

Artículo de investigación

**Cómo citar:** H. Y. Bustos *et al.*, "Fundamentos micro y macroscópicos de la modificación del asfalto convencional con polímeros: una revisión", *Inventum*, vol. 13, no. 24, pp. 58-77, enero - junio, de 2018. doi: 10.26620/uniminuto.inventum. 13.24.2018.58-77

**Editorial:** Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO.

**Recibido:** 10 de enero de 2018

**Aceptado:** 25 de febrero de 2018

**Publicado:** 2 de abril de 2018

**Conflicto de intereses:** los autores han declarado que no existen intereses en competencia.

# FUNDAMENTOS MICRO Y MACROSCÓPICOS DE LA MODIFICACIÓN DEL ASFALTO CONVENCIONAL CON POLÍMEROS: UNA REVISIÓN

## MICRO- AND MACROSCOPIC FUNDAMENTALS OF THE MODIFICATION OF CONVENTIONAL ASPHALT WITH POLYMERS: A REVISION

## FUNDAMENTOS MICRO E MACROSCÓPICOS DA MODIFICAÇÃO DO ASFALTO CONVENCIONAL COM POLÍMEROS: UMA REVISÃO

Henry Yecid Bustos Castañeda; Pedro Alexander Sosa Martínez; Nelson Rodríguez Ramírez; Jeimy Natalia Calderón Bustos

### Resumen

Con el pasar de los años el número de vehículos en las ciudades ha aumentado, de igual manera la velocidad a la que transitan y las cargas permitidas. Esto ha limitado la durabilidad de las estructuras de pavimento. Por otra parte, la diversidad de climas y microclimas a los que están sometidos los pavimentos, han acortado fuertemente la vida útil de estas estructuras. Lo anterior ha generado una motivación en los últimos años en mejorar la calidad de estos sistemas con el fin de mejorar el funcionamiento, la durabilidad y su mantenimiento. Para esto el uso de polímeros en un porcentaje y combinación adecuados como modificadores de los asfaltos convencionales, en los últimos años, ha tomado relevancia debido a la mejora de sus propiedades. En este trabajo se muestra una revisión de algunas de las investigaciones que se han realizado sobre los asfaltos modificados con polímeros en las dos últimas décadas, con el objetivo de presentar los efectos de la incorporación individual, binaria y multicomponente de polímeros elastómeros y plastómeros al ligante convencional. En este sentido, se obtuvo un resumen de los conocimientos actuales sobre el uso de diferentes polímeros en la modificación del asfalto, además la clasificación y revisión de diferentes tipos de sistemas de modificación según los polímeros, también las propiedades físicas y mecánicas de los asfaltos resultantes. En conclusión, la incorporación de polímeros al asfalto mejora algunas de las propiedades en comparación con el asfalto convencional, adicionalmente cuando las modificaciones son binarias o multicomponentes permiten que los asfaltos resultantes mejoren varias de sus propiedades simultáneamente, lo anterior con algunas limitaciones en temperatura y carga.

**Palabras clave:** Asfalto modificado con polímeros, propiedades viscoelásticas, morfología del asfalto modificado, reología.

**Henry Yecid Bustos Castañeda**

*hbustos@uniminuto.edu*

Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO, Colombia

**Pedro Alexander Sosa Martínez**

*pedrososa704@gmail.com*

Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO, Colombia

**Nelson Rodríguez Ramírez**

*nelson.1010@hotmail.com*

Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO, Colombia

**Jeimy Natalia Calderón Bustos**

*jenacabu@gmail.com*

Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO, Colombia

Copyright:



### **Abstract**

Over the years, the number of vehicles in the cities has increased, as well as the speed at which they transit and the loads allowed. This has limited the durability of the pavement structures. On the other hand, the diversity of climates and microclimates to which the pavements are subjected have greatly shortened the useful life of these structures. This has generated a motivation in recent years to improve the quality of these systems in order to improve performance, durability and maintenance. For this reason, the use of polymers in a percentage and combination suitable as modifiers of conventional asphalts, in recent years, has taken relevance due to the improvement of their properties. This paper shows a review of some of the investigations that have been conducted on polymer-modified asphalts in the last two decades, with the aim of presenting the effects of the individual, binary and multicomponent incorporation of elastomeric polymers and plastomers to the conventional binder. In this sense, we obtained a summary of current knowledge on the use of different polymers in the modification of asphalt, as well as the classification and revision of different types of modification systems according to the polymers, also the physical and mechanical properties of the resulting asphalts. In conclusion, the incorporation of polymers to asphalt improves some of the properties compared to conventional asphalt, additionally, when the modifications are binary or multicomponent they allow the resulting asphalts to improve several of their properties simultaneously, this with some limitations in temperature and load.

**Keywords:** Polymer-modified asphalt, viscoelastic properties, modified asphalt morphology, rheology.

### **Resumo**

Com o passar dos anos o número de veículos nas cidades tem aumentado, do mesmo modo a velocidade à que transitam e o ônus permitidos. Isto tem limitado a durabilidade das estruturas de pavimento. Por outra parte, a diversidade de climas e micro-climas aos que estão submetidos os pavimentos têm encurtado fortemente a vida útil destas estruturas. O anterior tem gerado uma motivação nos últimos anos em melhorar a qualidade destes sistemas com o fim de melhorar o funcionamento, a durabilidade e sua manutenção. Para isto o uso de polímeros numa percentagem e combinação adequados como modificadores dos asfaltos convencionais, nos últimos anos, tem tomado relevância devido à melhora de suas propriedades. Este trabalho mostra uma revisão de algumas das investigações que se realizaram sobre os asfaltos modificados com polímeros nas duas últimas décadas, com o objetivo de apresentar os efeitos da incorporação individual, binária e multi-componente de polímeros elastômeros e plastômeros ao ligante convencional. Neste sentido, obteve-se um resumo dos conhecimentos atuais sobre o uso de diferentes polímeros na modificação do asfalto, além da classificação e revisão de diferentes tipos de sistemas de modificação segundo os polímeros, também as propriedades físicas e mecânicas dos asfaltos resultantes. Em conclusão, a incorporação de polímeros ao asfalto melhora algumas das propriedades em comparação com o asfalto convencional, adicionalmente, quando as modificações são binárias ou multi-componentes permitem que os asfaltos resultantes melhorem várias de suas propriedades simultaneamente, o anterior com algumas limitações em temperatura e carga.

**Palavras-chave:** Inventários, multiproduto, heurística, demanda estocástica, revisão periódica.

## INTRODUCCIÓN

Los pavimentos asfálticos por naturaleza son sensibles a cambios extremos de temperatura [1], además, el aumento de carga, los elevados niveles de tránsito, el incremento en las presiones de los neumáticos, el rozamiento a alta temperatura y el daño por humedad son otros de los problemas a los que se someten las estructuras de pavimento a diario [2-11]. Estos retos de ingeniería aumentan el costo del mantenimiento de las carreteras [12] y en última instancia limitan la durabilidad [13]. A fin de contrarrestar estos problemas de largo plazo a altas y bajas temperaturas, se han estudiado e incorporado distintos porcentajes en proporción y formas de polímeros al asfalto [14]. El porcentaje de polímero en la modificación de asfalto usualmente oscila entre 2-6 % [1], [9], o de 3-7 % en peso [15] y se incorpora con el fin de producir materiales con una mejor resistencia al envejecimiento [16], a la deformación permanente [17], a la formación de fisuras, al craqueo térmico y al daño por fatiga [18], [19]. En resumen, la modificación del asfalto consiste en agregar un aditivo con ciertas propiedades para mejorarlo [20]. Sin embargo, la mayoría de asfaltos modificados con un polímero implican efectividad en un rango limitado de temperaturas y propiedades, debido a que cada polímero crea un efecto específico en el asfalto [13], es decir, un tipo de polímero puede solo mejorar una o pocas propiedades en el asfalto resultante [21]. Ejemplo: el solo minimizar las deformaciones permanentes en altas temperaturas o fisuras a bajas temperaturas en los pavimentos, lo que es ineficiente a la hora de predecir el rendimiento en las carreteras de Colombia; esto debido a que se requieren mejoras en la mayoría de las propiedades de los ligantes asfálticos, puesto que las carreteras están expuestas a diversos climas y microclimas que las afectan [22].

De acuerdo con lo anterior, algunos polímeros tienen como fin mejorar las propiedades elásticas (comportamiento resiliente) del asfalto, debido a sus características [1], [23], entre los que se incluyen el estireno-butadieno-estireno (SBS), el estireno-butadieno-caucho (SBR) y el grano de caucho reciclado y triturado (GCR) entre otros, sin embargo, esta mejora elástica solo se evidencia en rangos limitados de temperatura [24]; a su vez, estos polímeros a temperaturas ambientales altas ( $T_a > 40^\circ\text{C}$ ) inducen la deformación permanente [25]. Por otra parte, los modificadores de tipo plástico como el polietileno de alta y baja densidad (PEAD, PEBD), polipropileno (PP) y policloruro

de vinilo (PVC) son más efectivos en la mejora de la rigidez o la resistencia mecánica en altas temperaturas, si bien, a bajas temperaturas no logran impedir el agrietamiento [26]. Lo anterior comprueba la falta del mejoramiento integral de las propiedades en los asfaltos modificados. En consecuencia, el asfalto modificado utilizado para mezclas asfálticas debe tener la viscosidad necesaria en altas temperaturas para disminuir la susceptibilidad a la deformación permanente, sin aumentar la rigidez a bajas temperaturas, de tal manera que ocurra fisuración [6].

En consecuencia, se ha propuesto combinar polímeros compatibles con diferentes propiedades químicas, físicas, mecánicas y reológicas como modificadores del asfalto convencional en distintos porcentajes [14].

Dos o más polímeros combinados que se incorporan en materiales asfálticos proporcionan respuestas diferentes cuando se enfrentan a diferentes temperaturas y condiciones de carga, tales como mezcla, compactación y funcionamiento. Las mezclas de asfalto modificado con dos o más polímeros se denominan *binarias* [27] o *multicomponente* [14], respectivamente. Por lo tanto, los asfaltos modificados con mezclas binarias o multicomponente dan como resultado rendimientos híbridos que exceden las presentaciones individuales del polímero [3]. Lo anterior es importante ya que se optimizan las propiedades del asfalto convencional. Algunos investigadores han demostrado que las mezclas binarias o multicomponente compatibles pueden producir asfaltos modificados con un mejoramiento y optimización en varias de sus propiedades simultáneamente [14].

Los diferentes métodos de mezclas binarias o multicomponentes incluyen la combinación de diversos tamaños de grano, módulos y resistencias. Sobre este fundamento, las ventajas de las diferentes formas de mezclas binarias y multicomponentes son las siguientes:

### **A. Mezcla binaria o multicomponente basada en el tamaño del polímero de incorporación**

Se ha demostrado que al incorporar cierto porcentaje de polímero al asfalto con distintos tamaños de partícula los resultados de las pruebas viscoelásticas varían [28]. De igual manera, Maharaj y otros [29] demostraron que el tamaño de la partícula y el contenido de polímero tienen gran relevancia en la resistencia al agrietamiento por fatiga y la resistencia a la formación de surcos.

## B. Mezcla binaria o multicomponente basada en las propiedades elásticas o plásticas del polímero

En los asfaltos para climas cálidos que se pretenda mejorar la susceptibilidad a la deformación permanente, se rigidiza la mezcla asfáltica con un polímero con características plastoméricas; por otra parte, si se quiere mejorar las características elásticas y de flexibilidad a bajas temperaturas para minimizar la fragilidad y fisuras por rigidez, se incorporan polímeros con características elásticas. En resumen, el efecto en la modificación del asfalto depende fuertemente de la naturaleza del elastómero o plastómero utilizados.

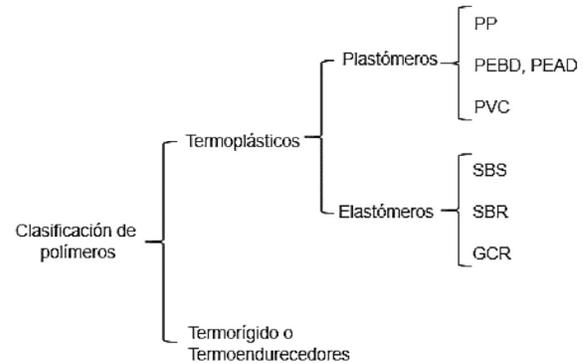
En algunas investigaciones recientes, la incorporación de varios polímeros a los asfaltos convencionales se usó para obtener mayor estabilidad a las deformaciones permanentes y la fisuración. Este artículo se enfoca en revisar la influencia de la modificación individual, binaria y multicomponente de polímeros en los materiales asfálticos. Para ello se dividió en tres ítems fundamentales. (1) Se realiza una breve descripción de los diferentes tipos de polímeros que se emplean para la modificación del asfalto. (2) Se describe rápidamente la composición química del asfalto y la influencia de cada uno de los componentes en las propiedades macroscópicas del ligante. Finalmente, (3) se muestran los objetivos principales que se pretenden con estas modificaciones, los resultados más relevantes que se han desarrollado en los últimos años, y se describen las conclusiones correspondientes a la revisión.

## CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS

Los polímeros son los materiales más usados en la modificación de asfaltos [30], se clasifican en dos grandes grupos: polímeros termoplásticos y polímeros termorrígidos o termoendurecedores [25], [31]. Los termoplásticos son utilizados para modificar los asfaltos debido a que conservan la gran mayoría de sus propiedades físicas y químicas al ser sometidos a procesos de reutilización a altas temperaturas, por lo tanto, existe la posibilidad de su reaprovechamiento. Por el contrario, los termorrígidos se degradan y pierden un porcentaje de sus propiedades físicas al someterse a altas temperaturas, lo que impide su reutilización [32]. Adicionalmente, los polímeros con posibilidad de ser reutilizados (termoplásticos) se pueden agrupar en dos categorías principales: elastómeros termoplásticos y plastómeros [13], [33]. 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 [20]. Del total de los asfaltos modificados, aproximadamente el 75 % se clasifican como elastoméricos, 15 % como plastoméricos y el 10 % restante como caucho u otros modificadores [15], [34], [35]. El resumen de la clasificación de polímeros se muestra en la figura 1.

Figura 1. Clasificación general de los polímeros en la modificación del asfalto



Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, acorde con la revisión de literatura y artículos relacionados, se identificó que las mezclas asfálticas binarias se clasifican como elastómero-elastómero, plastómero-plastómero, elastómero-plastómero, elastómero-otro y plastómero-otro, mientras que a las mezclas multicomponente se conocen por contener más de tres (3) polímeros en la mezcla asfáltica. En este documento de revisión se hace un breve resumen de la modificación de cada uno de los polímeros de manera individual, binaria y multicomponente.

## COMPOSICIÓN FÍSICO-QUÍMICA

El asfalto convencional está compuesto por asfaltenos y máltenos, los asfaltenos están constituidos por compuestos aromáticos (A) de color negro y marrón que contienen elementos químicos como el nitrógeno, azufre, carbono y oxígeno. Los máltenos están compuestos principalmente por saturados (S), aromáticos (A) y resinas (R) [36]. Estos componentes están en proporciones tales que le brindan a la mezcla asfáltica las características necesarias para emplearse eficientemente como ligante del agregado en la carpeta de rodadura para carreteras. Esta estructura físico-química se obtiene a partir de un análisis de cromatografía líquida en columna. A partir de este análisis, y empleando el procedimiento

conocido como fraccionamiento SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos) descrito por Reyes y otros [37], se obtienen los porcentajes de cada uno de los componentes presentes en el asfalto [38]. La figura 2 muestra esquemáticamente la estructura físico-química del asfalto convencional.

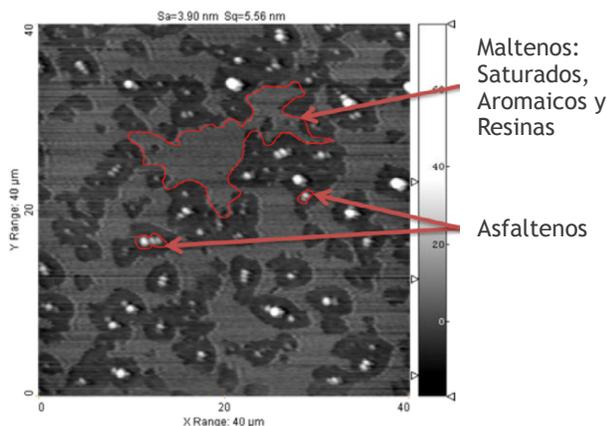
Figura 2. Estructura físico-química del asfalto, esquema coloidal de Pfeifer



Fuente: [7].

Los asfáltenos están inmersos en las resinas, y este compuesto constituido por dos fases se conoce como “estructura de abeja”, donde los puntos más brillantes son las asfáltenos (ver figura 3) [39]. Los aromáticos son susceptibles a la oxidación [40], mientras que los asfáltenos le proporcionan rigidez al asfalto, las resinas proporcionan características cementantes de adherencia y los aceites manejabilidad y protección al envejecimiento [7]. En general, la estructura abeja (asfáltenos y resinas) tiene un módulo más alto y una menor adhesión que la matriz lisa [41]. Estas propiedades y características que presentan los constituyentes del asfalto pueden ser afectadas por procesos de oxidación, es decir, por el envejecimiento [37]. Lo anterior muestra que la composición y la estructura coloidal del asfalto determina las propiedades físicas y reológicas del asfalto resultante.

Figura 3. Estructura físico-química del asfalto, estructura abeja, AFM

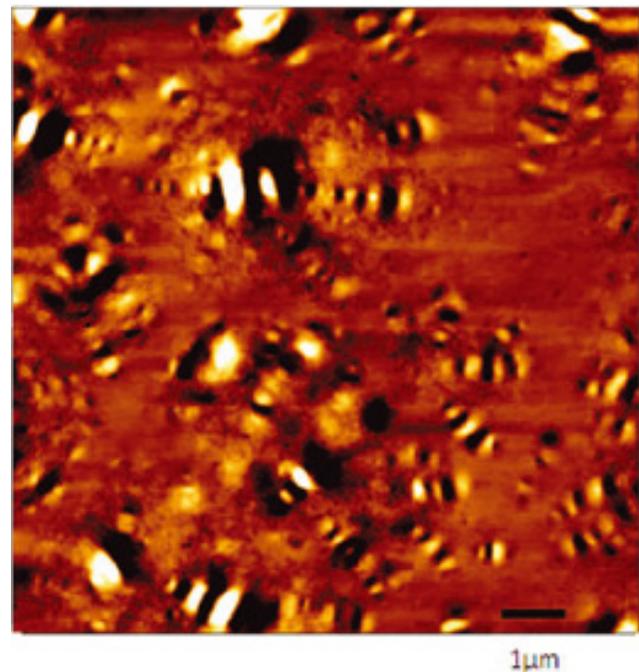


Fuente: [39].

Debido a sus ventajas el microscopio de fuerza atómica AFM (*atomic force microscopy*) se emplea en este campo de la ingeniería para identificar las fases de los asfaltos, a su vez para caracterizar a nivel nano- y microscópico las propiedades mecánicas y elásticas que tienen cada uno de los componentes del asfalto mediante el proceso de nanoindentación [42].

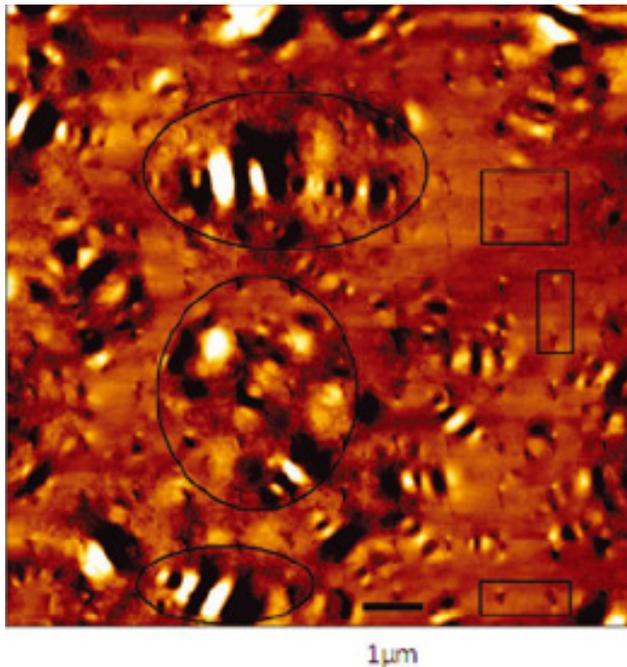
Dourado E. R. y otros [39] demostraron que al realizar indentaciones en los distintos componentes del asfalto se han dejado algunas marcas o microhuellas en la superficie, luego de retiradas las cargas, especialmente en la matriz (aceites) figura 4 y 5. De este comportamiento se puede inferir que la estructura de abeja (asfáltenos y resinas) tienen un comportamiento más elástico que la matriz. A pesar de los esfuerzos evidenciados en las investigaciones consultadas en medir las propiedades elásticas de cada componente del asfalto, no se ha logrado medir nano y microscópicamente el porcentaje de recuperación elástica para cada uno de los componentes del asfalto utilizado en Colombia, limitante que una vez superada permitirá actualizar el conocimiento sobre el envejecimiento de este material en función de su recuperación elástica para cada componente del asfalto.

Figura 4. Estructura físico-química, AFM (antes de indentación)



Fuente: [39].

Figura 5. Estructura físico-química, AFM (después de indentación)



Fuente: [39].

Lo anterior permite deducir que, al incorporar uno o varios polímeros al asfalto, su composición físico-química cambia y será reflejada a nivel macroscópico en sus propiedades viscoelásticas, mecánicas y reológicas. A partir de estos resultados, se pretende cumplir con objetivos a nivel macroscópico y microscópico mediante la aplicación de tecnologías en la modificación de asfaltos convencionales.

## OBJETIVOS AL MODIFICAR ASFALTOS CON POLÍMEROS

Las razones u objetivos principales que se buscan con la tecnología de la modificación de asfaltos convencionales se presentan en la tabla 1 [7].

Tabla 1. Objetivos principales de la modificación de asfaltos con polímeros

OBJETIVOS PRINCIPALES DE INVESTIGACIÓN	
1	Mejorar la resistencia a la fisuración y susceptibilidad térmica a bajas temperaturas.
2	Mejorar la resistencia a la deformación permanente bajo carga cíclica y monotónica.
3	Rigidez.
4	Mejorar la adherencia entre los agregados pétreos.

OBJETIVOS PRINCIPALES DE INVESTIGACIÓN	
5	Mejorar la cohesión, brindando mejor retención de los agregados en la vida inicial de los tratamientos superficiales.
6	Resistencia al envejecimiento.
7	Aumentar la resistencia a la fatiga de las mezclas.
8	Aumentar la resistencia al daño por humedad.

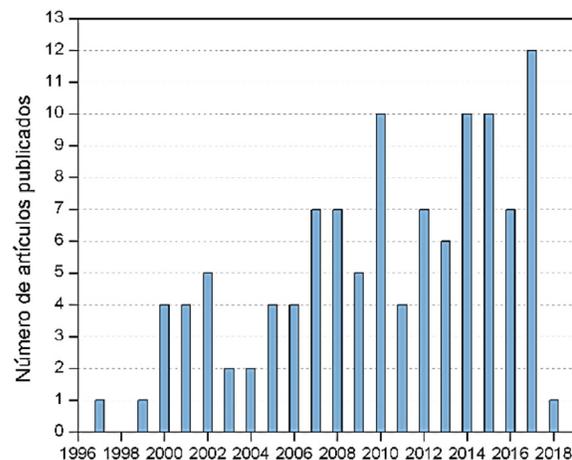
Fuente: [7] y [21].

## ESTUDIOS REALIZADOS ASFALTO-POLÍMERO

Los estudios e investigaciones en el marco de la modificación de asfalto convencional con polímero han tomado gran importancia en los últimos años; actualmente se invierten recursos por parte de los cuerpos académicos de educación superior que han logrado resultados importantes para el medio, aplicables al contexto urbano y rural de las vías. Es evidente el incremento de las publicaciones que permiten identificar las ventajas y desventajas de las diferentes proporcionalidades de materiales innovadores tipo polímero en procura de mejorar la resistencia de la carpeta asfáltica.

La figura 6 muestra el incremento de investigaciones en la línea de tiempo entre cantidad de artículos y año de publicación, el cual evidencia el reciente interés en mejorar las condiciones y propiedades de los asfaltos convencionales.

Figura 6. Publicaciones vs año con base en la muestra seleccionada



Fuente: elaboración propia.

## POLÍMEROS ELASTÓMEROS

### SBS

Estireno-butadieno-estireno, conocido como SBS, es un copolímero de los más destacados y comúnmente utilizados en la modificación de asfaltos en todo el mundo [34], [43], [49]. Realizando una separación de sus componentes y sus propiedades, se dice que el SBS está constituido por estireno y butadieno. El estireno de características duras y generalmente de fase dispersa le proporciona resistencia al SBS, mientras que el butadieno con características blandas contribuye con la elasticidad [50]. Adicionalmente, se ha reportado que los grupos de estireno tienen una temperatura de fusión alrededor de 90 °C y regiones de polibutadieno con temperatura de transición vítrea alrededor de -90 °C [14]. En general, este polímero tiene una temperatura de fusión superior a 300 °C [51], lo que implica que el polímero no se funde en ninguna de las temperaturas que se someten los ligantes asfálticos para carreteras, esto puede generar inconvenientes en la producción. Sin embargo, estas características le permiten ser usado en regiones de baja y alta temperatura.

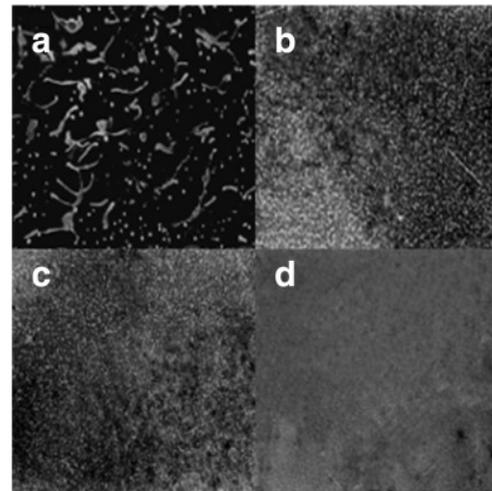
Adicionalmente, estas y otras particularidades lo convierten en un polímero con propiedades elásticas, necesarias para evitar grietas a baja temperatura con total éxito [52]. Lo anterior ha permitido que Sengoz B. y otros [25] clasifiquen a este copolímero como el más apropiado en la modificación del asfalto debido a que mejora el rendimiento a alta y baja temperatura [53]. A pesar de las excelentes propiedades de este modificador, se ha reportado que no satisface totalmente las propiedades necesarias de los ligantes modificados, para emplearse en mezclas asfálticas para carreteras. Por ejemplo, Sengoz B. y otros [25] reportaron que incorporar SBS en rangos de 3 a 5 % en masa causa un aumento considerable en el punto de ablandamiento, lo cual es favorable para disminuir la susceptibilidad a la deformación permanente a altas temperaturas [54], sin embargo, esta modificación a su vez disminuyó los valores de penetración, lo que induce el agrietamiento térmico a bajas temperaturas [55].

Por otra parte, Gordon A. [34] sugiere que las concentraciones adecuadas de este polímero en el asfalto generalmente oscilan entre 5 y 7 % en masa [34], sin embargo, Soenen, y otros [56] reportan que esta entre 3 y 9 % p/p de la mezcla. Cuando el SBS se mezcla con el asfalto, la fase elastómera del copolímero absorbe los máltenos (fracciones de aceite),

influyendo en dos aspectos principales (1) modifica la manejabilidad y el envejecimiento del asfalto [7] y (2) se hincha formando finalmente dos partes: la fase asfáltica y la fase SBS [57]. Lo que conduce a una fase polimérica continua que se forma a través del asfalto modificado con polímero cambiando significativamente las propiedades reológicas del asfalto base [45]. Por otra parte, Alam S. y Hossain Z. [47] encontraron que esta modificación influye en el aumento de asfaltenos, por lo tanto aumenta la rigidez y su viscosidad. Este polímero debido a sus características se emplea frecuentemente para aumentar los valores de viscosidad cinemática y dinámica de los aglutinantes del asfalto, lo que influye en la mejora del rendimiento a bajas temperaturas [48], [58].

La compatibilidad que existe entre este polímero y el asfalto ha sido estudiada por diversos autores [48], [59], [60]. Wen y otros [61] muestran mediante imágenes típicas la compatibilidad que existe entre el asfalto y el polímero, la cual varía de acuerdo con el tamaño de partícula y el contenido de azufre (figura 7).

Figura 7. Compatibilidad asfalto base-polímero SBS



Fuente: [61].

La figura 7a corresponde a 1 hora de mezcla y sin azufre, las demás con azufre y prolongándolas una hora, asimismo, reduciendo el tamaño de partícula, con concentraciones del 3,5 % en peso. Desde la reología que presenta esta mezcla asfáltica, la incorporación de azufre tiene gran influencia en aumentar la capacidad elástica del asfalto resultante [62]. Se ha demostrado también que la incorporación de azufre polimerizado al asfalto con SBS mejora la estabilidad de almacenamiento, esta modificación se ha desarrollado en un proyecto de pavimentación real [12],

[61]. El tamaño de partícula influye en la compatibilidad entre el asfalto y el polímero. Esta modificación muestra homogeneidad distribución y tamaño de las partículas de SBS, la figura 7a muestra un sistema con mayor incompatibilidad hasta la figura 7d con grados de mayor compatibilidad.

## SBR

Estireno-butadieno-caucho, conocido por sus siglas en inglés como SBR, es un elastómero termoestable, en el cual la relación estireno-butadieno y la distribución espacial son importantes para obtener la incorporación óptima en la modificación del asfalto base [63], [65]. Al modificar el asfalto con SBR, se logra mejorar la ductilidad, la fatiga, aumentar la viscosidad, la adhesión y la cohesión de los aglutinantes [18], [63], [66].

Debido a sus propiedades, el SBR ha sido ampliamente utilizado en la modificación de asfaltos en diferentes porcentajes [19], por ejemplo, Seyed A. y otros [67] modificaron el asfalto en 3, 4 y 5 % en peso. Realizando un análisis mecánico y dinámico a la mezcla, en temperaturas de 30 a 138 °C, se observó un aumento en el módulo complejo con el 5 %, lo que genera una mejor interacción en la carga de tráfico, al mismo tiempo, evidenciaron una disminución en el ángulo de fase, indicando la mejora de la capacidad elástica del aglutinante modificado. Finalmente, se demostró que modificando el asfalto en 5 % con SBR, mejora la resistencia del asfalto contra el agrietamiento por fatiga.

Por otra parte, Sargand S. M. y Kim S.-S. [68] encontraron que al incorporar SBR al asfalto mejora la capacidad resiliente a la fatiga y a la ruptura en comparación con el asfalto convencional. Khadivar y Kavussi [63] utilizaron asfalto 60/70 modificado con porcentajes de 3, 4 y 5 % de SBR a temperaturas medias del pavimento (30 a 78 °C). En este trabajo, se analizaron las propiedades reológicas, elásticas, la ductilidad y la consistencia. Como resultado se obtuvo que el asfalto aumento la ductilidad con concentraciones de 5 % en peso, traduciéndose en la mejora del agrietamiento a bajas temperaturas; asimismo, la modificación generó un aumento en la penetración, una reducción de la susceptibilidad térmica y se obtuvo un porcentaje de recuperación elástica del 54 %.

Según Yaacob y otros [55], al incorporar SBR en concentraciones de 1 a 5 % al asfalto, se genera una disminución en la penetración, es decir, aumenta la rigidez

del asfalto causando la mejora del agrietamiento por fatiga a altas temperaturas. Por otra parte, el punto de ablandamiento se incrementa con el SBR, disminuyendo la susceptibilidad térmica. Asimismo, la modificación aumenta la viscosidad del asfalto resultante, limitando la formación de baches a altas temperaturas en las carreteras. Los mismos resultados son reportados por Albayati [69].

De acuerdo con las investigaciones consultadas, el porcentaje de modificación del SBR usualmente oscila entre 1 y 5 %. Esta concentración en el asfalto permite aumentar la viscosidad y la rigidez a altas temperaturas, además, disminuir la susceptibilidad térmica en ciertos rangos de temperatura y el agrietamiento a bajas temperaturas [70]. Por otra parte, al incorporar SBR al asfalto, aumenta la ductilidad a baja temperatura, lo cual es importante ya que disminuye el craqueo. Otro factor importante en la incorporación de este polímero al asfalto es que genera separación de fase, y este aumento ocurre directamente con el aumento del polímero [71].

## GCR

El grano de caucho triturado reciclado es uno de los polímeros más antiguos que se han empleado en la modificación de asfaltos [6], [14]. Esto se debe a las problemáticas ambientales que causan las llantas de donde proviene este polímero [72], [73]. Sin embargo, la utilización de estos desechos en asfaltos se ha convertido en una alternativa atractiva para su reutilización [74]. Así mismo, el grano de caucho reciclado y triturado es uno de los más estudiados a nivel nacional, a tal punto que existe una normatividad, propuesta por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), de implementar estos residuos en las carreteras, y el tamaño sugerido del polímero es de 15 mm, debido a que demostró el incremento de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica para infraestructura vial [75].

En Colombia y en el mundo, la incorporación de este polímero se puede realizar por vía húmeda o por vía seca [76], la adición por vía seca disminuye el ruido en las carreteras [75], por vía húmeda se ha demostrado que este modificador de tipo elastómero es capaz de mejorar el rendimiento mecánico de las mezclas de asfalto [77], [78], especialmente a altas temperaturas [2]. En el proceso en seco las partículas de caucho representan del 0,5 a 3,0 p/p de la mezcla [14]. Mientras que el porcentaje de modificación por vía húmeda usualmente esta entre 15

y 20 % en peso [79], [82]. En general, se considera que el proceso en húmedo es la forma más eficiente de mejorar el rendimiento del asfalto [83]. En resumen, se ha demostrado que el grano de caucho reciclado y triturado es una alternativa para mitigar impactos ambientales, asimismo, produce asfaltos con mejores propiedades a alta y baja temperatura [84], sin embargo, el mayor problema de esta modificación es la separación de fase durante el almacenamiento [81].

Esta modificación puede ser una alternativa para el mejoramiento de la malla vial de Bogotá. Fontes L. y otros [76] demostraron que la incorporación de GCR mejora la resistencia a la deformación permanente en relación con la mezcla de asfalto convencional. También, se ha comprobado que la incorporación de caucho tiene un impacto positivo en el aumento de la temperatura de falla traduciéndose en la mejora de la deformación permanente y la formación de surcos [2], efecto importante ya que, a medida que los surcos son más profundos y el pavimento es impermeable, los surcos atrapan el agua y provocan deslizamiento de los vehículos, lo cual es peligroso para las personas [76], [85], [87].

## POLÍMEROS PLASTÓMEROS

### PEBD y PEAD

La influencia de los plastómeros sobre el asfalto convencional se evidencia en el aumento en el comportamiento plástico (rigidez) del asfalto volviéndolo más frágil, evitando la formación de surcos a altas temperaturas con ciertas limitaciones en el agrietamiento por fatiga. Uno de los termoplásticos más utilizados para la modificación de asfalto es el polietileno. Este polímero es uno de los más usados para reducir la formación de surcos, y el efecto es más evidente bajo cargas pesadas [88]. Cuando se incorporan solo partículas de polietileno al asfalto, esta modificación no mejora el rendimiento a bajas temperaturas, es decir, no influye en la disminución del craqueo térmico, por cambios de temperatura [89].

El polietileno pertenece a un grupo de polímeros conocidos como poliolefinas. Existen varios tipos de polietileno entre los más comunes están los de alta (PEAD) y baja densidad (PEBD). Los polietilenos de alta densidad se utilizan cuando la aplicación exige principalmente de una adecuada rigidez, resistencia y tolerancia al calor. En cambio, los polietilenos de

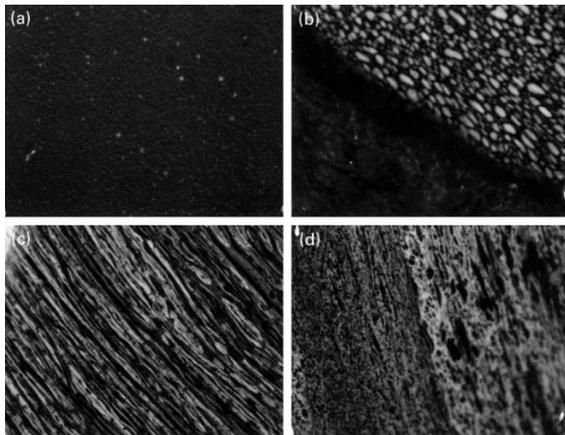
baja densidad se utilizan en aplicaciones que exige alta resistencia al impacto y ductilidad [90]. El polietileno posee una temperatura de fusión alrededor de 105 °C, este punto de fusión le permite mayor conveniencia para procesar y mezclar [51].

Diferentes investigaciones han utilizado tanto PEAD como PEBD para modificar asfalto [1], [74], [89], [91], sin embargo, el mayor inconveniente que han encontrado es su incompatibilidad con el asfalto debido principalmente a que las macromoléculas del polímero presentan gran peso molecular y por ende altas viscosidades, inhibiéndose de interactuar con los componentes del asfalto por la poca miscibilidad entre ambos [14], [92]. Esta situación hace que el asfalto cuando es mezclado con polietileno, en su estructura contenga fases de este en forma de glóbulos afectando las propiedades de la mezcla. Para lograr una mezcla homogénea entre ambos se han adicionado compatibilizantes que ayudan a enlazar las cadenas del polímero con los componentes de la mezcla [93], [94]. La necesidad de utilizar agentes compatibilizantes en las mezclas de asfalto con polímeros de polietileno hace que este proceso sea dispendioso, entre otros motivos por el aumento de los tiempos de mezcla, razón por la cual se utiliza polietilenos de tipo oligómero con pesos moleculares inferiores al polímero [14], [95].

La adición de cera de polietileno (CPE) se utiliza como mejorador de flujo (reductor de la viscosidad) a temperaturas elevadas. La CPE como mejorador de flujo aumenta la permeabilidad del asfalto con los agregados pétreos cuando van a ser utilizados en aplicaciones viales (arriba de 80 °C). El principal propósito de esta adición es el de reducir la temperatura de mezclado del asfalto con el objeto de reducir el consumo de energía y las emisiones. Sin embargo, la adición de cera puede ser perjudicial para el asfalto a temperaturas bajas, pues se aumenta la susceptibilidad al agrietamiento y pierde propiedades de adhesión [14], [93].

La figura 8 muestra la distribución del PEAD en la matriz de asfalto. Se observa que al incorporar mayor porcentaje de polímero, ocurre una variación creciente de las dos fases, iniciando desde una fase rica en asfalto hasta llegar a una fase rica en polímero cuando alcanza el 29 % de modificación (figura 8d). La fase oscura es rica en asfalto y la clara en polímero. Fawcett A. H. y otros [94] aducen que al incorporar mayor porcentaje de polímero al ligante, se mejora la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad.

Figura 8. Compatibilidad asfalto base-polímero PEAD



Fuente: [94].

## PP

El polipropileno es uno de los polímeros utilizados en la modificación del asfalto convencional [96], [97], ha sido usado desde el año 1965 en la industria del pavimento [98]. Este polímero está incluido en el grupo de los termoplásticos que se ablanda cuando la temperatura excede su punto de fusión [99].

Una de las investigaciones realizadas por Lastra y otros [99], usando 1 % en volumen de polipropileno en el concreto asfáltico, no muestra un cambio significativo en la resistencia a la deformación plástica ni en la resistencia a la fatiga, por el contrario, el módulo de rigidez aumenta con la incorporación del polipropileno, lo que le permite una mayor capacidad de carga y transmitir menos cargas a las capas subyacentes, asimismo, el ángulo de fase disminuyó incrementando el rendimiento elástico.

Por otra parte, Tapkin [100] modificó el asfalto con una penetración de 60/70 con 0,3, 0,5 y 1 % de fibras de polipropileno en peso, donde obtuvieron mayor resistencia a la fatiga con 1 % de PP, generando mayor rendimiento del asfalto modificado. En los estudios realizados, los porcentajes de modificación varían significativamente; por ejemplo, Sadeque y Patil [101] modifican el asfalto en 2, 4, 6, 8 y 10 %, donde a mayor porcentaje de modificación la penetración disminuye alcanzando un 50 % de disminución. Asimismo, la ductilidad disminuyó considerablemente, lo anterior ayuda a que el asfalto sea más rígido mejorando el agrietamiento por fatiga.

## PVC

El PVC es uno de los polímeros no biodegradables más problemáticos en cuanto a reciclaje por sus características. Tiene una vida útil de más de 30 años [102]. Con base en esto, diversos investigadores han decidido estudiarlo y utilizarlo en la tecnología de la modificación de asfaltos. A nivel nacional, Rondón y Guzmán [103] sugieren que el porcentaje óptimo de PVC en la modificación de asfalto se encuentra entre 0,5 y 1,0 %. Un año más adelante, Rondón y Reyes [23] demostraron que el mejor comportamiento de las mezclas modificadas con PVC es incorporando un 0,7 %. Estas dos investigaciones decidieron estudiar el desecho de PVC como modificador del ligante por vía húmeda. Rondón y Reyes [23] observaron que los mayores valores de estabilidad se obtienen cuando se adiciona 1,0 % de PVC al contenido óptimo de asfalto, a su vez, los mayores valores de resistencia mecánica bajo carga monotónica se obtuvieron al añadir 0,5 % de PVC.

Por otra parte, Behl A. y otros [102] evaluaron el rendimiento de PVC obtenido a partir de desechos de tuberías y lo incorporaron en dos porcentajes 3 y 5 % en peso, el PVC utilizado en esta investigación fue triturado (2-4 mm). Los resultados mostraron que la adición de PVC residual aumenta la rigidez del aglutinante y por lo tanto aumenta la viscosidad, además, de acuerdo con los resultados del módulo complejo y el ángulo de fase, se obtuvo, al añadir un 5 % de residuo de PVC, una excelente resistencia a la deformación permanente y una respuesta elástica más alta en comparación con el asfalto convencional; en resumen, los asfaltos modificados con PVC tienen alta consistencia y elasticidad. Lo anterior permite inferir que el PVC como modificador de asfaltos es un material que permite mejorar las características de rigidez y resistencia a las deformaciones permanentes en mezclas que sean utilizadas en climas cálidos, además, ofrece menos ahuellamiento a altas temperaturas de servicio en comparación con los convencionales [104], con modificaciones de 0,5 a 5 %.

Rondón y Guzmán [103] buscaron adicionar desecho de PVC, con el fin de evaluar la resistencia en tracción indirecta. A partir de la caracterización se obtuvo que la resistencia mecánica bajo carga monotónica de mezclas asfálticas tipo MDC-2 modificadas con desecho de PVC es mayor en comparación con las convencionales (sin ningún aditivo). En conclusión, el aumento en la consistencia y la viscosidad del

asfalto modificado influyó en el incremento notable en la resistencia mecánica en tracción indirecta en comparación con las mezclas convencionales.

El porcentaje óptimo de adición de PVC se encuentra entre 0,5 y 1,0 % con respecto a la masa total de la masa ensayada. En general, las mezclas asfálticas modificadas con desecho de PVC tienden a poseer un comportamiento rígido. A bajas temperaturas de servicio, estas mezclas pueden tener un comportamiento frágil, llevando a pensar que tendrían un mejor desempeño en climas cálidos. Lo anterior permite prever que el desecho de PVC como modificador de asfaltos puede ser un material que permita mejorar las características de rigidez y resistencia a las deformaciones permanentes de mezclas que sean utilizadas en climas cálidos. Los valores de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad del asfalto modificado permiten predecir menor ahuellamiento a altas temperaturas de servicio en comparación con los ligantes base.

Los desechos de tuberías de PVC se pueden usar con éxito en aplicaciones de pavimentación [102]. La adición de residuos de tubería de PVC al betún mejora tanto las propiedades del aglutinante como las de la mezcla [102]. Se lograron valores mejorados de ángulo de fase, modulo complejo después de adición de los residuos de PVC. Muestra una mejor resistencia a la deformación permeeen comparación con la mezcla preparada con aglutinante puro [102].

## MODIFICACIÓN BINARIA

### Elastómero-elastómero

Se han propuesto mezclas asfálticas con un polímero principal y uno como aditivo. El polímero principal es el de mayor porcentaje de incorporación al asfalto. Gonzáles V. y otros [84] mostraron que al incorporar grano de caucho reciclado y triturado mejoran los valores de módulo de almacenamiento, sin embargo, al emplear polímeros como el SBS como aditivo estos resultados aumentan en gran medida. Es decir, mejoran las características mecánicas de los ligantes modificados con GCR. Lo anterior permite inferir que la mezcla binaria elastómero-elastómero para las propiedades evaluadas es un éxito.

### Elastómero-plastómero

Por otra parte, Dongdong G. y otros [105] incorporaron al asfalto base caucho de neumático de desechos

y polietileno reciclado, estos dos polímeros poseen características distintas en cuanto a su comportamiento elástico. Ellos demostraron en su trabajo que, al incorporar los dos modificadores al asfalto, se genera una disminución en la penetración y en el punto de ablandamiento, lo que significa que se mejora la resistencia a la deformación y la estabilidad a altas temperaturas de manera simultánea. Asimismo, esta modificación permitió un aumento en el módulo complejo (G) y una disminución en el ángulo de fase después de la modificación, lo que demuestra la mejora de la deformación permanente a alta temperatura y la mejora de la flexibilidad del asfalto resultante a bajas temperaturas. Sin embargo, en el trabajo no se menciona en detalle el nombre del modificador que permite la adhesión y homogeneidad entre los dos polímeros y el asfalto base.

### Plástomero-plastomero

La adición de PEBD y EVA indujo una reducción considerable en la formación de surcos, demostrando que la combinación de estos modificadores disminuyen las deformaciones permanentes a temperaturas moderadas (30 °C) y (60 °C) [20]. Brovelli C. y otros [20], en esta misma investigación, demostraron que a medida que aumenta los aditivos disminuye la profundidad de surcos y la pendiente del ciclo de rodadura. Esta modificación a su vez aumentó el módulo de rigidez del asfalto debido a la naturaleza plastomérica de los dos polímeros. Sin embargo, a temperaturas bajas se puede presentar fisuración térmica debido al exceso de módulo de rigidez. Por otra parte, la modificación binaria de PEBD y EVA no tuvo influencia positiva en la mejora de la deformación permanente y la fatiga, posiblemente por la ausencia de un componente elástico que permitiera mejorar la ductilidad del asfalto modificado a bajas y altas temperaturas.

### Plastómero-otro

Changqing y otros [106] evidenciaron que la modificación combinada de dos materiales resulta efectiva para la mejora integral de las propiedades de los asfaltos resultantes en un rango de temperatura más amplio. Los residuos de envases de polietileno montmorillonita organófila fueron combinados en proporciones tales que mejoraran el rendimiento del asfalto.

Los resultados mostraron un aumento en el punto de ablandamiento, en la ductilidad del asfalto y en la consistencia del asfalto, demostrando que la modificación presenta asfaltos con una excelente

resistencia a la deformación, estabilidad a altas temperaturas y rendimiento anticraqueo a baja temperatura. Asimismo, se observó una distribución homogénea de los componentes y el asfalto.

Aunque la literatura sobre el uso de polímeros reciclados individuales como modificadores del asfalto es muy extensa, muy pocos estudios tratan sobre el uso combinado de dos modificadores diferentes [107].

## MODIFICACIÓN MULTICOMPONENTE

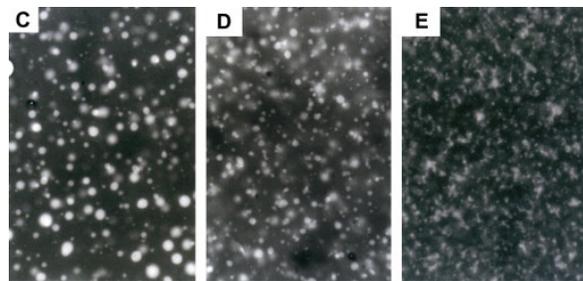
Algunos investigadores han desarrollado trabajos encaminados a producir mezclas asfálticas multicomponente (> 2 polímeros) [14]. La escasez de modificaciones de asfaltos con más de dos polímeros posiblemente se debe a la incertidumbre que genera el número de modificadores y su complejidad para interpretar las variaciones en las propiedades de los asfaltos resultantes, a su vez la posible incompatibilidad que se puede generar en este tipo de mezclas, o la variación de los resultados desde aceptables a desastrosos. Sin embargo, algunos estudios han demostrado que la combinación de más de dos polímeros (mezclas multicomponente) permiten determinar el contenido óptimo de polímeros de acuerdo con la flexibilidad y compatibilidad del polímero y el asfalto [14].

Tang P. y otros [51] incorporaron SBS, EVA, PE y resina de petróleo con el fin de mejorar las propiedades del asfalto convencional. Mediante el análisis de DSC, evidenciaron picos de fusión para el polímero EVA, PE y resina de petróleo, excepto para el SBS. A su vez, evidenciaron mediante TGA que ninguno de los polímeros utilizados en esta modificación pierde masa importante a temperaturas inferiores a 200 °C, afirmando su estabilidad hasta esta temperatura. Por otra parte, se observó que la incorporación de SBS al asfalto convencional muestra los mejores efectos en la mejora de la ductilidad, que es importante ya que esta influencia permite que el asfalto sea más dúctil a bajas temperaturas, de esta manera se disminuirá la fisuración. La combinación de SBS, EVA, PE y resina de petróleo mostraron valores intermedios de penetración, mínimos de punto de ablandamiento, pero una ductilidad relativamente baja, posiblemente incrementado el porcentaje de modificación de SBS todos los parámetros cumplirían los requerimientos mínimos. Es decir, esta mezcla multicomponente puede generar el equilibrio de las propiedades del asfalto para reducir los problemas del asfalto convencional sin afectar otros.

Por otra parte, al incorporar SBS al asfalto, ocurre una mejora significativa en la ductilidad a baja temperatura. Sin embargo, para mejorar la tenacidad, la estabilidad de almacenamiento y la adhesión del ligante con la piedra seleccionada simultáneamente, se elaboran asfaltos modificados con dos componentes más, la PPA y azufre [71]. Esta mezcla multicomponente mejoró las propiedades antes mencionadas y la compatibilidad simultáneamente figura 8.

La figura 8c muestra una estructura compuesta por dos fases, asfalto puro y SBS. Se observan partículas gruesas dispersas en la matriz de asfalto, lo que evidencia la compleja incompatibilidad que existe entre estos dos compuestos. Zhang F. y Jianying Y. [71] clasifican esta compatibilidad como deficiente. Por otra parte, al incorporar PPA/SBS (figura 8d) y PPA/SBS/azufre (figura 8e) se observa una mejor dispersión en la matriz del asfalto, es decir, la incorporación de estos componentes induce una mejora significativa en la compatibilidad. Los autores de este trabajo sugieren que la distribución óptima de estos componentes puede mejorar de manera sustancial las propiedades.

Figura 9. Características deseadas en una mezcla asfáltica



Fuente: [71].

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Cada una de las modificaciones que se han mostrado en este trabajo tienen como objetivo final la mejora integral y simultánea de las características de la mezcla asfáltica ideal que se muestran en la tabla 2. Además de cumplir esos requisitos, debe cumplir requerimientos mínimos de estabilidad de almacenamiento, viscosidad a altas temperaturas compatibles con otros procesos, emplearse con equipos tradicionales de construcción de carreteras, y todo a un costo razonable [15].

**Tabla 2.** Características de la mezcla asfáltica ideal

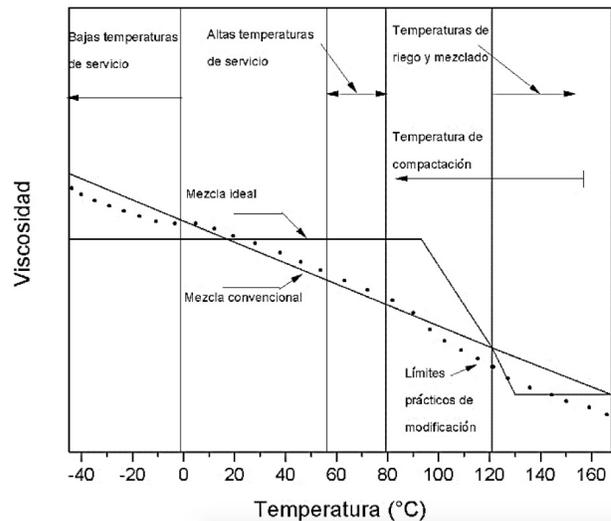
CARACTERÍSTICAS	
1	Baja rigidez o viscosidad a altas temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra.
2	Alta rigidez a temperaturas altas de servicio para reducir el ahuellamiento.
3	Baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio para reducir el riesgo de la aparición de fisuras por cambios de temperatura.
4	Buenas características adherentes en presencia de humedad, con el propósito de reducir el desgaste por abrasión.

Fuente: [71].

La figura 10 muestra de manera esquemática las características y propiedades que debe presentar la mezcla asfáltica ideal.

Teniendo clara la figura 10 y con base en los resultados mostrados durante el desarrollo del documento, se dice que las modificaciones que se realizan al asfalto con polímeros de tipo plastómero tienen como efecto rigidizar el asfalto [23], [102], [103], [109], [110], lo que daría cumplimiento a la segunda pauta de la mezcla ideal, es decir, alta rigidez a temperaturas altas de servicio para reducir el ahuellamiento. Lo que permite sugerir que los polímeros de tipo plastómero pueden ser incorporados en zonas con temperaturas medias anuales superiores a 24 °C, con ciertas restricciones a baja temperatura. Por otra parte, los modificadores de tipo elastómero presentan un comportamiento inverso a las mezclas modificadas con polímeros de tipo plastómeros, con base en las investigaciones mostradas en este documento. Es decir, al incorporar polímeros elastoméricos de manera individual al asfalto, este permite tener la baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio, con lo que se reduce el riesgo de la aparición de fisuras por cambios de temperatura y se cumple la tercera característica establecida para mezclas asfálticas ideales. Lo anterior demuestra que los polímeros, que se incorporan de manera individual al asfalto tienen grandes limitaciones de temperaturas en el cumplimiento de las características ideales de las mezclas asfálticas, estas limitantes de temperatura son mayores para la modificación de ciertos polímeros.

**Figura 10.** Características deseadas en una mezcla asfáltica [71]



Fuente: [71].

Las modificaciones de asfaltos convencionales a partir de polímeros reciclados o vírgenes influye de manera determinante en las características del asfalto resultante. Sin embargo, existe una limitante en los rangos de temperatura en los cuales las mezclas asfálticas se comportan satisfactoriamente. Esto crea una limitación para desarrollar carreteras en zonas tropicales, como es el caso de Colombia, donde existen deltas de temperatura altos, los cuales influyen en las características del asfalto, generando en última instancia disminución en la durabilidad de las carreras por diversos problemas. A partir de esto, se investigan mezclas binarias o multicomponentes que puedan mejorar la mayoría de las propiedades que requieren los asfaltos para carreteras en donde se presentan diversos climas. Sin embargo, estas combinaciones de polímeros en distintos porcentajes buscando una mejora integral y simultánea en las propiedades de los ligantes son un asunto por resolver en la ingeniería actual.

Este asunto por resolver desde la selección de polímeros con características tales que prevean una solución al problema antes mencionado, ya que, las propiedades son completamente opuestas y, por lo tanto, es difícil obtener un asfalto que funcione en todos los climas posibles [111]. Por otra parte, la incompatibilidad de los polímeros es el mayor

obstáculo en la modificación de asfaltos, debido a que puede ocurrir separación de fases gruesas en condiciones de reposo a temperaturas elevadas, entre los polímeros y el asfalto base [112]. Las diferencias en cuanto a reología de los polímeros y los asfaltos convencionales son asuntos que juegan un papel importante en la modificación de los asfaltos, ya que, como tienen capacidad de modificar elástica y plásticamente variando las propiedades viscoelásticas en rangos de temperatura, también pueden generar inconvenientes de incompatibilidad.

Por otra parte, el alto costo y la mejora del rendimiento de asfalto han limitado la producción y la aplicación de asfalto modificado con polímeros [18], [13]. Anteriormente, las mezclas convencionales cumplían con estas características propuestas por Arenas H. [71], sin embargo, con el aumento de cargas, los elevados niveles de tránsito y los diversos climas han producido que este cumplimiento fracase, incentivando el desarrollo de la tecnología de los asfaltos modificados.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta revisión presenta el estado actual del conocimiento sobre el tipo y las propiedades de los polímeros y las estrategias para mejorar el rendimiento de los asfaltos. Los artículos fueron revisados y clasificados en subcategorías dependiendo de los tipos de polímeros utilizados. El documento se fundamenta en el efecto de las mezclas individuales, binarias y multicomponente por separado y de las propiedades físicas y mecánicas. Las conclusiones principales son las siguientes:

La gran mayoría de modificaciones individuales generan mejoras específicas en los asfaltos modificados, con limitaciones importantes en la temperatura. Las influencias específicas que tiene cada uno de los polímeros sobre el asfalto dependen principalmente de la naturaleza del polímero utilizado, es decir, de sus propiedades y características. De acuerdo con lo anterior, la posibilidad de realizar una mejora en los ligantes asfálticos convencionales a partir de polímeros está fuertemente ligada con la temperatura. Por otra parte, para realizar una mejora integral y simultánea en las propiedades del asfalto se deben emplear dos o más polímeros con características tales que permitan este fin, de esta manera se podrán emplear estos asfaltos resultantes en climas tropicales con deltas de temperatura amplios, como los que se presentan en Colombia.

En la modificación de asfaltos con mezclas de polímeros binarias y multicomponente, los polímeros elastoplásticos mejoran la capacidad resiliente del material, debido a su capacidad elástica, de igual manera ocurre con la mejora plástica que generan los polímeros de tipo plastoméricos. Además, la revisión muestra que el tamaño y la forma de incorporación afecta directamente a las propiedades de las mezclas de asfalto.

Se recomienda que en trabajos futuros se profundice en realizar una caracterización térmica, física, mecánica, reológica y estructural a nivel nano y micro de los asfaltos convencionales empleados en Colombia y los polímeros reciclados que mayor factibilidad de acuerdo con la revisión bibliográfica en la modificación de polímeros. A su vez elaborar metodologías experimentales para comparar e interpretar los resultados en los asfaltos colombianos, en mezclas binarias y multicomponentes. Lo anterior con el objetivo de conocer el comportamiento y las interacciones existentes a niveles nano y micrométricos, que son los causantes de las propiedades de los asfaltos a niveles macroscópicos. Además, realizar caracterizaciones nanométricas que permitan conocer la influencia de las modificaciones binarias y multicomponente, para actualizar el conocimiento existente sobre los procesos que afectan y mejoran las propiedades de los asfaltos modificados. Lo anterior con el objetivo de reutilizar algunos desechos que causan problemas de disponibilidad. Además de esto, continuar en busca de mezclas asfálticas integrales a partir de modificaciones con polímeros reciclados, ya que algunos de ellos poseen baja densidad, alta resistencia, larga duración, facilidad de fabricación entre otros, lo que permite tener posibilidades de éxito en la modificación de asfaltos. Con la intención de implementar polímeros reciclados en los pavimentos se reducirían los desechos que se depositan a los vertederos.

## REFERENCIAS

- [1] G. Polacco, S. Berlincioni, D. Biondi, J. Stastna y L. Zanzotto, "Asphalt modification with different polyethylene-based polymers", *European Polymer Journal*, vol. 41, n.º 12, pp. 2831-2844, 2005.
- [2] D. Fuqiang, Y. Xin, L. Shengjie y W. Jianming, "Rheological behaviors and microstructure of SBS/CR composite modified hard asphalt",

- Construction and Building Materials*, vol. 115, pp. 285-293, 2016.
- [3] F. J. Navarro, P. Partal, F. J. Martínez Boza y C. Gallegos, “Novel recycled polyethylene/ground tire rubber/bitumen blends for use in roofing applications: Thermo-mechanical properties”, *Polymer Testing*, vol. 29, n.º 5, pp. 588-595, 2010.
- [4] S. Alonso, L. Medina Torres, R. Zitzumbo y F. Avalos, “Rheology of asphalt and styrene-butadiene blends”, *Journal of Materials Science*, vol. 45, n.º 10, pp. 2591-2597, 2010.
- [5] S. Caro Spinel y A. E. Alvarez Lugo, “Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas empleando propiedades termodinámicas”, *Revista Facultad de Ingeniería*, n.º 58, pp. 95-104, 2011.
- [6] J. C. Múnera y E. A. Ossa, “Estudio de mezclas binarias Asfalto - Polímero”, *Facultad de Ingeniería*, n.º 70, pp. 18-33, 2014.
- [7] H. A. Rondón Quintana y F. A. Reyez Lizcano, *Pavimentos materiales, construcción y diseño*, Bogotá: Ecow Ediciones Ltda, 2015.
- [8] H. A. Rondón Quintana y F. A. Reyes Lizcano, “Influencia de las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá sobre el comportamiento mecánicos de una mezcla asfáltica”, *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 24, n.º 2, pp. 195-207, 2009.
- [9] D. Aboelkasim y Y. Zhanping, “Small and large strain rheological characterizations of polymer- and crumb rubber-modified asphalt binders”, *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 168-177, 2017.
- [10] H. Wang y I. Al Qadi, “Evaluation of surface-related pavement damage due to tire braking”, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 11, n.º 1, pp. 101-122, 2010.
- [11] J. Baek, H. Ozer, H. Wang y I. Al Qadi, “Effects of interface conditions on reflective cracking development in hot-mix asphalt overlays”, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 11, n.º 2, pp. 307-334, 2010.
- [12] M. Liang, X. Xin, W. Fan, H. Wang, S. Ren y J. Shi, “Effects of polymerized sulfur on rheological properties, morphology and stability of SBS modified asphalt”, *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 860-871, 2017.
- [13] D. Alves Gama, J. M. Rosa Júnior, T. J. Alves de Melo y J. K. GuedesRodrigues, “Rheological studies of asphalt modified with elastomeric polymer”, *Construction and Building Materials*, vol. 106, pp. 290-295, 2016.
- [14] J. Munera y E. Ossa, “Polymer modified bitumen: Optimization and selection”, *Materials & Design*, pp. 91-97, 2014.
- [15] G. Polacco, S. Filippi, F. Merusi y G. Stastna, “A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility”, *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 224, pp. 72-112, 2015.
- [16] R. Raqiqatur, W. Shifeng, Z. Yong, L. Yue y Z. Guangtai, “Improving the aging resistance of SBS modified asphalt with the addition of highly reclaimed rubber”, *Construction and Building Materials*, vol. 145, pp. 126-134, 2017.
- [17] Z. Niloofar Kalantar, M. Rehan Karim y A. Mahrez, “A review of using waste and virgin polymer in pavement”, *Construction and Building Materials*, vol. 33, pp. 55-62, 2012.
- [18] Y. Yildirim, “Polymer modified asphalt binders”, *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 66-72, 2007.
- [19] L. Xiaohu y I. Ulf, “Modification of road bitumens with thermoplastic polymers”, *Polymer Testing*, vol. 20, n.º 1, pp. 77-86, 2000.
- [20] C. Brovelli, M. Crispino, J. Pais y P. Pereira, “Using polymers to improve the rutting resistance of asphalt concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 77, pp. 117-123, 2015.
- [21] A. Montejo, *Ingeniería de pavimentos para carreteras*, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, Ediciones y publicaciones, 2002.

- [22] O. J. Reyes Ortiz y J. F. Camacho Tauta, “Efecto de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas”, *Ingeniería e investigación*, vol. 28, n.º 3, pp. 22-27, 2008.
- [23] H. A. Rondón Quintana y F. A. Reyes Lizcano, “Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de PVC”, *Tecno Lógicas*, n.º 27, pp. 11-31, 2011.
- [24] Y. Becker, M. P. Méndez y Y. Rodríguez, “Polymer modified asphalt”, *Vision tecnológica*, vol. 9, n.º 1, pp. 39-50, 2001.
- [25] B. Sengoz, A. Topal y G. kyakar, “Morphology and image analysis of polymer modified bitumens”, *Construction and Building Materials*, vol. 23, n.º 5, pp. 1986-1992, 2009.
- [26] H. A. Rondón Quintana, E. Rodríguez Rincón y L. Á. Moreno Anselmi, “Resistencia mecánica evaluada en el ensayo marshall de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con desechos de policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (PEAD) y poliestireno (PS)”, *Revista Ingenierías*, vol. 6, n.º 11, pp. 91-104, 2007.
- [27] L. Socal da Silva, M. M. Camargo Forte, L. Alencastro Vignol y N. S. Medeiros Cardozo, “Study of rheological properties of pure and polymer-modified Brazilian asphalt binders”, *Journal of Materials Science*, vol. 39, n.º 2, p. 539-546, 2004.
- [28] F. Navarro, P. Partal, F. Martínez Boza, C. Valencia y C. Gallegos, “Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 89, n.º 1-3, pp. 53-61, 2002.
- [29] C. Maharaj, R. Maharaj y J. Maynard, “The effect of polyethylene terephthalate particle size and concentration on the properties of asphalt and bitumen as an additive”, *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, vol. 31, n.º 1, pp. 1-23, 2015.
- [30] H. A. Rondón Quintana, F. A. Reyes Lizcano, A. S. Figueroa Infante, E. Rodríguez Rincón, C. M. Real Triana y T. A. Montealegre Elizalde, “Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia”, *Infraestructura Vial*, n.º 19, pp. 10-20, 2008.
- [31] A. Gordon D, “Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens”, *Construction and Building Materials*, vol. 16, n.º 8, pp. 473-487, 2002.
- [32] W. A. Castro López, H. A. Rondón Quintana y J. C. Barrero Calixto, “Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD”, *Revista Ingeniería*, vol. 21, n.º 1, pp. 7-18, 2015.
- [33] Z. You, J. Mills Beale, J. M. Foley, S. Roy, G. M. Odegard, Q. Dai y S. W. Goh, “Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization”, *Construction and Building Materials*, vol. 25, n.º 2, pp. 1072-1078, 2011.
- [34] A. Gordon D., “Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens”, *Fuel*, vol. 82, n.º 14, pp. 1709-1719, 2003.
- [35] C. Diehl, “Ethylene-styrene interpolymers for bitumen modification”, *Proc Second Euroasphalt Eurobitume Congress*, vol. 2, pp. 93-102, 2000.
- [36] C. M. Díaz Claros y L. C. Castro Celis, “Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá”, Monografía de grado, Universidad Santo Tomás, 2017.
- [37] F. A. Reyes Lizcano, C. E. Daza y H. A. Rondón Quintana, “Determinación de las fracciones SARA de asfaltos colombianos envejecidos al medio ambiente empleando cromatografía líquida en columna”, *REVISTA EIA*, n.º 17, pp. 47-56, 2012.
- [38] J. P. Aguiar Moya, J. Salazar Delgado, V. Bonilla Mora, E. Rodríguez Castro, F. Leiva Villacorta y L. Loría Salazar, “Morphological analysis of bitumen phases using atomic force microscopy”, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 16, pp. 138-152, 2015.
- [39] E. R. Dourado, R. A. Simão y L. Leite, “Mechanical properties of asphalt binders evaluated by atomic force microscopy”, *Journal of Microscopy*, vol. 245, n.º 2, pp. 119-128, 2012.

- [40] X. Vargas, N. Afanasjeva, M. Álvares, P. Marchal y L. Choplin, “Evolución del comportamiento viscoelástico del asfalto inducida bajo termo-oxidación *in situ* en un reo-reactor”, *Dyna*, vol. 75, n.º 155, pp. 191-198, 2008.
- [41] M. Wang y L. Liu, “Investigation of micro-scale aging behavior of asphalt binders using atomic force microscopy”, *Construction and Building Materials*, vol. 135, pp. 411-419, 2017.
- [42] L. Rebelo, J. Sousa, A. Abreu, M. Baroni, A. Alencar, S. Soares, J. Mendes Filho y J. Soares, “Aging of asphaltic binders investigated with atomic force microscopy”, *Fuel*, vol. 117, pp. 15-25, 2014.
- [43] L. Peng, H. Weidong, L. Yi, N. Tang y X. Feipeng, “Investigation of influence factors on low temperature properties of SBS modified asphalt”, *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 609-622, 2017.
- [44] D. Fuqiang, Z. Wenzhe, Z. Yuzhen, W. Jianming, F. Weiyu, Y. Yanjie y W. Zhe, “Influence of SBS and asphalt on SBS dispersion and the performance of modified asphalt”, *Construction and Building Materials*, vol. 62, pp. 1-7, 2014.
- [45] D. O. Larsen, J. L. Alessandrini, A. Bosch y M. S. Cortizo, “Micro-structural and rheological characteristics of SBS-asphalt blends during their manufacturing”, *Construction and Building Materials*, vol. 23, n.º 8, pp. 2769-2774, 2009.
- [46] L. Á. Moreno Anselmi y D. A. Calvo López, “Estudio mecánico del asfalto modificado con polímeros y cueros que son utilizados en la elaboración del calzado”, *L'esprit Ingénieux*, n.º 5, pp. 14-22, 2014.
- [47] S. Alam y Z. Hossain, “Changes in fractional compositions of PPA and SBS modified asphalt binders”, *Construction and Building Materials*, vol. 152, pp. 386-393, 2017.
- [48] M. Liang, P. Liang, W. Fan, C. Qian, X. Xin, J. Shi y G. Nan, “Thermo-rheological behavior and compatibility of modified asphalt with various styrene-butadiene structures in SBS copolymers”, *Materials and Design*, vol. 88, p. 177-185, 2015.
- [49] G. Hernández, E. Medina, R. Sánchez y A. Mendoza, “Thermomechanical and rheological asphalt modification using styrene-butadiene triblock copolymers with different microstructure”, *Energy & Fuels*, vol. 20, pp. 2623-2626, 2006.
- [50] C. Ouyang, S. Wang, Y. Zhang y Y. Zhang, “Preparation and properties of styrene-butadiene-styrene copolymer/kaolinite clay compound and asphalt modified with the compound”, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 87, n.º 2, pp. 309-317, 2005.
- [51] P. Tang, L. Mo, C. Pan, H. Fang, B. Javilla y M. Riara, “Investigation of rheological properties of light colored synthetic asphalt binders containing different polymer modifiers”, *Construction and Building Materials*, vol. 161, pp. 175-185, 2018.
- [52] H. Jutao, C. Pengyun, L. Zenghong, W. Zhengxing y X. Shifa, “Developing of a SBS polymer modified bitumen to avoid low temperature cracks in the asphalt facing of a reservoir in a harsh climate region”, *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 105-113, 2017.
- [53] Y. Yang, Y. Liu, J. Zhu y M. Gao, “Study and performance test of high module pavement asphalt”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 455, pp. 1-4, 2008.
- [54] R. Zhang, H. Wang, J. Gao, Z. You y X. Yang, “High temperature performance of SBS modified bio-asphalt”, *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 99-105, 2017.
- [55] H. Yaacob, M. Ali Mughal, R. Putra Jaya, M. Rosli Hainin, D. Sri Jayanti y C. N. Che Wan, “Rheological properties of styrene butadiene rubber modified bitumen binder”, *Jurnal Teknologi*, vol. 78, n.º 7-2, pp. 121-126, 2016.
- [56] H. Soenen, J. De Visscher, A. Vanelstraete y P. Redelius, “Influence of thermal history on rheological properties of various bitumen”, *Rheologica Acta*, vol. 45, n.º 5, p. 729-739, 2006.
- [57] H. Gengren, H. Weidong, Y. Jie, T. Naipeng y X. Feipeng, “Effect of aging on chemical and rheological properties of SBS modified asphalt with different compositions”, *Construction and Building Materials*, vol. 156, pp. 902-910, 2017.

- [58] L. Xiaohu y I. Ulf, "Influence of styrene-butadiene-styrene polymer modification on bitumen viscosity", *Fuel*, vol. 76, n.º 14-15, pp. 1353-1359, 1997.
- [59] H. Fu, L. Xie, D. Daying, L. Li, M. Yu y S. Yao, "Storage stability and compatibility of asphalt binder modified by SBS graft copolymer", *Construction and Building Materials*, vol. 21, n.º 7, pp. 1528-1533, 2007.
- [60] M. Liang, X. Xin, F. Weiyu, H. Luo, X. Wang y B. Xing, "Investigation of the rheological properties and storage stability of CR/SBS modified asphalt", *Construction and Building Materials*, vol. 74, pp. 235-240, 2015.
- [61] G. Wen, Y. Zhang, Y. Zhang, K. Sun y Y. Fan, "Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts", *Polymer Testing*, vol. 21, n.º 3, pp. 295-302, 2002.
- [62] J. Chen y C. Huang, "Fundamental characterization of SBS-modified asphalt mixed with sulfur", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 103, n.º 5, pp. 2817-2825, 2006.
- [63] A. Khadivar y A. Kavussi, "Rheological characteristics of SBR and NR polymer modified bitumen emulsions at average pavement temperatures", *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 1099-1105, 2013.
- [64] C. V. Palma, J. C. Ortiz Cisneros, F. Ávalos Belmonte y A. Castañeda Facio, "Modificación de asfalto con elastómeros para su uso en pavimentos", *Afinidad LXXIII*, vol. 554, pp. 119-124, 2016.
- [65] J. Zhu, B. Birgisson y N. Kringos, "Polymer modification of bitumen: Advances and challenges", *European Polymer Journal*, vol. 54, pp. 18-38, 2014.
- [66] Y. Becker, M. P. Méndez y Y. Rodríguez, "Polymer modified asphalt", *Visión tecnológica*, vol. 9, n.º 1, pp. 39-50, 2001.
- [67] S. Abbas Tabatabaei, A. Kiasat y F. Karimi Alkouhi, "The Effect of Styrene-Butadiene-Rubber (SBR) Polymer Modifier on Properties of Bitumen", *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, vol. 7, n.º 10, pp. 785-788, 2013.
- [68] S. M. Sargand y S.-S. Kim, "Performance evaluation of polymer modified and unmodified superpave mixes", in *Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Auburn, Alabama, 2001.
- [69] A. H. Albayati y H. Kariem Mohammed, "Influence of styrene butadiene rubber on the mechanical properties of asphalt concrete", *Al-Qadisiya Journal For Engineering Sciences*, vol. 4, n.º 3, pp. 258-274, 2011.
- [70] Y. Becker, M. Meondez y Y. Rodríguez, "Polymer modified asphalt", *VisTechnologies AS*, vol. 9, n.º 1, pp. 39-50, 2001.
- [71] Z. Zhang y J. Yu, "The research for high-performance SBR compound modified asphalt", *Construction and Building Materials*, vol. 24, n.º 3, pp. 410-418, 2010.
- [72] P. Cong, P. Xun, M. Xing y S. Chen, "Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts", *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 632-641, 2013.
- [73] M. Sienkiewicz, J. Kucinska Lipka, H. Janik y A. Balas, "Progress in used tyres management in the European Union: a review", *Waste Management*, vol. 32, pp. 1742-1751, 2012.
- [74] S. Rafat, K. Jamal y K. Inderpreet, "Use of recycled plastic in concrete: A review", *Waste Management*, vol. 28, n.º 10, pp. 1835-1852, 2008.
- [75] A. M. Dueñas Rodríguez y S. A. Calume Figueroa, "Recopilación y análisis sobre el uso del grano de caucho modificado (CMR) para la utilización por vía seca en el diseño de carpetas asfálticas en Bogotá", *Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Santo Tomás*, 2017.
- [76] L. P. Fontes, G. Trichês, J. C. Pais y P. A. Pereira, "Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures", *Construction and Building Materials*, vol. 24, n.º 7, pp. 1193-1200, 2010.
- [77] C. Chui Te y L. Li Cheng, "A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber", *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1027-1033, 2007.

- [78] M. Partl, E. Pasquini, F. Canestrar y A. Virgili, "Analysis of water and thermal sensitivity of open graded AR mixtures", *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 283-291, 2010.
- [79] H. Wang, Z. You, J. Mills Beale y P. Hao, "Laboratory evaluation on high temperature viscosity and low temperature stiffness of asphalt binder with high percent scrap tire rubber", *Construction and Building Materials*, vol. 26, pp. 583-590, 2012.
- [80] D. Zhang, X. Huang, Y. Zhao y S. Zhang, "Rubberized asphalt mixture design using a theoretical model", *Construction and Building Materials*, vol. 67, pp. 265-269, 2014.
- [81] F. Navarro, P. Partal, F. Martínez Boza y C. Gallegos, "Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens", *Fuel*, vol. 83, pp. 2041-2049, 2004.
- [82] A. Tortum, C. Celik y A. Cuneyt Aydin, "Determination of the optimum conditions for tire rubber in asphalt concret", *Building and Environment*, vol. 40, pp. 1492-1504, 2005.
- [83] X. Ding, T. Ma, W. Zhang y D. Zhang, "Experimental study of stable crumb rubber asphalt and asphalt mixture", *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 975-981, 2017.
- [84] V. González, F. Martínez Boza, F. Navarro, C. Gallegos, A. Pérez Lepe y A. Páez, "Thermo-mechanical properties of bitumen modified with crumb tire rubber and polymeric additives", *Fuel Processing Technology*, vol. 91, n.º 9, pp. 1033-1039, 2010.
- [85] Y. Doh, K. Yun, S. Amirkhanian y K. Kim, "Framework for developing a static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures", *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 2047-2058, 2007.
- [86] S. Oda, J. Leomar Fernandes Jr y J. Sereni Ildefonso, "Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, vol. 26, pp. 13-20, 2012.
- [87] Q. Li, F. Ni, L. Gao, Q. Yuan y Y. Xiao, "Evaluating the rutting resistance of asphalt mixtures using an advanced repeated load permanent deformation test under field conditions", *Construction and Building Materials*, vol. 61, pp. 241-251, 2014.
- [88] V. S. Punith y A. Veeraragavan, "Behavior of asphalt concrete mixtures with reclaimed polyethylene as additive", *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, n.º 6, pp. 500-507, 2007.
- [89] K. Yan, H. Xu y L. You, "Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene", *Construction and Building Materials*, vol. 83, pp. 143-149, 2015.
- [90] M. Murphy, M. O'Mahony, C. Lycett y I. Jamieson, "Bitumens modified with recycled polymers", *Materials and Structures*, vol. 33, n.º 231, pp. 438-44, 2000.
- [91] I. A. Hussein, I. M. H. y H. I. Al-Abdul-Wahhab, "Influence of Mw of LDPE and vinyl acetate content of EVA on the rheology of polymer modified asphalt", *Rheologica Acta*, pp. 92-104, 2005.
- [92] F. Changqing, Z. Ying, Y. Qian, Z. Xing, G. Dagan, Y. Ruien y Z. Min, "Preparation, characterization and hot storage stability of asphalt modified by waste polyethylene packaging", *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 29, n.º 5, pp. 434-438, 2013.
- [93] A. Pérez Lepe, F. Martínez, C. González, O. Gallegos, M. Muñoz y A. Santamaría, "Influence of the processing ified bitumeconditions on the rheological behaviour of polymer modified bitumen", *Fuel*, pp. 1339-1348, 2003.
- [94] A. Fawcett, T. McNally, G. McNally, F. Andrews y J. Clarke, "Blends of bitumen with polyethylenes", *Polymer*, vol. 40, pp. 6337-6349, 1999.
- [95] Y. Edwards, Y. Tasdemir y U. Isacson, "Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220 - high and medium temperature performance", *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1899-1908, 2007.

- [96] N. Uğur Koçkal y S. Köfteci, “Aggressive Environmental Effect on Polypropylene Fibre Reinforced Hot Mix Asphalt”, *Procedia Engineering*, vol. 161, pp. 963-969, 2016.
- [97] P. Ahmedzade, K. Demirelli, T. Günay, F. Biryan y O. Alqudah, “Effects of Waste Polypropylene Additive on the Properties of Bituminous Binder”, *Procedia Manufacturing*, vol. 2, pp. 165-170, 2015.
- [98] J. Zhu, B. Birgisson y N. Kringos, “Polymer modification of bitumen: Advances and challenges”, *European Polymer Journal*, vol. 54, pp. 18-38, 2014.
- [99] P. Lastra González, M. A. Calzada Pérez, D. Castro Fresno, Á. Vega Zamanillo y I. Indacochea Vega, “Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste”, *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 1133-1140, 2016.
- [100] S. Tapkin, “The effect of polypropylene fibers on asphalt performance”, *Building and Environment*, vol. 43, pp. 1065-1071, 2008.
- [101] M. Sadeque y K. A. Patil, “Rheological properties of recycled low density polyethylene and polypropylene modified bitumen”, *International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering*, vol. 2, n.º 2, pp. 24-26, 2013.
- [102] A. Behl, G. Sharma y G. Kumar, “A sustainable approach: Utilization of waste PVC in asphaltting of roads”, *Construction and Building Materials*, vol. 54, pp. 113-117, 2014.
- [103] H. A. Rondón Quintana y M. L. Guzmán Millán, “Influencia de la granulometría sobre la resistencia mecánica de una mezcla asfáltica modificada con desecho de policloruro de vinilo (PVC)”, *Studiositas*, vol. 5, n.º 3, pp. 69-84, 2010.
- [104] H. A. Rondón Quintana, F. A. Reyes Lizcano y B. E. Ojeda Martínez, “Comportamiento de una mezcla densa de asfalto en caliente modificada con desecho de policloruro de vinilo”, *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 18, n.º 2, pp. 29-43, 2008.
- [105] G. Dongdong, Y. Kezhen, U. Zhanping y X. Hongbin, “Mecanismo de modificación del aglutinante de asfalto con caucho de llanta de desecho y polietileno reciclado”, *Construcción y materiales de construcción*, vol. 126, pp. 66-76, 2016.
- [106] F. Changqing, Y. Ruien, Z. Ying, H. Jingbo, Z. Min y M. Xinghua, “Modificación combinada de asfalto con residuos de envases de polietileno y montmorillonita organofílica”, *Prueba de polímeros*, vol. 31, n.º 2, pp. 276-281, 2012.
- [107] M. García Morales, P. Partal, F. Navarro y C. Gallegos, “Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen”, *Fuel*, vol. 85, n.º 7-8, pp. 936-943, 2006.
- [108] H. L. Arenas Lozano, *Tecnologías del cemento asfáltico*, 5ta ed., Bogotá, Colombia: Faid Editores, 2000.
- [109] H. Rondón Quintana, W. Fernández Gómez y W. Castro López, “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, n.º 1, pp. 83-94, 2010.
- [110] F. A. Reyes Lizcano, C. Guáqueta Echeona, L. M. Porras Salcedo y H. A. Rondón Quintana, “Compotamiento de un cemento asfáltico modificado con desecho de PVC”, *Revista Ingenierías*, vol. 12, n.º 22, pp. 75-84, 2013.
- [111] D. Lesueur, “The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification”, *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 145, n.º 1-2, pp. 42-82, 2009.
- [112] J. Hailong, G. Guangtao, Z. Yong, Z. Yinxi, S. Kang y F. Yongzhong, “Improved properties of polystyrene-modified asphalt through dynamic vulcanization”, *Polymer Testing*, vol. 21, n.º 6, pp. 633-640, 2002.
- [113] M. Çubuk, M. Gürü y M. K. Çubuk, “Improvement of bitumen performance with epoxy resin”, *Fuel*, vol. 88, n.º 7, pp. 1324-1328, 2009.