiento. (Vélez Moreno,

2010). Y se pueden determinar realizando los siguientes ensayos: penetración, punto de ablandamiento, ductilidad, punto de inflamación, solubilidad, contenido de agua, índice de penetración. (Mejía Umbarila & Sierra Hernández, 2017)

La consistencia/viscosidad se puede interpretar de la siguiente manera, a una temperatura intermedia es la base para la clasificación de asfaltos por penetración, ayudando a controlar los criterios de mezcla. A una temperatura más elevada se da el punto de reblandecimiento y en temperaturas bajas se puede determinar la fragilidad de la mezcla. (Vélez Moreno, 2010)

Por otra parte, la susceptibilidad térmica depende del índice de penetración (I_p) y sus valores se pueden interpretar de la siguiente manera: 1) Cuando ($I_p > 1$) el asfalto posee poca susceptibilidad a la temperatura, presentando cierta deformación elástica. 2) Cuando ($I_p < -1$) el ligante tiene gran susceptibilidad a la temperatura, y baja deformación elástica. 3) Cuando (I_p entre $+1$ y -1) se tiene un rango intermedio al cual pertenecen la mayoría de los asfaltos utilizados en la construcción de carreteras. (Borja Torres & Cárdenas Castillo, 2019)

La trabajabilidad se refiere a la facilidad con la cual una mezcla puede ser manipulada al momento de su colocación y compactación, determinada por la temperatura de mezclado y compactación óptima de las mezclas. (Zúñiga, 2015).

Y la seguridad es determinada por el ensayo de copa Cleveland, el cual determina la temperatura máxima a la que puede ser sometido el ligante, sin que exista riesgo de fuego. (Ibañez Aguilera, 2003). Por esta razón, los resultados obtenidos ayudan a tomar las medidas preventivas necesarias al manipular dicho producto, con el fin de evitar riesgos de incendio.

Capítulo 2. Asfaltos modificados con polímeros termoplásticos

2.1 Polímeros termoplásticos como modificadores de mezclas asfálticas en caliente

“Los cementos asfálticos modificados con polímeros son ligantes hidrocarbonados resultantes de la interacción física y/o química de polímeros con un cemento asfáltico” (INVIAS, 2013). Y su uso, surge de la necesidad de fabricar un asfalto que proporcione mayor resistencia en las carreteras, debido al aumento de vehículos por eje, así como un incremento significativo de la velocidad a la que estos transitan.

La primera aplicación de asfaltos modificados con polímeros fue para una emulsión impermeable. Más tarde, comenzaron a emplearse en la pavimentación, como riegos, que consiste en el rociado uniforme de emulsión asfáltica como tratamiento de superficiales en frío y más adelante en la modificación de cemento asfáltico. (Palma, Ortiz Cisneros, Ávalos Belmonte, & Castañeda Facio, 2016)

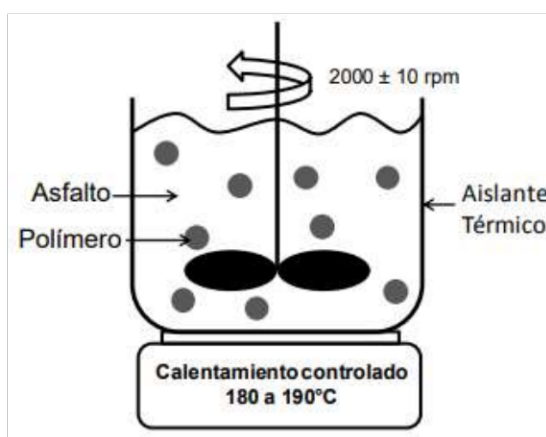
Existe una variedad de polímeros para modificar el asfalto y de esta forma mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica, extendiendo su vida útil y evitando la aplicación de mantenimiento preventivo. Se recomienda utilizar asfaltos modificados con polímeros como solución a la deformación permanente, agrietamiento por fatiga, oxidación, deterioro por causa de permeabilidad del agua, relacionado con la carga del tráfico, altas temperaturas y mucha precipitación. (Salazar Delgado, 2012)

Los polímeros reutilizables (termoplásticos) se pueden dividir en dos categorías: elastómeros y plastómeros, así mismo, los polímeros que forman una red tridimensional rígida son los plastómeros, mientras que los que inducen la elasticidad en la modificación del asfalto son los elastómeros. (Brovelli, Crispino, Pais, & Paulo, 2014).

La elaboración de un asfalto modificado se basa en agregar el polímero al asfalto cuando este esté sometido a altas temperaturas, por otro lado, el proceso de mezclado depende principalmente de la naturaleza de cada uno de los componentes. (Forigua Orjuela & Pedraza Díaz, 2014)

Figura 3

Esquema del montaje para la obtención de asfalto modificado con polímeros



Fuente: (Múnera Ossa, 2012, pág. 70)

Además, estudios demuestran que los desperdicios pertenecientes a un material termoplástico pueden ser útiles en la pavimentación de carreteras. Esto se debe a la capacidad que tienen estos polímeros de ablandarse fácilmente al ser expuesto al fuego, y soportar altas temperaturas sin que se produzca una degradación excesiva en sus propiedades y finalmente recobran su resistencia al enfriarse. (Castro López, Rondón Quintana, & Barrero Calixto, 2015)

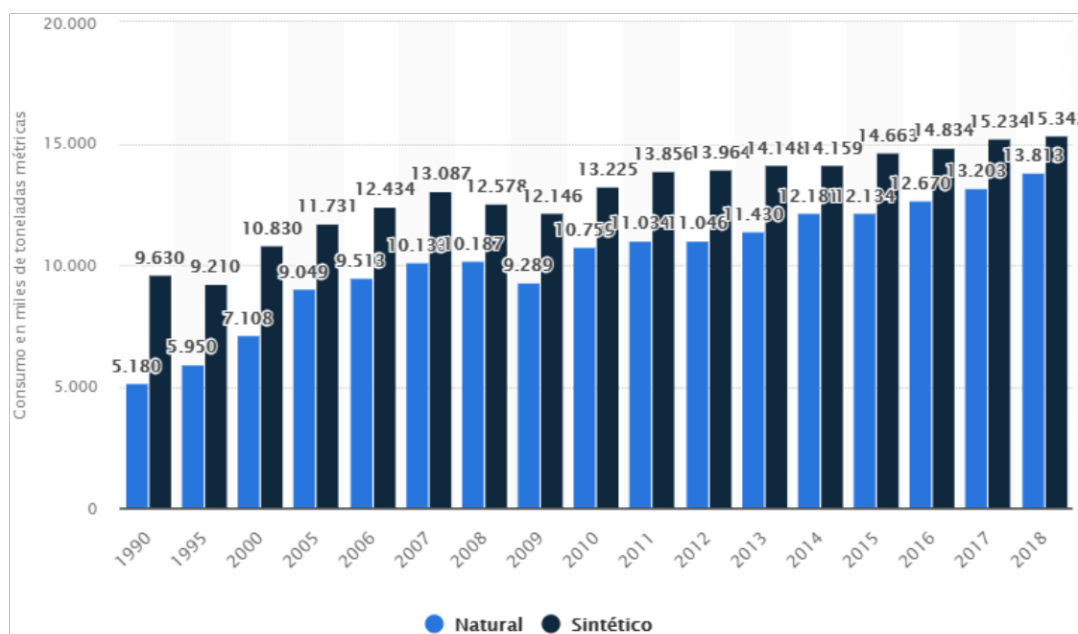
Por ello, uno de los factores que impulsa el uso de polímeros termoplásticos como modificador asfáltico, además de los beneficios que otorga a una mezcla convencional, es generar técnicas de construcción sostenibles y amigables con el ambiente, pues, el aumento de la producción y consumo de materiales plásticos y cauchos, dio origen a una problemática

ambiental, que se debe al largo periodo de degradación que tienen estos materiales de composición polimérica. En consecuencia, en el año 2018 la producción de plástico alcanzo cifras aproximadas de 359 millones de toneladas (Mundo Plast, 2019). Mientras que el consumo mundial de caucho para el mismo año se calculó en unas 29.000 toneladas métricas, ver figura 4. Cabe destacar que, el 70% de la producción mundial de caucho (natural o sintético) es destinado a la fabricación de neumáticos. (Más azul planeta, 2020). Además, se debe tener en cuenta que más de la mitad del de estos materiales son desechado, como se aprecia en la figura 5.

En ese sentido, el uso de elastómeros y plastómeros como modificadores asfálticos, se convierten en una solución, para disminuir la cantidad de estos compuestos presentes en el medio ambiente, a la vez que mejora las características de los asfaltos convencionales.

Figura 4

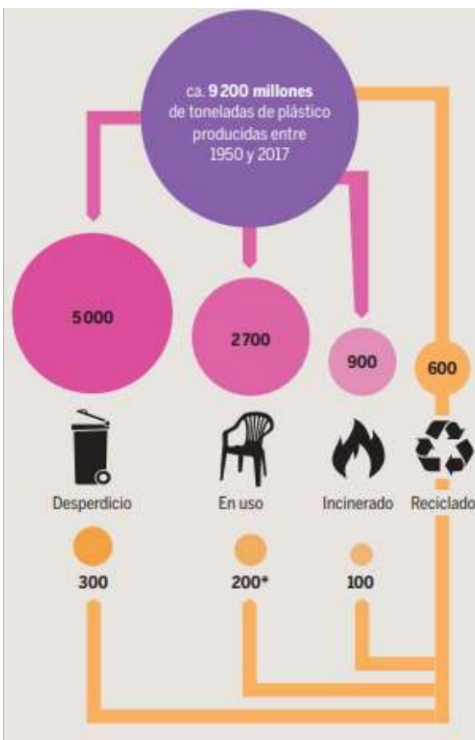
Consumo de caucho natural y sintético a nivel mundial de 1990 a 2018



Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/635829/consumo-mundial-de-caucho-natural-y-sintetico/>

Figura 5

Causas de la crisis de producción, uso y disposición del plástico de 1950 a 2017 a nivel mundial



Fuente: (Boll Stiftung, 2019)

2.2 Normatividad colombiana en el uso de asfaltos modificados con polímeros

El estudio y construcción de los pavimentos en Colombia, deben estar sujetos a los parámetros que establece el Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Esta entidad está a cargo de los proyectos de red vial no concesionados que se llevan a cabo en todo el territorio nacional, proyectos que deben cumplir con los requisitos mínimos exigidos por el documento técnico “Especificaciones generales de construcción de carreteras” del 2013. (Mejía Umbarila & Sierra Hernández, 2017)

Esta norma fija los lineamientos que deben cumplir los diferentes diseños de mezclas y en el caso específico de las mezclas asfálticas modificadas con polímeros, la norma INVIAS en el Art 414-13 establece “la designación y las características básicas de los cementos asfálticos modificados con polímeros” (INVIAS, 2013), en ella los asfaltos modificados se encuentran divididos por tipos, basándose en las propiedades del asfalto convencional al ser modificados con diferentes materiales poliméricos y de esta manera también establecen en qué tipo de mezclas pueden ser utilizados.

En primer lugar, se encuentra el Tipo I, a este pertenecen los asfaltos modificados con materiales como EVA o polietileno y puede ser utilizado para fabricar mezclas drenantes. De manera seguida se encuentran los Tipos II, III y IV estos están conformados por asfaltos modificados por polímeros como el SBS, con la diferencia de que, el Tipo II puede ser aplicada en mezclas drenantes, discontinuas y densas, semidensas y gruesas en caliente en general, mientras que el Tipo III se puede utilizar los mismos tipos de mezclas del Tipo II excluyendo las mezclas drenantes y con la particularidad que las demás mezclas se deben realizar en caliente en lugares en donde las exigencias sean mayores. Por otro lado, el Tipo IV puede ser utilizado en la preparación de mezclas anti reflectivas de grietas de carácter arena-asfalto o de riegos en caliente para membranas de absorción de esfuerzos.

Y finalmente se encuentra el Tipo V que es un asfalto modificado de alta consistencia, el cual es sugerido para la elaboración de mezclas asfálticas de alto módulo. Sin embargo, la norma deja abierta la posibilidad de usar asfaltos modificados con materiales poliméricos distintos a los nombrados anteriormente, siempre y cuando estos cumplan con los requisitos exigidos en la Tabla 414-1 de la norma INVIAS, ver tabla 1.

Tabla 1*Especificaciones del asfalto modificado con polímeros*

CARACTERISTICAS	Norma ensayo INV	TIPO I	TIPO IIa	TIPO IIb	TIPO III	TIPO IV	TIPO V
Asfalto original							
Penetración (25°C, 100g, 5s), 0,1mm	E-706	55 a 70	40 a 70	55 a 70	55 a 70	80 a 130	15 a 40
Punto de ablandamiento, °C, mínimo	E-712	58	58	58	65	60	65
Ductilidad (5°C,5cm/min), cm, mínimo	E-702	-	15	15	15	30	-
Recuperación elástica por torsión a 25°C, %, mínimo	E-727	15	40	40	70	70	15
Estabilidad al almacenamiento (Nota 1) -Diferencia en el punto de ablandamiento, °C, máximo	E-726 y E-712	5	5	5	5	5	5
Contenido de agua, %, máximo	E-704	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland, °C, mínimo	E-709	230	230	230	230	230	230
Residuo del ensayo de pérdida por calentamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo (INV E-720)							
Pérdida de masa, %, máximo	E-720	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8
Penetración del residuo, en % de la penetración original, mínimo	E-706	65	50	65	65	60	70
Incremento en el punto de ablandamiento, °C, máximo	E-712	10	10	10	10	10	10
Ductilidad (5°C,5cm/min), cm, mínimo	E-702	-	8	8	8	15	-

Nota 1: No se exigirá este requisito cuando los sistemas de transporte y almacenamiento estén provistos de un sistema de homogenización adecuado, aprobado por el Interventor.

Fuente: Tabla 414-1 (INVIAS, 2013).

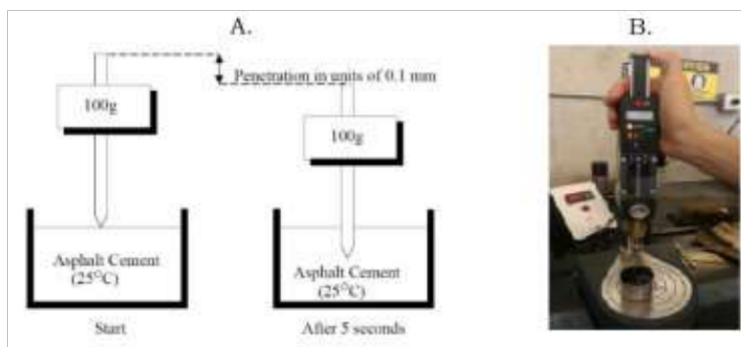
Con el fin de verificar, si las mezclas asfálticas convencionales modificadas con polímeros cumplen con los valores establecidos por el INVIAS, se deben realizar los siguientes ensayos para evaluar las características expuestas en la tabla anterior:

1. Penetración de materiales bituminosos: Este ensayo determina la consistencia del asfalto en condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura, en el cual se utilizan generalmente condiciones estándar que corresponden a una carga de 100g, un tiempo de 5 segundos y a una temperatura de 25°C, sin embargo, se permite emplear parámetros diferentes.

Para realizar este ensayo se derrite una pequeña muestra del material asfáltico y se deja disminuir su temperatura de forma controlada, de manera seguida se utiliza una aguja de dimensiones específicas para penetrar la muestra con las condiciones previamente establecidas. (INVIAS, 2013). Esta prueba también puede determinar la rigidez de un asfalto, pues entre más bajo sea el valor obtenido por la prueba de penetración, se considera más rígido el cemento asfáltico, por otro lado, si los datos obtenidos del ensayo de penetración son altos, indica que el cemento asfáltico será más blando. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

Figura 6

Ensayo de penetración



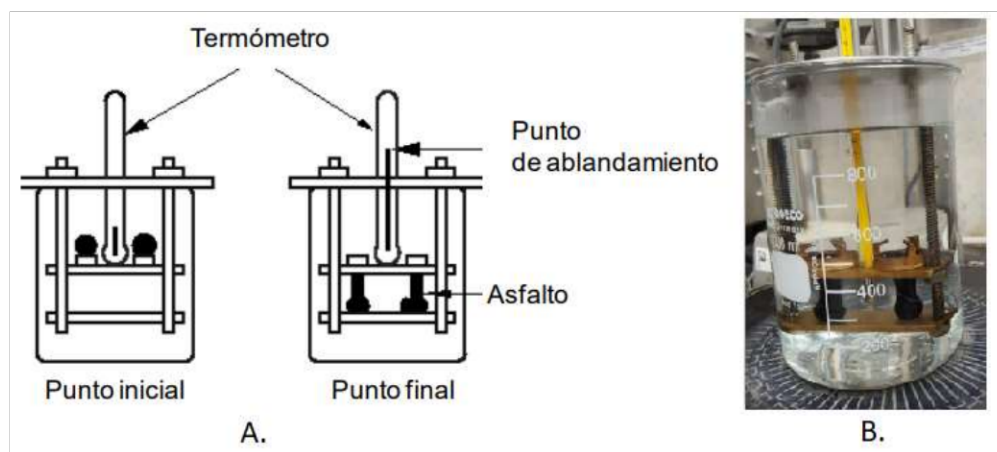
Fuente: A. NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY Obtenido <https://docplayer.net/18999657-Penetration-of-bituminous-materials.html>, B. (Castro Cabeza, 2018, pág. 56)

2. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos: Este ensayo de laboratorio consiste en un cambio gradual de temperatura en un rango que pueden ir de los 30 a 157 °C, esta temperatura depende del tipo de fluido en el cual se vaya a sumergir la muestra. Una vez puestos los dos anillos con los discos de la muestra asfáltica, comienza a elevarse la temperatura de manera controlada, y finalmente se identifica el punto de ablandamiento como el promedio de las temperaturas a las cuales el asfalto pasa de ser un material sólido a uno más blando el cual permite que la bola puesta sobre en los discos caiga a una distancia de 25mm. (INVIAS, 2013)

Además, el punto de ablandamiento es una de las propiedades usadas normalmente para establecer la temperatura máxima de servicio de un asfalto, al precisar la temperatura a la cual el material bituminoso comienza a fluir. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

Figura 7

Punto de ablandamiento



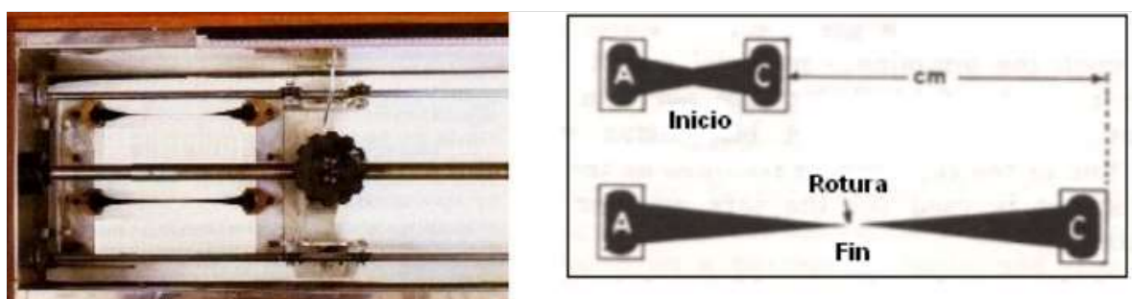
Fuente: A. (Múnera Ossa, 2012, pág. 48), B. (Castro Cabeza, 2018, pág. 57)

3. Ductilidad de los materiales asfálticos: Para realizar este ensayo una probeta de material asfáltico es sometida a tracción en condiciones controladas de velocidad y temperatura, determinando la ductilidad de la muestra como la longitud que alcanza la probeta hasta el

momento de falla. (INVIAS, 2013). Los asfaltos que poseen buena ductilidad tienen mejores propiedades aglomerantes. Sin embargo, cuando la ductilidad del asfalto es considerablemente alta, el material puede ser más sensible a los cambios de temperatura y por lo tanto más propenso a sufrir deformaciones. (Salazar Delgado, 2011)

Figura 8

Ensayo de ductilidad

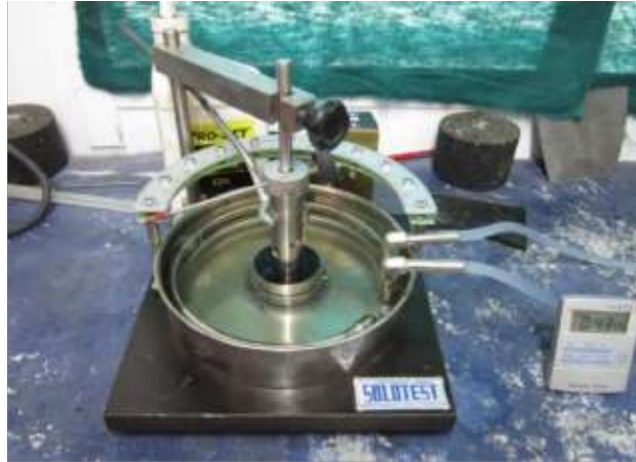


Fuente: Fernando Sánchez Sabogal, Obtenido <https://www.slideshare.net/castilloaroni/mdulo-8-ligantes-bituminosos-fernando-snchez-sabogal>

4. Recuperación elástica por torsión de asfaltos modificados: Se utiliza de manera particular para asfaltos modificados con polímeros, cuando las condiciones climáticas, el nivel de tráfico y la topografía del terreno necesitan un asfalto que aporte mejores características a la mezcla asfáltica. La adición de polímeros aporta una mayor elasticidad por ello este ensayo mide el ángulo de recuperación elástica del cilindro de prueba después de ser sometido a una deformación. (INVIAS, 2013)

Figura 9

Ensayo de recuperación elástica por torsión

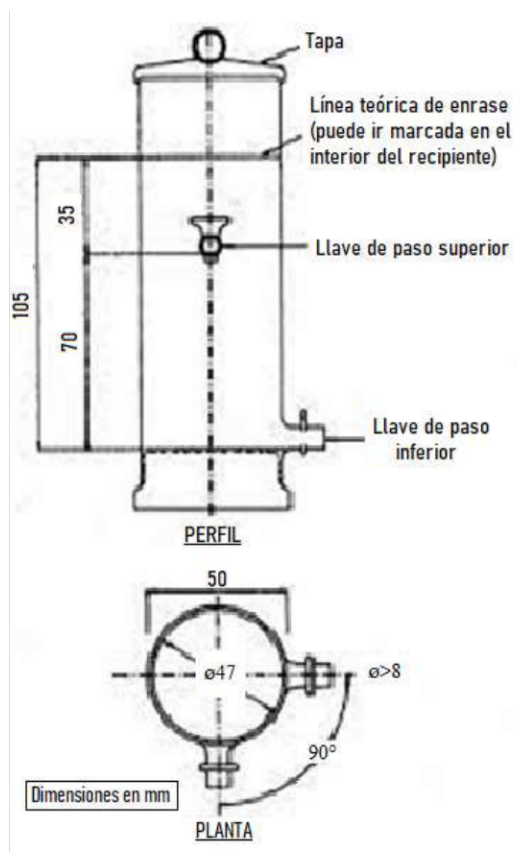


Fuente: Universidad privada del norte

5. Estabilidad al almacenamiento de asfaltos modificados: Cuando se almacenan asfaltos modificados a altas temperaturas, se pueden generar “fenómenos de cremado o de sedimentación”, porque al mezclar el material polimérico con el asfalto no se obtiene una mezcla homogénea, agrupando mayor cantidad de polímeros en una sección del tanque, ya sea en la parte superior o inferior. Esto puede ser causado por la distribución incorrecta del polímero en el asfalto o por incompatibilidad entre estos dos materiales. Para ello se selecciona una muestra del asfalto modificado, y se somete a altas temperaturas durante un periodo de tiempo de 5 días, para finalmente realizarle a la muestra ensayos de punto de ablandamiento y penetración. (INVIAS, 2013)

Figura 10

Esquema del recipiente para el ensayo de estabilidad al almacenamiento



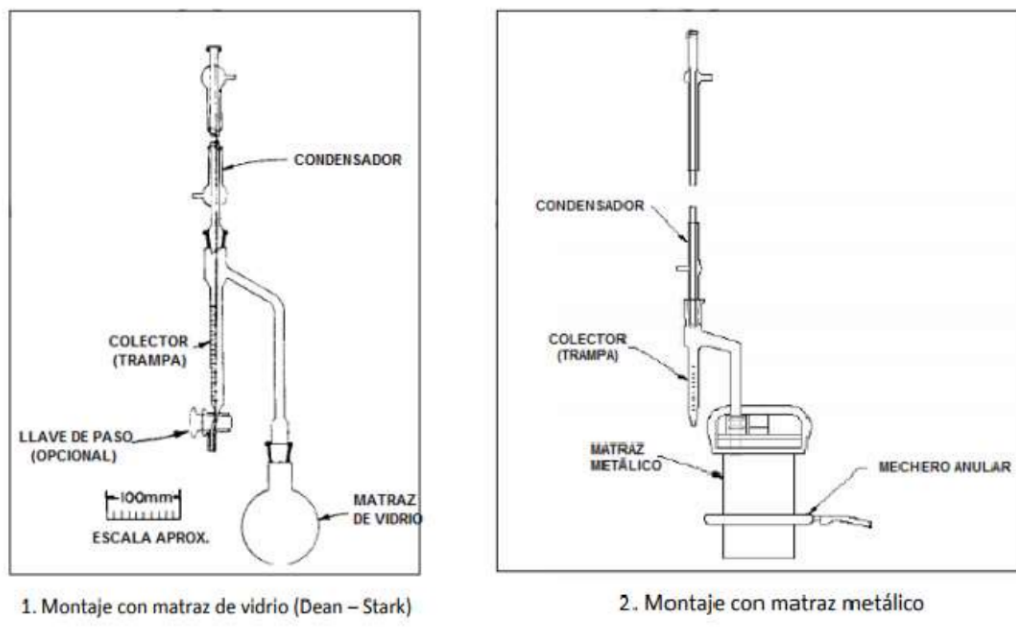
Fuente: (INVIAS, 2013, págs. E726-3)

6. Determinación del contenido de agua en los materiales bituminosos por destilación:

Con este ensayo se determina si hay presencia de contaminantes en el material asfáltico y también se suele utilizar para verificar que no se genere espuma mientras el asfalto es sometido a altas temperaturas. “La cantidad de agua determinada por este método se usa para verificar el cumplimiento del producto bituminoso en relación con la especificación sobre contenido de agua”. (INVIAS, 2013)

Figura 11

Montaje con matraz de vidrio y metálico



Fuente: (INVIAS, 2013, págs. E 704-2 y E 704-4)

7. Puntos de inflamación y combustión mediante la copa abierta Cleveland: Este ensayo determina la temperatura máxima a la que puede ser sometido el material bituminoso, sin que exista riesgo de fuego, al estar en presencia de una llama libre. (Ibañez Aguilera, 2003).

Por consiguiente, esta prueba es utilizada para “medir y describir las propiedades de respuesta al calor y a la llama bajo condiciones de laboratorio controladas”. Si el resultado del laboratorio indica que se pueden obtener mezclas que ardan con facilidad; esto puede señalar la presencia de compuestos sumamente inflamables y volátiles. Y la finalidad de los resultados obtenidos son tomados como una respuesta estimada que sirve para tomar las medidas preventivas necesarias al manipular dicho producto, y de esta manera poder evitar riesgos de incendio. (INVIAS, 2013).

Figura 12

Determinación de punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland



Fuente: (Seguridad Industria Química, 2017)

8. Efecto del calor y del aire sobre el asfalto en lamina delgada y rotatoria: Este ensayo muestra el cambio que tienen las propiedades físicas de asfaltos convencionales en caliente al momento de realizar procesos de mezclado y colocación, simulando las condiciones del cemento asfáltico al ser integrado al pavimento. Es decir, cuando el cemento asfáltico es expuesto al calor y al aire ocurren procesos de endurecimiento por oxidación, para ello se determina la viscosidad y otras propiedades reológicas antes y después de este ensayo y de esta manera poder determinar la variación de los valores obtenidos. (INVIAS, 2013)

Figura 13

Horno y recipientes para el ensayo de película delgada rotatoria



Fuente: Fernando Sánchez Sabogal, obtenido <https://www.slideshare.net/castilloaroni/mdulo-8-ligantes-bituminosos-fernando-snchez-saboga>

No obstante, aunque el grano de caucho reciclado (GCR) está clasificado como un polímero elastomérico, no se encuentra dentro del artículo mencionado anteriormente, y su uso se especifica en el Art 413-13 de la norma, por ende, debe cumplir los requisitos que se encuentran en la tabla 413-3 del INVIAS, ver tabla 2. Su uso en mezclas asfálticas en caliente se encuentra en el Art 467-13P, artículo agregado por el INVIAS en 2015 en los pliegos de condiciones de algunas licitaciones como medida ambiental, y aunque hoy en día se hace uso de dicho artículo para emplear el GCR como modificador de mezclas asfálticas en caliente su inclusión formal se hará en la próxima actualización de la norma. (Ramírez Franco, 2016). Por otro lado, el uso en mezclas asfálticas en caliente modificadas con los demás compuestos poliméricos se rigen por el Art 450-13 que es el mismo utilizado en mezclas con asfaltos convencionales. (Mejía Umbarila & Sierra Hernández, 2017).

Tabla 2

Especificaciones físicas del cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado

PROPIEDADES	NORMA DE ENSAYO	TIPO DE ASFALTO-CAUCHO					
		TIPO I		TIPO II		TIPO III	
		Mín	Max	Mín	Max	Mín	Max
Viscosidad aparente a 175°C (Pa.s)	ASTM D-2196 Método A Modificado según ASTM G-6114	1.5	5.0	1.5	5.0	1.5	5.0
Penetración 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 de ignición mediante la copa abierta 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	E-706	75	-	75	-	75	-

Fuente: Tabla 413-3 (INVIAS, 2013)

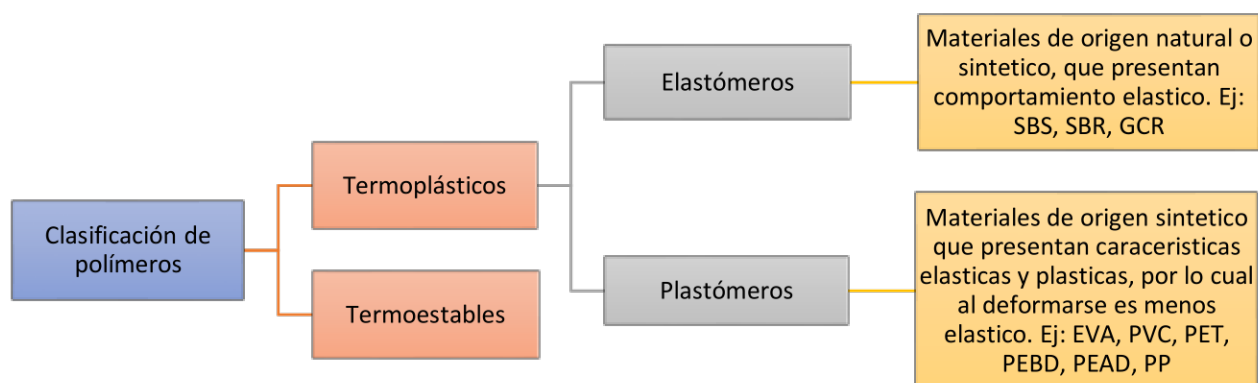
2.3 Principales polímeros modificadores utilizados en el asfalto.

El objetivo principal del asfalto modificado es incrementar la resistencia a las deformaciones al ser sometidas a altas temperaturas, sin que se altere de manera desfavorable las demás propiedades del asfalto. (Infante Ataurima & Velásquez Alarcón, 2016). Por esta razón uno de los principales modificadores en mezclas asfálticas en caliente son los polímeros termoplásticos, esto se debe, a la capacidad que tienen de soportar temperaturas elevadas sin perder gran parte de sus propiedades.

Los polímeros termoplásticos se encuentran divididos por dos grupos: los elastómeros y los plastómeros. Cada uno de ellos aporta características distintas a las mezclas asfálticas, los materiales de composición elastomérica mejoran la resistencia de las mezclas, esto se debe al aumento en las propiedades elásticas, lo cual produce una recuperación más eficiente ante las deformaciones, mientras que los plastómeros, aportan resistencia mecánica ya que su adición produce pavimentos más rígidos. (Castro López, Rondón Quintana, & Barrero Calixto, 2015).

Figura 14

Clasificación de polímeros



Fuente: Autores

2.3.1 Elastómeros

Es un polímero visco-elástico, es decir son polímeros, que al ser sometidos a esfuerzos de tensión pueden recuperar su estado original. Se caracterizan por ser una especie de modificador de asfalto, que puede mejorar el rendimiento de la mezcla asfáltica de alta temperatura y baja temperatura.

Los elastómeros se utilizan como modificadores de mezclas asfálticas, para pavimentos delgados y carpetas estructurales con alto índice de tráfico y vehículos pesados, en climas cálidos y fríos, así mismo para la preparación de emulsiones que se utiliza para tratamiento de superficies. (Velásquez Mayén, 2016). En este grupo podemos encontrar: el Estireno-butadieno-estireno (SBS), el Estireno-butadieno (SBR) y el grano de caucho reciclado (GCR).

2.3.1.1 Estireno-butadieno-estireno (SBS). Es un material de origen sintético, extraído por la polimerización de una mezcla de estireno y butadieno. Es una especie de caucho de consistencia dura, que se utiliza para fabricar suelas de calzado, cubiertas de neumáticos y demás objetos de uso cotidiano que requieren ser duraderos. (Aldana Perdomo & Acosta Velásquez, 2014). Este polímero es uno de los más utilizados para la modificación de mezclas asfálticas porque es el que mejor comportamiento tiene durante su vida útil.

2.3.1.2 Estireno- butadieno (SBR). Es un material de origen sintético, obtenido gracias a la polimerización del estireno y 1,3 butadieno. Es el más usado en todo el mundo, produce aproximadamente el 60% de cauchos sintéticos a nivel mundial, y su mayor demanda se encuentra en la fabricación de neumáticos. Una de los puntos a favor del SBR es que su producción tiene buena relación costo-utilidad. (Júarez, Balart, Ferrandiz, & García, 2013)

2.3.1.3 Grano de caucho reciclado (GCR). Material elaborado a base de llantas de automóviles que han sido desechadas, las cuales tiene un final que genera gran contaminación al medio ambiente, pues tienen como destino ser depositadas en rellenos sanitarios, basureros a cielo abierto, que general un daño ambiental irreversible. El GCR se extrae mediante proceso de molida, disminuyendo en partículas pequeñas las llantas usadas. Y se utiliza en diferentes obras de ingeniería civil, como en relleno de terraplenes, pisos de parques, materiales de contención, como modificador en mezclas asfálticas. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017)

2.3.2 Plastómeros.

Este polímero tiene un punto de fluencia al ser sometido a tensión y se sobrepasa, no vuelve a su estado original. (Borja Torres & Cárdenas Castillo, 2019). Se caracteriza por mejorar la resistencia al ahuellamiento de las mezclas, también disminuya la susceptibilidad del asfalto, por último, mejora su comportamiento a altas temperaturas. (Velásquez Mayén, 2016). En este grupo se pueden encontrar: el EVA, Policloruro de vinilo (PVC), Tereftalato de polietileno (PET) y el polietileno de baja densidad (PEBD), entre otros.

2.3.2.1 EVA. El polímero o resinas etilo-vinil-Acetato es una de las modificaciones nuevas en el asfalto y muy compatible con estos. La relación de etileno/ acetato de vinilo es importante, capaz de variar algún porcentaje de contenido de acetato de vinilo hasta el 50% o incluso más. (Infante Aaturima & Velásquez Alarcón, 2016)

2.3.2.2 Policloruro de vinilo (PVC). Según el libro “Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales”, (Smith, 1999) describe el policloruro de vinilo (PVC), como un plástico sintético utilizado debido a una alta resistencia química. Cada átomo de carbono que se encuentra en la cadena principal, tiene un átomo de cloro que le confiere una gran resistencia ante agentes químicos como disolventes, así como, al ser expuesto al fuego. Debido a la estructura química del PVC reduce su flexibilidad en la cadena de los polímeros, dificulta el procesamiento y rara vez se puede utilizar sin la adición de compuesto de material base. Por lo tanto, como plastificantes, estabilizadores térmicos, lubricantes, rellenos y pigmentos para proporcionarles propiedades flexibles, previenen la degradación térmica e imparten calor, opacidad y resistencia a la intemperie a los compuestos de PVC.

2.3.2.3 Tereftalato de polietileno (PET). Es el poliéster termoplástico más utilizado, es un polímero con propiedad mecánicas altas y buena estabilidad dimensional bajo cargas

variables que se utiliza en cintas magnéticas, ropa y contenedores para bebidas. (Movilla-Quesada, Raposeiras, & Olavarria, 2019). El PET tiene un alto grado de cristalinidad y termo plasticidad, es muy duro, resistente al deterioro, estabilidad dimensional, tiene gran resistencia al estar en contacto con químicos y posee buenas propiedades dieléctricas, el PET se encuentra dentro del grupo de materiales sintéticos denominados Poliésteres. (Arteaga Villamarin, 2018).

2.3.2.4 Polietileno de baja densidad (LDPE). Es un polímero perteneciente a los polímeros olefinicos, es decir, están polimerizados a partir de olefinas. la estructura del (PELD) está compuesta por cadenas muy ramificadas Es un plástico de baja dureza, pero posee una gran resistencia al impacto y al alargamiento. (Luque Ariza & Rincón Solano, 2011). Es un material que tiene un amplio número de cadenas de etileno, convirtiéndolo en un material para diferentes propósitos por ejemplo sacos y bolsas plásticas, materiales que son reciclables, por ello es importante crear conciencia, ya que la contaminación provocada por estos materiales ha afecta significativamente. (Coicue Duarte & Sepulveda Salazar, 2017)

2.4 Propiedades físicas y reológicas en asfaltos modificados con polímeros termoplásticos

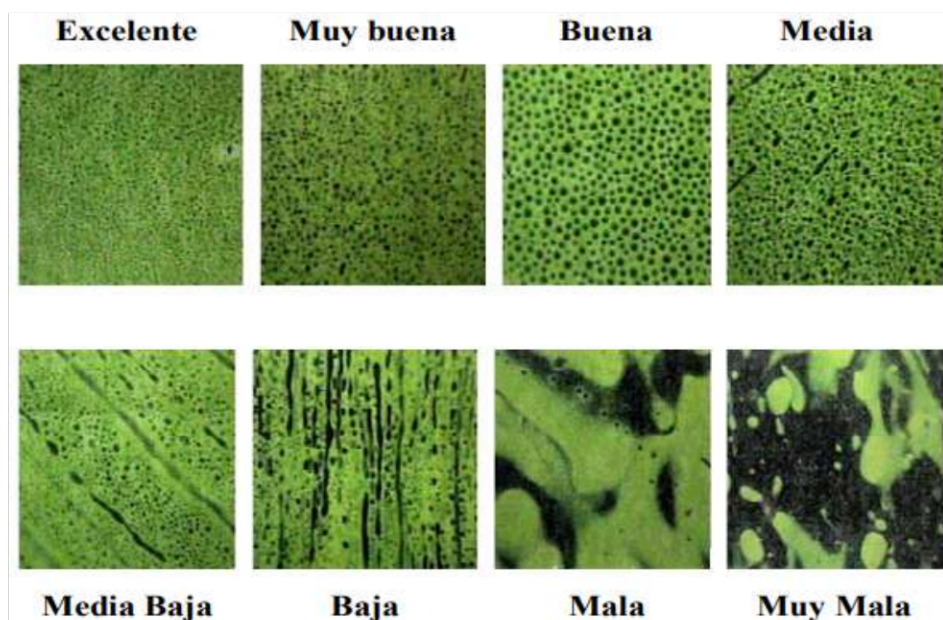
La estructura molecular del asfalto afecta en gran medida las propiedades físico-mecánicas de las mezclas y su rendimiento, mientras que las propiedades reológicas dependen de los porcentajes en que están presentes sus componentes, la cual puede cambiar dependiendo de la naturaleza del crudo de petróleo. (Cárdenas & Fonseca, 2009)

De esta manera, al adicionar polímeros al material asfaltico, se busca mejorar las propiedades físicas y reológicas del ligante, lo cual depende en gran medida a la cantidad y tipo de polímero que se emplee y las características estructurales que este posea. (Pérez Verdugo, 2014). Así mismo, también depende de la compatibilidad del material asfaltico con el polímero,

pues siempre se busca obtener una mezcla homogénea, que aporte mejores características al ser sometido a alteraciones físicas. (Múnera Ossa, 2012)

Figura 15

Visualización micro estructural para definir compatibilidad asfalto-polímero



Fuente: conferencia introducción a la química de asfalto Ing. Germán Garzón; Costa rica 2004.

Cabe destacar que el asfalto es un material visco elástico y su comportamiento se ve altamente influenciado por factores como la temperatura. La adición de polímeros hace que el rango de temperaturas se ajuste a las necesidades del pavimento, aumentado la resistencia a la deformación a altas temperaturas de servicio, y lo más importante sin alterar de forma negativa las demás propiedades. (Infante Aaturima & Velásquez Alarcón, 2016).

La modificación del asfalto produce una reducción significativa de las fallas que se pueden presentar en la estructura de pavimento, mejorando la elasticidad, la durabilidad, a su vez, mejoran la capacidad impermeabilizante y gracias a un aumento en la viscosidad se convierte en mejor aglutinante, al generar mayor adherencia entre el material asfáltico con los

agregados, lo que reduce porcentajes de vacíos y porosidad. Lo cual depende en gran medida, del porcentaje de polímeros adicionado a la mezcla, ya que, una cantidad excesiva de polímeros en el ligante puede ocasionar principalmente grietas y deformaciones. (Rodríguez, 2009)

Por ello es importante conocer los cambios que sufren las propiedades del asfalto modificado. Según datos obtenidos de la empresa Manufacturas y Procesos Industriales (MPI) fabricantes de asfaltos en Colombia, la modificación de cementos asfálticos convencionales genera ventajas, que como se mencionaba anteriormente, varían dependiendo del polímero utilizado para su modificación, de esta manera la empresa MPI expide fichas técnicas que se rigen bajo los criterios de la norma INVIAS indicando que: los cementos asfálticos Tipo I, Tipo II y Tipo III disminuyen la susceptibilidad térmica, aumentan la cohesión interna, mejoran la flexibilidad y elasticidad, mejoran el comportamiento a la fatiga, aumentan la adhesividad árido-ligante, aumenta la resistencia al envejecimiento. El Tipo IV, genera interface visco elástica e impermeable, ayudan a redireccionar fisuras ascendentes de pavimentos envejecidos, y permiten absorber parte de la energía de propagación de grietas. Y el Tipo V disminuye la susceptibilidad térmica, mejora la resistencia al ahuellamiento, mejora la adhesión árido-ligante. (MPI Ltda, S.f)

Por otra parte, el GCR, en su ficha técnica describe las ventajas que trae a la mezcla como la disminución en las fisuras por reflexión, en la susceptibilidad a la temperatura, también genera un incremento de la cohesión, mejora otras características como la flexibilidad, elasticidad y el comportamiento a la fatiga, mejora la adhesión árido-ligante, genera mayor durabilidad, menor mantenimiento y reduce en el espesor de las capas. (MPI Ltda, S.f)

Capítulo 3. Análisis comparativo de la influencia de polímeros termoplásticos en mezclas asfálticas en caliente

3.1 Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas y reológicas de asfaltos convencionales y asfaltos modificados con polímeros termoplásticos en mezclas asfálticas en caliente.

Los polímeros termoplásticos aportan excelentes propiedades físico-mecánicas y reológicas a las mezclas asfálticas, pero la aplicación del asfalto varía según el material que se añade, esto se debe a que cada uno proporciona características diferentes a la modificación del asfalto. Para realizar un análisis comparativo de los cambios que sufren las mezclas asfálticas al ser modificadas con polímeros termoplásticos, se realizará un desglose de la información recolectada, dividiendo la investigación en asfaltos modificados por elastómeros y por plastómeros. De esta manera poder hacer un análisis más completo y sencillo que ayude a determinar cuál de los materiales aporta mejores características a la mezcla asfáltica, teniendo en cuenta porcentajes de optimización de la mezcla los cuales se basan en los resultados de los ensayos de laboratorio y dependen de las cantidades del contenido de ligante en la mezcla.

3.1.1 Elastómeros.

3.1.1.1 Estireno-butadieno-estireno (SBS). El SBS es uno de los polímeros más utilizados para llevar a cabo la modificación de asfaltos, gracias a su composición, el estireno aporta resistencia a las mezclas y el butadieno elasticidad, adicionalmente el buen comportamiento de este material al ser expuesto a diferentes temperaturas permite que sea usado en zonas donde se presentan altas y bajas temperaturas. (Bustos Castañeda, Sosa Martínez, Rodríguez Ramírez, & Calderón Bustos, 2018).

Las mezclas modificadas con SBS desarrollan mejoras sobre las propiedades físico-mecánicas y reológicas, donde se obtiene un mejor comportamiento al ser sometido a cargas, como también resultados positivos a pruebas de envejecimiento en comparación a las mezclas convencionales. Por ello, (Sengoz, Topal, & Isikyakar, 2009) sugieren incorporar concentraciones de SBS entre 3% y 5% del peso del asfalto. (Merizalde Aguirre, López Pérez, & Puma Vásquez, 2017), obtienen una optimización de la mezcla al incorporar 3% de SBS al asfalto. Mientras que (Borja Torres & Cárdenas Castillo, 2019) en su estudio sobre la influencia del SBS en mezclas asfálticas, encuentran la optimización de la mezcla al adicionar 2% de SBS, un contenido de polímero más bajo al sugerido anteriormente por Sengoz, Topal, & Isikyakar.

Sin embargo, los tres autores concluyen que, entre más contenido de este polímero (SBS) se adiciona, la viscosidad y la respuesta elástica del asfalto aumentan de manera considerable, por otro lado, la caracterización del asfalto muestra un incremento significativo del punto de ablandamiento, disminuyendo las deformaciones permanentes a altas temperaturas, mientras que, la disminución en los valores de la penetración, pueden aumentar el agrietamiento a temperaturas bajas, lo que a su vez indica mayor rigidez, también se observan cambios en el índice de penetración, por lo cual estas mezclas tienen poca susceptibilidad térmica pero buena elasticidad. Y teniendo en cuenta que las propiedades físicas se evalúan por medio de la reología de los ligantes envejecidos, se realizó el ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFO), evaluando el cambio de masa, ductilidad del material envejecido y porcentaje de penetración del residuo. Finalmente, con los ensayos por el método Marshall, se obtiene que el SBS proporciona mayor flujo, estabilidad y rigidez a las mezclas.

Los resultados de las investigaciones expuestas, se pueden observar en la tabla 3 donde se resume con mayor claridad cómo influye el SBS en las propiedades de los asfaltos

convencionales, comparando los resultados obtenidos con el porcentaje óptimo de polímero en las pruebas de caracterización del asfalto.

Tabla 3

Comparación de la caracterización del asfalto modificado con SBS

Especificación	Autores						Comparación
	Borja Torres & Cárdenas Castillo, 2019		López Pérez & Puma Vásquez, 2017		Sengoz, Topal & Isikyakar, 2009		
	Asfalt Conv	SBS 2%	Asfalt Conv	SBS 2.5%	Asfalt Conv	SBS 5%	
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	313,6 3	643,8 3	410,1 3	1813,2	-	-	Los valores obtenidos por los tres autores muestran aumento en la viscosidad de la mezcla modificada
Viscosidad Rotacional (cP)	320,3 9	649,5 2	387,5	1715	510	1200	
Penetración (mm/10)	67	60	65	44	63	48	Los valores de penetración del asfalto modificado disminuyen, mostrando mayor rigidez
Punto de ablandamiento (°C)	49	63,1	49	72	49	67	Las muestras modificadas presentan aumento, evitando las deformaciones a altas temperaturas
Índice de penetración	-0,75	2,11	-0,84	2,82	- 0,92	2,18	En los tres estudios se obtiene baja susceptibilidad a la temperatura y alta deformación elástica
Ductilidad (cm)	149	27	117	64	100	-	La ductilidad en asfaltos modificados es más baja, indicando mayor rigidez
Recuperación elástica (%)	12,5	57,5	10	90	-	-	Los asfaltos modificados tienen mejor recuperación elástica, evitando deformaciones permanentes

Especificación	Autores						Comparación
	Borja Torres & Cárdenas Castillo, 2019		López Pérez & Puma Vásquez, 2017		Sengoz, Topal & Isikyakar, 2009		
	Asfalt Conv	SBS 2%	Asfalt Conv	SBS 2.5%	Asfalt Conv	SBS 5%	
Película delgada de horno rotatorio (RTFO)							
Cambio de masa (%)	-0,016	-0,028	-0,008	-0,009	0,07	0,07	Los valores obtenidos por los dos primeros autores muestran pérdida de masa, mientras que la última investigación presenta ganancia de masa y al ser modificada la conserva
Ductilidad (cm)	35	18	-	-	-	-	La ductilidad del asfalto envejecido muestra mayor rigidez
Penetración Residuo (%)	67,16	72,22	77	75	80,95	43,75	El porcentaje de penetración del asfalto envejecido para el primer autor aumenta, mientras que para los otros dos disminuye.
Punto de ablandamiento (°C)	-	-	56,5	78	51	52	Las muestras modificadas presentan mayor punto de ablandamiento

Fuente: Autores

3.1.1.2 Caucho estireno-butadieno (SBR). Con el SBR como modificante asfáltico se han observado mejoras de la ductilidad a temperaturas bajas, mayor la viscosidad, una buena recuperación elástica, a su vez también mejora propiedades asfálticas de adhesión y cohesión. Las ventajas que otorga el uso de SBR ocurren gracias a que sus “partículas son muy pequeñas y regulares, por esta razón, cuando se mezclan con el ligante, se dispersan rápida y uniformemente a lo largo de toda la masa asfáltica y forman un refuerzo de estructura homogénea en red.” (Palma, Ortiz Cisneros, Ávalos Belmonte, & Castañeda Facio, 2016)

Las mezclas modificadas con SBR desarrollan mejoras sobre las propiedades físico-mecánicas y reológicas, donde se obtiene un mejor comportamiento al ser sometido a cargas, como también resultados positivos a pruebas de envejecimiento en comparación a las mezclas convencionales. (Yaacoba, y otros, 2016), aseguran que las modificaciones realizadas con SBR entre el 1% y el 5 % producen mejores resultados, datos que concuerdan los estudios de (Khadivar & Kavussi, 2013) y (Borja Torres & Cárdenas Castillo, 2019) quienes en su diseño de mezcla establecen que el contenido óptimo de polímero lo encuentran al incorporar 5% y 1% de SBR al asfalto.

En el desarrollo de estas investigaciones se obtuvo, disminución de la penetración, lo que proporciona mayor rigidez y resistencia a la deformación, evitando fallas producidas por fatiga, también aumentó el punto de ablandamiento y la ductilidad, indicando una reducción de la susceptibilidad a la temperatura, además, la mezcla mostro valores más altos del índice de penetración, creando mayor resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas, gracias a la disminución de la susceptibilidad térmica y al aumento en la elasticidad, estos estudios también demostraron que añadir SBR produce un aumento en la viscosidad del asfalto. Y dado que, las propiedades físicas se evalúan por medio de la reología de los ligantes envejecidos, se realizó el ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFO), evaluando el cambio de masa, ductilidad del material envejecido y porcentaje de penetración del residuo. Los resultados de las investigaciones expuestas anteriormente, se pueden observar en la tabla 4 donde se resume y se puede apreciar con mayor claridad cómo influye el SBR en las propiedades de los asfaltos convencionales, comparando los resultados obtenidos con el porcentaje óptimo de polímero en las pruebas de caracterización del asfalto.

Tabla 4*Comparación de la caracterización del asfalto modificado con SBR*

Especificación	Autores						Comparación
	Borja Torres & Cárdenas Castillo, 2019		Khadivar & Kavussi, 2013		Yaacoba, y otros, 2016		
	Asfalt Conv	SBR 1%	Asfalt Conv	SBR 5%	Asfalt Conv	SBR 3%	
Viscosidad cinemática (mm ² /s)	313,6 3	328,3 3	-	-	-	-	Los valores obtenidos muestran mayor viscosidad en las mezclas modificadas
Viscosidad Rotacional (cP)	320,3 9	327,7 7	-	-	500	1000	
Penetración (mm/10)	67	68	65	57	65	55	Los valores obtenidos muestran disminución de la penetración, es decir mayor rigidez
Punto de ablandamiento (°C)	49	51,9	51,1	71,2	52	60	Con el aumento del punto de ablandamiento de las mezclas con SBR disminuye la susceptibilidad térmica
Índice de penetración	-0,75	0,05	0,286	3,38	-0,06	1,53	El primer estudio indica que la mezcla modificada tiene un desempeño moderado, mientras que los dos últimos indican susceptibilidad térmica baja y un grado de deformación elástico alto.
Ductilidad (cm)	149	81	-	-	-	-	La ductilidad en asfaltos modificados es más baja, indicando mayor rigidez
Recuperación elástica (%)	12,5	51	50	54	-	-	El aumento de la recuperación elástica en las mezclas modificadas reduce la deformación permanente
Película delgada de horno rotatorio (RTFO)							
Cambio de masa	-0,016	-0,02	-	-	-	-	La muestra presenta pérdida de masa

Especificación	Autores						Comparación
	Borja Torres & Cárdenas Castillo, 2019		Khadivar & Kavussi, 2013		Yaacoba, y otros, 2016		
	Asfalt Conv	SBR 1%	Asfalt Conv	SBR 5%	Asfalt Conv	SBR 3%	
Ductilidad (cm)	35	25	-	-	-	-	Se tiene disminución en la ductilidad del asfalto modificado envejecido
Penetración Residuo (%)	67,16	57,07	65	57	-	-	Se presenta mayor rigidez en mezclas modificadas
Punto de ablandamiento (°C)	-	-	51,1	71,2	-	-	Se evidencia aumento del punto de ablandamiento en la mezcla modificada

Fuente: Autores

3.1.1.3 Grano de caucho reciclado (GCR). Este material es el resultado de triturar llantas que han sido desechadas, en este proceso de molienda procura que el GCR obtenido no contenga acero, fibras u otros materiales que puedan afectar la calidad del producto. Cuando el grano de caucho entra en contacto con el asfalto, la reacción entre ambos hace que el grano de caucho comience a ablandarse y a aumentar su tamaño. Esto produce un ligante de consistencia más densa, factor que aporta las mezclas mayor resistencia frente a procesos de envejecimiento y oxidación. (Díaz Claros & Castro Celis, 2017).

El GCR es muy utilizado gracias a los beneficios que genera su incorporación en la modificación de propiedades asfálticas y también por su bajo costo. Este elastómero posee propiedades mecánicas importantes y que lo hacen sobresalir de los demás materiales, pues presenta gran resistencia a la deformación, es decir, al ser sometido a fuertes cargas de tensión es capaz de recuperarse sin sufrir deformaciones permanentes. (Carreño Zagarra & Reyes Salcedo, 2015)

Charles H. McDonald fue el primero en desarrollar de manera exitosa mezclas asfálticas modificadas con GCR en Phoenix (Arizona, EE.UU.). McDonald determinó que después de un lapso de tiempo de 40 minutos, la mezcla asfáltica modificada comenzaba a mostrar mejoras significativas en sus propiedades. (Carlson & Zhu, 1999). El GCR ha sido estudiado con el fin de perfeccionar los procesos utilizados al ser incorporado a la mezcla, actualmente se puede realizar dos métodos, por vía seca o húmeda; con cada uno de los métodos se obtienen variaciones en los resultados.

Por vía húmeda se obtiene un ligante más viscoso lo que produce disminución de la plasticidad de a temperaturas altas, factor que ayuda a disminuir el deterioro por ahuellamiento. Por otra parte, cuando se encuentra a temperaturas bajas, crea en la mezcla mayor flexibilidad, disminuyendo la formación de fisuras en el pavimento. Además, en la modificación por vía húmeda se deben tener en cuenta factores como el tamaño, la consistencia y la cantidad de GCR, el tipo de asfalto, el tiempo y la temperatura de mezclado. El proceso seco consiste en incorporar previamente el grano de caucho reciclado con los agregados antes de agregar el cemento asfáltico a la mezcla. En este proceso el GCR sustituye una pequeña parte de los agregados por un porcentaje de GCR. Y es menos utilizado por los resultados poco satisfactorios, lo que ha generado cierta desconfianza en los investigadores a emplear este método (Velar Prieto, 1997)

(Yung Vargas, Cordoba Maquilón, & Rondón Quintana, 2016) en su estudio modificaron mezclas asfálticas por vía húmeda y notaron un aumento significativo en la viscosidad y en la rigidez del asfalto base, también determinaron que los mejores resultados se obtenían con un porcentaje de GCR del 17% en peso, para ello realizaron ensayos de caracterización del asfalto y obtuvieron mayor punto de ablandamiento, menor ductilidad y penetración en el ligante con contenido de GCR. Resultado que también fueron obtenidos por (Rondón Quintana, Molano

Mora, & Tenjo Lancheros, 2012) y (Sánchez Millán & Vega Ramírez, 2016) en sus investigaciones, pero empleando contenidos de polímero del 15% en el ligante. Los resultados de estos estudios se encuentran plasmados en la tabla 5, en ella se puede apreciar una comparación en los resultados obtenidos por cada autor, en los ensayos de caracterización realizados al asfalto convencional y al modificado.

Esos datos concuerdan con (Bustos Castañeda, Sosa Martínez, Rodríguez Ramírez, & Calderón Bustos, 2018), quienes indican que en una modificación con GCR por vía húmeda presenta un porcentaje óptimo de polímero entre el 15 y 20%. Dichos porcentajes también son recomendados por la sociedad americana para pruebas y materiales (ASTM, 1997), en donde se sugiere que del peso total de la mezcla se debe adicionar al menos un 15% de GCR, porcentaje con el cual la modificación muestra cambios favorables en las propiedades del ligante asfáltico.

Tabla 5

Comparación de la caracterización del asfalto modificado con GCR

Especificación	Autores						Comparación
	Yung Vargas, Córdoba Maquilón & Rondón Quintana, 2016		Rondón Quintana, Molano Mora & Tenjo lancheros, 2012		Sánchez Millán & Vega Ramírez, 2016		
	Asfalt Conv	GCR 17%	Asfalt Conv	GCR 15%	Asfalt Conv	GCR 15%	
Viscosidad Rotacional (cP)	120	1850		2104	380	2100	Las mezclas modificadas muestran aumento en la viscosidad
Penetración (mm/10)	59,5	33	65	50	81	48,2	Los valores de penetración disminuyen, por lo cual las mezclas presentan mayor rigidez al incorporar GCR

Especificación	Autores						Comparación
	Yung Vargas, Córdoba Maquilón & Rondón Quintana, 2016		Rondón Quintana, Molano Mora & Tenjo lancheros, 2012		Sánchez Millán & Vega Ramírez, 2016		
	Asfalto Conv	GCR 17%	Asfalto Conv	GCR 15%	Asfalto Conv	GCR 15%	
Punto de ablandamiento (°C)	44	51	50	57	47	52	Los estudios presentan valores cercanos y un aumento en el punto de ablandamiento, disminuyendo la susceptibilidad térmica
Ductilidad (cm)	141,7	17,7	105	-	-	-	La ductilidad en asfaltos modificados es más baja, indicando mayor rigidez
Película delgada de horno rotatorio (RTFO)							
Cambio de masa (%)	-	-	0,6	0,5	-	-	Se observa que la mezcla presenta ganancia de masa
Penetración Residuo (%)	-	-	73	70	-	-	La penetración del residuo disminuye en mezclas con la adición del polímero

Fuente: Autor

3.1.2 Plastómeros.

3.1.2.1 Etilvinilacetato (EVA). Para procesos de pavimentación con polímero EVA como modificante asfáltico, resulta más conveniente utilizar un contenido del 18% de acetato de vinilo. Si esta concentración aumenta de 15% a 30% otorga a la mezcla una gran propiedad adherente. El cemento asfáltico modificado con EVA influye de manera positiva en los cambios que sufren las propiedades físico-mecánicas y reológicas del asfalto, entre ellas se encuentran, mejoras en la estabilidad térmica, incrementa la temperatura de ablandamiento, presenta mayor resistencia a la fatiga, la cantidad de polímero con respecto al peso total del asfalto puede variar

de 2% a 10% y como se menciona anteriormente aumenta la adhesión y cohesión de la mezcla cuando se le adiciona polímero con mayor concentración. (Infante Ataurima & Velásquez Alarcón, 2016).

(Mjthab, Hussien, & Al-Layla, 2011) en su investigación establecen que el efecto de la modificación del asfalto convencional con polímero EVA, mejora las propiedades reológicas y físicas del ligante, causando disminución de la penetración y la ductilidad, y aumento en el punto de ablandamiento y en la viscosidad del asfalto a medida que aumenta el contenido de polímero. Además, la rigidez que proporciona este plastómero, hace que el asfalto resista mejor las deformaciones y las cargas de tráfico, particularmente en zonas con clima cálido, es decir, lugares en donde el asfalto tiene mayor riesgo de ablandarse y deformarse.

Sin embargo, (Saboo & Kumar, 2016) aseguran que el cemento asfáltico modificado con EVA tiene mayor resistencia a la fatiga, pero la rigidez que produce la incorporación de este polímero, puede aumentar la formación de grietas en el pavimento al soportar demasiada tensión, y teniendo en cuenta que este polímero a bajas temperaturas puede ser más frágil, no se recomienda su uso en climas fríos.

Los resultados de estas investigaciones se pueden observar de forma más clara y sencilla en la tabla 6. En ella se encuentran los resultados obtenidos por cada autor en los ensayos de caracterización del asfalto convencional y modificado.

Tabla 6*Comparación de la caracterización del asfalto modificado con EVA*

Especificaciones	Autores				Comparación
	Saboo & Kummar, 2016		Mjthab, Hussien & Al-Layla, 2010		
	Asfalto Conv	EVA 5%	Asfalto Conv	EVA 2%	
Viscosidad en 60°C (Pa-s)	375	6120	-	-	Los valores de viscosidad aumentan considerablemente con asfalto modificado con EVA
Penetración (mm/10)	62	49	55	36	Se puede observar disminución en la penetración cuando el asfalto es modificado, lo que otorga mayor rigidez a la mezcla
Punto de ablandamiento (°C)	49	65	53	60	Los valores de punto de ablandamiento aumentaron, disminuyendo la susceptibilidad térmica
Índice de penetración	-0,95	1,92	-	-	El índice de penetración del asfalto base en comparación al modificado, indica disminución en la susceptibilidad térmica y otorga mayor grado de deformación al ligante asfáltico
Ductilidad (cm)	-	-	21	21	No se encuentran cambios en la ductilidad

Fuente: Autores

3.1.2.2 Policloruro de vinilo (PVC). Se estima que el PVC tiene un periodo de vida superior a los 30 años y debido a sus propiedades, este material termoplástico permite ser manejado a altas temperaturas, por esta razón se han realizado investigaciones para incluirlo como un modificador asfáltico. (Bustos Castañeda, Sosa Martínez, Rodríguez Ramírez, & Calderón Bustos, 2018)

En el estudio realizado por (Behl, Sharma, & Kumar, 2014), aseguran que los desechos de PVC pueden ser usados con éxito en la construcción de carreteras. Pues añadir este polímero (PVC) se obtiene mayor estabilidad y resistencia a las deformaciones permanentes en las mezclas. La modificación que sufre el cemento asfáltico aumenta en la viscosidad, el punto de ablandamiento con lo cual disminuye la susceptibilidad a la temperatura, además, reduce la penetración y la ductilidad, lo que indica mayor rigidez. De manera similar, (Reyes Lizcano, Guáqueta Echeona, Porras Salcedo, & Rondón Quintana, 2013) y (Addissie, Gebissa, & Tsegaye, 2018) en sus estudios obtienen resultados que coinciden con los expuestos anteriormente, y concluyen que un ligante con menor penetración, mayor punto de ablandamiento y menor ductilidad es capaz de soportar cargas y temperaturas más altas, mejora la propiedad de adhesión y cohesión y presenta mejor elasticidad. Además, los valores obtenidos en la caracterización del asfalto pueden indicar menor ahuellamiento a altas temperaturas de servicio, mientras que, en temperaturas bajas, puede presentar un comportamiento más frágil.

Los resultados de estas investigaciones se encuentran en la tabla 7, en ella se resume con mayor claridad los cambios que sufre los asfaltos convencionales al ser modificados con PVC.

Tabla 7

Comparación de la caracterización del asfalto modificado con PVC

Especificación	Autores						Comparación
	Behl, Sharma, & Kumar, 2014		Reyes Lizcano, Guáqueta Echeona, Porras Salcedo, & Rondón Quintana, 2013		Addissie, Gebissa & Tsegaye, 2018		
	Asfalt Conv	PVC 5%	Asfalt Conv	PVC 10%	Asfalt Conv	PVC 3%	
Viscosidad a 135°C (Cst)	270	1550	-	-	213	-	Se evidencian aumento en la viscosidad en el asfalto modificado

Especificación	Autores						Comparación
	Behl, Sharma, & Kumar, 2014		Reyes Lizcano, Guáqueta Echeona, Porras Salcedo, & Rondón Quintana, 2013		Addissie, Gebissa & Tsegaye, 2018		
	Asfalt Conv	PVC 5%	Asfalt Conv	PVC 10%	Asfalt Conv	PVC 3%	
Penetración (mm/10)	81	44	96	32	96	71,33	En todos los estudios se producen una disminución en la penetración, lo que indica mayor rigidez en el asfalto
Punto de ablandamiento (°C)	48	58	50,6	67,5	45,85	53,85	El aumento del punto de ablandamiento del asfalto modificado muestra disminución en la susceptibilidad térmica
Índice de penetración	-	-	-0,2	-	-0,66	0,64	El aumento en el índice de penetración deja a las muestras modificadas en un rango intermedio
Ductilidad (cm)	75	-	100	-	150	122	Los valores muestran menor ductilidad en asfaltos modificados
Película delgada de horno rotatorio (RTFO)							
Cambio de masa	-	-	0,3	0,9	0,34	0,23	Se puede evidenciar ganancia de masa

Fuente: Autores.

3.1.2.3 Polietileno de tereftalato (PET). Al modificar cemento asfáltico con polietileno de tereftalato (PET) se busca principalmente a reducir los desechos producidos por el PET y mejorar las características del pavimento. (Blazejowski, 2011)

(Ramírez López, Vidal, & Grajales, 2014) obtienen resultados poco satisfactorios, esto se debe al alto contenido de polímero que emplearon como modificante asfáltico, lo que les produjo una mezcla poco homogénea. Esto se ve reflejado en los valores de la caracterización física, los cuales sugieren que el asfalto modificado es menos rígido y por ende más susceptible a sufrir deformaciones. Pero sorpresivamente los ensayos por película delgada de horno rotatorio (RTFO), que determinan los efectos del asfalto frente a procesos de endurecimiento, mostraron buenos resultados, en ellos se obtuvo disminución en la penetración y aumento en el punto de ablandamiento.

En cambio, (Jaffar Al-Mulla & Makky, 2017) logran mezclar partículas de PET reciclado con el aglutinante de manera exitosa, con un contenido óptimo de polímero PET del 0.75%. Obtuvieron que al incorporar material PET en mezclas asfálticas, produce cambios en la reología y en la rigidez del asfalto al ser sometido a temperaturas altas. En sus ensayos la penetración disminuye a medida que aumenta la cantidad de residuos PET en el ligante, el punto de ablandamiento muestra una disminución en la susceptibilidad térmica, y mantuvo valores de ductilidad mínima según la ASTM. Los valores obtenidos por cada investigación se encuentran plasmados en la tabla 8, en la cual se resume y se comparan los resultados de los ensayos de caracterización del asfalto convencional y modificado realizados por cada autor.

Tabla 8*Comparación de la caracterización del asfalto modificado con PET*

Especificaciones	Autores				comparación
	Ramirez Lopez, Vidal & Grajales, 2014		(Jaffar Al-Mulla & Makky, 2017)		
	Asfalt Conv	PET 3%	Asfalt Conv	PET 0,75%	
Viscosidad Rotacional (cP)	1162,3	1024,5	-	-	El valor de la viscosidad disminuye, el en segundo estudio no muestran valores, pero mencionan que aumenta
Penetración (mm/10)	61	64,3	48	27,89	Para el primer estudio los valores de penetración aumentan mientras que para el segundo estudio disminuyen, lo cual es lo ideal para aumentar la rigidez
Punto de ablandamiento (°C)	52	51	56	53,86	En ambas muestras modificadas el punto de ablandamiento es menor, lo ideal sería que presentaran aumento
Índice de penetración	-0,32	-0,34	-1,79	-1,72	La primera investigación muestra valores de desempeño moderado, mientras que en la segunda el asfalto tiene alta susceptibilidad térmica y un grado bajo de deformación
Ductilidad (cm)	-	-	100	93,86	Se evidencian valores más bajos de ductilidad en el ligante modificado, debido al endurecimiento del asfalto.
Película delgada de horno rotatorio (RTFO)					
Penetración Residuo (%)	60	39	-	-	El porcentaje de penetración en el asfalto envejecido muestra una disminución considerable
Punto de ablandamiento (°C)	52	57,2	-	-	El punto de ablandamiento en el material expuesto a procesos de envejecimiento sigue siendo mayor en muestras modificadas

Fuente: Autores.

3.1.2.4 Polietileno de baja densidad (LDPD o PEBD). Este material posee gran resistencia térmica, y como modificante asfáltico aumenta la resistencia mecánica a altas temperaturas porque da mayor rigidez al asfalto. Por ello (Rondón Quintana, Fernández Gómez, & Castro López, 2010), en su investigación muestran la influencia que tiene el añadir PEBD en las propiedades físico-mecánicas del cemento asfáltico. Mencionan que, con la adición de desechos de este material perteneciente a los plastómeros el ligante asfáltico presenta mayor rigidez y en temperaturas bajas tiende a ser más frágil, lo cual puede indicar que este tipo de mezclas tendrían mejor rendimiento a temperaturas más elevadas (clima cálido), y con los ensayos de caracterización del asfalto se determinó que estas mezclas son menos propensas a presentar problemas por ahuellamiento.

Así mismo, (Castro López, Rondón Quintana, & Barrero Calixto, 2015) concluyen que en su investigación el porcentaje de PEBD produjo cambios significativos en el asfalto, esto se debe principalmente al aumento en la rigidez y el comportamiento del ligante modificado al ser expuesto a temperaturas altas, también observaron menor resistencia a la formación de grietas en climas más fríos y templados, por lo cual también sugieren que el uso de este tipo de asfaltos modificados se debe llevar a cabo en zonas cálidas, con el fin de evitar deformaciones en el pavimento, además, cabe resaltar que al presentar una pérdida de masa tan baja, este tipo de asfaltos puede resistir de mejor manera procesos de oxidación y envejecimiento. Resultados con los que coinciden (Addissie, Gebissa, & Tsegaye, 2018) quienes explican que un ligante con menor penetración, mayor punto de ablandamiento y menor ductilidad al asfalto es capaz de soportar cargas y temperaturas más elevadas, además, mejora la propiedad de adhesión y cohesión y presenta mejor elasticidad.

Tabla 9*Comparación de la caracterización del asfalto modificado con PEBD o LDPE*

Especificación	Autores						Comparación
	(Rondón Quintana, Fernández Gómez, & Castro López, 2010)		Castro López, Rondón Quintana & Barrero Calixto (2015).		Addissie, Gebissa & Tsegaye, 2018		
	Asfalt Conv	PEBD 5%	Asfalt Conv	PEBD 5%	Asfalt Conv	PEBD 5%	
Penetración (mm/10)	87	33,87	65	35	96	72,33	Los asfaltos modificados presentan menor penetración lo que indica mayor rigidez
Punto de ablandamiento (°C)	48	60	50	61	45,85	55,2	Los asfaltos que tienen contenido de PEBD disminuyen la susceptibilidad a la temperatura, esto se debe al aumento en el punto de ablandamiento
Índice de penetración	-0,2	-	-0,8	-	-0,66	0,99	El asfalto modificado tiene un desempeño moderado
Ductilidad (cm)	100	-	105	55	150	121,9	Los valores de la ductilidad disminuyen debido al aumento en la rigidez del asfalto
Película delgada de horno rotatorio (RTFO)							
Cambio de masa	0,3		0,65	0,5	0,34	0,29	Los valores del cambio de masa en el ligante con PEBD son un poco más bajos que los del asfalto base, pero aun así representan ganancia de masa al ser valores positivos

Fuente: Autores.

Conclusiones

Al analizar los dos tipos de polímeros que conforman el grupo de los termoplásticos, se pudo observar la capacidad que tienen estos compuestos para conservar sus propiedades al ser expuestos al calor, soportando las altas temperaturas a la que es sometido el asfalto. Por ello se convierten en uno de los mejores materiales para ser usado en mezclas asfálticas en caliente, ya que la compatibilidad que existe entre ambos (asfalto y polímero) produce buena homogeneidad en las mezclas, característica que también depende del porcentaje de polímero adicionado al asfalto, además, proporcionan mayor resistencia y estabilidad, creando mezclas con mejores características que las convencionales.

Adicionalmente, se debe determinar qué tipo de polímero es el más adecuado, esto depende en gran medida de las necesidades, exigencias y el lugar del proyecto, teniendo en cuenta que, las distintas clases de polímeros aportan características diferentes a las mezclas asfáltica y desarrollan mejor sus propiedades en condiciones distintas. En consecuencia, los plastómeros (EVA, PVC, PET y PEBD) desarrollan mejor sus propiedades en climas cálidos, esto se debe a que estos materiales (plásticos) rigidizan las mezclas, y al ser expuesto a un clima frío pueden ser muy frágiles, mientras que, los elastómeros (SBS, SBR y GCR) proporcionan mayor elasticidad, evitando de una manera más eficiente las deformaciones permanentes a bajas temperaturas.

Todos los polímeros de la investigación pueden ser utilizados como modificadores de mezclas asfálticas, ya que todos cumplen con los requisitos mínimos exigidos por las distintas normas en las cuales se basaron sus resultados. Para cada uno de los materiales existen porcentajes de optimización diferentes, pues, de un mismo polímero puede variar el resultado de

una investigación a otra, esto puede ocurrir ya sea por las condiciones en las que se realizan los ensayos, o debido al origen de los materiales. Por ende, al realizar el diseño de mezcla, cada trabajo de investigación obtiene resultados diferentes del peso del asfalto, de agregados y de porcentaje óptimo de polímeros.

También se concluye que, la adición de polímeros termoplásticos si influye en las propiedades físico-mecánicas y reológicas de las mezclas asfálticas. Los ensayos de caracterización del asfalto en general, mostraron que las mezclas modificadas presentan aumento en la viscosidad de 543,29% y en el punto de ablandamiento de 19,66%, por otro lado, se encuentra una disminución los valores de la penetración de 28,99% y en la ductilidad de 36,39%, como se muestra en la tabla 10, así mismo, los porcentajes en los cuales aumentan o disminuyen los resultados obtenidos por cada polímero en los diferentes ensayos de caracterización, se pueden observar en las figuras 16 hasta la 19.

Los cambios en estos parámetros muestran un evidente aumento en la rigidez y por ende una mayor resistencia a soportar cargas y mayor resistencia a la deformación permanente, también se evidencia disminución en la susceptibilidad a la temperatura, siendo capaz de soportar temperaturas más elevadas, además, el ligante presenta mejor adhesión y cohesión, lo cual ayuda a obtener una mezcla de carácter homogéneo.

Tabla 10

Porcentajes de aumento o disminución obtenidos en los ensayos de caracterización entre el asfalto convencional y el modificado

Porcentajes de aumento o disminución en los ensayos de caracterización entre asfalto convencional y el modificado								
Especificación	SBS	SBR	GCR	EVA	PVC	PET	PEBD	% General
Viscosidad	193,5	51,15	1020,8	1532	474,1	-11,9	-	543,3
Penetración	-22,19	-8,73	-36,04	-27,76	-46,01	-18,24	-43,96	-29

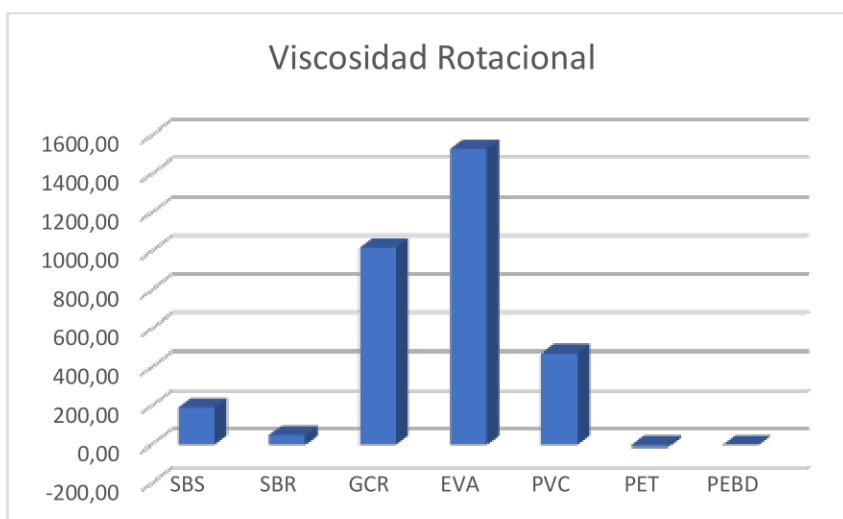
Especificación	SBS	SBR	GCR	EVA	PVC	PET	PEBD	% General
Punto de ablandamiento	37,48	20,21	13,52	22,93	23,89	-2,87	22,46	19,66
Ductilidad	-63,59	-45,64	-87,51	0,00	-18,67	-6,14	-33,18	-36,39
Película delgada de horno rotatorio (RTFO)								
Ductilidad	-48,57	-28,57	-	-	-	-	-	-38,57
Penetración residuo	-11,38	-9,05	-3	-	-	-21	-	-11,11
punto de ablandamiento	20,01	39,33	-	-	-	10	-	23,11

Nota: los valores negativos indican el porcentaje en que disminuyen los resultados del asfalto modificado frente al convencional y los valores positivos el porcentaje en el que aumentan.

Fuente: Autores.

Figura 16

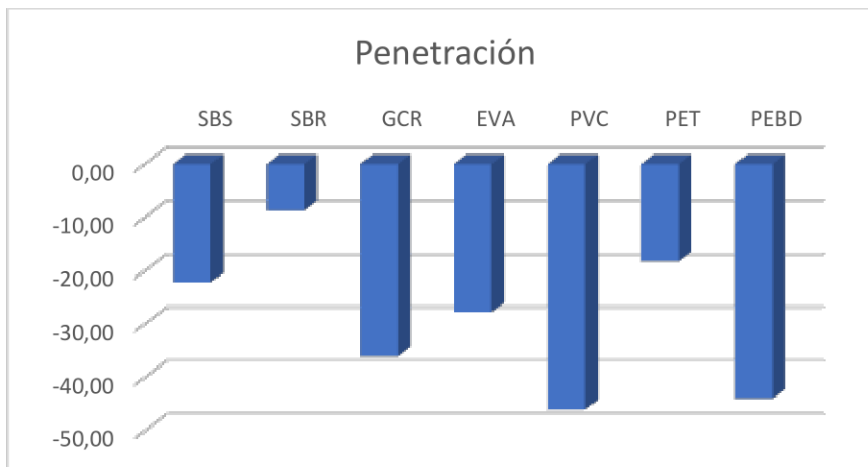
Porcentaje en que aumenta la viscosidad del asfalto modificado



Fuente: Autores.

Figura 17

Porcentaje en el que disminuye la penetración del asfalto modificado



Fuente: Autores.

Figura 18

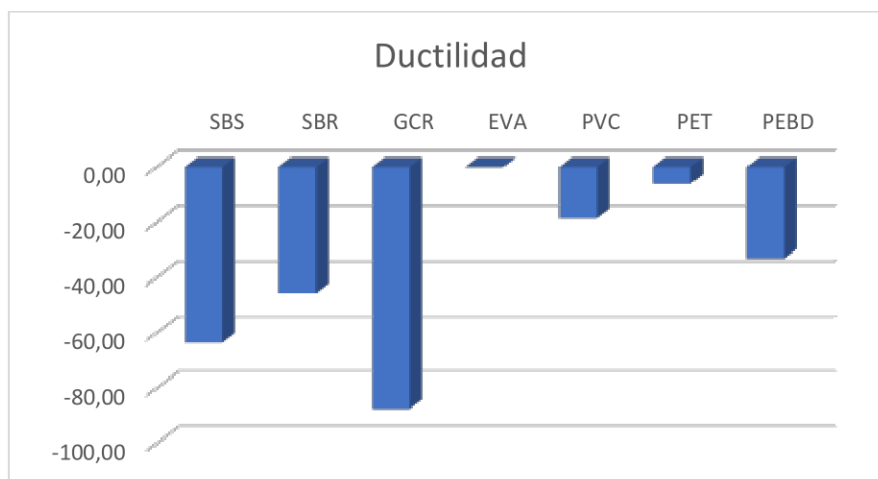
Porcentaje en que aumenta el punto de ablandamiento del asfalto modificado



Fuente: Autores.

Figura 19

Porcentaje en el que disminuye la ductilidad del asfalto modificado



Fuente: Autores

Cabe destacar que en esta monografía solo se tuvieron en cuenta estudios que realizaron modificaciones por vía húmeda. Por otra parte, para algunos materiales las investigaciones no contaban con el ensayo de película delgada en horno rotatorio (RTFO), como se evidencia en la tabla 10, sin embargo, con los materiales que si contemplaban este estudio, se pudo determinar que también mejoran el comportamiento del asfalto frente a procesos de oxidación, endurecimiento y envejecimiento. Parámetros que al ser mejorados prolongan el tiempo de vida del pavimento, y a largo plazo, disminuye considerablemente los costos que implican construir este tipo de carreteras, pues, con asfaltos modificados se presenta una reducción en la aparición de patologías en el pavimento principalmente fisuras, ahuellamiento y fatiga, minimizando los trabajos de mantenimiento y rehabilitación vial, a la vez, que se llevan a cabo prácticas sostenibles, en las que se le da una segunda oportunidad a materiales de composición polimérica que han sido desechados.

Finalmente, con esta monografía de compilación se pudo observar que el material que mostró mejores resultados como modificador asfáltico de origen elastomérico es el GCR, el cual presenta mayor viscosidad, mayor disminución en los valores de penetración y ductilidad, lo cual da como resultado un material que otorga al asfalto mayor rigidez y disminuye la sensibilidad a la temperatura, así mismo, muestran mejor desempeño ante el deterioro, evitando fallas por agrietamiento y deformaciones permanentes. Mismas conclusiones a las cuales llegan con el proyecto piloto realizado por el IDU en 2001-2003 con la universidad de los Andes. Además, en la tabla 10 se puede apreciar que después del GCR, los mejores valores se obtienen con el SBS y por último el SBR. A continuación, en la tabla 11 se ordenan los materiales según los resultados obtenidos y se especifica los climas en los cuales se desarrolla mejor las propiedades de los elastómeros, los cuales proporcionan mayor elasticidad a las mezclas asfálticas.

Tabla 11

Desempeño de polímeros elastomérico

Polímero Termoplástico	Zonas de aplicación	Se busca obtener	Ranking
Elastómeros	GCR	Aumento en la viscosidad y el punto de ablandamiento, lo cual indica disminución en la susceptibilidad térmica. Y también, disminución en valores de penetración y ductilidad, lo que indica mayor rigidez del asfalto. Por ende, mayor resistencia a la deformación permanente.	1
	SBS		2
	SBR		3

Fuente: Autores

Por último, en los resultados de los asfaltos modificados con plastómeros, se puede observar que el EVA, PVC y PEBD obtienen valores similares en los ensayos de penetración y punto de ablandamiento. Y aunque el EVA presente mejores valores de viscosidad, los tres materiales mencionados anteriormente (EVA, PVC, PEBD) son buenas opciones a la hora de

realizar mezclas asfálticas modificadas en caliente, a excepción del PET, dado que, los estudios de este material muestran resultados poco satisfactorios; la disminución en la viscosidad puede producir que exista poca adhesión y cohesión del material bituminoso tanto con el polímero como con el material pétreo, haciendo que aumente las fallas debido a la falta de homogeneidad en la mezcla. A continuación, en la tabla 12 se ordenan los materiales según los resultados obtenidos y se especifica los climas en los cuales se desarrolla mejor las propiedades de los elastómeros, los cuales proporcionan mayor rigidez las mezclas modificadas.

Tabla 12

Desempeño de polímeros plastoméricos

Polímeros Termoplásticos	Zonas de aplicación	Se busca obtener	Ranking
EVA	climas cálidos	Aumento en la viscosidad y el punto de ablandamiento, lo cual indica	1
PVC		disminución en la susceptibilidad	2
PEBD		valores de penetración y ductilidad, lo	3
PET		que indica mayor rigidez del asfalto. Por ende, mayor resistencia a la deformación permanente.	4

Fuente: Autores

Referencias

- Addissie, H., Gebissa, A., & Tsegaye, M. (2018). Rheological Properties of Plastic Modified Bitumen for Sub-Tropical Areas of Ethiopia. *Science and Education Publishing, American Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol. 6*(No.6), pp. 223-235.
- Aldana Perdomo, J. L., & Acosta Velásquez, L. E. (2014). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS GRUESA EN CALIENTE MGC-1, UTILIZANDO ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS (SBS)*. Bogotá D.C, Colombia: Universidad Católica de Colombia.
- Araiza Armenta, J. A. (2002). *Manejo de planta de concreto asfáltico y construcción de carpeta*. Mexico: Universidad de Sonora.
- Arteaga Villamarin, J. F. (2018). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA BASE – CEMENTO PARA PAVIMENTOS CON ADICIÓN DE RESIDUOS PET RECICLADO*. Bogotá D.C: Univesidad Católica de Colombia.
- ASTM. (1997). *ASTM D6114-97. Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*.
- Behl, A., Sharma, G., & Kumar, G. (2014). A sustainable approach: Utilization of waste PVC in asphaltting of roads. *Construction and Building Materials, Vol. 54*, p. 113-117.
- Blazejowski, K. (2011). *Stone Matrix Asphalt Theory and Practice* (Edición. 1st ed.). CRC Press Taylor and Francis Group.
- Boll Stiftung, H. (2019). Datos y cifras sobre el mundo de los polímeros sintéticos 2019. *Atlas del plástico*, pp. 1-52.

- Borja Torres, S. A., & Cárdenas Castillo, J. A. (2019). *Caracterización de mezclas asfálticas en caliente, elaboradas con el uso de cemento asfáltico modificado con polímero SBR y SBS*. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Brovelli, C., Crispino, M., Pais, J., & Paulo, P. (2014). Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete. *School of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano and University of Minho*.
- Bustos Castañeda, H. Y., Sosa Martínez, P. A., Rodríguez Ramírez, N., & Calderón Bustos, J. N. (2018). “Fundamentos micro y macroscópicos de la modificación del asfalto convencional con polímeros: una revisión”. *Inventum, Vol. 13*(No. 24), pp. 58-77.
- Cabeza Acosta, F. J., Hidalgo Prada, B., & Valles García, F. A. (2013). ANÁLISIS REOLÓGICOS DE LAS PRINCIPALES FALLAS QUE EXPERIMENTA EL ASFALTO OBTENIDO A PARTIR DE MEZCLAS DE DOS COMPONENTES: UNO BLANDO TÍA JUANA MEDIANO (TJM-26) Y UN COMPONENTE DURO LAGOTRECO. *Saber, Universidad de Oriente, Ciencias Basicas y Tecnologia, Vol.25*(No.3), 285-293.
- Cárdenas, J., & Fonseca, E. (2009, Diciembre). MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE ASFALTO CONVENCIONAL Y MODIFICADO CON POLÍMERO RECICLADO, ESTUDIADA DESDE LA RELACIÓN VISCOSIDAD-TEMPERATURA. *Revista EIA*(No.12), p. 125-137.
- Carlson, D. D., & Zhu, H. (1999). *Third Joint UNCTAD/IRSG Workshop on Rubber and the Environment*. Veracruz, Mexico: International Rubber Forum.

Carreño Zagarra, R. J., & Reyes Salcedo, J. E. (2015). *ESTUDIO DEL EFECTO DE ADITIVOS REDUCTORES DE TEMPERATURAS DE TRABAJO, EN EL DESEMPEÑO DE MEZCLAS BITUMINOSAS GAP-GRADED ELABORADAS CON ASFALTOS MODIFICADOS CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO*. Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia.

Castro Cabeza, A. P. (2018). *INVESTIGACIÓN SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO 100% RECICLADAS CON ADICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS*. Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte.

Castro López, W. A., Rondón Quintana, H. A., & Barrero Calixto, J. C. (2015). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Revista Ingeniería*, 2.

Castro López, W. Á., Rondón Quintana, H. A., & Barrero Calixto, J. C. (2015). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Revista Ingeniería*.

Coicue Duarte, L. F., & Sepulveda Salazar, C. C. (2017). *POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD COMO ALTERNATIVA PARA MEJORAR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE MDC-19*. Bogotá D.C: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.

Constructora Arquintex. (2016). *CONSTRUCTORA ARQUINTEX SRL*. Retrieved from <http://arquintex.com/historia-de-asfalto.html>

Díaz Claros, C. M., & Castro Celis, L. C. (2017). *IMPLEMENTACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS PARA*

MEJORAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y GARANTIZAR PAVIMENTOS SOSTENIBLES EN BOGOTÁ. Bogota D.C, Colombia: UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS.

Figueroa, A. S., Reyes, F. A., Hernández, D., Jiménez, C., & Bohórquez, N. (2007). Analisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. *Revista Ingenieria e Investigación*, Vol No.3 (5-15).

Forero Bernal, J. A., García Medina, J. P., & Martínez Torres, M. J. (2015). *PROPIEDADES FÍSICAS, REOLÓGICAS Y MECÁNICAS DE UN CEMENTO ASFÁLTICO 80/100 MODIFICADO POR VÍA HÚMEDA CON ADICIÓN DE CORCHO.* Bogota D.C, Colombia: UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA.

Forigua Orjuela, J. E., & Pedraza Díaz, E. (2014). *DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS MEDIANTE LA ADICIÓN DE DESPERDICIOS PLÁSTICOS.* Bogotá D.C, Colombia: Universidad Católica de Colombia.

Ibañez Aguilera, H. E. (2003). *“USO DE EMULSIONES EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS; ASFALTOS CALIENTES Y FRIOS”.* Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.

Infante Ataurima, C. A., & Velásquez Alarcón, D. H. (2016). *“ESTUDIO COMPARATIVO DEL MÉTODO CONVENCIONAL Y USO DE LOS POLÍMEROS EVA Y SBS EN LA APLICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS”.* Pimentel: Universidad Señor de Sipán.

INVIAS. (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras - Art 413-13.*

INVIAS. (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras - Art 414-13.*

Colombia.

Jaffar Al-Mulla, E. A., & Makky, S. M. (2017). Preparation of sustainable asphalt pavements using polyethylene terephthalate waste as a modifier. *ZASTITA MATERIJALA, Vol.58(No.3)*, pp.394-399.

Júarez, D., Balart, R., Ferrandiz, S., & García, D. (2013). ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS POLÍMEROS DERIVADOS DEL ESTIRENO-BUTADIENO. *Revista de investigación 3Ciencias.*

Khadivar, A., & Kavussi, A. (2013). Rheological characteristics of SBR and NR polymer modified bitumen emulsions at average pavement temperatures. *Construction and Building Materials, Vol. 47*, p. 1099 - 1105.

Lubo Gómez, O. A., & Martínez Giraldo, R. A. (2020). Asfaltos modificados con cauchos en vías primarias en las ciudades Santa Marta, Barranquilla y Bogotá como alternativa de mejoramiento de la capa de rodadura de los pavimentos flexibles entre los años 2012-2019. *Universidad Cooperativa De Colombia*, pp. 1-10.

Luque Ariza, H., & Rincón Solano, A. J. (2011). *EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN CEMENTO ASFÁLTICO 60/70 MODIFICADO CON RESIDUOS DE LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD.* Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana.

Más azul planeta. (2020, Julio 24). Retrieved from

<https://www.masazulplaneta.com.ar/2020/07/24/caucho-y-neumaticos/>

- Mejía Umbarila, C. A., & Sierra Hernández, C. A. (2017). *ESTADO DEL ARTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS: CASO DE ESTUDIO UNIVERSIDADES DE BOGOTÁ D.C.* Bogota D.C, Colombia: Universidad Piloto de Colombia.
- Merizalde Aguirre, J. E., López Pérez, D. J., & Puma Vásquez, C. J. (2017). *Caracterización de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante la determinación del módulo de rigidez.* Quito: Quito: UCE.
- Mjthab, E. I., Hussien, A. K., & Al-Layla, N. M. (2011). Evaluation of the properties and storage stability of EVA polymer modified asphalt. *J. Edu. & Sci, Vol.24(No.3).*
- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A., & Olavarria, J. (2019, Febrero 20). Efectos del tereftalato de polietileno reciclado (PET) sobre la rigidez de las mezclas de asfalto caliente. (G. Dondi, Ed.) *Hindawi, 2019*, 1-6.
- MPI Ltda. (S.f). *MPI*. Retrieved from Asfaltos Con Polimeros - Fichas Tecnicas:
<https://www.mpi.net.co/ASFALTOS-CON-POLIMEROS>
- MPI Ltda. (S.f). *MPI*. Retrieved from Asfalto Caucho - Fichas Tecnicas:
<https://www.mpi.net.co/ASFALTO-CAUCHO>
- Mundo Plast. (2019, Octubre 22). Retrieved from <https://mundoplast.com/produccion-plasticos-2018/>
- Múnera Ossa, J. C. (2012). *MODIFICACIÓN POLIMÉRICA DE ASFALTOS.* Medellín, Colombia: Universidad EAFIT.

- Palma, C. V., Ortiz Cisneros, J. C., Ávalos Belmonte, F., & Castañeda Facio, A. (2016).
Modificación de asfalto con elastómeros para su uso en pavimentos. (U. A. Cohauila,
Ed.) *Afinidad LXXIII*.
- Pérez Verdugo, R. H. (2014). *REALIDADES Y PERCEPCIONES DEL USO DE LOS
ASFALTOS MODIFICADOS EN COLOMBIA*. Bogotá D.C, Colombia: Universidad
Militar Nueva Granada.
- Pineda Rodríguez, Y. A., & Rey Moreno, F. A. (2012). *Mezclas asfálticas drenante modificada
con grano de caucho reciclado*. Bogotá D.C: Universidad Piloto de Colombia.
- Rama Labrador, F. (2006). Historia de los pavimentos urbanos. *Cimbra*, 40-41.
- Ramirez Franco, O. A. (2016). *ANÁLISIS COMPARATIVO DEL PROYECTO DE NORMA
DE044-16 CON LA ESPECIFICACIÓN IDU 560 – 11 Y CON EL ARTICULO INVIAS
467-13 Y LA NORMA INV – E – 824 -13 DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON GRANO DE
CAUCHO MEJORADO*. Bogotá D.C: Universidad Militar Nueva Granada.
- Ramírez López, D., Vidal, A. J., & Grajales, J. A. (2014). *Incorporación de Tereftalato de
Polietileno como agente modificados en el asfalto*. Cali, Colombia: Pontificia Universiad
Javeriana.
- Reyes Lizcano, F. A., Guáqueta Echeona, C., Porras Salcedo, L. M., & Rondón Quintana, H. A.
(2013). Comportamiento de un cemento asfáltico modificado con un desecho de PVC.
Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol.12(No.22), p. 75-84.
- Rodríguez, E. A. (2009). *Polimeros en mezclas asfálticas*. Tunja, Colombia: Universidad Santo
Tomas.

- Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2015). *Pavimentos materiales, construcción y diseño*. Bogota D.C: ECOE ediciones .
- Rondón Quintana, H. A., Molano Mora, Y., & Tenjo Lancheros, 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. *TecnoLógicas*(No. 29), pp. 13-31.
- Rondón Quintana, H., Fernández Gómez, W., & Castro López, W. (2010). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). *Revista Ingeniería de Construcción, Vol.25*(No.1), pp.83-94.
- Saboo, N., & Kumar, P. (2016). Performance Characterization of Polymer Modified Asphalt Binders and Mixes. *Hindawi*, pp. 1-12.
- Salamanca Arce, G. J. (2007). *Influencia de la contaminación salina en el envejecimiento prematuro de mezclas y tratamientos asfálticos*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Salazar Delgado, J. (2008). *Evaluación de factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto modificados en planta*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Salazar Delgado, J. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047). *Metodos y materiales, Vol 1*.

Salazar Delgado, J. (2012, Octubre). ¿Por qué modificar el asfalto? *PITRA, Boletín técnico, Vol 3*(No. 34).

Sánchez Millán, S. P., & Vega Ramírez, C. C. (2016). *Evaluación del daño por humedad en una mezcla asfáltica modificada con grano de caucho (GCR)*. Bogotá D.C, Colombia: Universidad la Gran Colombia.

Sengoz, B., Topal, A., & Isikyakar, G. (2009). Morphology and image analysis of polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials, Vol 23*(No.5), p. 1986-1992.

Smith, W. F. (1999). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (Vol. 3ra edición). Madrid, España: McGraw-Hill.

Timetoast. (S.f). *Timetoast*. Retrieved from <https://www.timetoast.com/timelines/historia-del-pavimento>

Utrilla, A. d. (2007). *Diseño de una mezcla asfáltica de alto rendimiento para baches superficiales y profundos: tramo carretero Villahermosa - Teapa*. Mexico: Universidad de las Américas Puebla.

Velar Prieto, J. (1997). *Characterizacion of hot mix asphalt using crumb rubber*. Puerto rico: UMI company.

Velásquez Mayén, J. A. (2016). *REHABILITACIÓN DE CARRETERAS PAVIMENTADAS UTILIZANDO MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE MODIFICADA CON POLÍMEROS*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Vélez Moreno, L. M. (2010, Mayo 24). *Propiedades Materiales de Construcción*. Retrieved from *Procesos y características de materiales de construcción*:

<https://propiedadesmaterialesdeconstruccion.blogspot.com/2010/05/procesos-y-caracteristicas-de.html>

Yaacoba, H., Ali Mughala, M., Putra Jayaa, R., Rosli Hainina, M., Sri Jayantib, D., & Che Wan, C. N. (2016). Rheological properties of styrene butadiene rubber modified bitumen binder. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, Vol. 78(7-2), p. 121-126.

Yung Vargas, Y. W., Cordoba Maquilón, J. E., & Rondón Quintana, H. A. (2016). Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR). *Revista Tecnura*, Vol 20(No.50), pp. 106-108.

Zúñiga, R. (2015). *LABORATORIO NACIONAL DE VIALIDAD Mezcla Asfáltica en caliente*. Ministerio de obras publicas.