



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

TESIS

**EFEECTO DEL CONTENIDO DE VINILOS DEL SBS EN COMPÓSITOS CON
PARTÍCULAS DE SARGAZO, DISPERSADOS EN UNA MATRIZ ASFÁLTICA**

Que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Presenta
Ing. Rivaldo Guerrero Sánchez
G16070460
No. CVU de CONAHCyT: 1186248

Director de Tesis
Dra. Beatriz Adriana Salazar Cruz
No. CVU de CONAHCyT: 269015

Co - director de Tesis
Dr. José Luis Rivera Armenta



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ciudad Madero, Tamaulipas, 18/Septiembre/2025

Oficio No. U1.176/2025

ASUNTO: Autorización de Impresión

C. RIVALDO GUERRERO SÁNCHEZ
No. DE CONTROL G16070460
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	DRA. BEATRIZ ADRIANA SALAZAR CRUZ
SECRETARIO:	DR. JOSÉ LUIS RIVERA ARMENTA
VOCAL :	DRA. ANA BEATRIZ MORALES CEPEDA
SUPLENTE:	DR. CARLOS FERNANDO CASTRO GUERRERO

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

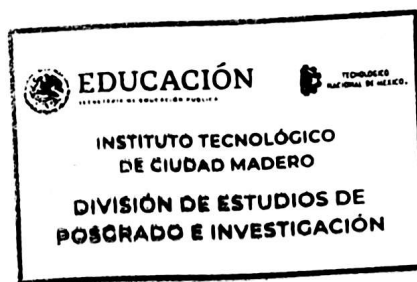
**"EFECTO DEL CONTENIDO DE VINILOS DEL SBS EN COMPÓSITOS CON PARTÍCULAS
DE SARGAZO, DISPERSADOS EN UNA MATRIZ ASFÁLTICA"**

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica.
"Por Mi Patria y Por Mi Bien" ®


RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



ccp. Archivo

RCG/DYV/aap




2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos
C.P. 89440 Cd. Madero, Tam. Tel. (833) 3574820 ext. 3110
e-mail: depi_cdmadero@tecnm.mx www.tecnm.mx
www.cdmadero.tecnm.mx



Agradecimientos

Antes que nada, agradezco a Dios por otorgarme la dicha de continuar con mi desarrollo profesional, sin su voluntad, nada de esto sería posible. De igual forma, agradezco a mis padres por todo su amor y apoyo incondicional brindado en cada una de mis decisiones, muchos de mis logros, incluido este, así como la persona que soy hoy en día se los debo a ustedes.

A mi directora de tesis, la Dra. Beatriz Adriana Salazar Cruz no solo por compartirme su experiencia y conocimiento, los cuales han sido determinantes para la culminación de esta tesis, sino también por todo su apoyo, paciencia, motivación, orientación y supervisión durante mi estancia en el posgrado. Trabajar con usted ha sido sin lugar a duda una experiencia muy amena y enriquecedora.

A mi comité tutorial conformado por el Dr. José Luis Rivera Armenta, la Dra. Ana Beatriz Morales Cepeda y el Dr. Carlos Fernando Castro Guerrero por sus valiosas observaciones, sugerencias y aportaciones a mi trabajo de investigación. Mi agradecimiento se extiende para la Mtra. María Yolanda Chávez Cinco, quien estuvo siempre pendiente de mi avance, además de brindarme todo su apoyo y enseñanzas.

A la Dra. Nancy Patricia Díaz Zavala por su amistad y gran compromiso como coordinadora del programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Le agradezco inmensamente sus enseñanzas y todo el apoyo incondicional otorgado.

A la empresa Dynasol Elastómeros por la donación de los materiales poliméricos utilizados en este estudio, así como por el apoyo brindado para el desarrollo de las pruebas de penetración y reología. Asimismo, expreso mi gratitud hacia la empresa Ergon Asfaltos México por la donación de los asfaltos empleados en la presente investigación.

A mis amigos por todos estos años de buenos y malos momentos que hemos compartido, gracias por acompañarme en esta nueva etapa de mi vida, los llevo por siempre en mi mente.

Por último, pero no menos importante, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico otorgado, número de beca 812552, para lograr este grado académico.

Resumen

El asfalto desempeña un papel crucial en la elaboración de carpetas asfálticas y diversas aplicaciones. Por esta razón, se busca constantemente nuevos materiales que puedan mejorar la calidad del asfalto y que, además, sean amigables con el medio ambiente.

Actualmente, el sargazo representa un grave problema para las costas de las playas de algunas regiones del Golfo de México y el Mar Caribe, su reproducción excesiva es a causa del aumento de la temperatura, de los nutrientes de origen antropogénico en el mar y por los cambios en las corrientes marinas generados por el cambio climático. En un estudio previo se demostró que el uso de partículas de sargazo (SP) como modificador asfáltico potencializa las propiedades físicas y reológicas del asfalto. Debido a ello se planteó el uso de estas partículas en compósito con el copolímero estireno – butadieno – estireno (SBS, por sus siglas en inglés) de estructura lineal y con diferente contenido de unidades vinilo para su uso como posible modificador asfáltico. La incorporación de este material orgánico en el copolímero permitiría la disminución de costos al reemplazar parte del polímero por este desecho, asimismo, ayudaría a la gestión de este residuo.

En la presente investigación se evaluó el efecto del contenido de unidades vinilo (11 y 40 %) en la microestructura lineal del SBS en compósito con partículas de sargazo a diferentes proporciones (0, 1, 5 y 10 phr) respectivamente, cada compósito se adicionó al asfalto por separado a diferentes concentraciones (1, 2 y 3 % peso). El análisis de estas mezclas se llevó a cabo a partir de técnicas de caracterización, tales como, viscosidad dinámica, punto de reblandecimiento, separación de fases, penetración, microscopia fluorescente, así como análisis de espectroscopía infrarroja y reológicos.

Con base en los resultados, los compósitos SBS/SP evaluados, poseen una buena afinidad con el asfalto. En relación con el contenido de vinilo en el SBS se demostró que un mayor contenido resulta más significativo en las propiedades físicas y reológicas de los asfaltos. Por otra parte, el uso de partículas de sargazo en compósito con el SBS mejoró notablemente estas propiedades, al igualar o incluso superar a los valores registrados por las mezclas de referencia, las cuales poseen únicamente el 3% peso de SBS lineal con diferente contenido de vinilo. La mezcla asfáltica modificada con el 2% peso del compósito SBS/SP de alto contenido de vinilo y 5 phr de partículas de sargazo, presentó el mayor desempeño de entre todas las muestras evaluadas.

Abstract

Asphalt plays a crucial role in the production of asphalt layers and various applications. For this reason, there is a constant search for new materials that can improve the quality of asphalt and that are also environmentally friendly.

Currently, sargassum represents a serious problem for the coasts of the beaches of some regions of the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea; its excessive reproduction is due to the increase in temperature, anthropogenic nutrients in the sea and changes in ocean currents generated by climate change. A previous study showed that the use of sargassum particles (SP) as an asphalt modifier enhances the physical and rheological properties of asphalt. Therefore, the use of these particles in a compound with styrene-butadiene-styrene copolymer (SBS) of linear structure and with different content of vinyl units was proposed for its use as a possible asphalt modifier. The incorporation of this organic material in the copolymer would reduce costs by replacing part of the polymer with this waste, and would also help in the management of this waste.

In the present investigation, the effect of the content of vinyl units (11 and 40%) on the linear microstructure of SBS in composite with sargassum particles at different proportions (0, 1, 5 and 10 phr) respectively, each composite was added to the asphalt separately at different concentrations (1, 2 and 3 wt%) was evaluated. The analysis of these mixtures was carried out using characterization techniques such as dynamic viscosity, softening point, phase separation, penetration, fluorescence microscopy, as well as infrared spectroscopy and rheological analysis.

Based on the results, the SBS/SP composites evaluated have a good affinity with asphalt. In relation to the vinyl content in the SBS, it was shown that a higher content is more significant in the physical and rheological properties of the asphalts. On the other hand, the use of sargassum particles in composite with SBS composite improved significantly these properties, equaling or even surpassing the values recorded by the reference mixes, which have only 3% by weight of linear SBS with different vinyl content. The asphalt mix modified with 2% by weight of SBS/SP high vinyl content and 5 phr of sargassum particles presented the best performance among all the samples evaluated.

Índice

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Introducción.....	1
Capítulo 1. Marco teórico	3
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Asfalto	8
1.2.1 Composición química	8
1.2.2 Proceso de obtención	10
1.2.3 Clasificación.....	11
1.3 Pavimentos	12
1.3.1 Pavimento flexible	12
1.3.2 Pavimento rígido.....	13
1.3.3 Propiedades de los pavimentos.....	13
1.4 Mezcla Asfáltica	15
1.5 Asfalto modificado	15
1.6 Materiales compuestos.....	15
1.6.1 Componentes	16
1.6.2 Clasificación.....	16
1.7 Algas	18
1.8 Sargazo.....	19
1.8.1 Sargassum natans.....	20
1.8.2 Sargassum fluitans	20
1.8.3 Composición química	20
1.9 Estireno – Butadieno – Estireno (SBS).....	23
1.9.1 Propiedades	23
1.9.2 Grupo vinilo	25
Capítulo 2. Metodología.....	26
2.1 Materiales	27
2.2 Preparación de las partículas de sargazo (SP).....	28
2.3 Preparación de los compósitos SBS/SP	28

2.4	Preparación de las mezclas asfálticas modificadas.....	30
2.5	Técnicas de caracterización.....	32
2.5.1	Viscosidad dinámica	32
2.5.2	Punto de reblandecimiento (análisis Ring and Ball).....	33
2.5.3	Separación de fases.....	35
2.5.4	Penetración.....	36
2.5.5	Microscopía fluorescente	37
2.5.6	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier	38
2.5.7	Reología	38
Capítulo 3.	Discusión de resultados.....	41
3.1	Viscosidad dinámica	42
3.2	Punto de reblandecimiento	50
3.3	Separación de fases.....	53
3.4	Penetración	55
3.5	Microscopía fluorescente	59
3.6	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	62
3.7	Reología	67
Capítulo 4.	Conclusiones	73
Anexo A		77
Referencias		79

Índice de tablas

Tabla 1.1	Composición elemental promedio de un asfalto ^[18]	8
Tabla 1.2	Clasificación de los materiales asfálticos de uso en pavimentos ^[21]	11
Tabla 1.3	Clasificación de las macroalgas según el predominio de sus pigmentos ^[27]	18
Tabla 1.4	Composición química del sargazo por GC-MS ^[12]	21
Tabla 2.1	Características de los copolímeros SBS.	27
Tabla 2.2	Propiedades del asfalto AC-20.....	27
Tabla 2.3	Matriz experimental de los compósitos SBS/SP elaborados.	29
Tabla 2.4	Condiciones de procesamiento de los compósitos SBS/SP.	29
Tabla 2.5	Condiciones de prensado de los compósitos SBS/SP.....	30

Tabla 2.6 Matriz experimental de las mezclas asfálticas preparadas.....	31
Tabla 3.1 Parámetros estimados del modelo de Arrhenius de las mezclas asfálticas analizadas.	49
Tabla 3.2 Resultados del índice de penetración de las mezclas asfálticas evaluadas.....	57
Tabla 3.3 Micrografías de fluorescencia de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP. Aumento 40x.	60
Tabla 3.4 Micrografías de fluorescencia de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-L/SP. Aumento 40x.....	61

Índice de figuras

Figura 1.1 Asfalto.	8
Figura 1.2 Clasificación del asfalto en presencia de n-heptano.	9
Figura 1.3 Diagrama de fabricación de los productos asfálticos.	11
Figura 1.4 a) Estructura de un pavimento flexible. b) Distribución de cargas en un pavimento flexible.....	12
Figura 1.5 a) Estructura de un pavimento rígido. b) Distribución de cargas en un pavimento rígido.	13
Figura 1.6 Componentes base de un material compuesto y sus tipos.....	15
Figura 1.7 Morfología del sargazo.....	19
Figura 1.8 a) Sargassum natans, b) Sargassum fluitans.	20
Figura 1.9 Espectro FTIR del sargazo (alga parda).	22
Figura 1.10 UCR del copolímero SBS.....	23
Figura 1.11 a) Polibutadieno 1,4 en configuración cis. b) Polibutadieno 1,4 en configuración trans. c) Polibutadieno 1,2 (unidad vinilo).....	24
Figura 2.1 Diagrama de flujo para la preparación de las partículas de sargazo.	28
Figura 2.2 Diagrama de flujo para la preparación de los compósitos SBS/SP.....	30
Figura 2.3 Equipo de calentamiento y mezclado.....	31
Figura 2.4 a) Equipo utilizado para la medición de la viscosidad dinámica de las muestras asfálticas. b) Spindle 27 y copa porta muestra empleados en la determinación de dicha propiedad.	32
Figura 2.5 Análisis Ring and Ball.....	34
Figura 2.6 Proceso de la prueba de separación de fases.	35

Figura 2.7 a) Penetrómetro digital Koehler K95500. b) Esquema del análisis de penetración.	36
Figura 2.8 Microscopio óptico Carl Zeiss Axio Lab A1	37
Figura 2.9 Espectrofotómetro FTIR Perkin Elmer Spectrum 100	38
Figura 2.10 DSR TA Instruments Discovery HR-3	39
Figura 3.1 Viscosidad a 160°C de las mezclas modificadas al 3% con los compósitos: a) SBS-L/SP, b) SBS-H/SP.	43
Figura 3.2 Efecto de la concentración de modificador y de la temperatura en la viscosidad de las mezclas modificadas con los compósitos: a) H1, b) H5, c) H10.	45
Figura 3.3 Efecto de la concentración de modificador y de la temperatura en la viscosidad de las mezclas modificadas con los compósitos: a) L1, b) L5, c) L10.	47
Figura 3.4 Resultados del punto de reblandecimiento de los asfaltos modificados con los compósitos: a) SBS-H/SP, b) SBS-L/SP	51
Figura 3.5 Resultados de la prueba de separación de fases de los asfaltos modificados con los compósitos: a) SBS-H/SP, b) SBS-L/SP.	54
Figura 3.6 Resultados de penetración de las mezclas modificadas con los compósitos: a) SBS-H/SP, b) SBS-L/SP.	56
Figura 3.7 Espectros FTIR de los copolímeros L0 y H0	62
Figura 3.8 Espectros FTIR del asfalto virgen y de las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos: a) H1 b) H5, c) H10.	65
Figura 3.9 Espectros FTIR del asfalto virgen y de las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos: a) L1, b) L5, c) L10.	66
Figura 3.10 Gráficas isocrónicas del módulo complejo en función de la temperatura para las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos: a) H1, b) H5, c) H10	68
Figura 3.11 Gráficas isocrónicas del módulo complejo en función de la temperatura para las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos: a) L1, b) L5, c) L10.	69
Figura 3.12 Temperatura de falla de los asfaltos modificados con los compósitos: a) SBS-H/SP, b) SBS-L/SP.	71
Figura A.1 Viscosidad a 135°C de las mezclas modificadas al 3% con los compósitos: a) SBS-L/SP, b) SBS-H/SP.	77
Figura A.2 Viscosidad a 190°C de las mezclas modificadas al 3% con los compósitos: a) SBS-L/SP, b) SBS-H/SP.	78

Introducción

El asfalto es un material aglomerante viscoso, de color negro con consistencia variable, compuesto, primordialmente, por componentes que pueden ser naturales u obtenidos a partir de la refinación del petróleo; es empleado principalmente en la construcción de pavimentos e impermeabilización de edificaciones y obras hidráulicas debido a sus propiedades impermeables, adherentes y cohesivas capaces de fluir bajo la acción de cargas permanentes y resistir altos esfuerzos instantáneos ^[1,2].

En años recientes, se han realizado numerosas investigaciones con el propósito de mejorar el grado de desempeño del asfalto, resultado de la creciente necesidad de contar con materiales que exhiban un mejor rendimiento bajo la influencia del tránsito vehicular y de los diversos factores ambientales ^[3]. Se ha comprobado que la adición de modificadores puede disminuir la susceptibilidad térmica, mejorar las propiedades termo-mecánicas, la durabilidad y el rendimiento, así como un incremento en la resistencia al agrietamiento por fatiga y deformación permanente.

La problemática producida en los sectores económico, ambiental y social, debido a la industria del pavimento de asfalto, ha ocasionado un gran interés en encontrar nuevos materiales, que reduzcan o den solución a estos problemas. Estudios previos han señalado que es posible utilizar compósitos a base de materiales orgánicos dispersados en una matriz polimérica como modificador de asfalto (por ejemplo, estireno – butadieno – estireno con carbonato de calcio modificado, plumas de pollo, poli alfa olefina amorfa o aceite de cocina y polipropileno con partículas de nano sílice).

El sargazo es una macroalga marina parda que proporciona un hábitat a diferentes especies. Su llegada a las costas del Caribe es un fenómeno habitual, registrado desde 1960, sin embargo, en los últimos años, se han presentado arribos masivos atípicos de esta alga en el Caribe mexicano, producidos por el desprendimiento de agregaciones de esta especie en el mar de los Sargazos; este fenómeno es ocasionado por el calentamiento global y la contaminación antropogénica. La crisis producida por la acumulación excesiva de sargazo en las playas mexicanas ha generado un gran interés dentro de la comunidad científica por encontrar una nueva aplicación a este desecho orgánico; con base en ello y en estudios previos se tomó la idea de crear compósitos SBS/SP (estireno – butadieno – estireno / partículas de sargazo) como modificador de asfaltos ^[4-7].

Ante las circunstancias mencionadas y con el objetivo de obtener una mezcla asfáltica capaz de ser utilizada en el diseño de carpetas asfálticas, en el presente trabajo de investigación se estudió el efecto del contenido de vinilo (40% y 11%) en la microestructura lineal del copolímero SBS en compósito con partículas de sargazo dispersados en una matriz asfáltica a distintas concentraciones de estos modificadores. Las propiedades físicas de estas mezclas fueron evaluadas a partir de caracterizaciones, tales como, viscosidad dinámica, penetración, separación de fases, punto de reblandecimiento, microscopia fluorescente, análisis de espectroscopia infrarroja y reológicos.

.

Capítulo 1. Marco teórico

1.1 Antecedentes

El asfalto es un aglutinante muy interesante debido a sus propiedades altamente resistentes, adhesivas e impermeables. Es un material que brinda cierta elasticidad controlable a las mezclas con las que se combina. Se emplea significativamente en el diseño de carpetas asfálticas, recubrimiento de obras hidráulicas, impermeabilización de edificaciones, etc ^[1].

La innovación del presente estudio consiste en utilizar dos materiales que de forma individual han sido probados como eficientes modificadores de asfaltos, pero cuya combinación no ha sido estudiada por ningún equipo de investigación hasta el momento. Comúnmente los polímeros más utilizados para la modificación de asfaltos han sido el acetato de vinilo etileno (EVA), el polietileno (PE), y algunos copolímeros elastoméricos, tales como el caucho estireno – butadieno (SBR), estireno – isopreno – estireno (SIS), estireno – etileno – butileno – estireno (SEBS), así como el SBS, siendo este copolímero el de mayor aplicación para este fin. El uso de ciertos materiales de desecho como modificadores de asfalto han cobrado relevancia debido a las mejoras obtenidas en las propiedades físicas y reológicas, así como en el grado de desempeño de las muestras modificadas en comparación con las del asfalto virgen. Algunos de los materiales de desecho reportados en literatura empleados en la modificación de asfaltos han sido el caucho granulado, plumas de aves, conchas de mar, compósitos de cenizas de cáscara de arroz con polvo de caucho triturado, así como el sargazo, siendo este material uno de los principales componentes del modificador de asfaltos a estudiar en este proyecto. A continuación, se presentan algunos de los antecedentes consultados para contrastar a futuro los resultados obtenidos en esta investigación.

Fan y col. (2022) analizaron la influencia del uso de residuos de conchas marinas como modificador de asfalto en el desempeño de pavimentos asfálticos. Emplearon dos tipos de polvos de conchas de mar, el primero corresponde al de la concha marina sin modificar (SP), mientras que el segundo pertenece al de la concha de mar exfoliada hasta la capa llamada estrato córneo del caparazón (SCESP). Los resultados muestran que los SP y SCESP son rugosos y porosos, cuyo componente principal es el CaCO_3 , dicho compuesto es físicamente miscible con el asfalto. Ambos modificadores reducen la resistencia al agrietamiento a baja temperatura del asfalto, de los cuales el SCESP tiene un efecto más adverso en comparación con el SP. Cuando los SP y SCESP se mezclan con el asfalto estos generan una mejora en la propiedades cohesivas y adhesivas de las mezclas, además, crean una mayor resistencia al

daño por agua, de los cuales el SCESP posee una mayor resistencia en comparación con el SP ^[8].

Escobar y col. (2021) utilizaron sargazo como modificador de asfalto natural y evaluaron el efecto del tamaño de partícula del alga marina en las propiedades fisicoquímicas, reológicas y morfológicas de las mezclas asfálticas modificadas. Estudiaron dos tamaños máximos de partículas: 500 μm y 850 μm . Los espectros FTIR (espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier) demostraron que el proceso de modificación inducido no genera cambios químicos, por lo tanto, la interacción entre el sargazo y el asfalto es considerada como una adsorción física. La microscopía fluorescente reveló que la adición de altas concentraciones de sargazo, a partir del 1.5% en peso, conducen a la formación de aglomerados, lo que afecta la morfología y la microestructura de los asfaltos modificados. Los resultados, además, demuestran un mejor punto de reblandecimiento, penetración, estabilidad de almacenamiento térmico y resistencia a las deformaciones al utilizar proporciones bajas de partículas finas de sargazo (500 μm), caso contrario para las mezclas modificadas con partículas de sargazo de tamaño superior (850 μm). A partir del análisis estadístico realizado se concluye que el comportamiento reológico de las mezclas asfálticas es más afectado por el tamaño de partícula del modificador, mientras que las propiedades físicas analizadas estuvieron más determinadas por la concentración del sargazo ^[9].

Münkel y col. (2021) determinaron el rango de desempeño de una mezcla asfáltica evaluando el efecto del aceite de cocina reciclado con dos diferentes tipos de polímero, SBS y terpolímero elastomérico reactivo (RET), como modificadores de asfalto. Descubrieron que el aceite puede afectar la formación de la red entre el polímero y el asfalto, por lo que el tipo de polímero utilizado (SBS o RET) resultó ser el factor más importante en la resistencia a deformación permanente y fatiga. Los resultados señalan que el aceite disminuye el grado superior e inferior del grado de desempeño (PG) del asfalto base. Además, indican que la presencia de aceite afectó la interacción del SBS con el asfalto. Sin embargo, con la incorporación del RET al asfalto previamente modificado con aceite, el límite superior de PG aumentó en 2 grados sin afectar las temperaturas intermedia y baja ^[10].

Guo y col. (2021) investigaron el efecto del uso de conchas marinas como modificador asfáltico en las propiedades reológicas a bajas y altas temperaturas. La adición de este material tuvo una buena aceptación por parte de la matriz asfáltica, generando una mezcla física estable y, por consiguiente, una mejora en la consistencia, la dureza, en las propiedades

reológicas, en el desempeño a la recuperación y en la resistencia a deformaciones permanentes hacia las altas temperaturas. A temperaturas de servicio muy bajas el grado de desempeño de las mezclas asfálticas modificadas disminuye ^[11].

Salazar y col. (2020) determinaron el grado de desempeño (PG) de una mezcla asfáltica evaluando el efecto de la concentración de las partículas de sargazo como modificador de asfalto natural. Los resultados indican que las propiedades físicas como el punto de reblandecimiento, la viscosidad dinámica y el índice de penetración aumentan al adicionar hasta un 2.5% peso de partículas de sargazo. Además, demuestran que el grado de desempeño de la mezcla asfáltica a la concentración mencionada anteriormente es eficiente hacia las altas temperaturas, al generar una mayor resistencia a las deformaciones permanentes. Una concentración mayor al 2.5% peso de las partículas de sargazo resultó ser contraproducente para las propiedades físicas de la mezcla asfáltica y por ende en su grado de desempeño ^[12].

Liu y col. (2020) utilizaron poli alfa olefina amorfa (APAO) para reemplazar parcialmente el SBS como modificador asfáltico. Descubrieron que la mezcla compuesta por SBS/APAO en proporciones de 2% y 3% respectivamente por peso del asfalto base, utilizada como modificador, mostró no solo mejores propiedades físicas y reológicas, sino también una mejor estabilidad al almacenamiento y propiedades de envejecimiento que el asfalto modificado con SBS exclusivamente ^[13].

Rivera y col. (2019) utilizaron SBS de estructura radial, partículas de plumas de pollo (PPP) y compósitos de SBS/PPP como modificadores de asfalto. El estudio revela que la incorporación de PPP mejora las propiedades físicas del asfalto puro como la temperatura de reblandecimiento, penetración y separación de fases, provocando un aumento en su estabilidad y rigidez. Las propiedades reológicas del asfalto modificado con PPP presentaron una naturaleza elástica reforzada muy similar a la del asfalto modificado con SBS puro. Además, indicaron que las propiedades físicas, térmicas y reológicas de las mezclas modificadas con compósitos de SBS/PPP se potencializan al adicionar primero las PPP al asfalto ^[14].

Li y col. (2019) estudiaron las propiedades del SBS con carbonato de calcio pesado modificado con tres tipos de modificadores (agente de acoplamiento de aluminato, ácido esteárico y agente de acoplamiento de titanato) como modificador de mezclas asfálticas. La

estabilidad a altas temperaturas, la resistencia al ahuellamiento y las propiedades de fatiga de los tres asfaltos modificados se evaluaron mediante una prueba de Esfuerzo - Deformación - Múltiple (MSCR, por sus siglas en inglés) realizada en un reómetro de corte dinámico (DSR, por sus siglas en inglés). Los resultados demostraron que a una temperatura de 46°C los módulos de almacenamiento y pérdida de los tres modificadores de carbonato de calcio pesado en combinación con SBS aumentaron considerablemente, en comparación con el asfalto modificado únicamente con SBS. El análisis microscópico y los resultados de la microscopía fluorescente (FM, por sus siglas en inglés, Fluorescence Microscopy) revelaron una distribución uniforme del modificador en la matriz asfáltica, así como una mejora en las propiedades viscoelásticas del asfalto modificado comparado con el asfalto original ^[15].

Bala y col. (2018) estudiaron el efecto de las partículas de nano sílice en una mezcla asfáltica modificada con polipropileno, los compósitos de nano sílice / polipropileno se prepararon mediante la adición de un 5% de polipropileno junto con una concentración variable (1% - 4%) de partículas de nano sílice por peso del aglutinante asfáltico base. La composición de mezcla óptima se logró a partir del 2% de la incorporación de partículas de nano sílice. El estudio revela que los compósitos a base de polipropileno con partículas de nano sílice mejoran el rendimiento y la durabilidad de las mezclas asfálticas ^[16].

Zapién y col. (2015) evaluaron las propiedades físicas y reológicas en muestras de asfalto modificadas con nanocompósitos formados a partir de un copolímero en bloque de estireno – etileno – butadieno – estireno (SEBS, por sus siglas en inglés) con montmorillonita a diferentes concentraciones másicas. Los resultados señalan un aumento en la temperatura de reblandecimiento, la viscosidad y en el módulo complejo, por otra parte, la penetración, la susceptibilidad térmica, la separación de fases y la $\tan \delta$ disminuyeron, confiriéndole al asfalto una mayor resistencia tanto a las deformaciones permanentes a elevadas temperaturas, como a la fisuración a bajas temperaturas ^[17].

1.2 Asfalto

El asfalto es un aglutinante de color negro el cual puede ser encontrado en yacimientos naturales o a partir de la destilación fraccionada del crudo de petróleo.

La consistencia del asfalto varía ampliamente, entre sólida y semisólida a condiciones normales de temperatura y presión como se ilustra en la Figura 1.1. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se reblandece y se vuelve líquido, de modo que le permite envolver satisfactoriamente los agregados pétreos durante la producción de la mezcla en caliente ^[1].



Figura 1.1 Asfalto.

1.2.1 Composición química

Está compuesto principalmente por una mezcla hidrocarbonada de alto peso molecular, algunos residuos de azufre, oxígeno, nitrógeno y pequeñas trazas de elementos metálicos (Fe, Ni, Co, V, Mg). En la Tabla 1.1 se muestra la composición elemental promedio de un asfalto, obtenidos a partir del análisis elemental de varios aceites crudos de petróleo.

Tabla 1.1 Composición elemental promedio de un asfalto ^[18].

Elemento	Composición (%)
Carbono	82 – 88
Hidrógeno	8 – 11
Azufre	0 – 6
Oxígeno	0 – 1.5
Nitrógeno	0 – 1

El asfalto al ser disuelto en n-heptano se separa en dos componentes principales, asfaltenos y maltenos. Los asfaltenos no son solubles en n-heptano y son usualmente de color negro o pardo oscuro, con apariencia similar al polvo de grafito. Los maltenos, por el contrario, son solubles en n-heptano, los cuales son líquidos viscosos constituidos por resinas y aceites (aromáticos y saturados). Esta clasificación se muestra en la Figura 1.2.

Un sin número de factores puede variar la proporción de asfaltenos y maltenos presentes en el asfalto, estos incluyen las altas temperaturas, el oxígeno, la exposición al sol, etc. ^[19]

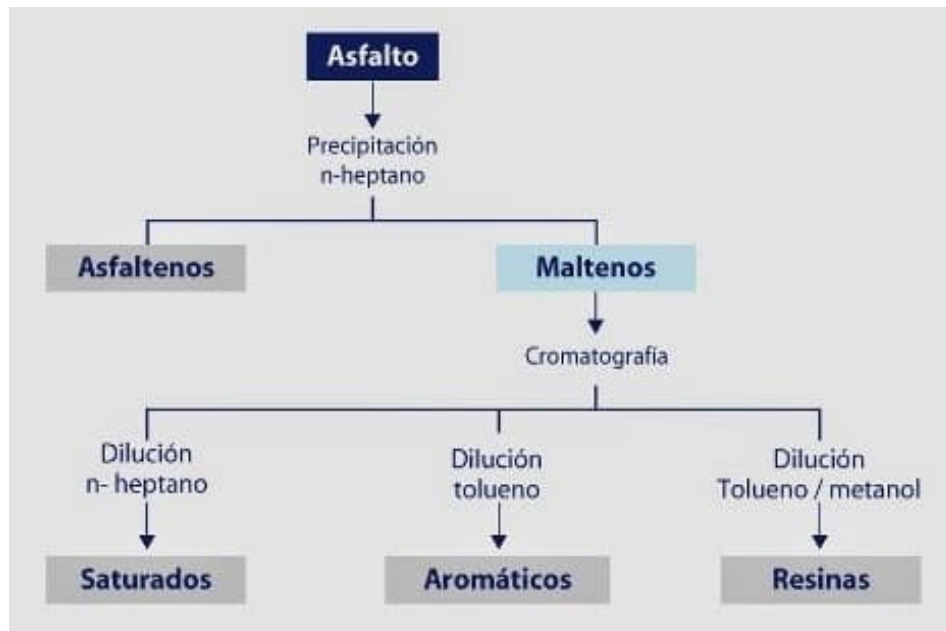


Figura 1.2 Clasificación del asfalto en presencia de n-heptano.

Asfaltenos

Los asfaltenos son aquellos que brindan al asfalto su color y dureza, proporcionándole a su vez resistencia mecánica y consistencia, es decir, al incrementar el contenido de ellos se obtiene una mezcla de mayor dureza, punto de reblandecimiento, viscosidad y de menor penetración.

Resinas

Las resinas, así como los asfaltenos, tienen un alto contenido de hidrógeno y carbono, además, contienen heteroátomos (S, O, N) en proporciones pequeñas. Son compuestos altamente polares, esta característica los hace fuertemente adhesivos y peptizantes.

Aromáticos

Los compuestos aromáticos son líquidos viscosos de color café oscuro, los cuales conforman la mayor proporción del medio de dispersión de los asfaltenos peptizados.

Básicamente, consisten en cadenas hidrocarbonadas no polares en donde prevalecen los anillos insaturados, siendo altamente capaces de disolver otros compuestos de alto peso molecular.

Saturados

Los compuestos saturados son aceites viscosos no polares, formados principalmente por compuestos alifáticos de cadenas lineales y o ramificados con peso molecular similar al de los aromáticos. Algunas de sus funciones son: disminución de la viscosidad y de la susceptibilidad térmica, aumento de la penetración, acción antioxidante, impermeabilizantes, deformación en el asfalto, etc.

1.2.2 Proceso de obtención

El asfalto es la fracción de petróleo destilada por encima de los 535°C y la que contiene compuestos químicos con pesos moleculares superiores a 600 uma. Por lo tanto, es extraído del petróleo a través de diversos procesos, como destilación, craqueo, extracción por solventes y reconstitución.

El proceso comienza con una destilación fraccionada a presión atmosférica y 300 – 350°C, donde a partir del crudo reducido se obtienen gases (propano y butano), nafta, queroseno y diésel. A continuación, el crudo reducido es sometido a una segunda destilación al vacío (10 – 100 mmHg) y 350 – 400°C, donde se obtienen varias fracciones pesadas, que son utilizadas como base en la elaboración de aceites lubricantes. Los residuos generados por el proceso de vacío poseen una elevada viscosidad y una penetración entre 10 a 500 dmm (décimas de milímetro), dependiendo del origen del crudo. Después de obtener el residuo de vacío, ocurren diversos procesos y transformaciones, como se observa en la Figura 1.3 ^[20].

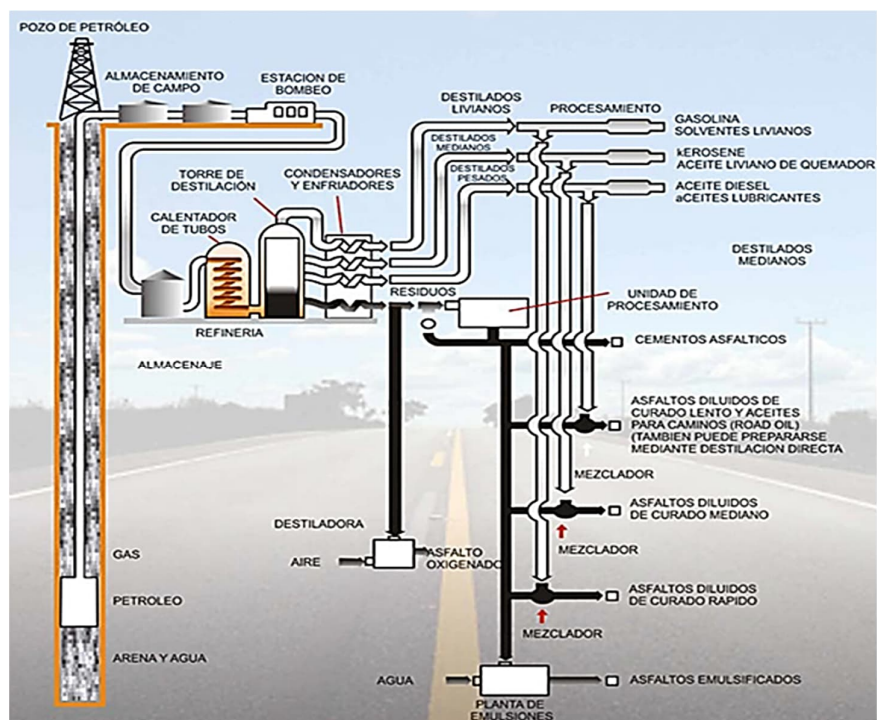


Figura 1.3 Diagrama de fabricación de los productos asfálticos.

1.2.3 Clasificación

Los materiales asfálticos se clasifican según su aplicación para uso industrial o de pavimentación, estos últimos se dividen en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se utilice para su incorporación o aplicación, como se indica en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Clasificación de los materiales asfálticos de uso en pavimentos ^[21].

Material asfáltico	Vehículo para su aplicación	Usos más comunes
Emulsión asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones.
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de subbases y bases hidráulicas.

1.3 Pavimentos

Los pavimentos son un conjunto de estratos seleccionados que absorben directamente las cargas de tránsito y las distribuyen a las formaciones subyacentes, proporcionando una superficie de rodadura que debe funcionar de manera eficiente. Estos a su vez, deben demostrar una resistencia apropiada a los efectos dañinos generados por el tránsito, el clima y el agua ^[4].

1.3.1 Pavimento flexible

El cemento asfáltico también conocido como mezcla asfáltica en caliente (HMA) o pavimento flexible. Es una mezcla de agregados gruesos, agregados finos y aglutinantes de asfalto.

La naturaleza única del cemento asfáltico es su flexibilidad bajo carga. Los agregados en la capa inferior son responsables de evitar el agrietamiento por fatiga y la deformación permanente, mientras que los agregados en la superficie gruesa son responsables de sus propiedades de fricción y durabilidad.

Este tipo de pavimento posee un bajo costo inicial y una vida útil de 10 a 15 años, su desventaja radica al requerir un mantenimiento constante para alcanzar dicha vida útil. Está conformado primordialmente por una carpeta asfáltica, una capa base, una subbase y de una subrasante como se indica en la Figura 1.4.

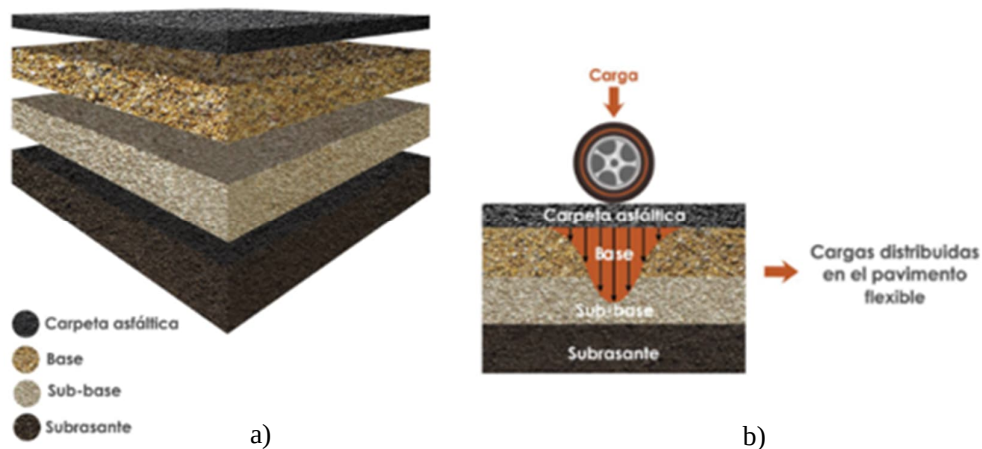


Figura 1.4 a) Estructura de un pavimento flexible. b) Distribución de cargas en un pavimento flexible.

1.3.2 Pavimento rígido

Los pavimentos rígidos están conformados por una capa de cemento Portland (PCC), una capa base o subbase y de una subrasante como se observa en la Figura 1.5, tienen un mayor costo inicial en comparación con los pavimentos flexibles, sin embargo, su vida útil es superior, la cual varía entre 20 a 40 años; el mantenimiento requerido es casi nulo y se lleva a cabo generalmente solo en las juntas de las losas.

Este tipo de pavimento tiene un alto módulo de elasticidad para distribuir la carga en un área amplia de subrasante. Las deformaciones excesivas debidas a cargas de ruedas más pesadas no son recuperables ^[22].

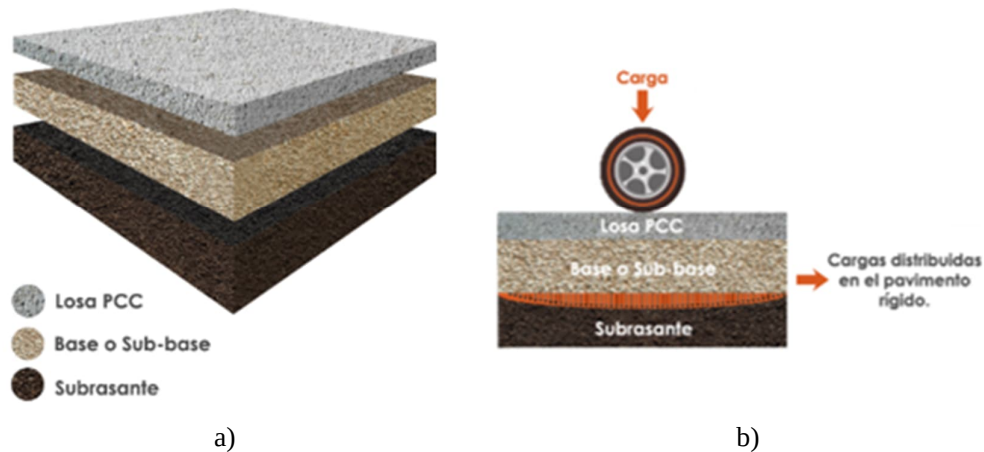


Figura 1.5 a) Estructura de un pavimento rígido. b) Distribución de cargas en un pavimento rígido.

1.3.3 Propiedades de los pavimentos

En el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras, las propiedades físicas más relevantes del asfalto son la durabilidad, la adhesión y cohesión, así como la susceptibilidad al envejecimiento, la temperatura y el endurecimiento.

Durabilidad

Mide la capacidad que tiene el asfalto de conservar sus propiedades originales en el servicio a largo plazo, es decir, cuando es sometido a procesos normales de degradación y envejecimiento. La durabilidad de los aglomerantes asfálticos depende principalmente del rendimiento del pavimento.

Adhesión y cohesión

La adhesión se refiere a la capacidad del asfalto para separarse a altas temperaturas y, después de enfriarse, adherirse a los agregados en las mezclas de pavimento, incluso en presencia de agua o durante el tránsito vehicular.

La cohesión, por otra parte, es la cualidad que tiene el asfalto para retener los materiales pétreos en un pavimento compactado y enfriado a temperatura ambiente.

La pérdida de adhesión y cohesión ocurre cuando el agua interactúa o penetra en la interfaz entre el asfalto y el agregado.

Susceptibilidad térmica

El asfalto es un aglutinante cuya viscosidad disminuye o aumenta al elevar o reducir la temperatura, respectivamente. A esta propiedad se le conoce como susceptibilidad térmica.

Para operar correctamente, el asfalto deberá poseer una fluidez adecuada a elevadas temperaturas para lograr cubrir los agregados durante el mezclado, permitiendo que estos se muevan unos con otros en el transcurso de la compactación. Posteriormente deberá tener una viscosidad apropiada para mantener adheridos los agregados a condiciones ambientales.

Envejecimiento y endurecimiento

Debido a las propiedades del asfalto, las mezclas asfálticas tienden a endurecerse durante la construcción, así como en el pavimento terminado. Este endurecimiento es ocasionado primordialmente por procesos de oxidación, que ocurren con mayor frecuencia a altas temperaturas y en capas delgadas de asfalto.

No todos los asfaltos son endurecidos a la misma velocidad cuando se calientan. Por ello, cada asfalto debe ser analizado individualmente para definir sus características de envejecimiento y así adaptar los métodos de construcción para minimizar el endurecimiento. Estas adaptaciones contemplan mezclar el asfalto con el agregado a la menor temperatura y tiempo posible ^[23].

1.4 Mezcla Asfáltica

Las mezclas asfálticas son el resultado de la unión de un agregado pétreo y un ligante asfáltico. Se elaboran en bases fijas o móviles y se trasladan al sitio de construcción, donde se extienden y comprimen. Son utilizadas en el diseño de carpetas asfálticas, espacios como pistas de aeropuertos, obras hidráulicas o para impermeabilizar obras civiles ^[19,24].

1.5 Asfalto modificado

Los asfaltos modificados son el resultado de la adición de nuevos materiales al asfalto, esto con la finalidad de mejorar sus propiedades físicas y reológicas, al reducir su susceptibilidad a la humedad, a la temperatura y a la oxidación, aumentando por su parte la adhesión con los agregados y la resistencia del asfalto ante las deformaciones permanentes y esfuerzos de tensión reiterados ^[25].

1.6 Materiales compuestos

Los materiales compuestos están conformados por dos o más materiales distintos, estos a su vez tienen una interfase discreta e identificable que los separa.

Estos tipos de materiales resultan de la necesidad de obtener materiales que posean una serie de propiedades combinadas, las cuales se encuentran difícilmente de forma individual en materiales cerámicos, plásticos o metálicos.

Todos los materiales compuestos tienen dos componentes en común: la matriz o fase continua y el refuerzo o fase discontinua, estos componentes se ilustran en la Figura 1.6.

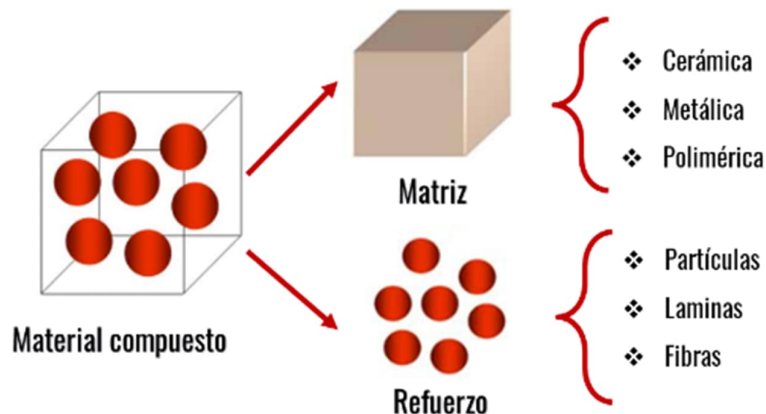


Figura 1.6 Componentes base de un material compuesto y sus tipos.

1.6.1 Componentes

Están constituidos por una matriz, un refuerzo y una interfase.

Matriz

La matriz o fase continua es aquella en donde el refuerzo queda disperso. Tanto, materiales cerámicos, metálicos o poliméricos pueden desempeñar este papel. Con exclusión de los cerámicos, el material elegido como matriz no suele ser tan rígido ni tan resistente como el material seleccionado como refuerzo.

Refuerzo

El refuerzo o fase discontinua es aquel que se le incorpora a la matriz con el fin de otorgarle al compuesto cierta propiedad que la matriz no posee. Generalmente, los refuerzos son empleados para aumentar la resistencia y rigidez mecánica, asimismo, son utilizados para mejorar el comportamiento a elevadas temperaturas o a la resistencia al desgaste.

Estos materiales pueden tener forma de partículas, láminas o fibras. El tamaño de partícula es importante, ya que, a menor tamaño, el refuerzo es más efectivo, pues se distribuye uniformemente en la matriz, en el caso de las fibras, un incremento en la relación longitud/diámetro de la fibra resulta óptimo.

Interfase

La interfase es la región que une al refuerzo y la matriz. Si la interfaz es débil, la transferencia de carga de la matriz al refuerzo no será eficiente y/o bien será la matriz la que finalmente soporte las cargas (esta fallará, debido a que no es lo suficientemente resistente), o se formarán huecos entre la matriz y el refuerzo, haciendo que la pieza se rompa.

1.6.2 Clasificación

Los materiales compuestos se clasifican según la naturaleza de la matriz:

Compuestos de matriz polimérica

Esta clase de compuestos están constituidos por un polímero como matriz y fibras con mayor frecuencia como refuerzo. Algunas de las fibras más utilizadas son las de vidrio o carbono.

Compuestos de matriz metálica

Estos compuestos están conformados por metales ligeros, tales como el aluminio como matriz y fibras de carburo de silicio como refuerzo, por ejemplo. Son empleados principalmente en la industria automotriz.

Compuestos de matriz cerámica

Estos materiales están compuestos por una matriz cerámica y un refuerzo comúnmente en forma de fibras cortas, tales como las de carburo de silicio o nitruro de boro. Son ampliamente utilizados en aplicaciones donde se requiere altas temperaturas.

Según la forma que tenga el refuerzo, los materiales compuestos se pueden clasificar de la siguiente manera:

Compuestos reforzados con partículas

Estos materiales se dividen a su vez en materiales reforzados con partículas grandes y otros consolidados por dispersión.

Los compuestos consolidados por dispersión son aquellos cuyo diámetro de partícula se encuentra entre 10 y 250 nm. Por otro lado, los compuestos reforzados con partículas grandes son aquellos en donde la interacción entre la matriz y las partículas ocurre a un nivel macroscópico.

Compuestos reforzados con fibras

La mayor parte de los materiales reforzados con fibras proporcionan una mayor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una relación resistencia – peso superior, al adicionar fibras rígidas y resistentes, no obstante, frágiles, en una matriz más dúctil. Las fibras son las encargadas de soportar la mayor parte de las fuerzas aplicadas en el material de la matriz. Estos compuestos poseen una alta resistencia a condiciones de temperatura ambiente y elevadas

[26].

1.7 Algas

Las algas son un grupo de organismos autótrofos consideradas talofitas debido a su estructura simple, con poca o nula diferenciación celular y de tejidos complejos. Taxonómicamente se dividen en tres grupos: algas verdes (Chlorophyta o clorofitas), pardas (Phaeophyta o feófitas) y rojas (Rhodophyta o rodófitas), ya que cada una de ellas poseen pigmentos que predominan unos sobre los otros. En la Tabla 1.3 se detalla los pigmentos involucrados en la coloración característica de cada grupo.

Tabla 1.3 Clasificación de las macroalgas según el predominio de sus pigmentos ^[27].

Clasificación	Nombre común	Pigmentos	Ejemplos
Chlorophyta	Algas verdes	Clorofilas a y b, xantófilas (luteína, violaxantina, neoxantina y enteroxantina)	Ulva spp, Codium spp
Phaeophyta	Algas pardas	Xantofilas (fucoxantina y flavoxantina) y clorofila a y c	Laminaria spp, Sargassum spp, Durvillaea spp
Rhodophyta	Algas rojas	Ficoeritrina, ficobilina, clorofilas a y d	Gracilaria spp, Palmaria spp, Porphyra spp

Algas verdes

Las algas verdes o clorofitas están constituidas por aproximadamente 1200 especies. Se han registrado alrededor de 500 géneros y cerca de 8000 especies divididas en 4 clases: Charophyceae, Chlorophyceae, Micromonadophyceae y Ulvophyceae. Su color verde característico es debido a una combinación de pigmentos, primordialmente clorofilas a, b y carotenoides. Sus células pueden exhibir una pared de celulosa, hemicelulosa, manosa o xilosa. Sus flagelos son lisos y uniformes en forma y tamaño. Sus cloroplastos tienen doble membrana con arreglo tilacoidal formando grana y pueden tener pirenoides con almidón ^[27,28].

Algas pardas

Las algas pardas o feófitas incluyen cerca de 2000 especies, alrededor de 250 géneros y entre 1500 a 2000 especies registradas. El color pardo, de tonalidad variable, es debido a la presencia de algunos pigmentos carotenoides (fucoxantina, por ejemplo). Son conocidas por su rápido crecimiento y gran tamaño. Morfológicamente son muy variadas, estas van desde algas filamentosas con estructuras simples hasta algas con tejidos especializados para el transporte de nutrientes dentro de la planta. Su pared celular se compone principalmente de polisacáridos sulfatados como el fucoïdan.

Algas rojas

Las algas rojas o rodófitas conforman el grupo más variado entre las algas, con cerca de 6000 especies. Se han registrado entre 500 a 600 géneros y entre 5000 a 5500 especies distribuidas en una sola clase. Su coloración parda – rojiza se debe a la presencia de biliproteínas (ficocianina y ficoeritrina fundamentalmente) las cuales permiten encubrir el color verde de la clorofila. Sus células se unen entre sí en ciertos puntos debido a una división celular inconclusa ^[27].

1.8 Sargazo

El sargazo es un grupo de macroalgas marinas del género *Sargassum*, estas poseen coloraciones pardas, negros y verdes con diferentes texturas (rizadas, laminadas o en estirpe), estos organismos a su vez pueden ocupar grandes áreas en diferentes hábitats. Algunas especies de sargazo cuentan con vesículas llenas de gas, las cuales le permiten flotar y desarrollarse en el mar. En la Figura 1.7 se detalla la estructura del sargazo. Las especies flotantes de sargazo más representativas son el *S. fluitans* y el *S. natans*, estos ejemplares se muestran en la Figura 1.8 ^[29].

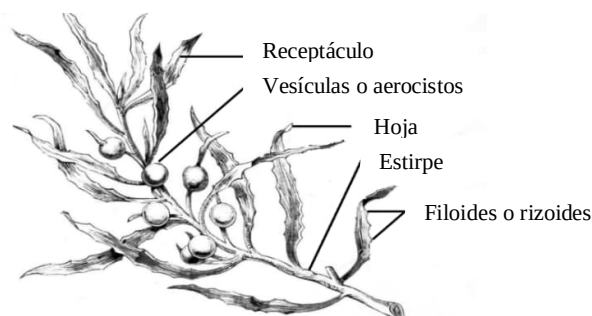


Figura 1.7 Morfología del sargazo.

1.8.1 *Sargassum natans*

El *S. natans* son plantas pelágicas que se ramifican en todas direcciones, varían en tamaño y son de color dorado a marrón oscuro. Tienen ejes lisos y hojas firmes, lineares, ligeramente cerradas, de 1.5 a 2 mm de ancho por 24 a 42 mm de largo, con dientes finos de hasta 1 mm de largo. Vena central no pronunciada. Vesículas de 3 a 4 mm de diámetro, sobre pedúnculos largos de 2 a 4 mm de diámetro, con un filoide liso y de forma aciculada, no cuentan con receptáculos.

1.8.2 *Sargassum fluitans*

El *S. fluitans* son plantas pelágicas, con tallos lisos o ligeramente espinosos de hasta 15 cm, cuentan con hojas pecioladas, gruesas y firmes, lanceoladas, ampliamente cerradas con dientes de base ancha, de hasta 4 cm de largo por 2 a 4 mm de ancho, estas van creciendo generalmente de criptostomas. Vesículas no apiculadas con formas redondas a ovaladas de 3 a 5 mm de diámetro, sobre pedúnculos de 2 a 3 mm de largo ^[30].

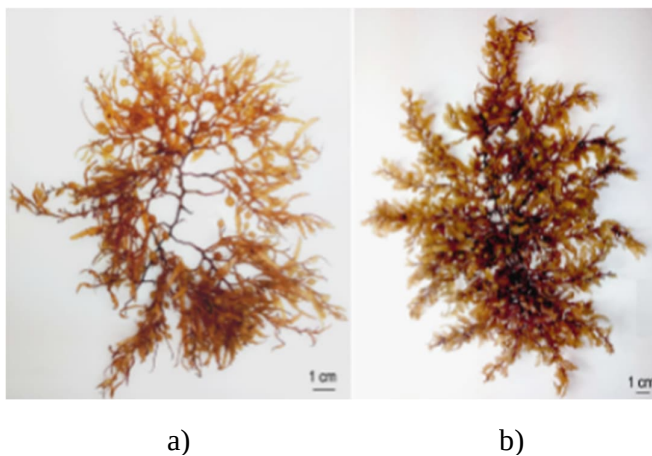


Figura 1.8 a) *Sargassum natans*, b) *Sargassum fluitans*.

1.8.3 Composición química

La constitución química del sargazo dependerá de la región en donde este se encuentre. Los componentes químicos encontrados en las especies *S. fluitans* y *S. natans* que arriban a la orilla de playa Miramar ubicada en el Golfo de México en Ciudad Madero, Tamaulipas, así como sus concentraciones, se muestran en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4 Composición química del sargazo por GC-MS ^[12].

Componente	Tiempo de retención	Área	%AR
N,N'-dimetilamina	3.34	265,674	0.52
2-metilpropanal	4.19	2,806,561	5.49
2,3-epoxibutano	4.91	1,770,658	3.46
2-hidroxipropanamida	5.71	5,749,090	11.24
3-metilbutanal	5.99	713,849	1.40
Propilenglicol	6.14	8,043,904	15.73
3-metilbutanal	7.24	906655.69	1.77
Hexanal	9.24	4797487.00	9.38
Heptanal	11.59	3227770.50	6.31
Dimetilsulfóxido	11.89	417538.41	0.82
1-(2-furanil) etanona	12.34	541736.19	1.06
2-pentilfurano	12.97	335329.13	0.66
2,2,3,3-tetrametilpentano	13.34	671151.00	1.31
Benzaldehído	13.47	608290.44	1.19
5-metil-2-furanocarboxaldehído	13.69	6973008.00	13.64
Octanal	13.81	697017.75	1.36
Ácido hexanoico	14.02	2176027.75	4.26
1-clorododecano	14.64	239440.66	0.47
Hexanal bencil trans-2-hexenil acetal	15.37	2296895.00	4.49
4-hidroxi-5-metil-3-furanona	15.69	655655.31	1.28
Nonanal	15.94	4100728.00	8.02
Ácido nonanoico	19.62	2485685.25	4.86
2-ciclohexiloctano	21.52	306052.09	0.60
Hexadecano	21.99	349758.38	0.68
	Total	51135962.53	100
%AR = Porcentaje de área relativa			

Un total de 24 componentes fueron identificados, los cuales corresponden al 100% de los volátiles extraídos por la técnica Headspace o “espacio de cabeza” de CG-MS (cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas, por sus siglas en inglés). El

componente más abundante fue el propilenglicol (15.7% peso), seguido por el 5-metil-2-furancarboxaldehído (13.64% peso) ^[12].

Asimismo, en este mismo estudio llevado a cabo por Salazar Cruz y col. (2020), realizaron un análisis estructural de las especies de sargazo que llegan a la ribera de playa Miramar ubicada en el Golfo de México en Ciudad Madero, Tamaulipas mediante la técnica FTIR.



Figura 1.9 Espectro FTIR del sargazo (alga parda).

En la Figura 1.9 se muestra el espectro de infrarrojo del sargazo, donde a 3250 cm^{-1} se observa una banda de absorción intensa relacionada con las flexiones de tipo N-H y O-H, esta señal es atribuida por la presencia de polisacáridos y aminoácidos, asociados posiblemente con el alginato, componente en mayor abundancia en las algas pardas; dicho compuesto representa alrededor del 40% peso del alga en seco y se encuentra distribuido por arreglos de celulosa que dan forma a la estructura de la pared celular del alga ^[31]. La banda pequeña situada en 2890 cm^{-1} se atribuye a vibraciones de flexión de compuestos alifáticos como $-\text{CH}_2$ y $-\text{CH}_3$. En 1620 cm^{-1} se observa una banda de absorción media relacionada a las flexiones de tipo C=O y N-H por grupos ésteres asociados con la pectina. La banda de intensidad media ubicada en 1560 cm^{-1} es ocasionada por el estiramiento de flexión C=C relacionada con la lignina presente en la estructura del sargazo. En 1250 cm^{-1} se contempla una banda de absorción débil debida a la existencia de grupos S=O asociados con compuestos sulfatados como fucanos. En la región de la huella dactilar a 1100 cm^{-1} se

observan bandas de absorción fuertes, las cuales corresponden a estiramientos del tipo C-F, relacionados con la celulosa.

Por último, la banda en 670 cm^{-1} pertenece a los enlaces del tipo C-S y C=S en modo de vibración de tensión de los compuestos sulfatados ^[32]. Este análisis realizado confirma la ausencia de arsénico en el alga que arriba a la orilla de Playa Miramar; dicho elemento nocivo fue encontrado en algas pardas de otra zona geográfica en un estudio realizado por la UNAM en 2018 ^[12].

1.9 Estireno – Butadieno – Estireno (SBS)

El SBS es un elastómero termoplástico producido a partir de la polimerización de los monómeros de estireno y butadieno. Este material se caracteriza por su dureza, por lo que es utilizado en la fabricación de diversos objetos, como cubiertas de neumáticos, suelas para zapatos y otros productos que requieren una alta durabilidad. Es un tipo de copolímero conocido como copolímero en bloque. En la Figura 1.10 se ilustra la unidad constitucional repetitiva (UCR) del SBS.

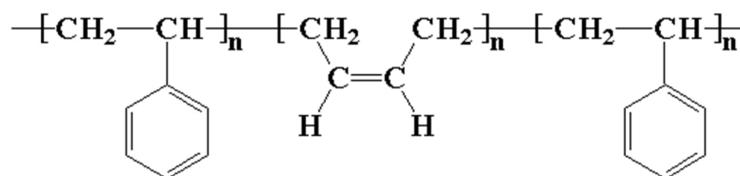


Figura 1.10 UCR del copolímero SBS.

1.9.1 Propiedades

Este copolímero combina las propiedades del poliestireno y del polibutadieno, es decir, al agregar el polibutadieno al poliestireno, este último material cambia de ser frágil y quebradizo a uno dúctil y resistente.

El proceso consiste en mezclar butadieno y estireno para luego añadirlo al reactor de polimerización, dentro de él, el caucho es vulcanizado a causa del incremento de temperatura al que es sometido el poliestireno. Como resultado, se obtiene un copolímero formado por tres bloques: uno continuo de poliestireno, otro de polibutadieno y uno último de poliestireno. La forma, estructura y tamaño de los bloques de polibutadieno influye

significativamente en las propiedades mecánicas del poliestireno, es decir, de la viscosidad y de la proporción de isómeros cis, trans y vinilo que contenga el bloque de polibutadieno (Figura 1.11) ^[33-35].

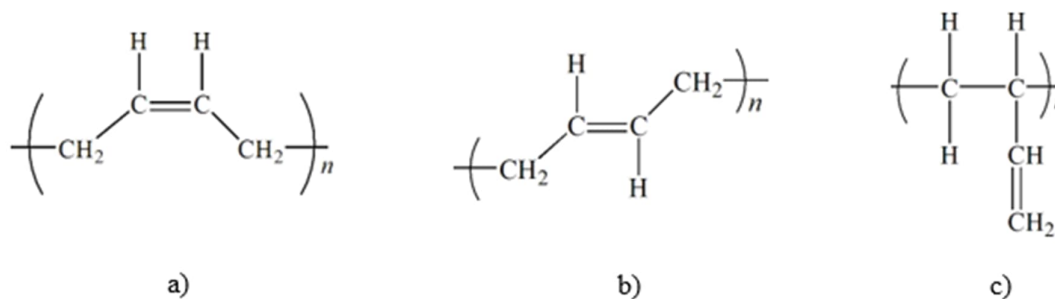


Figura 1.11 a) Polibutadieno 1,4 en configuración cis. b) Polibutadieno1,4 en configuración trans. c) Polibutadieno 1,2 (unidad vinilo).

A continuación, se detallan las propiedades de cada uno de los bloques de manera individual:

Propiedades del polibutadieno

En las polimerizaciones 1,2 y 1,4 del monómero de butadieno, se conserva un doble enlace al final de la cadena del polibutadieno que actúa como un sitio activo para llevar a cabo una reacción. Estas insaturaciones corresponden a la principal característica del polibutadieno ya que le confieren al polímero sus propiedades elásticas.

Estos dobles enlaces pueden reaccionar fácilmente entre sí o con otros materiales añadidos para formar nuevos enlaces entre las moléculas. Al aplicar un esfuerzo sobre el polibutadieno, este continúa deformándose, cuando el esfuerzo cesa, los enlaces hacen que recupere su forma original.

Propiedades del poliestireno

Las propiedades del poliestireno exhiben una amplia variación en función de su grado de cristalización y su peso molecular. A medida que disminuye el peso molecular, aumenta la fluidez y, por lo tanto, se facilita su manejo, pero al mismo tiempo se reduce su resistencia mecánica ^[35].

1.9.2 Grupo vinilo

El grupo vinilo, $-\text{CH}=\text{CH}_2$, es un grupo funcional conformado a partir de dos átomos de carbono unidos entre sí por un doble enlace y tres átomos de hidrógeno, derivados del etileno tras la pérdida de un hidrógeno. El vinilo posee una estructura de carbono que exhibe una hibridación sp^2 .

Los grupos vinilos pueden ser polimerizados a partir de un iniciador de radicales o un catalizador, lo que resulta en la formación de polímeros de vinilo. En estos materiales, los dobles enlaces presentes en los monómeros vinílicos se convierten en enlaces simples, y los distintos monómeros se unen mediante enlaces simples ^[34].

Capítulo 2. Metodología

2.1 Materiales

Para la elaboración de las mezclas asfálticas se utilizaron dos tipos de compósitos como modificadores de asfalto, ambos conformados por una matriz polimérica de SBS de estructura lineal con diferente contenido de vinilos y por partículas de sargazo de tamaño de 177 μm como refuerzo. Los copolímeros SBS empleados fueron proporcionados por la empresa Dynasol Elastómeros, estos materiales se identificaron como C1 para el de bajo contenido de vinilos (11%) y C2 para el de alto contenido de vinilos (40%). Las características de las matrices poliméricas se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características de los copolímeros SBS.

SBS	C1	C2
Nombre comercial	Calprene 501	Calprene 580
Estructura	Lineal	Lineal
Polimerización empleada	En solución	En solución
Composición butadieno/estireno (%)	69/31	69/31
Contenido de vinilos (%)	11	40

El asfalto AC-20 utilizado fue donado por la empresa Ergon Asfaltos México, la caracterización del asfalto virgen se detalla en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Propiedades del asfalto AC-20.

Parámetro		Unidades	Método	Valor
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s		dmm	ASTM D-5	66
Temperatura de reblandecimiento		°C	ASTM D-36	51.2
Viscosidad de Brookfield	135°C	cP	ASTM D-4402	565
Saturados		%	Prueba SARA	2.26
Aromáticos		%		64.42
Resinas		%		18.95
Asfaltenos		%		13.35

2.2 Preparación de las partículas de sargazo (SP)

Este proceso comenzó con la recolección del sargazo compuesto por las especies *S. fluitans* y *S. natans* que llega a la ribera de playa Miramar ubicada en el Golfo de México en Ciudad Madero, Tamaulipas. El alga fue lavada con abundante agua destilada para remover la materia orgánica ajena al espécimen de interés, así como el exceso de alcalinidad y cloruros provenientes del agua de mar; para eliminar el exceso de agua se empleó una centrífuga Max marca Betterware. Posteriormente, se llevó a secar en una estufa de convección marca red Line Binder a 60°C por 24 horas. Después, se trituro la materia seca en un molino marca BioloMix a 36,000 rpm durante 5 minutos para obtener un polvo fino. Por último, se clasificó el tamaño de partícula con un tamiz de pruebas físicas ASTM malla número 80 para conseguir un tamaño de partícula homogéneo de 177 μm . En la Figura 2.1 se muestra el proceso descrito para la obtención de las partículas de sargazo.



Figura 2.1 Diagrama de flujo para la preparación de las partículas de sargazo.

2.3 Preparación de los compósitos SBS/SP

La elaboración de los compósitos poliméricos de alto y bajo contenido de vinilos se realizaron a una concentración definida de partículas de sargazo expresada en phr (partes por cien de resina). En la Tabla 2.3 se muestra la relación de SBS y SP de los compósitos preparados.

Tabla 2.3 Matriz experimental de los compósitos SBS/SP elaborados.

Material	Formulación (phr)							
	L0	L1	L5	L10	H0	H1	H5	H10
SBS-L	100	100	100	100	0	0	0	0
SBS-H	0	0	0	0	100	100	100	100
SP	0	1	5	10	0	1	5	10

Los compósitos fueron identificados como L para el copolímero C1 y H para el copolímero C2, seguido de la concentración de SP en phr, por ejemplo, al compósito conformado por SBS de alto contenido de vinilos (40%) y 5 phr de partículas de sargazo se le identifica como H5.

Para el procesamiento de los compósitos SBS/SP se empleó una cámara de mezclado de la marca C.W. Brabender, modelo Intelli – Torque Plasti – Corder con una capacidad de hasta 60 cm³, sin embargo, solo se utilizó una cantidad de 56 g con el fin de obtener un mejor mezclado de los materiales. Las condiciones de temperatura, velocidad y tiempo para el procesamiento de los materiales se describen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Condiciones de procesamiento de los compósitos SBS/SP.

Temperatura (°C)	Velocidad (rpm)	Tiempo (min)
130	30	5
	30 a 60	1
	60	9
Total		15

El orden de adición de los materiales a la cámara de mezclado comenzó con la mitad del copolímero, enseguida se agregó la cantidad total de las partículas de sargazo y, por último, se añadió el copolímero restante.

Los compósitos SBS/SP preparados fueron moldeados por termocompresión utilizando una prensa hidráulica marca Dake y un molde delgado en forma de marco rectangular. Las condiciones de temperatura, presión y tiempo de prensado de los materiales se describen en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Condiciones de prensado de los compósitos SBS/SP.

Temperatura (°C)	Carga (ton)	Tiempo (min)
170	0	5
	5	2
	10	2
	15	1
Total		10

En la Figura 2.2 se observa el diagrama de flujo para llevar a cabo la preparación de los compósitos SBS/SP hasta su respectivo moldeo.



Figura 2.2 Diagrama de flujo para la preparación de los compósitos SBS/SP.

2.4 Preparación de las mezclas asfálticas modificadas

Las mezclas asfálticas se prepararon a una concentración de modificador del 1, 2 y 3% respecto al peso total del asfalto, se elaboraron 18 mezclas modificadas con los compósitos SBS/SP y 2 mezclas modificadas únicamente con los copolímeros C1 y C2, se consideró también la muestra de asfalto virgen (VA), dando así un total de 21 mezclas asfálticas evaluadas. En la Tabla 2.6 se describe la relación de asfalto y modificador utilizado en cada una de las mezclas asfálticas elaboradas.

Tabla 2.6 Matriz experimental de las mezclas asfálticas preparadas.

Concentración de modificador en el asfalto (% peso)	Tipo de modificador							
	L0	L1	L5	L10	H0	H1	H5	H10
0	VA							
1	-	L1-1	L5-1	L10-1	-	H1-1	H5-1	H10-1
2	-	L1-2	L5-2	L10-2	-	H1-2	H5-2	H10-2
3	L0-3	L1-3	L5-3	L10-3	H0-3	H1-3	H5-3	H10-3

Las mezclas asfálticas fueron identificadas de acuerdo con el tipo de modificador utilizado (L0, L1, L5, L10, H0, H1, H5 o H10), seguido de la concentración del modificador en el asfalto en % peso (1, 2 o 3), por ejemplo, la mezcla asfáltica modificada con el compósito L10 al 2% peso en el asfalto se le identifica como L10-2.

Los agentes modificadores fueron cortados en partes pequeñas con el propósito de aumentar el área superficial, mejorando así el mezclado y reduciendo el tiempo de dispersión del modificador en el asfalto.

El proceso de mezclado se llevó a cabo en un agitador mecánico de la marca IKA, modelo RW16, compuesto por un eje vertical que posee en su extremo inferior unas paletas tipo hélice, las cuales permiten que el asfalto fluya en dirección de espiral vertical. Se utilizó, además, un sistema de calentamiento, el cual consiste en un bloque de acero inoxidable de 16 x 16 x 14 cm, con un pozo de 8.5 cm de diámetro y 6 cm de profundidad en el centro, conectado a su vez a un controlador de la marca Yokogawa, modelo UT14E y a un termopar tipo K. Como reactor se dispuso de una lata de fierro con capacidad de 500 ml. En la Figura 2.3 se muestra el sistema descrito.



Figura 2.3 Equipo de calentamiento y mezclado.

El proceso de elaboración de las mezclas modificadas inició con el precalentamiento del bloque metálico durante una hora a 180°C, después se introdujo la lata con el asfalto por un periodo de 30 min a 180°C para fundir el material, por último, se adicionó el agente modificador de acuerdo con los diferentes porcentajes establecidos en la matriz experimental. Todas las preparaciones se llevaron a cabo bajo el procedimiento de mezclado en caliente a 180°C, utilizando agitación mecánica a una velocidad de 1500 rpm durante 120 min. Estas condiciones de operación fueron establecidas a partir de estudios previos ^[4].

Al finalizar el tiempo de mezclado, se filtraron todas las mezclas modificadas en caliente a través de un colador comercial de cocina de acero inoxidable, esto con el propósito de conseguir una mezcla lo más homogénea posible.

2.5 Técnicas de caracterización

2.5.1 Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica, también conocida como viscosidad rotacional, es una medida de la resistencia que un fluido presenta al fluir debido a la fricción entre sus moléculas. Esta propiedad se determina midiendo el torque necesario para hacer girar un husillo cilíndrico sumergido en el fluido a una temperatura y velocidad rotacional constantes.

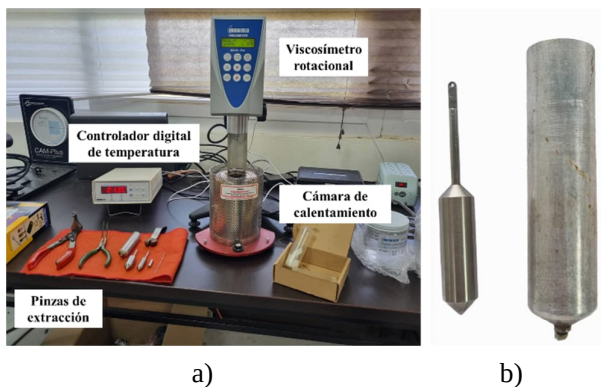


Figura 2.4 a) Equipo utilizado para la medición de la viscosidad dinámica de las muestras asfálticas. b) Spindle 27 y copa porta muestra empleados en la determinación de dicha propiedad.

Esta caracterización fue evaluada en un viscosímetro rotacional de la marca Brookfield, modelo DV-II+ Pro, cuyos accesorios incluyen una cámara de calentamiento (Thermosel) y un controlador de temperatura. En la Figura 2.4 se observa los componentes del viscosímetro Brookfield utilizado, así como sus accesorios.

Se realizaron mediciones de esta propiedad a 135°C, 160°C y 190°C, tomando como referencia el método ASTM D4402. Las condiciones de operación que se detallan a continuación se establecieron de acuerdo con la norma mencionada.

La geometría sugerida por el método se basa en las siguientes consideraciones:

- Asfaltos no modificados a temperatura $\geq 135^{\circ}\text{C}$: spindle 21.
- Asfaltos modificados muy viscosos a temperatura $\geq 135^{\circ}\text{C}$: spindle 27.

El tamaño de muestra recomendado para cada tipo de husillo es:

- Para el spindle 21: 8.5 g.
- Para el spindle 27: 10.5 g.

Con base en estas consideraciones y en estudios previos, se decidió utilizar el spindle 27 con un tamaño de muestra de 10.5 g para realizar el estudio de esta propiedad en todas las mezclas modificadas incluida la muestra de asfalto virgen.

El procedimiento empleado para llevar a cabo esta prueba consistió en fijar la temperatura de análisis en el controlador y esperar a que el sistema de calentamiento alcanzara dicho valor. Una vez estabilizada la temperatura, se introdujo la copa de acero inoxidable que contenía la muestra, dentro del Thermosel, asegurándose de fijarla correctamente. La muestra fue calentada durante 30 min. Posteriormente, se insertó el husillo dentro de la copa y se ambientó durante 10 min. Cumplido este periodo se iniciaron las mediciones a temperaturas de 135°C, 160°C y 190°C, variando las velocidades angulares a 5, 10, 20, 30, 50, 60 y 100 rpm. Entre cada temperatura de análisis, transcurrió un periodo de 15 min a la temperatura del ensayo, con el propósito de evitar un gradiente de temperatura en el sistema. Las lecturas de esta propiedad se recopilaron en un lapso de 60 s entre cada velocidad angular analizada a las diferentes temperaturas, lo que permitió estandarizar las mediciones y estabilizar la viscosidad de la mezcla.

2.5.2 Punto de reblandecimiento (análisis Ring and Ball)

El punto de reblandecimiento es una medida de la susceptibilidad térmica de los materiales asfálticos. Esta técnica consiste en medir la temperatura a la cual una bola de acero de cierto

peso penetra una distancia específica en la superficie de un anillo relleno del material asfáltico, bajo condiciones de carga y temperatura controladas.

El análisis de esta prueba se realizó de acuerdo con el método ASTM D36. Los materiales requeridos para llevar a cabo el ensayo se enlistan a continuación:

- Un anillo de bronce de 5/8" de diámetro interior y 1/4" de altura.
- Una esfera de acero de 3/8" de diámetro y con peso entre 3.45 g y 3.55 g.
- Un recipiente de vidrio que pueda ser calentado (vaso de precipitado de 1L).
- Un termómetro normalizado graduado.
- Glicerina grado USP.

El proceso de esta prueba consistió inicialmente en rellenar y enrasar dos anillos de bronce con la muestra asfáltica. Posteriormente, fueron situados en la estructura de medición e introducidos dentro del vaso de precipitado relleno con 900 ml de glicerina. La temperatura inicial requerida en el sistema es de 30°C, la cual se mantuvo estable durante 15 minutos para asegurar que la muestra junto con la estructura y las esferas de acero se encontraran a la misma temperatura. Finalmente, las esferas fueron colocadas sobre los anillos, y se inició la prueba al someter al sistema bajo calentamiento a razón de 5°C/min. El ensayo concluye cuando la esfera penetra la muestra asfáltica y entra en contacto con la placa inferior de la estructura, inmediatamente se registra la temperatura de este suceso y se reporta el promedio de las mediciones realizadas en los dos anillos. En la Figura 2.5 se observa el proceso de medición descrito para la determinación del punto de reblandecimiento.



Inicio de la prueba

Fin de la prueba

Figura 2.5 Análisis Ring and Ball.

2.5.3 Separación de fases

La prueba de separación de fases proporciona información acerca de la estabilidad al almacenamiento a altas y bajas temperaturas de los asfaltos modificados, es decir, mide la compatibilidad entre el asfalto y los agentes modificadores después de haber sido sometido a condiciones extremas de temperatura por varios días.

Este ensayo (Figura 2.6) se realizó conforme a la norma ASTM D5892, la cual indica que el asfalto modificado debe ser calentado hasta alcanzar su fundición, para después verter 50 g de la muestra asfáltica en un tubo colapsable de aluminio, mismo que debe ser sellado y colocado siempre en posición vertical (Figura 2.6 – 1). A continuación, el tubo es introducido en una estufa a 163°C por un periodo de 48 h (Figura 2.6 – 2). Al finalizar el periodo de calentamiento, el tubo es retirado de la estufa e introducido inmediatamente en un baño de agua fría por debajo de 0°C (Figura 2.6 – 3). Una vez solidificada la muestra se lleva al congelador a -7°C por un periodo mínimo de 4 h (Figura 2.6 – 4). Posteriormente, se extrae el tubo del congelador y se divide en tres partes iguales; la sección de en medio se descarta, mientras que las secciones inferior y superior se funden por separado en una estufa a 163°C para ser evaluadas a partir de un análisis Ring and Ball (Figura 2.6 – 5, 6 y 7). Por último, se reportó y comparó el punto de reblandecimiento de las secciones inferior y superior; si la diferencia de las temperaturas es menor o igual a 3°C, la muestra posee buena estabilidad al almacenamiento a altas temperaturas, de lo contrario es clasificada como inestable [36].



Figura 2.6 Proceso de la prueba de separación de fases.

2.5.4 Penetración

La prueba de penetración permite determinar la dureza de materiales asfálticos sólidos y semisólidos. Este ensayo se utiliza como una medida de consistencia; valores altos de penetración indican consistencias blandas, mientras que valores bajos de penetración indican consistencias más duras.

La medición de esta propiedad se llevó a cabo con el apoyo de la empresa Dynasol Elastómeros, en un penetrómetro digital de la marca Koehler, modelo K95500 (Figura 2.7 – a), según el método ASTM D5. La metodología consiste en medir la profundidad, reportada en décimas de milímetro (dmm), a la cual una aguja estandarizada, es capaz de penetrar verticalmente la muestra asfáltica bajo condiciones controladas de temperatura, carga y tiempo. En conformidad con el método, se empleó una carga de 100 g a una temperatura de 25°C por un periodo de 5 s (Figura 2.7 – b) ^[37]. Cada una de las muestras asfálticas fue analizada por triplicado, el resultado final es el promedio de cada una de las mediciones.

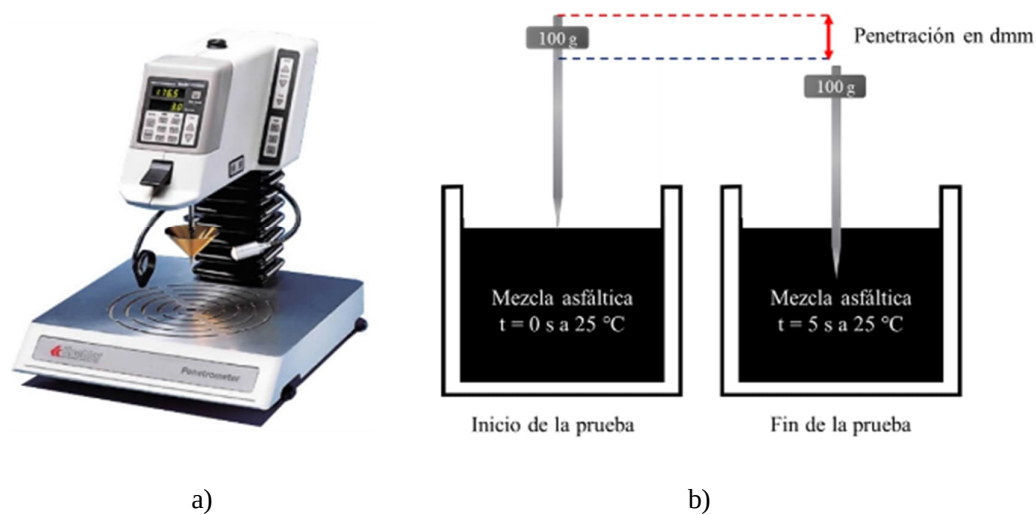


Figura 2.7 a) Penetrómetro digital Koehler K95500. b) Esquema del análisis de penetración.

El índice de penetración, también conocido como índice de susceptibilidad térmica (IP), es un parámetro obtenido a partir la ecuación 2.1, el cual relaciona la temperatura de reblandecimiento y el valor de penetración del asfalto ^[38].

$$IP = \frac{1952 - 500 \log(P) - 20 T_R}{50 \log(P) - T_R - 120} \quad (2.1)$$

En donde:

IP = Índice de penetración, varía entre -3 y 7.

P = Penetración en dmm, de acuerdo con el método ASTM D5.

T_R = Temperatura de reblandecimiento en °C, conforme a la norma ASTM D36.

Los ligantes asfálticos con un bajo IP presentan un comportamiento newtoniano, por otra parte, los asfaltos con un alto IP exhiben un comportamiento de flujo no newtoniano con cierta elasticidad y tixotropía ^[39]. En términos de la sensibilidad a la temperatura, el índice de penetración oscila desde -3 para asfaltos altamente susceptibles a la temperatura hasta +7 para aquellos que son pocos susceptibles térmicamente. Para aplicaciones viales el IP debe oscilar entre -2 y +2 ^[40].

2.5.5 Microscopía fluorescente

La microscopía fluorescente es una técnica óptica que utiliza la fluorescencia para determinar la afinidad y el grado de dispersión entre los constituyentes de las mezclas modificadas.

La morfología de las mezclas fue analizada en un microscopio de la marca Carl Zeiss, modelo Axio Lab A1, óptica: 40x (Figura 2.8). El equipo emite una luz de una longitud de onda determinada que es absorbida por la muestra asfáltica generándose en cuestión de nanosegundos la emisión de luz fluorescente provocada por la excitación de las moléculas de la fase rica en polímero, posteriormente el equipo separa la luz fluorescente emitida que es mucho más débil que la proveniente de la fuente original. Como resultado, las partes fluorescentes del espécimen resplandecen sobre un fondo oscuro, lo que permite su detección ^[41].



Figura 2.8 Microscopio óptico Carl Zeiss Axio Lab A1.

2.5.6 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

La espectroscopía FTIR proporciona información acerca de la estructura molecular de un compuesto orgánico, es decir, identifica los grupos funcionales presentes en el espécimen.

Las muestras fueron analizadas en un espectrofotómetro de la marca Perkin Elmer, modelo Spectrum 100 (Figura 2.9), utilizando la técnica de drop – casting, la cual requiere de una ventana de bromuro de potasio (KBr). El asfalto virgen, las mezclas modificadas y los copolímeros C1 y C2 fueron disueltos en tolueno a una concentración de 10% p/v. Se depositó una pequeña gota de la solución sobre la ventana de KBr; una vez volatilizado el solvente, se colocó la ventana en el portamuestra del equipo para ser analizada. Los espectros de todas las muestras se obtuvieron en porcentaje de transmitancia en un intervalo espectral de 4000 a 450 cm^{-1} a través de 12 barridos con una resolución de 4 cm^{-1} .



Figura 2.9 Espectrofotómetro FTIR Perkin Elmer Spectrum 100.

2.5.7 Reología

El reómetro de corte dinámico (DSR) es un instrumento utilizado en el análisis reológico de aglutinantes asfálticos a temperaturas de servicio altas e intermedias. Mide el comportamiento viscoso y elástico del material, proporcionando información acerca de sus propiedades reológicas a una frecuencia y temperatura específica, bajo un esfuerzo o deformación tal que se encuentre dentro de la región viscoelástica lineal del asfalto.

La medición de las propiedades reológicas de un material líquido y fundido requiere de una geometría de tipo cono – plato o una de tipo platos paralelos, el uso de una u otra dependerá de la viscosidad de la muestra a analizar, es decir, para materiales muy fluidos se recomienda utilizar una geometría de cono – plato, mientras que para sustancias más viscosas se sugiere el uso de la geometría de platos paralelos ^[42].

El factor de ahuellamiento ($G^*/\sin \delta$) es utilizado para determinar la temperatura de falla, según lo establecido por el programa estratégico de investigación en carreteras (SHRP, por sus siglas en inglés). Este parámetro está relacionado a la capacidad del asfalto para resistir deformaciones permanentes cuando es empleado en aplicaciones viales; la temperatura de falla (T_{SHRP}) es aquella a la cual el factor $G^*/\sin \delta$ es igual a 1 kPa bajo una frecuencia de 10 rad/s la cual simula el efecto de un vehículo transitando a 90 km/h ^[43].

Los parámetros de módulo complejo (G^*), módulo viscoso o de pérdida (G''), módulo elástico o de almacenamiento (G'), ángulo de fase (δ) y el factor de ahuellamiento ($G^*/\sin \delta$) de las mezclas modificadas, fueron determinados con el apoyo de la empresa Dynasol Elastómeros en un DSR de la marca TA Instruments, modelo Discovery HR-3 (Figura 2.10), con una geometría tipo plato paralelo de 25 mm y un gap de 1 mm (distancia entre la geometría y el plato fijo) conforme a los métodos AASHTO T315 y ASTM D7552-09 ^[44].

La prueba se llevó a cabo mediante un barrido de temperatura a una frecuencia angular de 10 rad/s, en un intervalo de temperaturas de 70°C hasta 88°C. De acuerdo con la metodología de referencia, se estableció un valor de 10% de deformación y saltos de 6°C entre las lecturas ^[45].



Figura 2.10 DSR TA Instruments Discovery HR-3.

Capítulo 3. Discusión de resultados

3.1 Viscosidad dinámica

La viscosidad es una propiedad física que describe la resistencia al flujo de los materiales, ocasionada por la fricción interna de las moléculas del fluido. Esta propiedad fue evaluada en el asfalto virgen y en las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos SBS/SP a las temperaturas de 135°C, 160°C y 190°C a diferentes velocidades de corte.

Efecto newtoniano en la viscosidad dinámica

El análisis del comportamiento newtoniano de los materiales está enfocado en evaluar la tendencia de la viscosidad en función de la velocidad de corte, se observa un comportamiento similar en todas las temperaturas analizadas, sin embargo, a altas y bajas temperaturas, el comportamiento de la viscosidad a bajas velocidades de corte se presenta un poco inestable, debido principalmente a las características intrínsecas de la muestra, por lo que se decide enfocar el análisis de este comportamiento a la temperatura de 160°C, en donde la viscosidad se presenta de manera continua en todo el rango de la velocidad de corte. En el Anexo A se muestran los gráficos de los resultados a las temperaturas de 135°C y 190°C.

En la Figura 3.1 se observa el comportamiento de la viscosidad de las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos SBS/SP de bajo contenido de vinilos (SBS-L/SP), así como las modificadas con los compósitos de alto contenido de vinilos (SBS-H/SP), ambas al 3% con respecto al peso total del asfalto y a una temperatura de 160°C.

Los resultados obtenidos de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-L/SP (Figura 3.1 – a) muestran un adelgazamiento de la viscosidad a velocidades de corte bajas. A partir de un gradiente de velocidad intermedio se presenta un comportamiento newtoniano en la viscosidad de los materiales debido a la estabilización del modificador en el asfalto. La incorporación de los modificadores en el ligante asfáltico genera un aumento considerable de la viscosidad con respecto al asfalto virgen, no así con la referencia, siendo esta la mezcla L0-3, la cual presenta mayor viscosidad; por debajo de ella se encuentran las mezclas L1-3, L5-3 y L10-3, cuyas viscosidades aumentan ligeramente a medida que incrementa la concentración de partículas de sargazo en el compósito. La disminución de la viscosidad de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-L/SP con respecto a la referencia puede estar asociada con el alto contenido de propilenglicol presente en la composición química

del sargazo determinado por Salazar Cruz y col. (2020); de acuerdo con la teoría, este componente es ampliamente utilizado como agente plastificante ^[12].

Por otra parte, la tendencia de la viscosidad de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP (Figura 3.1 – b) es similar al presentado por los asfaltos modificados con los compósitos SBS-L/SP en cuestión del efecto newtoniano a partir de velocidades de corte intermedias y en el aumento gradual de la viscosidad de las mezclas H1-3, H5-3 y H10-3 a medida que incrementa la concentración de sargazo en el compósito. No obstante, para este caso, la mezcla de referencia, H0-3, se encuentra por debajo de las mezclas H1-3, H5-3 y H10-3; este fenómeno puede estar relacionado con la adición de las partículas de sargazo, aunado a la estructura molecular del SBS, ya que un aumento en el contenido de vinilos implica espacios intermoleculares más grandes, lo cual genera una mayor resistencia en el deslizamiento de las cadenas poliméricas y, por lo tanto, una mayor viscosidad.

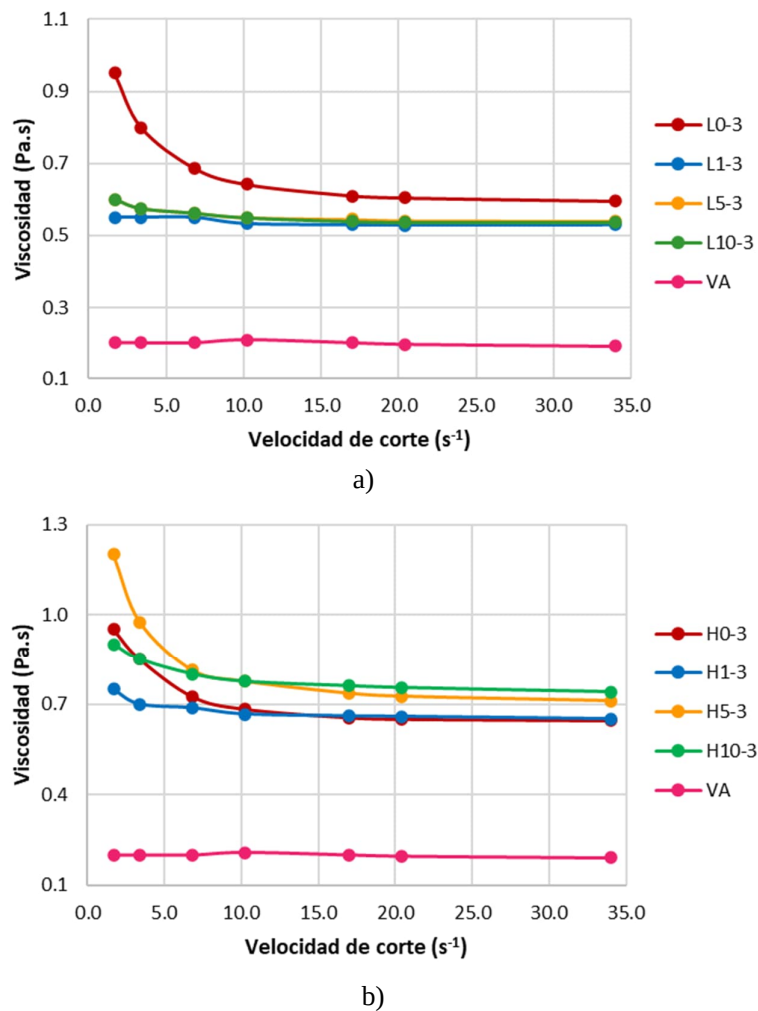


Figura 3.1 Viscosidad a 160°C de las mezclas modificadas al 3% con los compósitos: a) SBS-L/SP, b) SBS-H/SP.

Efecto de la concentración vs temperatura

El análisis del efecto de la concentración con respecto a la temperatura en función de la viscosidad de los materiales fue estudiado mediante el uso de la ecuación de Arrhenius (ecuación 3.1), la cual permite representar el comportamiento viscoso de las mezclas modificadas a una velocidad de corte determinada bajo la influencia de la temperatura. A partir de la recomendación del método ASTM D4402 para el análisis de viscosidad, aunado al comportamiento de flujo de tipo newtoniano de las mezclas a esta velocidad, se estableció un gradiente de velocidad de 20 rpm para el estudio de todas las mezclas asfálticas.

$$\eta = \eta_0 e^{\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \quad (3.1)$$

En donde:

η = Viscosidad del material.

η_0 = Factor pre exponencial.

E_a = Energía de activación de flujo, en Kcal/mol.

R = Constante universal de los gases, en Kcal/mol °K.

T = Temperatura, en °K.

e = Número de Euler.

La estimación de los parámetros η_0 y E_a son obtenidos a partir de la linealización de la ecuación 3.1, la cual se expresa de la siguiente manera (ecuación 3.2):

$$\ln \eta = \left(\frac{E_a}{R}\right) \frac{1}{T} + \ln \eta_0 \quad (3.2)$$

Para obtener los valores estimados de dichos factores se elaboró un gráfico en el que se compara el logaritmo natural de la viscosidad experimental del material asfáltico contra el inverso de la temperatura ($1/T$) en $^{\circ}\text{K}^{-1}$. La linealización de los valores experimentales de viscosidad se realizó mediante el uso del método de mínimos cuadrados. A partir de la pendiente (E_a/R) de la recta formada es posible determinar la energía de activación de las mezclas asfálticas, asimismo, el parámetro η_0 es calculado a partir de la ordena al origen ($\ln \eta_0$) de la recta.

El comportamiento viscoso de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP a diferentes concentraciones de modificador en el asfalto con respecto a la temperatura, se muestra en la Figura 3.2.

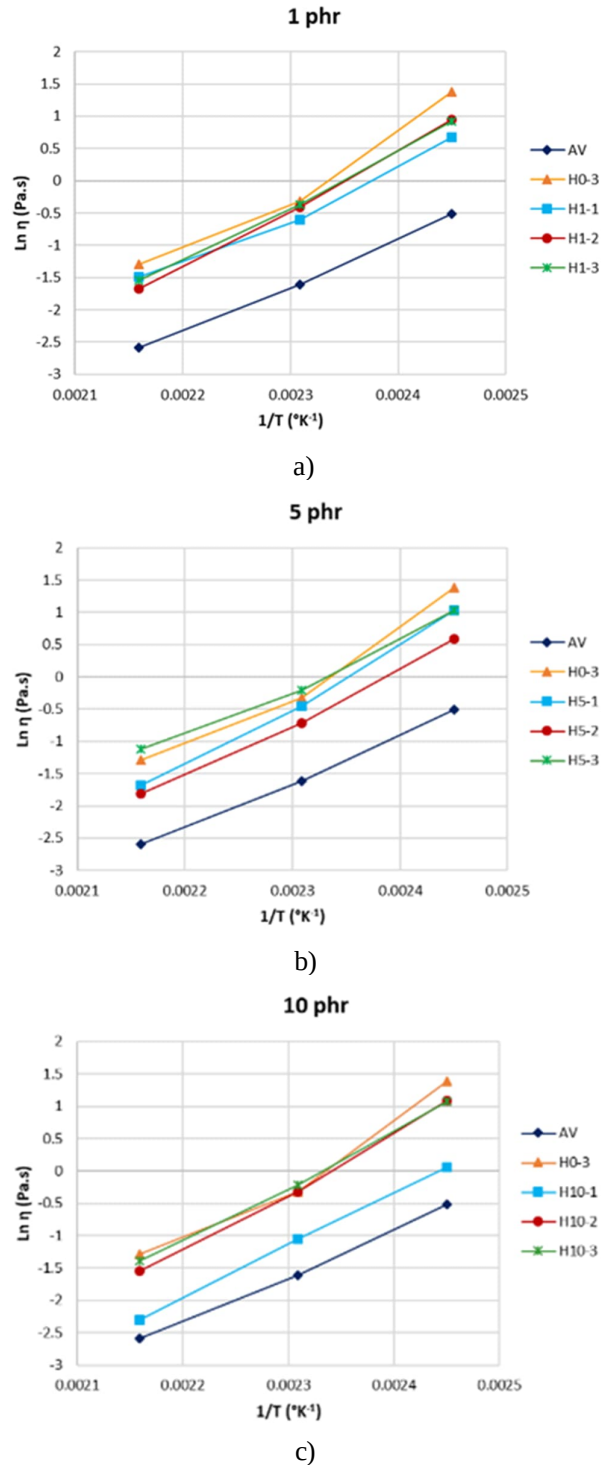


Figura 3.2 Efecto de la concentración de modificador y de la temperatura en la viscosidad de las mezclas modificadas con los compósitos: a) H1, b) H5, c) H10.

En todas las mezclas asfálticas evaluadas en la Figura 3.2, se observa un comportamiento lineal de la viscosidad con respecto al cambio de temperatura. Asimismo, en los asfaltos modificados con los compósitos H1 y H10 (Figura 3.2 – a y Figura 3.2 – c), se presenta un aumento de la viscosidad en cada una de las temperaturas a medida que aumenta la concentración de estos modificadores en el asfalto, siendo las mezclas modificadas al 1% peso (H1-1 y H10-1) y la muestra de referencia al 3% peso (H0-3) las de menor y mayor viscosidad, respectivamente. Por otra parte, las mezclas modificadas con el compósito H5 (Figura 3.2 – b) exhiben un comportamiento viscoso diferenciado al de las Figuras 3.2 – a y Figura 3.2 – c, donde a partir de la incorporación de un 3% peso de este material en el rango de temperaturas intermedias a altas se genera un valor de viscosidad superior al de la referencia (H0-3); este fenómeno permite inferir que existe un límite en la adición del aditivo en el compósito al presentar un comportamiento decreciente en la viscosidad de las mezclas asfálticas al ser modificadas con el compósito de mayor proporción de sargazo (H10).

Por otro lado, en la Figura 3.3 se ilustra el comportamiento de la viscosidad de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-L/SP a diferentes concentraciones de modificador en el asfalto con respecto a la temperatura.

Los resultados de todas las muestras analizadas en la Figura 3.3 revelan un comportamiento viscoso similar al presentado por las muestras estudiadas en la Figura 3.2, el cual se mantiene lineal en relación con el cambio de temperatura. Además, se observa que la muestra de referencia, L0-3, posee el mayor valor de viscosidad registrado en comparación con los datos obtenidos de los asfaltos modificados con los compósitos L1, L5 y L10. Las mezclas modificadas con los compósitos L5 y L10 (Figura 3.3 – b y Figura 3.3 – c) exhiben una tendencia análoga a las muestras modificadas con los compósitos H1 y H10 (Figura 3.2 – a y Figura 3.2 – c), es decir, el valor de la viscosidad de las mezclas es proporcional a la concentración de modificador presente en el asfalto en cada una de las temperaturas evaluadas. En cambio, las mezclas modificadas con el compósito L1 (Figura 3.3 – a) para cada una de las temperaturas estudiadas, indican un incremento de la viscosidad al disminuir la proporción de modificador disuelto en el asfalto, este comportamiento está limitado a una concentración del 2% peso de modificador, ya que a partir de la adición de un 3% peso de aditivo en el asfalto, el valor de la viscosidad de esta mezcla (L1-3), supera a los valores obtenidos por las mezclas L1-1 y L1-2. Este efecto es homólogo al presentado por las muestras modificadas con el compósito H5 (Figura 3.2 – b).

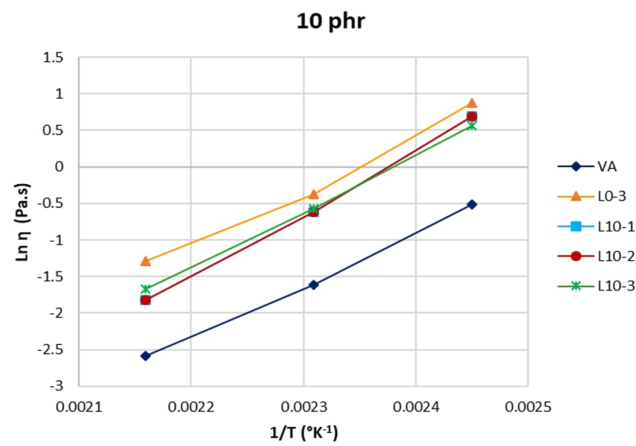
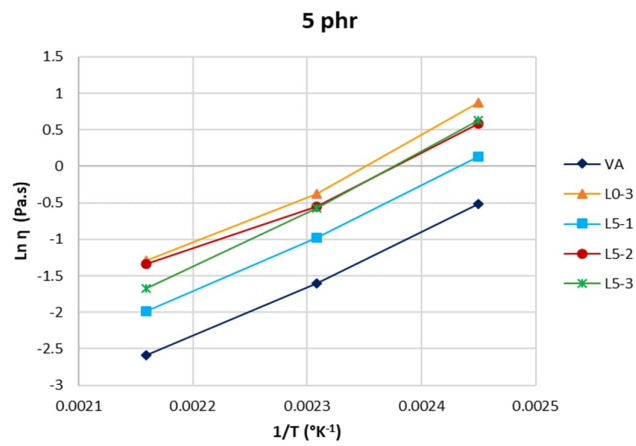
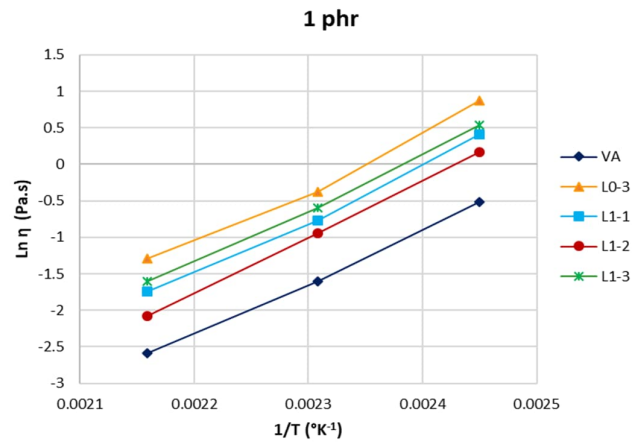


Figura 3.3 Efecto de la concentración de modificador y de la temperatura en la viscosidad de las mezclas modificadas con los compósitos: a) L1, b) L5, c) L10.

La incorporación de los modificadores en el asfalto generó un incremento considerable de la viscosidad en comparación con el valor registrado por el asfalto virgen, lo cual se traduce a una mayor resistencia a las deformaciones permanentes. No obstante, las mezclas modificadas únicamente con los polímeros L0 y H0, superan el valor máximo permisible de viscosidad (3000 cP a 135°C) estipulado en las especificaciones SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) para asfaltos modificados de alto desempeño ^[46]; los resultados indican que la adición de partículas de sargazo en los copolímeros C1 y C2 (compósitos SBS-L/SP y SBS-H/SP) al ser empleados como modificadores asfálticos, mejoran el valor de la viscosidad, sin llegar a superar el valor de 3000 cP a una temperatura de 135°C. Los valores de viscosidad obtenidos por las mezclas modificadas con los compósitos SBS-L/SP y SBS-H/SP en cada una de las temperaturas analizadas, son ligeramente inferiores a las muestras de referencia (L0-3 y H0-3) a excepción de la mezcla H5-3, la cual posee una viscosidad mayor a la mezcla de referencia (H0-3) a una temperatura mayor o igual que 160°C.

La proporción de sargazo en el compósito resulta ser un factor importante en la viscosidad de las mezclas asfálticas bajo estudio al ser modificadas con estos materiales; una mayor proporción de partículas de sargazo en el compósito genera una mayor viscosidad debido a la gran cantidad de alginatos y fucoïdan presentes en la composición de las algas pardas (Rioux y col., 2007) ^[47]. Por otro lado, un aumento en el contenido de vinilos en la estructura del SBS implica un ligero incremento en la viscosidad de las mezclas asfálticas estudiadas.

Efecto de la concentración vs energía de activación

La energía de activación en los asfaltos es una variable significativa por considerar en el diseño y construcción de carreteras, este parámetro indica la cantidad mínima de energía requerida por las moléculas del asfalto para que estas puedan superar una barrera de energía y comenzar a fluir. La temperatura es proporcional a la energía de activación, es decir, un incremento en la temperatura implica un aumento de la energía cinética de las moléculas del asfalto, permitiendo así que las moléculas se muevan con mayor libertad y, por ende, la viscosidad del asfalto disminuya ^[48]. En 1936, Eyring modeló el concepto de una barrera de energía para la activación de flujo de un líquido. Cuando un material líquido fluye, las capas de moléculas que conforman al líquido se desplazan unas sobre otras, este deslizamiento, aunado a las fuerzas intermoleculares genera una resistencia al flujo. El estudio realizado

por Eyring permite modelar la relación entre la viscosidad y la temperatura de los asfaltos, a partir de la ecuación de Arrhenius ^[49].

La Tabla 3.1 muestra los parámetros estimados de energía de activación (E_a) y factor pre exponencial (η_0), provenientes del modelo de Arrhenius. Asimismo, se incluyen los valores de los coeficientes de correlación (R^2) entre las variables $\ln \eta$ (Pa.s) y $1/T$ (°K), los cuales demostraron poseer una relación lineal.

Tabla 3.1 Parámetros estimados del modelo de Arrhenius de las mezclas asfálticas analizadas.

Identificación de la muestra	E_a (kJ/mol)	η_0	R^2
VA	59.3708	1.4662E-08	0.9976
H0-3	76.1061	6.2893E-10	0.9703
H1-1	61.5897	2.3719E-08	0.9868
H1-2	74.8133	6.6516E-10	0.9986
H1-3	70.3880	2.3733E-09	0.9981
H5-1	77.0322	3.6432E-10	0.9951
H5-2	68.6430	3.5955E-08	0.9896
H5-3	61.4334	2.8130E-09	0.9957
H10-1	67.5597	2.4285E-09	0.9997
H10-2	75.3396	6.4808E-10	0.9968
H10-3	70.3514	2.8074E-09	0.9977
L0-3	61.7992	2.7612E-08	0.9890
L1-1	61.5631	1.9054E-08	0.9947
L1-2	64.0148	7.4802E-09	0.9999
L1-3	61.3021	2.3648E-08	0.9976
L5-1	60.3435	2.0911E-08	0.9979
L5-2	54.9039	1.5763E-07	0.9850
L5-3	65.7482	7.0025E-09	0.9982
L10-1	71.6766	1.2973E-09	0.9981
L10-2	71.6766	1.2973E-09	0.9981
L10-3	64.0056	1.1126E-08	0.9992

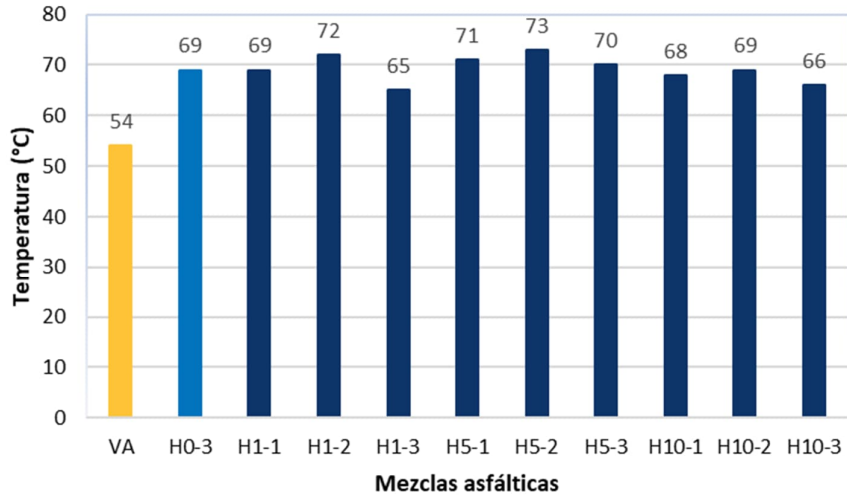
El valor de energía de activación más pequeño registrado, corresponde al del asfalto virgen, esto en comparación con las mezclas modificadas con los compósitos de alto y bajo contenido de vinilos. Asimismo, en la Tabla 3.1, se observa que los asfaltos modificados con los compósitos SBS-L/SP y SBS-H/SP presentan un aumento de la energía de activación a medida que incrementa la concentración hasta un 2% peso de modificador en el asfalto; a partir de un 3% peso, la energía de activación comienza a disminuir. Este comportamiento es atribuido a causa de las fuerzas intermoleculares generadas entre el asfalto y el modificador, las cuales se intensifican conforme a la proporción de modificador presente en el asfalto, estas interacciones provocan una mayor resistencia al flujo y, por ende, una mayor barrera de energía de activación de flujo. Otro factor que podría describir este comportamiento es la concentración de sargazo en el compósito; Escobar Medina y col. (2021) indican que el sargazo posee una gran cantidad de alginatos y fucoidan en su composición, los cuales, en su estudio, actuaron como aglutinante y espesante dentro del ligante asfáltico, donde, además, se observó que una gran cantidad de sargazo puede provocar un decaimiento de estas propiedades, debido a su alto contenido en propilenglicol ^[9]. En cuestión al contenido de vinilos en la estructura del SBS, los resultados señalan una mayor barrera de energía de activación de flujo para aquellas muestras modificadas con los compósitos de alto contenido de vinilo, efecto conferido por el mayor volumen espacial requerido por las unidades vinilo.

Cabe mencionar que los datos de energía de activación estimados para las mezclas de referencia H0-3 y L0-3, fueron igualados o incluso superados por algunas de las muestras asfálticas modificadas con los compósitos SBS-H/SP y SBS-L/SP, respectivamente.

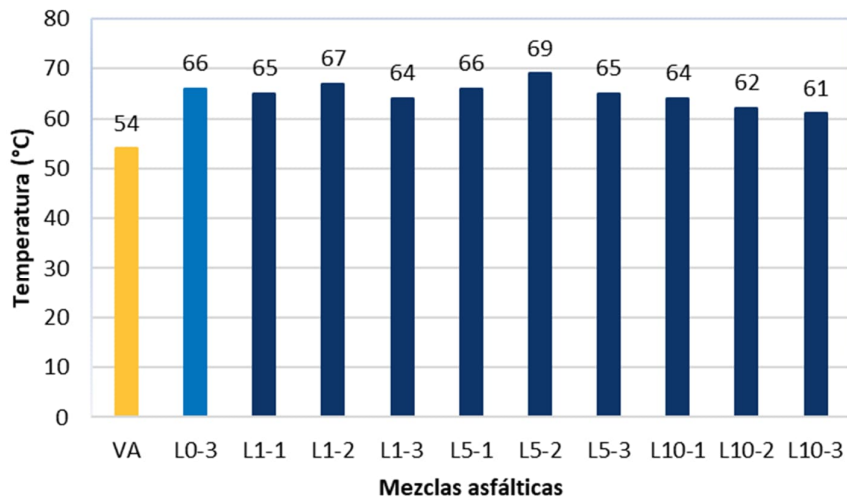
3.2 Punto de reblandecimiento

El punto de reblandecimiento de un material asfáltico proporciona información acerca de la susceptibilidad del asfalto a la temperatura. Un aumento del punto de ablandamiento está asociado a una mayor resistencia a los ahuellamientos ^[50].

En la Figura 3.4 se presentan los resultados obtenidos del punto de reblandecimiento de todos los materiales asfálticos evaluados.



a)



b)

Figura 3.4 Resultados del punto de reblandecimiento de los asfaltos modificados con los compósitos: a) SBS-H/SP, b) SBS-L/SP.

Las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP (Figura 3.4 – a) y SBS-L/SP (Figura 3.4 – b) exhiben un incremento de la temperatura de ablandamiento hasta un 2% peso de modificador en el asfalto, a partir de un 3% peso el punto de reblandecimiento de los materiales comienza a disminuir. Además, se observa que un aumento en la proporción de sargazo en el compósito, limitado a 5 phr, mejora la resistencia del asfalto ante las deformaciones permanentes, una proporción mayor a 5 phr en el compósito resulta desfavorable para esta propiedad. La viscosidad y el punto de reblandecimiento son dos propiedades íntimamente ligadas ^[51], debido a ello, los comportamientos presentados por los

resultados de la prueba de viscosidad y del análisis Ring & Ball de las muestras asfálticas bajo estudio, son análogos entre sí.

El comportamiento descendente del punto de reblandecimiento de las muestras asfálticas evaluadas en esta investigación a partir de la incorporación de un 3% peso de modificador en el asfalto, es explicado en un estudio realizado por Zhang y col. (2020) en el que evalúan el comportamiento mecánico de dos tipos de asfaltos modificados con SBS como referencia, así como con tres diferentes compósitos a base de SBS con SBR, polvo de caucho (rubber powder) y TPS (estireno termoplástico); los resultados demuestran que una concentración superior a 4% peso de SBS base y proporciones de SBR, polvo de caucho y TPS mayores a 3%, 17% y 7% peso, respectivamente en el asfalto, generan un efecto negativo en la temperatura de ablandamiento de los asfaltos modificados con estos agentes. Este fenómeno es provocado por una sobresaturación de modificador, en donde las redes formadas entre el modificador y los componentes del asfalto colapsan, causando una disminución de la viscosidad y, por ende, un descenso en la temperatura de reblandecimiento del ligante asfáltico ^[52].

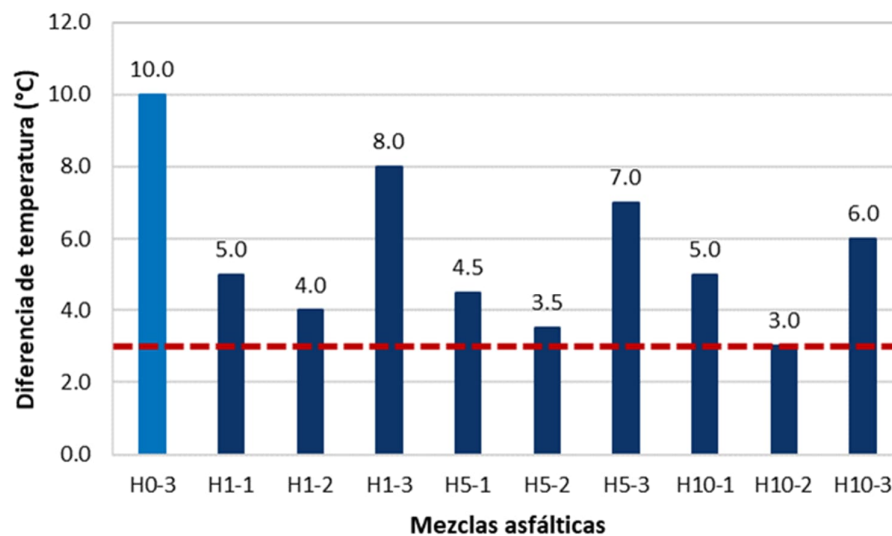
Las mezclas modificadas con los compósitos que contienen una concentración superior a los 5 phr de partículas de sargazo (H10 y L10), presentan una menor resistencia a las deformaciones permanentes. Escobar Medina y col. (2021) mencionan que una incorporación mayor a 1.5% peso en el asfalto de partículas de sargazo resulta contraproducente para la temperatura de reblandecimiento del material. A pesar de que la concentración de partículas de sargazo en los compósitos empleados en el presente estudio no supera al 1.5% peso utilizado en la investigación de Escobar Medina y col. el comportamiento de esta propiedad es similar al alcanzar cierta concentración de partículas de sargazo, efecto provocado por la adición del SBS en la mezcla asfáltica. Asimismo, Escobar Medina y col. explican que el uso de grandes cantidades de modificador en el asfalto genera mezclas no homogéneas e insolubles con las fracciones aromáticas del asfalto ^[9].

Los resultados indicados en la Figura 3.4 demuestran que la incorporación de los modificadores generó un gran efecto positivo en el punto de reblandecimiento del asfalto virgen. Las muestras de referencia, H0-3 y L0-3, alcanzaron un 28% y un 22% de mejora, respectivamente en comparación con el asfalto virgen. Por otro lado, los materiales asfálticos modificados con los compósitos SBS-H/SP y SBS-L/SP, lograron un incremento en la temperatura de reblandecimiento de hasta un 6% y un 4.5%, respectivamente en relación con

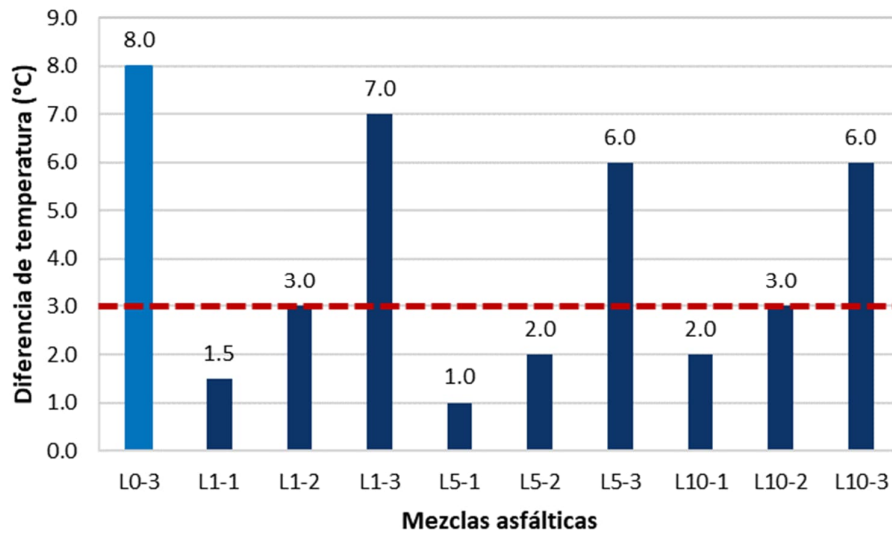
las muestras de referencia H0-3 y L0-3. Con respecto al contenido de vinilos presentes en la estructura del SBS, se determinó que un incremento de esta unidad vinílica en la estructura del copolímero potencializa la resistencia del asfalto a sufrir ahuellamientos. Este mismo comportamiento es presentado en la investigación realizada por Hernández y col. (2006), quienes estudiaron el efecto de diferentes copolímeros SBS lineales, variando sus microestructuras, específicamente el contenido de estireno total y el contenido de unidades vinilo (1,2 – butadieno); los resultados indican que un SBS lineal con un contenido del 30% de estireno total y un alto contenido de grupos vinilo (40%) exhiben el mejor punto de reblandecimiento, en comparación con las demás muestras analizadas ^[53]. Por todo lo mencionado anteriormente, se puede concluir que el uso de SBS reforzado con partículas de sargazo como modificador asfáltico genera un efecto de mejora en la resistencia del material a altas temperaturas.

3.3 Separación de fases

La prueba de separación de fases determina la compatibilidad entre el modificador y el asfalto al someter la mezcla a altas y bajas temperaturas, por periodos largos. Estos cambios abruptos de temperatura provocan que la mezcla tienda a separarse si el aditivo no se homogenizó completamente en el asfalto.



a)



b)

Figura 3.5 Resultados de la prueba de separación de fases de los asfaltos modificados con los compósitos: a) SBS-H/SP, b) SBS-L/SP.

De acuerdo con Djaffar y col. (2013) un asfalto modificado se considera estable cuando la diferencia entre el punto de reblandecimiento de la parte superior e inferior del tubo empleado en este ensayo es menor o igual a 3°C ^[36]. Los resultados de la estabilidad al almacenamiento de todas las muestras asfálticas estudiadas se muestran en la Figura 3.5.

Las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos SBS-H/SP (Figura 3.5 – a) con excepción de la muestra H10-2, presentan una baja estabilidad al almacenamiento a elevadas temperaturas, es decir, carecen de una buena densidad homogénea a lo largo del tubo encargado de contener la muestra durante la prueba. No obstante, se observa que la presencia de partículas de sargazo en el modificador asfáltico genera una mejora en la estabilidad de las mezclas modificadas con dichos aditivos, este efecto positivo se potencializa a medida que incrementa la proporción de sargazo presente en el compósito. Con respecto a la concentración de modificador en el asfalto, se contempla que la estabilidad de las muestras mejora hasta un 2% peso de aditivo, concentraciones mayores a esta resulta adverso para la estabilidad de las mezclas. A pesar de que la mayoría de las muestras no poseen una buena estabilidad entre los componentes a elevadas temperaturas, es importante mencionar que las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP presentan una mejor estabilidad que la muestra de referencia, H0-3, modificada únicamente con el copolímero H0.

En cuanto a las mezclas modificadas con los compósitos SBS-L/SP (Figura 3.5 – b) se observa de manera general una buena estabilidad al almacenamiento a elevadas temperaturas. La presencia de partículas de sargazo en el compósito influyó de manera positiva en la estabilidad de las muestras asfálticas; en todas ellas la estabilidad mejoró en comparación con la de la mezcla de referencia (L0-3), sin embargo, se identificó que una proporción mayor a 5 phr en el compósito genera una mayor inestabilidad entre el asfalto y el aditivo. En función a la concentración de modificador en el asfalto se visualiza un comportamiento decreciente en la estabilidad de las muestras asfálticas conforme aumenta la proporción de estos aditivos en el ligante asfáltico.

Los datos registrados en la Figura 3.5 indican que un bajo contenido de vinilo en la estructura del SBS genera una mayor afinidad entre el copolímero y el asfalto. A pesar de ello, la incorporación única de SBS en el asfalto presenta una desventaja en términos de compatibilidad y almacenamiento (Ren y col., 2019) ^[54]. Para resolver este tipo de problemática se han estudiado diversos tipos de materiales. Una de las mejores alternativas es adicionar azufre o ácido fosfórico a la mezcla asfáltica (Zhang y col., 2013) ^[55]. Liang y col. (2017) investigaron la influencia del azufre y del SBS tanto en las propiedades como en el mecanismo del asfalto modificado con SBS, los resultados indican que el azufre desencadena una reacción química de entrecruzamiento entre el copolímero SBS y el asfalto base, generándose así una estructura de red polimérica tridimensional capaz de mejorar notablemente la estabilidad de almacenamiento del SBS en el asfalto ^[56].

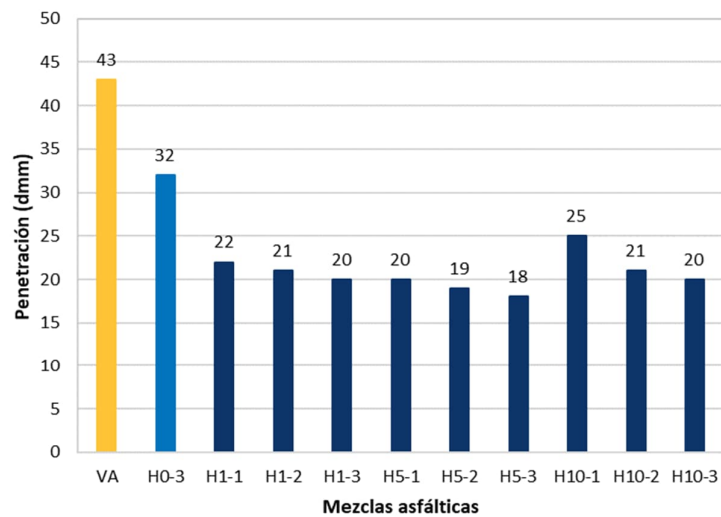
3.4 Penetración

Esta prueba proporciona información acerca de la consistencia o dureza del asfalto expresada por medio de la distancia. El valor de penetración de un asfalto es inversamente proporcional a la dureza de este, es decir, valores de penetración bajos indican que el ligante asfáltico posee una alta rigidez, la cual se relaciona a su vez con la resistencia a sufrir de deformaciones permanentes.

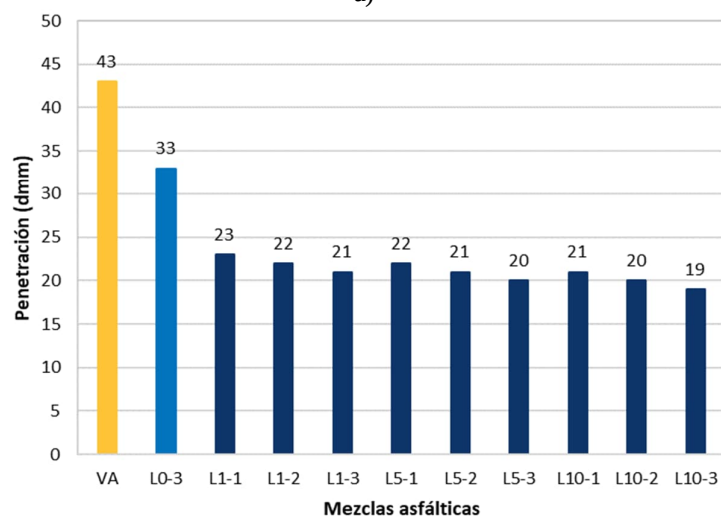
Los resultados de penetración de todas las muestras asfálticas analizadas fueron reportados en décimas de milímetro (dmm) y se presentan en la Figura 3.6.

Los valores de penetración registrados para las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP (Figura 3.6 – a) y SBS-L/SP (Figura 3.6 – b) indican un aumento de la dureza de

los materiales conforme incrementa la concentración de aditivo en el asfalto. Asimismo, se observa que la presencia de partículas de sargazo en el modificador asfáltico potencializa enormemente la consistencia de las mezclas aditivadas con dichos agentes, no obstante, la proporción de sargazo en el compuesto es un factor importante a considerar, ya que a pesar de que la dureza de todas las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP y SBS-L/SP mejoran en comparación con las muestras de referencia H0-3 y L0-3, respectivamente, existe un límite de 5 phr de partículas de sargazo para los compósitos SBS-L/SP, concentraciones mayores a esta provoca una disminución de la dureza de los ligantes asfálticos; por otro lado, la consistencia de los asfaltos modificados con los compósitos SBS-H/SP presenta una mejoría proporcional a la concentración de partículas de sargazo en el aditivo.



a)



b)

Figura 3.6 Resultados de penetración de las mezclas modificadas con los compósitos: a) SBS-H/SP, b) SBS-L/SP.

Conforme a los resultados obtenidos se concluye que la incorporación de los modificadores SBS/SP en el asfalto virgen mejoran notablemente la consistencia de los ligantes asfálticos, lo cual indica una buena resistencia a las deformaciones permanentes. Por lo tanto, el comportamiento de los resultados de esta prueba es homólogo al presentado por las caracterizaciones analizadas anteriormente, esto a causa de la relación interdependiente existente entre ellas. Las mezclas de referencia H0-3 y L0-3 exhiben una mejoría en su consistencia del 25.6% y 23.3%, respectivamente en comparación con la del asfalto virgen. Por otra parte, las muestras modificadas con los compósitos SBS-H/SP y SBS-L/SP, presentan un aumento de la dureza de hasta un 43.8% y un 42.4%, respectivamente en relación con las mezclas de referencia H0-3 y L0-3. Con base en los resultados mencionados anteriormente, es posible suponer que un incremento en el contenido de vinilos mejora ligeramente la consistencia del asfalto.

El índice de penetración (IP) indica la sensibilidad del asfalto a la temperatura y se calcula a partir de la ecuación 2.1, presentada en el capítulo 2. La determinación del índice de penetración de las mezclas asfálticas evaluadas en el presente estudio tomó en consideración las temperaturas de reblandecimiento mostradas en la Figura 3.4 y los datos de penetración expuestos en la Figura 3.6. En la Tabla 3.2 se muestran los valores de IP correspondientes a cada muestra.

Tabla 3.2 Resultados del índice de penetración de las mezclas asfálticas evaluadas.

Identificación de la muestra	T _R (°C)	P (dmm)	IP
VA	54	44	-0.5986
H0-3	69	32	1.5876
H1-1	69	22	0.8140
H1-2	72	21	1.1845
H1-3	65	20	-0.0124
H5-1	71	20	0.9410
H5-2	73	19	1.1419
H5-3	70	18	0.5945
H10-1	68	25	0.9057
H10-2	69	21	0.7251

H10-3	66	20	0.1531
L0-3	66	33	1.1561
L1-1	65	23	0.2469
L1-2	67	22	0.4939
L1-3	64	21	-0.0924
L5-1	66	22	0.3298
L5-2	69	21	0.7251
L5-3	65	20	-0.0124
L10-1	64	21	-0.0924
L10-2	62	20	-0.5257
L10-3	61	19	-0.7912

De acuerdo con lo establecido por Iqbal y col. (2020), el índice de penetración de los asfaltos destinados a la construcción de carreteras debe oscilar entre -2 y +2; un valor de IP negativo indica una alta susceptibilidad a la temperatura, mientras que un valor de IP positivo demuestra una baja susceptibilidad térmica ^[38].

Según lo señalado por los resultados presentados en la Tabla 3.2 y con base en la clasificación mencionada anteriormente, se concluye que todas las muestras asfálticas analizadas, son aptas para el diseño y construcción de carpetas asfálticas. Las muestras de referencia H0-3 y L0-3 poseen el menor valor de susceptibilidad térmica registrado en comparación con los del asfalto virgen y las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP y SBS-L/SP, respectivamente. La presencia de partículas de sargazo en los aditivos utilizados reduce el índice de penetración de las mezclas modificadas con estos agentes en comparación con el de las mezclas de referencia H0-3 y L0-3, a pesar de ello, aún poseen un valor de sensibilidad a la temperatura aceptable, encontrándose dentro del intervalo estipulado para asfaltos empleados en obras de pavimentación. La concentración de sargazo en los aditivos SBS-H/SP y SBS-L/SP impacta de igual forma a la susceptibilidad térmica de los asfaltos modificados con dichos compósitos, es decir, la sensibilidad a la temperatura de estas mezclas disminuye al incrementar la proporción de partículas de sargazo hasta 5 phr, una concentración mayor a esta resulta desfavorable, ya que el índice de penetración disminuye, causando un aumento de la susceptibilidad térmica. En relación con la concentración de aditivo en el asfalto se observa que para las mezclas modificadas con los

compósitos H1, H5, L1 y L5 la sensibilidad a la temperatura de estos materiales disminuye proporcionalmente hasta un 2% peso, a partir de un 3% peso la sensibilidad térmica comienza a aumentar. Por otra parte, el índice de penetración de las mezclas aditivadas con los compósitos H10 y L10 disminuye proporcionalmente conforme aumenta la concentración de modificador en el ligante asfáltico. Este efecto adverso es asociado a la proporción de sargazo en el aditivo, en donde como se mencionó anteriormente una cantidad superior a 5 phr provoca un decaimiento de la resistencia de los asfaltos a la temperatura.

Las mezclas modificadas con los compósitos de alto contenido de vinilos (SBS-H/SP) resultaron con mejores valores de penetración e índice de penetración que los presentados por los asfaltos modificados con los compósitos de bajo contenido de vinilos (SBS-L/SP), este comportamiento es similar a los exhibidos en las pruebas estudiadas anteriormente, confirmando así que un alto contenido de unidades vinilo en la estructura del SBS aunado a la presencia de partículas de sargazo en el aditivo, mejora considerablemente la resistencia de los asfaltos a sufrir de deformaciones permanentes, además de poseer buena estabilidad térmica.

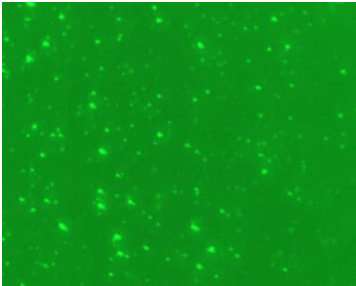
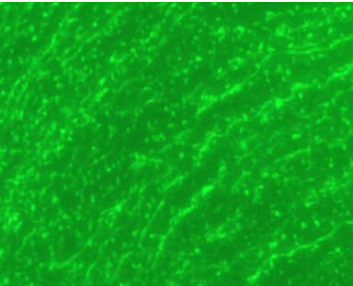
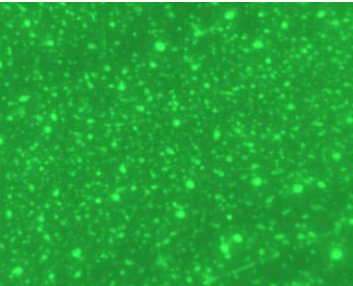
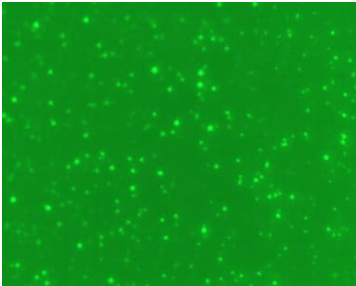
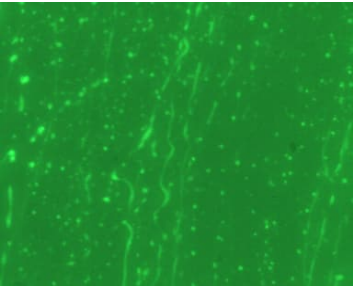
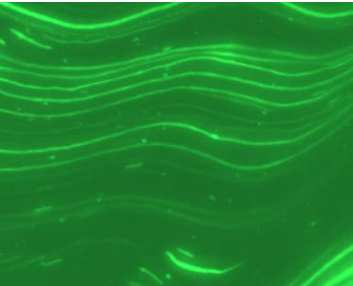
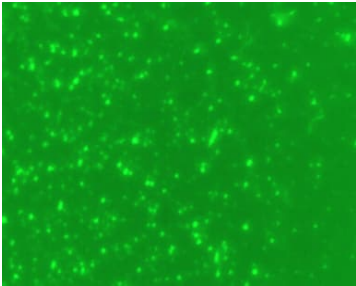
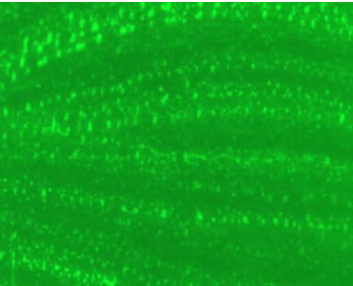
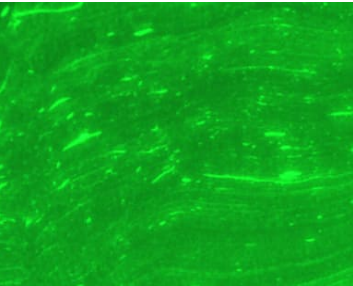
3.5 Microscopía fluorescente

La microscopía de fluorescencia es una técnica realizada para determinar la compatibilidad y el nivel de dispersión entre el aditivo y el asfalto. El fondo verde de la micrografía representa la fase rica en asfalto, mientras que las áreas fluorescentes están relacionadas con la fase rica en aditivo, por lo tanto, una distribución homogénea del modificador se obtiene cuando la micrografía muestra menores áreas fluorescentes de tamaño pequeño y dispersas de manera uniforme.

En la Tabla 3.3 se muestran las micrografías fluorescentes de los asfaltos modificados con los compósitos SBS-H/SP. Las muestras con un contenido de 1% peso de aditivo poseen una mejor dispersión que aquellas modificadas con concentraciones superiores, al incrementar la concentración de aditivo se observa una mayor heterogeneidad y una tendencia a la aglomeración. En relación con la proporción de partículas de sargazo en el aditivo se aprecia una mayor homogeneidad entre el modificador y el asfalto conforme aumenta la cantidad de este refuerzo, no obstante, a pesar de que las mezclas modificadas con el compósito H10 presentan una mejor compatibilidad en comparación con los asfaltos modificados con el compósito H1, no lo es así para los ligantes asfálticos aditivados con el compósito H5, por

lo tanto, una proporción de 5 phr en el aditivo resulta ideal entre las concentraciones estudiadas. Las micrografías de las muestras H1-2, H1-3, H5-2, H5-3, H10-2 y H10-3 exhiben una morfología similar a un conjunto de fibras que tienden a aglomerarse, este hecho es descrito por Hernández y col. (2006), en el cual mencionan que un alto contenido de unidades vinilo (40%) en la microestructura del SBS genera altos dominios de entrelazamiento, los cuales requieren mayor tiempo de mezclado para conseguir una buena dispersión en el asfalto ^[53].

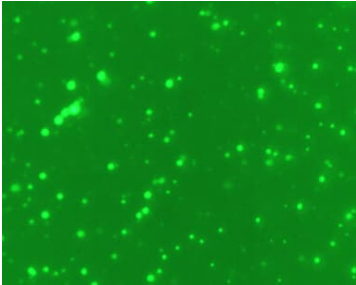
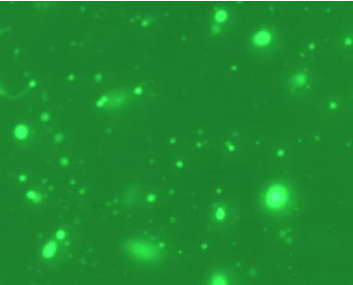
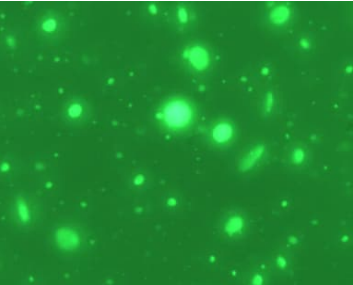
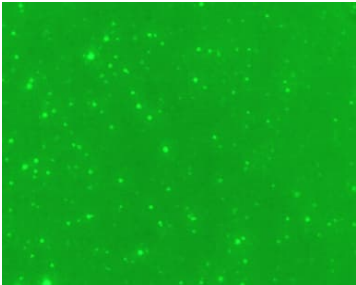
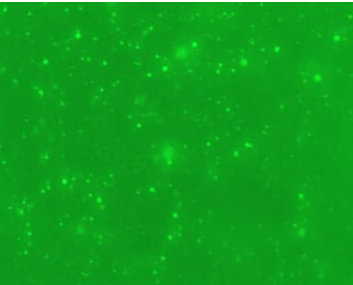
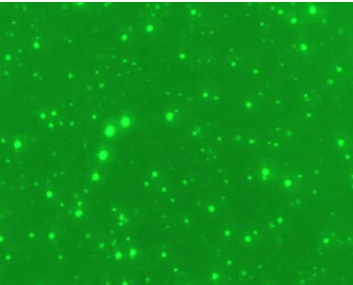
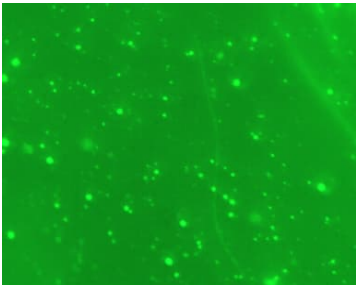
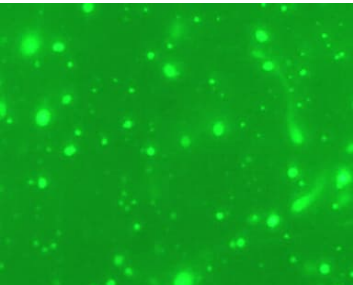
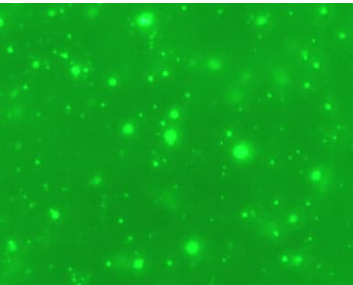
Tabla 3.3 Micrografías de fluorescencia de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP. Aumento 40x.

H1-1	H1-2	H1-3
		
H5-1	H5-2	H5-3
		
H10-1	H10-2	H10-3
		

En la Tabla 3.4 se presentan las micrografías fluorescentes de los asfaltos modificados con los compósitos SBS-L/SP. De manera general, las micrografías de estas muestras revelan

una mejor dispersión y compatibilidad entre el aditivo y el asfalto, en comparación con las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP. Los efectos de la concentración de modificador en el asfalto y el de la proporción de partículas de sargazo en el aditivo, son los mismos que los exhibidos por los ligantes asfálticos modificados con los compósitos SBS-H/SP, es decir, la dispersión y afinidad de los compósitos SBS-L/SP en el asfalto disminuye al aumentar la concentración de este agente en él, así como que el compósito L5 con un contenido de 5 phr de partículas de sargazo exhibe la mayor compatibilidad. Las micrografías de todas las mezclas modificadas poseen una morfología de pequeños círculos tipo “salami”, la cual es similar a la presentada en el estudio de Hernández y col. (2006) para asfaltos modificados con SBS lineal y de bajo contenido de vinilos (10%) [53].

Tabla 3.4 Micrografías de fluorescencia de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-L/SP. Aumento 40x.

L1-1	L1-2	L1-3
		
L5-1	L5-2	L5-3
		
L10-1	L10-2	L10-3
		

Los resultados obtenidos en este ensayo concuerdan con los valores registrados en la prueba de separación de fases, en donde se observa que las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP presentan una baja estabilidad al almacenamiento a altas temperaturas, en comparación con los asfaltos modificados con los compósitos SBS-L/SP. En ambos casos, la incorporación de las partículas de sargazo en los copolímeros C1 y C2, mejoraron notablemente la dispersión y afinidad de los aditivos en el asfalto, y en consecuencia una mayor estabilidad térmica que las muestras de referencia H0-3 y L0-3, respectivamente.

3.6 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

El análisis de FTIR es una técnica la cual proporciona un espectro obtenido a partir de la interacción de la radiación electromagnética en la región infrarroja con la materia, analizando las transiciones de las vibraciones moleculares de cada sección de la estructura, dicho espectro permite conocer la constitución química de la muestra a partir de los picos característicos de los grupos funcionales.

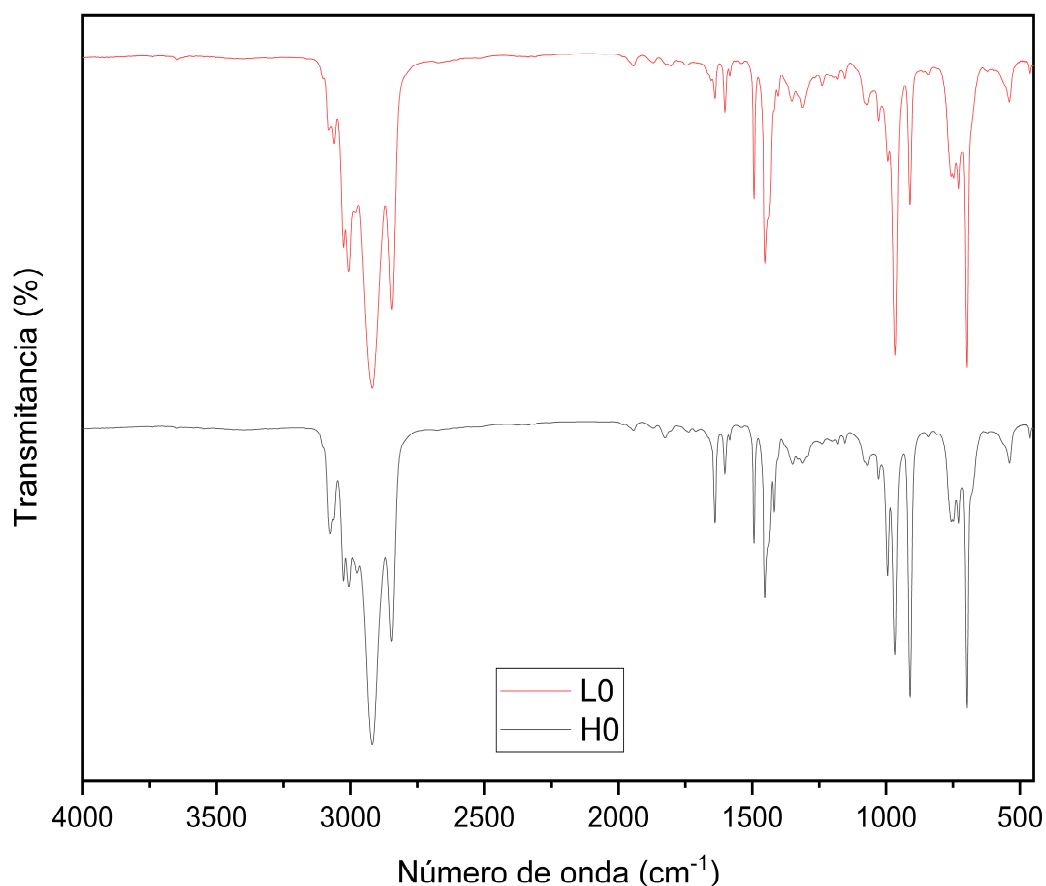
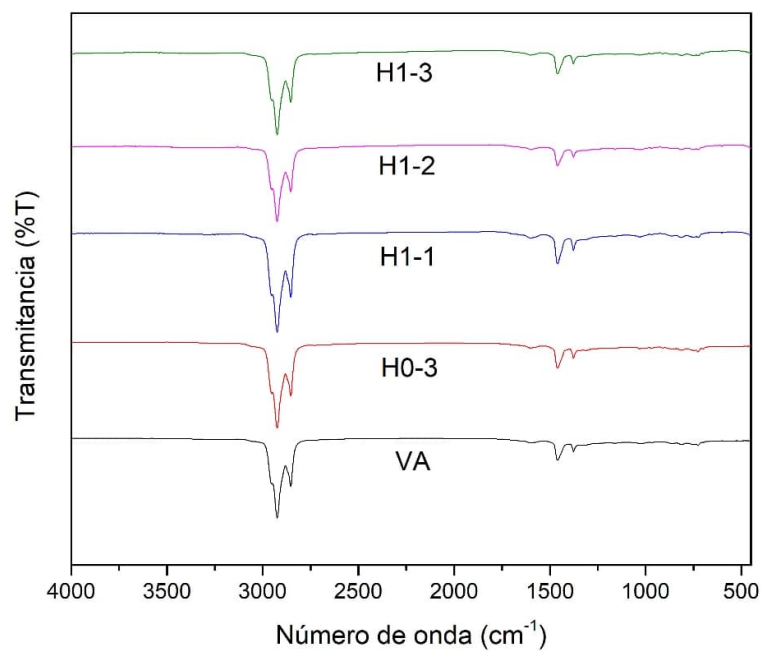


Figura 3.7 Espectros FTIR de los copolímeros L0 y H0.

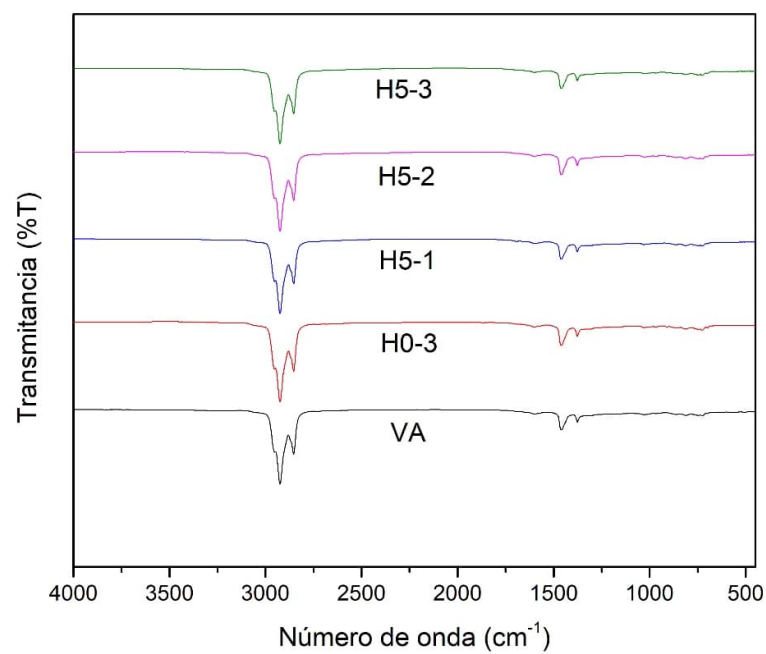
En la Figura 3.7 se muestran los espectros de infrarrojo de los copolímeros SBS de bajo y alto contenido de vinilos, L0 y H0, respectivamente. A continuación, se describen las señales más importantes correspondientes a los bloques de polibutadieno y poliestireno:

Las bandas de absorción en 699 cm^{-1} y 757 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de deformación fuera del plano de los enlaces CH del anillo bencénico ^[57], ambos picos representan vibraciones características de anillos aromáticos monosustituídos, por lo que es una evidencia clara de la presencia de poliestireno en los copolímeros SBS ^[57,58]. La señal en 745 cm^{-1} pertenece a la vibración de flexión de los enlaces CH de las unidades cis-1,4 del bloque de polibutadieno. A 911 cm^{-1} se observa la banda de absorción correspondiente a las vibraciones de deformación fuera del plano de los enlaces CH_2 cercanos al doble enlace de las unidades 1,2-vinilo del bloque de polibutadieno, evidencia fuerte y bien conocida en todos los copolímeros que poseen este bloque. La señal en 967 cm^{-1} es atribuida a las vibraciones de flexión de los enlaces CH cercanos al doble enlace de las unidades trans-1,4 del bloque de polibutadieno ^[59]. La banda de absorción en 994 cm^{-1} pertenece a las vibraciones de flexión fuera del plano de los enlaces $-\text{CH}=\text{}$ en las unidades vinílicas del bloque de polibutadieno ^[58, 60]. En el intervalo de 1028 a 1181 cm^{-1} aparecen señales características correspondientes a vibraciones características de los bloques de poliestireno. Entre 1266 y 1312 cm^{-1} se observan señales atribuidas posiblemente a vibraciones de deformación del bloque de poliestireno o a vibraciones de flexión de los enlaces CH_2 de las unidades cis-1,4 o trans-1,4 del bloque de polibutadieno ^[60]. A 1452 cm^{-1} aparece una banda de absorción fuerte, la cual es una evidencia contundente en la identificación de copolímeros, esta señal puede estar relacionada a vibraciones de flexión de los enlaces CH_2 de las unidades cis-1,4 o trans-1,4 del bloque de polibutadieno, además puede ser atribuida a vibraciones de deformación de los enlaces $\text{CH}_2=\text{CH}$ de las unidades 1,2-vinilo del bloque de polibutadieno, asimismo, esta banda en conjunto con otra a 1493 cm^{-1} , pueden ser atribuidas a vibraciones de tensión de los átomos de carbono presentes en el anillo aromático, del mismo modo las señales a 1583 y 1602 cm^{-1} son atribuidas a estos mismos átomos de carbono ^[35]. A 2847 y 2920 cm^{-1} se identifican dos bandas de absorción fuerte correspondientes a vibraciones de estiramientos simétricos de los enlaces CH_2 del bloque de polibutadieno. La señal ubicada en 2978 cm^{-1} está relacionada con las vibraciones de tensión simétricas de los enlaces $\text{CH}_2=\text{}$ en las unidades 1,2-vinilo del bloque de polibutadieno. Las bandas situadas en 3005 y 3026 cm^{-1} están asociadas a las vibraciones de estiramiento de los enlaces CH_2 del bloque de polibutadieno y a las de los enlaces CH de los anillos aromáticos. A causa del traslape entre

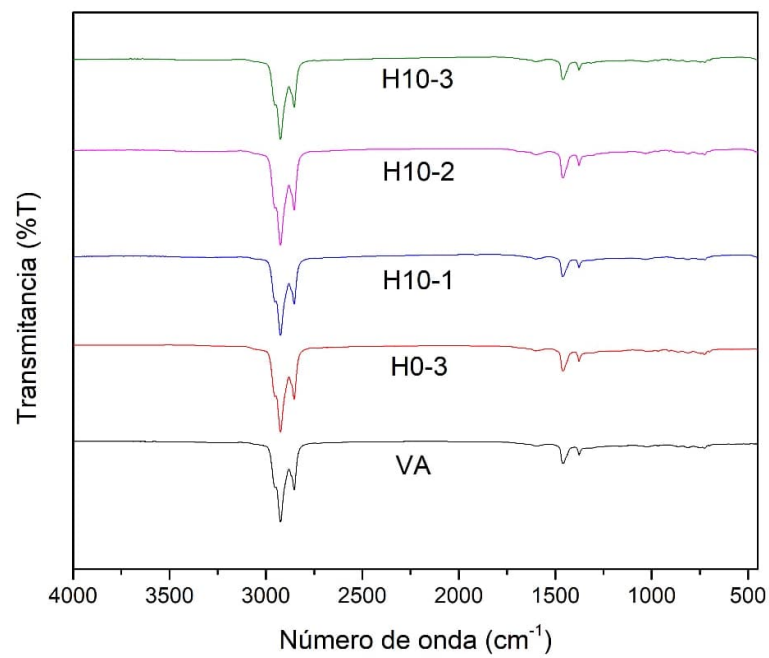
estas dos últimas bandas existe dificultad para asignarlas a cada uno de los enlaces. Por último, a 3079 cm^{-1} se observa una señal correspondiente a las vibraciones de tensión simétricas de las unidades 1,2-vinilo del bloque de polibutadieno ^[35,60].



a)

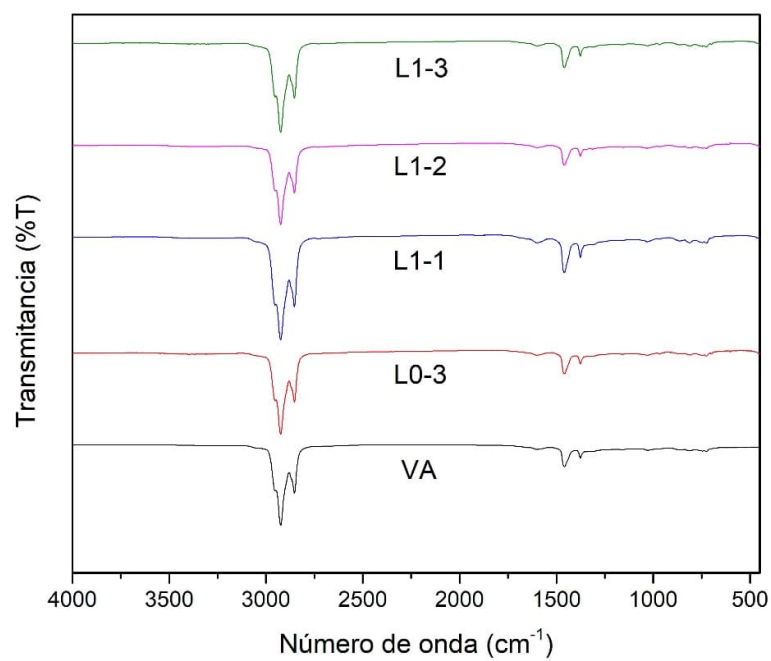


b)

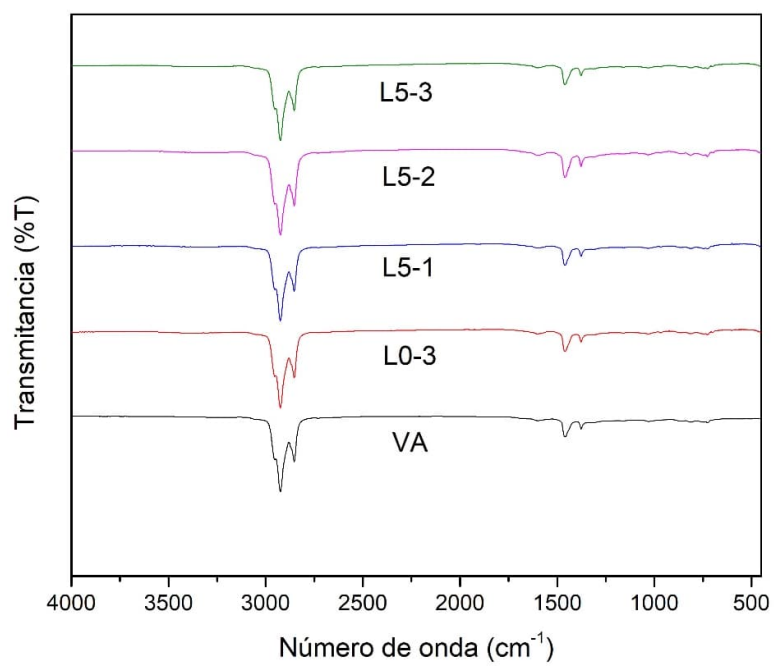


c)

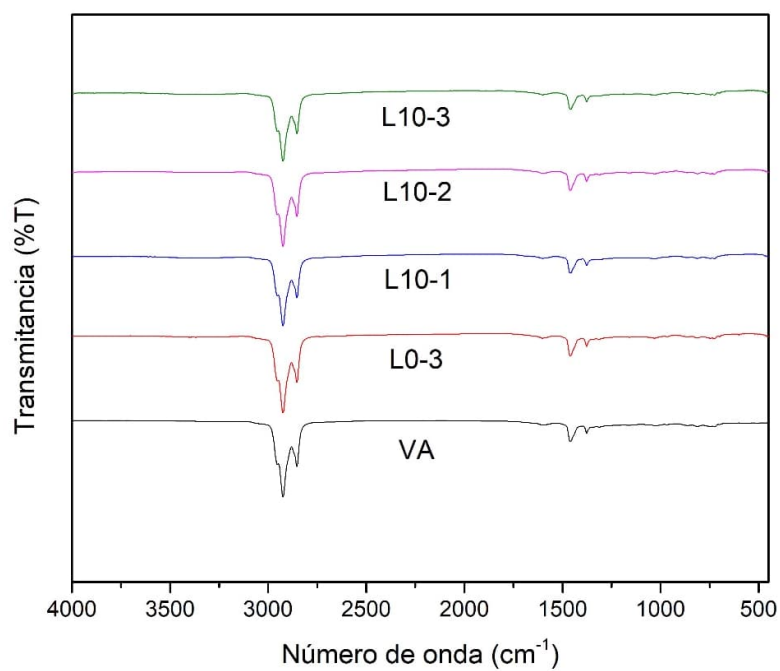
Figura 3.8 Espectros FTIR del asfalto virgen y de las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos: a) H1 b) H5, c) H10.



a)



b)



c)

Figura 3.9 Espectros FTIR del asfalto virgen y de las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos: a) L1, b) L5, c) L10.

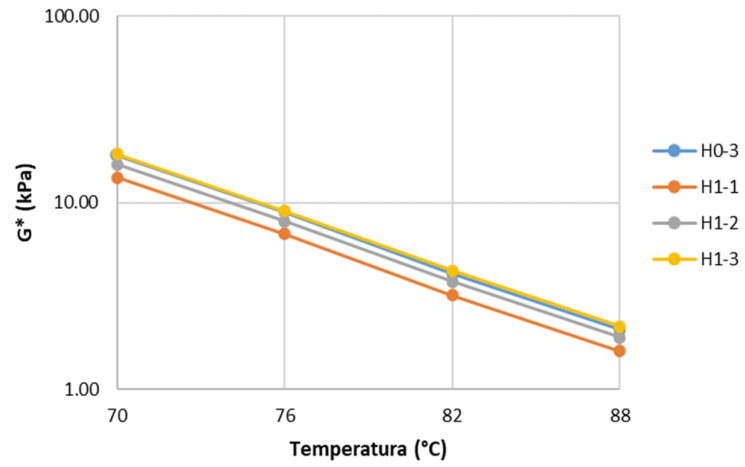
En las Figuras 3.8 y 3.9 se muestran los espectros FTIR de la muestra de asfalto virgen comparado con los de las mezclas de referencia (H0-3 y L0-3), así como el de aquellas mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP y SBS-L/SP, respectivamente.

En el espectro del asfalto virgen se observan dos señales típicas a 2924 y 2852 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de tensión de los enlaces alifáticos C-H de cadenas de alcanos. La banda ubicada en 1599 cm^{-1} representa la vibración de estiramiento del enlace C=C presente en el anillo aromático de compósitos de esta clase. Las señales en 1457 y 1376 cm^{-1} están relacionadas con las vibraciones de los enlaces C=C presentes en ácidos carboxílicos y sus derivados ^[61]. La banda en 1028 cm^{-1} está asociada al estiramiento del enlace del grupo sulfóxido S=O ^[40]. Las señales localizadas en 809 y 723 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de flexión de sustituciones aromáticas en grupos alifáticos y a las cadenas alifáticas largas, respectivamente ^[61].

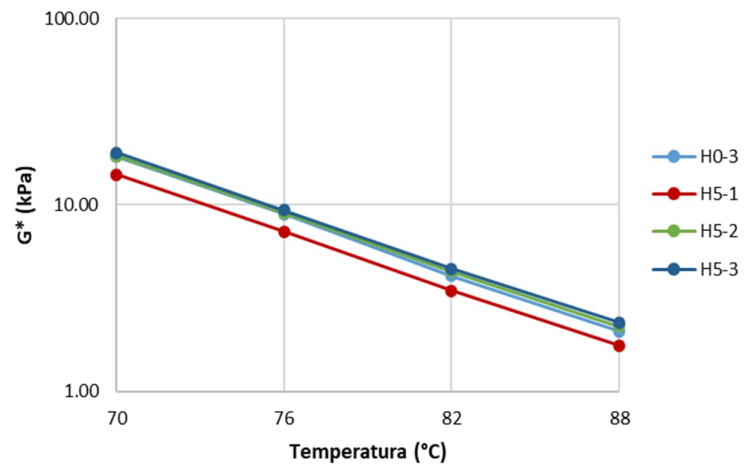
Al comparar los espectros del asfalto virgen y de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-L/SP y SBS-H/SP se observa que no existen cambios considerables ni la formación de nuevos picos, la intensidad de las señales puede variar, sin embargo, el rango de los grupos funcionales se mantiene igual, por consiguiente, la modificación del asfalto con los compósitos SBS-L/SP y SBS-H/SP es de naturaleza física debido a que su estructura química no cambia.

3.7 Reología

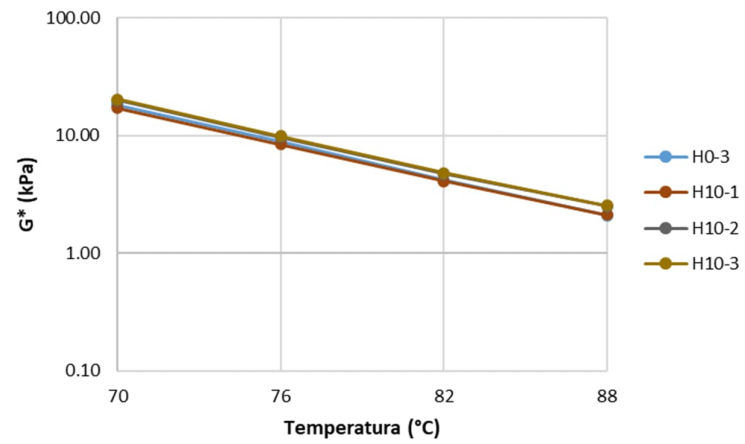
Las deformaciones permanentes en una carpeta asfáltica representan una condición de fallo del pavimento causadas principalmente por la temperatura y por la acumulación de pequeñas deformaciones producidas cada vez que se aplica una carga. El comportamiento viscoelástico de las mezclas asfálticas modificadas fue evaluado a partir de la propiedad reológica módulo complejo (G^*) que describe la resistencia del asfalto modificado a deformarse por esfuerzos de corte repetidos. Este módulo está conformado por dos partes, el módulo de almacenamiento (G') que representa el comportamiento elástico del material y es una medida de la energía de deformación almacenada durante el proceso de corte y por el módulo de pérdida (G'') que representa el comportamiento viscoso del material y es una medida de la energía de deformación disipada durante el proceso de corte. Ambos módulos son indicadores de la resistencia del asfalto a la deformación bajo condiciones de carga determinadas ^[9, 61].



a)

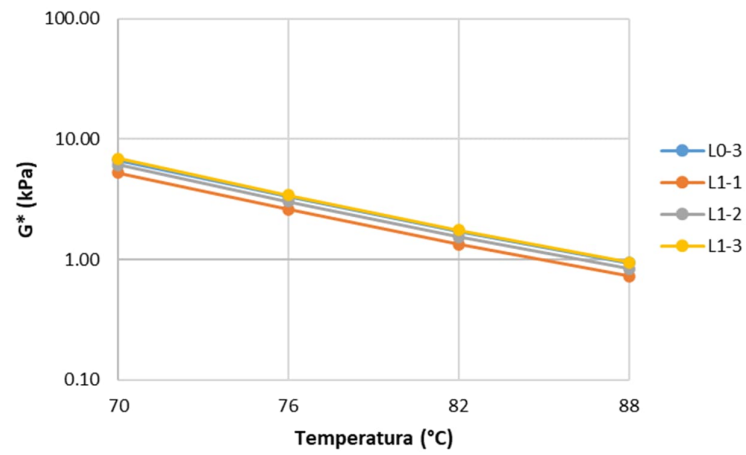


b)

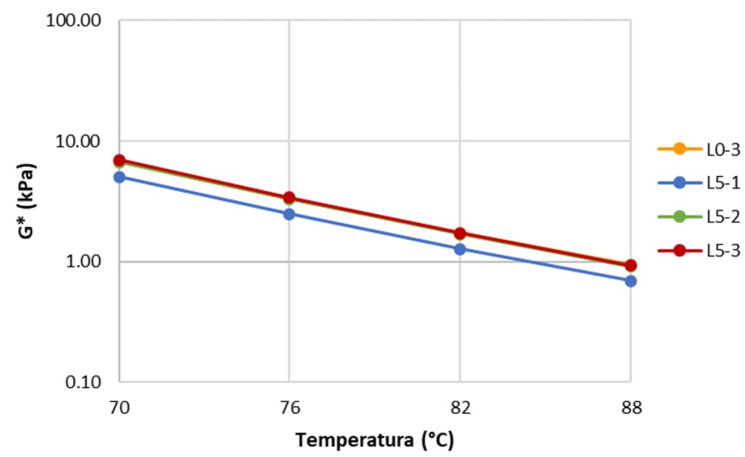


c)

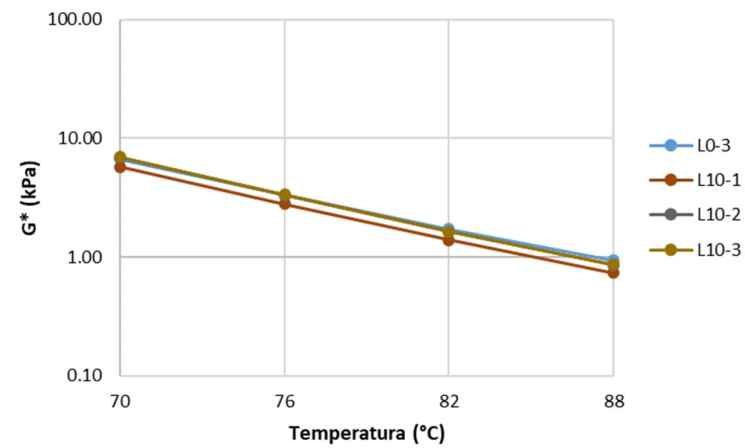
Figura 3.10 Gráficas isocrónicas del módulo complejo en función de la temperatura para las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos: a) H1, b) H5, c) H10.



a)



b)



c)

Figura 3.11 Gráficas isocrónicas del módulo complejo en función de la temperatura para las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos: a) L1, b) L5, c) L10.

En las Figuras 3.10 y 3.11 se muestran las gráficas isocrónicas del módulo complejo en función de la temperatura para las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos SBS-H/SP y SBS-L/SP, respectivamente.

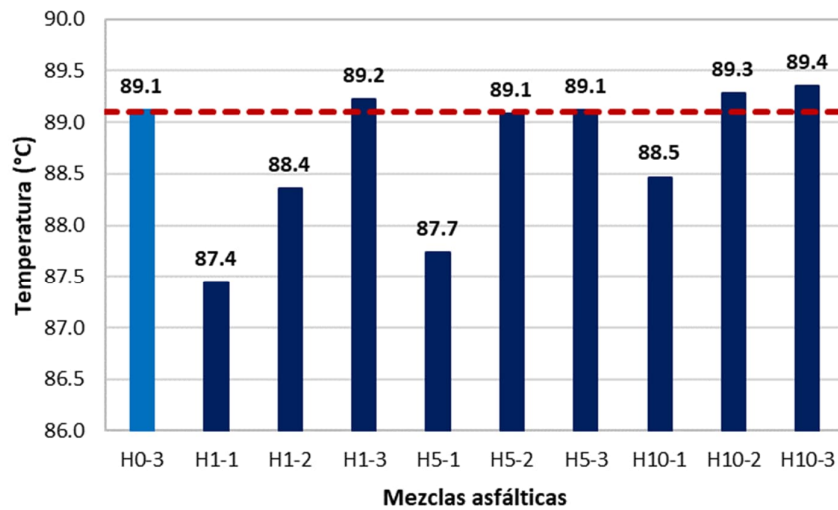
Los resultados del análisis del módulo complejo de las muestras modificadas con los compósitos SBS-H/SP y SBS-L/SP muestran una ligera mejoría de este parámetro a medida que incrementa la proporción de sargazo presente en el compósito, además, se observa un pequeño aumento del módulo complejo al adicionar una mayor concentración de modificador en el asfalto. En relación con la temperatura para ambos tipos de compósitos, se visualiza que, entre cada punto de las lecturas, estos se encuentran cada vez más cercanos entre sí hasta la temperatura de 88°C, esta tendencia indica una recuperación elástica insignificante del asfalto ante el cambio de temperatura. Por otra parte, el contenido de vinilos presente en el SBS demostró nuevamente ser un factor muy importante en el desempeño de las mezclas asfálticas modificadas; los mejores resultados pertenecen a aquellos asfaltos modificados con los compósitos SBS-H/SP, logrando alcanzar entre un 60 a 65% de mejoría en comparación con los asfaltos modificados con los compósitos SBS-L/SP. El valor del módulo complejo de un asfalto es proporcional a la resistencia que presenta dicho material a las deformaciones permanentes causadas por los esfuerzos de corte repetitivos provenientes de las cargas vehiculares. Por lo tanto, un valor alto del módulo complejo se traduce como una alta resistencia a las deformaciones permanentes ^[9].

Determinación de la temperatura de falla

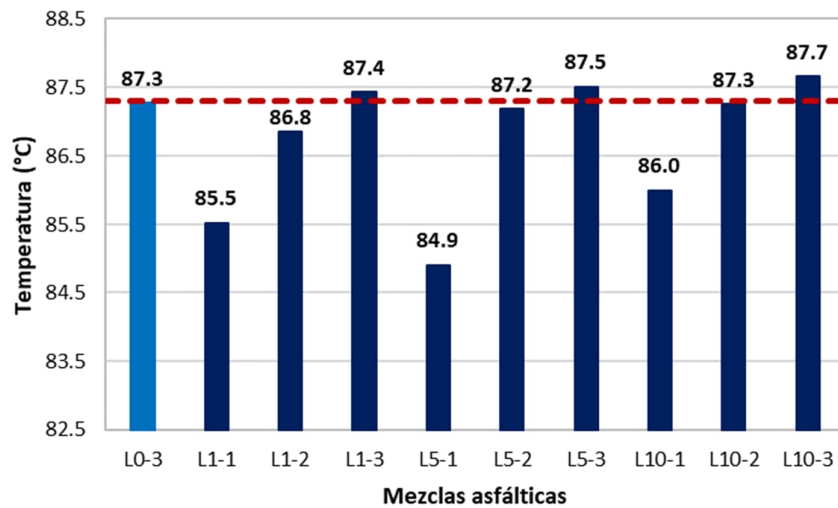
El factor de ahuellamiento ($G^*/\sin \delta$) de cada una de las mezclas asfálticas modificadas fue determinado con el fin de asociarlo a las especificaciones SHRP acerca de la resistencia del asfalto a las deformaciones permanentes a altas temperaturas, a partir de esta información es posible calcular la temperatura de falla (T_{SHRP}) en la cual el parámetro $G^*/\sin \delta$ es igual a 1 kPa bajo una frecuencia oscilatoria de 10 rad/s, estas condiciones simulan un tránsito automovilístico en carretera de 90 km/h ^[43].

La temperatura de falla y el punto de reblandecimiento son los parámetros más significativos comúnmente empleados en la evaluación de las propiedades de un asfalto a altas temperaturas. Mientras mayores sean las temperaturas de reblandecimiento y de falla, mejores serán las propiedades del asfalto a elevadas temperaturas ^[36, 45].

En la Figura 3.12 se muestran las temperaturas de falla de las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos SBS-H/SP y SBS-L/SP.



a)



b)

Figura 3.12 Temperatura de falla de los asfaltos modificados con los compósitos: a) SBS-H/SP, b) SBS-L/SP.

Los resultados obtenidos para ambos tipos de modificadores (SBS-H/SP y SBS-L/SP) presentan una tendencia análoga entre sí, es decir, la temperatura de falla mejora al aumentar la proporción de sargazo en el compósito, así como al incrementar la concentración de modificador en el asfalto, no obstante, la mejoría de la temperatura de falla entre las mezclas de referencia L0-3 y H0-3, con respecto a los asfaltos modificados con los compósitos SBS-L/SP y SBS-H/SP, respectivamente, se considera insignificante, puesto que el cambio es menor al 1%.

En relación con el contenido de vinilo presente en el SBS se observa que las mezclas asfálticas modificadas con los compósitos de alto contenido de vinilo (SBS-H/SP), poseen una mayor resistencia a las deformaciones permanentes que aquellas modificadas con los compósitos de bajo contenido de vinilo (SBS-L/SP), a pesar de ello, esta diferencia no es considerada significativa, dado que el cambio promedio entre ellas es del 2%. Este mismo comportamiento fue observado en el estudio de Hernández y col. (2006) para asfaltos modificados con distintos tipos de SBS lineales de diferente contenido de estireno y vinilo, en dicha investigación se contempla un aumento de la temperatura de falla a medida que incrementa el contenido de vinilo, este comportamiento fue presentado en los tres niveles de contenido de estireno estudiados: bajo (10 – 12%), medio (29 – 30%) y alto (43 – 45%); los resultados demostraron que los copolímeros con un contenido medio de estireno (25 – 30%) y un contenido medio de insaturaciones 1,2-butadieno (grupo vinilo) en la microestructura del SBS (20 – 30%), presentaron las mejores propiedades en cuestión de punto de reblandecimiento, viscosidad, y reológicas como lo es la temperatura de falla, de acuerdo con las especificaciones SHRP ^[53].

Capítulo 4. Conclusiones

Con base en todos los resultados mostrados anteriormente, se confirma que los compósitos SBS-H/SP y SBS-L/SP utilizados como modificadores asfálticos en el presente estudio, poseen una buena afinidad con el asfalto. No obstante, las mezclas modificadas con los compósitos de alto contenido de vinilo (40%) presentaron cambios más significativos en las propiedades del asfalto en comparación con aquellos modificados con los compósitos de bajo contenido de vinilo (11%). En relación con la proporción de sargazo en el compósito y la concentración de modificador en el asfalto estudiadas, se determinó que una proporción de 5 phr de partículas de sargazo y 2% de modificador resultaron ser las que potencializaron en mayor medida las propiedades del asfalto. A partir de lo mencionado previamente es posible concluir lo siguiente:

Un mayor contenido de vinilo en el SBS le confiere al asfalto una mayor viscosidad, sin embargo, los asfaltos modificados con los copolímeros puros (L0 y H0) exceden el límite de viscosidad establecido a 135°C en las especificaciones SUPERPAVE, sin embargo, la incorporación de las partículas de sargazo en el compósito ayudó a reducir ligeramente la viscosidad del asfalto, permitiendo que esta propiedad se situara dentro de lo especificado por la metodología. Asimismo, al aumentar la temperatura, la viscosidad de la mezcla asfáltica disminuyó, lo cual es benéfico en operaciones de bombeo y mezclado del asfalto.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de punto de reblandecimiento, un mayor contenido de vinilo en el SBS le concede al asfalto una menor susceptibilidad térmica, es decir, una mayor resistencia a los ahuellamientos. Por otra parte, la incorporación de hasta 5 phr de partículas de sargazo en el compósito, produjo temperaturas de reblandecimiento iguales o superiores a las registradas por las mezclas de referencia (L0-3 y H0-3); una mayor proporción de estas partículas en el compósito ocasionó un decaimiento de esta propiedad debido a una sobresaturación del modificador en el asfalto, provocando a su vez que las redes formadas entre el modificador y los componentes del asfalto colapsaran.

Los datos obtenidos en la prueba de separación de fases indican que a pesar de que ambos copolímeros (L0 y H0) no poseen una buena estabilidad con el asfalto a altas temperaturas, un menor contenido de vinilo en la microestructura del SBS produce una mayor estabilidad con el asfalto. La presencia de las partículas de sargazo en el compósito resultó favorable, puesto que la estabilidad de la mezcla asfáltica mejoró notablemente al adicionar hasta un 2% de modificador en el asfalto, dicho efecto es ocasionado por la formación de redes más estables entre el modificador y los componentes del asfalto. A pesar de la mejora generada

por estas partículas en ambos copolímeros, las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP estudiadas, no lograron en su mayoría cumplir con lo especificado en la metodología para ser clasificados como térmicamente estables, por otro lado, gran parte de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-L/SP analizadas, caen dentro de esta clasificación.

La prueba de penetración revela que las mezclas asfálticas modificadas poseen una buena consistencia, es decir, cuentan con una buena resistencia a las deformaciones permanentes. El efecto del contenido de vinilo en esta propiedad carece de relevancia, puesto que las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP superan a las modificadas con los compósitos SBS-L/SP por apenas 1 – 4 dmm. Caso contrario al contenido de partículas de sargazo en el compósito, el cual mejora considerablemente la dureza de los materiales asfálticos, superando a las mezclas de referencia (L0-3 y H0-3) hasta en un 57%. El índice de penetración (IP) de todas las mezclas asfálticas modificadas se encuentra entre – 0.8 y + 1.2, lo que las vuelve poco susceptibles a la temperatura e idóneas para su uso en el diseño y construcción de carpetas asfálticas.

La morfología de las mezclas, descrita por la prueba de microscopia fluorescente, muestra que un mayor contenido de vinilo en el SBS dificulta la dispersión del compósito en la matriz asfáltica, lo cual explica que las mezclas modificadas con los compósitos SBS-L/SP sean más estables térmicamente que aquellas modificadas con los compósitos SBS-H/SP. Independientemente de ello, todas las mezclas asfálticas estudiadas cuentan con una afinidad aceptable entre el modificador y el asfalto.

Los espectros IR del asfalto y de las mezclas modificadas con los compósitos SBS-H/SP y SBS-L/SP muestran que no hay interacciones químicas entre el modificador y el asfalto al no existir nuevas bandas entre sus espectros. Por lo tanto, se concluye que la interacción entre el modificador y el asfalto es de tipo física.

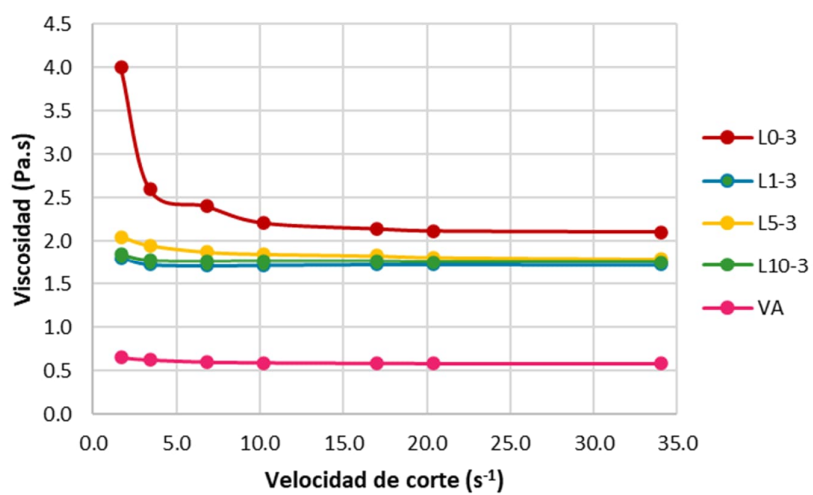
El análisis reológico de las muestras evaluadas señala que un mayor contenido de vinilo en la estructura del SBS le confiere al asfalto un mayor valor del parámetro G^* , lo cual indica una mayor resistencia a las deformaciones permanentes causadas por los esfuerzos de corte repetitivos provenientes de las cargas vehiculares. Otro parámetro importante evaluado, es la temperatura de falla, en esta ocasión, el contenido de vinilo no tuvo un efecto significativo sobre esta propiedad, sin embargo, la incorporación de un 2 – 3% de los modificadores iguala

o incluso supera ligeramente la temperatura de falla de las mezclas de referencia (L0-3 y H0-3). Estos resultados demuestran que las mezclas asfálticas evaluadas tienen una buena capacidad para evitar ahuellamientos.

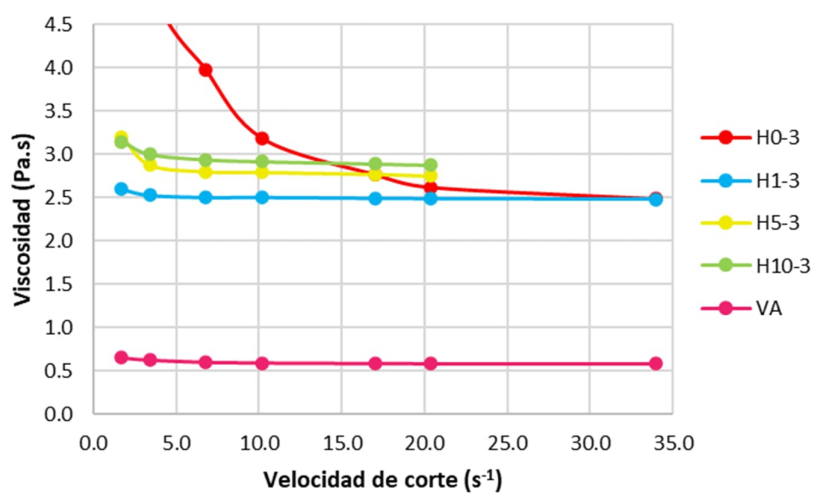
En general, los resultados de todas las pruebas realizadas demuestran que el contenido de vinilo en la microestructura del SBS lineal es una variable importante a considerar cuando se utiliza este tipo de copolímero en el diseño de carpetas asfálticas. Por otra parte, el uso de partículas de sargazo en compósito con el SBS como modificador asfáltico resultó en una buena opción para el diseño de pavimentos debido a las propiedades que le concede al copolímero y estos en conjunto al asfalto. Además, el uso de estas partículas propone una buena estrategia para la gestión de este residuo orgánico que se acumula en las playas.

Debido a estos resultados, se propone investigar el uso de otros copolímeros en compósito con las partículas de sargazo, reducir el intervalo entre las proporciones de partículas adicionadas al copolímero y modificar las condiciones de mezclado.

Anexo A

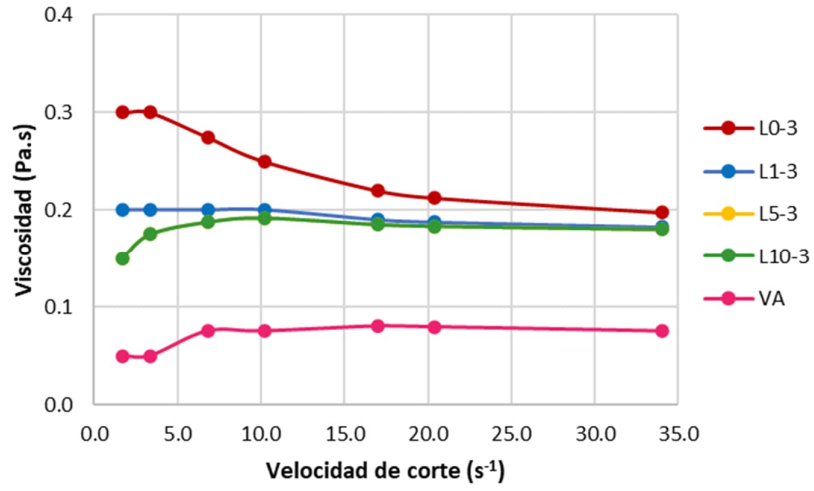


a)

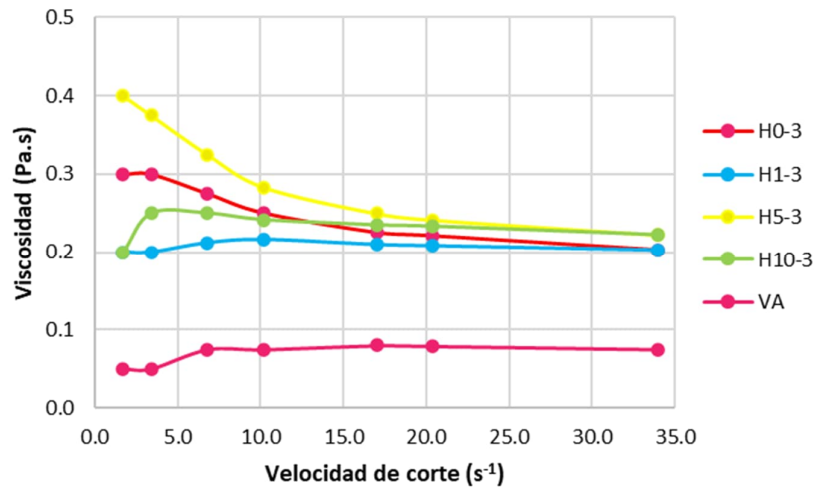


b)

Figura A.1 Viscosidad a 135°C de las mezclas modificadas al 3% con los compósitos: a) SBS-L/SP, b) SBS-H/SP.



a)



b)

Figura A.2 Viscosidad a 190°C de las mezclas modificadas al 3% con los compósitos: a) SBS-L/SP, b) SBS-H/SP.

Referencias

- [1]. The Asphalt Institute. (1992). *Manual del asfalto*. Bilbao, España: Urmo S.A.
- [2]. Vega Zurita, D. S. (2016). *Análisis del comportamiento a compresión de asfalto conformado por caucho reciclado de llantas como material constitutivo del pavimento asfáltico*. Tesis de licenciatura. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.
- [3]. Wulf Rodríguez, F. A. (2008). *Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero*. Tesis de licenciatura. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.
- [4]. Escobar Medina, F. J. (2021). *Evaluación del comportamiento fisicoquímico y reológico en asfaltos modificados con sargazo*. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Tamaulipas, México.
- [5]. Aldana Aranda, D., Enríquez Díaz, M. & Vidal, E. (2020). *Cooperación en el Caribe ante el sargazo*. Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias. Vol. 71, 62-71.
- [6]. Rodríguez Martínez, R. E. & Van Tussenbroek, B. I. (2020). *El sargazo en los pastos marinos y arrecifes*. Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias. Vol. 71, 28-33.
- [7]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2021). *Lineamientos Técnicos y de Gestión para la Atención de la Contingencia Ocasionada por Sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México*. Ciudad de México, México.
- [8]. Fan, G., Liu, H., Liu, C., Xue, Y., Ju, Z., Ding, S., Zhang, Y. & Li, Y. (2022). Analysis of the influence of waste seashell as modified materials on asphalt pavement performance. *Materials*, 15, 6788. <https://doi.org/10.3390/ma15196788>
- [9]. Escobar Medina, F. J., Rivera Armenta, J. L., Hernández Zamora, G., Salazar Cruz, B. A., Zapién Catillo, S. & Flores Hernández, C. G. (2021). Sargassum - Modified

- Asphalt: Effect of particle size on its physicochemical, rheological, and morphological properties. *Sustainability*, 13, 11734. <https://doi.org/10.3390/su132111734>
- [10]. Münkkel, M., Baldi, A., Aguiar, J., Villegas, R. & Hernández, N. (2021). Efecto de polímeros y aceite de cocina en el rango de desempeño del asfalto. *Infraestructura vial*, 42(23), 71-81. <https://doi.org/10.15517/iv.v23i42.47587>
- [11]. Guo, Y., Wang, X., Ji, G., Zhang, Y., Su, H. & Luo, Y. (2021). Effect of recycled shell waste as a modifier on the high and low temperature rheological properties of asphalt. *Sustainability*, 13, 10271. <https://doi.org/10.3390/su131810271>
- [12]. Salazar Cruz, B. A., Zapién Castillo, S., Hernández Zamora, G. & Rivera Armenta, J. L. (2020). Investigation of the performance of asphalt binder modified by sargassum. *Construction and Building Materials*, 271, 121876. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121876>
- [13]. Liu, J., Yan, K., Liu, W. & Zhao, X. (2020). Partially replacing Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) with other asphalt binder modifier: Feasibility study. *Construction and Building Materials*, 249, 118752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118752>
- [14]. Rivera Armenta, J. L., Salazar Cruz, B. A., Chávez Cinco, M. Y., Morales Cepeda, A. B. & Zapién Castillo, S. (2019). Influence of chicken feather on the rheological properties and performance of modified asphalts. *Construction and Building Materials*, 264, 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120128>
- [15]. Li, J., Yang, S., Liu, Y., Muhammad, Y., Su, Z. & Yang, J. (2019). Studies on the properties of modified heavy calcium carbonate and SBS composite modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 218, 413-423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.139>
- [16]. Bala, N., Napiah, M. & Kamaruddin, I. (2018). Effect of nanosilica particles on polypropylene polymer modified asphalt mixture performance. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.011>

- [17]. Zapién Castillo, S., Rivera Armenta, J. L., Chávez Cinco, M. Y., Salazar Cruz, B. A. & Mendoza Martínez, A. M. (2015). Physical and rheological properties of asphalt modified with SEBS/montmorillonite nanocomposite. *Construction and Building Materials*, 106, 349-356. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.099>

- [18]. Arriaza Mejía, E. E. (2015). *Introducción al diseño de mezclas asfálticas en caliente, guía práctica y teórica para su control de calidad*. Tesis de licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala. Ciudad de Guatemala, Guatemala.

- [19]. Segura Almanza, A. T. (2016). *Estudio del comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas; con materiales reutilizables en la construcción como escoria de acero*. Tesis de licenciatura. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia.

- [20]. Martínez, A., Martin, N., Gómez, A. & Páez, A. (2008). *Betunes asfálticos: materiales muy utilizados y poco conocidos químicamente*. Anales de la real sociedad española de química. Vol. 99, 43-50.

- [21]. Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2005). *N-CMT-4-05-001/05 CMT. Características de los materiales*. Ciudad de México, México.

- [22]. Nath Gotame, Y. (2016). *Relationship between physical and chemical properties of straight and recovered asphalt binders from Ontario*. Tesis de maestría. Universidad de Queen. Ontario, Canadá.

- [23]. Cox Tuch, P. M. (2015). *Manual de laboratorio para estudiantes para el desarrollo de ensayos en concreto asfáltico en caliente*. Tesis de licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala. Ciudad de Guatemala, Guatemala.

- [24]. Infante Ataurima, C. A. & Vásquez Alarcón D. H. (2016). *Estudio comparativo del método convencional y uso de los polímeros EVA y SBS en la aplicación de mezclas asfálticas*. Tesis de licenciatura. Universidad Señor de Sipán. Ciudad de Chiclayo, Perú.

- [25]. Avellán Cruz, M. D. (2007). *Asfaltos modificados con polímeros*. Tesis de licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala. Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- [26]. Stupenengo, F. (2011). *Materiales compuestos*. Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Buenos Aires, Argentina.
- [27]. Gutiérrez Cuesta, R., González García, K. L., Valdés Iglesias, O., Hernández Rivera, Y. & Acosta Suárez, Y. (2016). *Algas marinas como fuente de compuestos bioactivos en beneficio de la salud humana*. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud. Vol. XVIII, 20-27.
- [28]. León Álvarez, D., Candelaria Silva, C., Hernández Almaraz, P. & León Tejera, H. (2017). *Géneros de algas marinas tropicales de México I. Algas verdes*. Ed. Las prensas de Ciencias, Facultad de Ciencias, UNAM. 173 pp.
- [29]. Caballero Vázquez, J. A., Acosta González, A. & Hernández Zepeda, C. (2020). *El sargazo, un fenómeno complejo*. Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias. Vol. 71, 14-19.
- [30]. Muñoz Bautista, A. N. (2013). *Composición taxonómica y abundancia de la macrofauna asociada a sargassum (phaeophyceae: fucales) flotante en el sistema arrecifal veracruzano, suroeste del Golfo de México*. Tesis de maestría. Universidad Veracruzana. Veracruz, México.
- [31]. Khalil, H. P. S., Tye, Y. Y., Saurabh, C. K., Leh, C. P., Lai, T. K., Chong, E. W. N., & Syakir, M. I. (2017). Biodegradable polymer films from seaweed polysaccharides: A review on cellulose as a reinforcement material. *Express Polymer Letters*, 11(4). <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.26>
- [32]. Kannan, S. (2014). FT-IR and EDS analysis of the seaweeds *Sargassum wightii* (brown algae) and *Gracilaria corticata* (red algae). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(4), 341-351.

- [33]. Helida, E. (2011). *Polímeros*. Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Buenos Aires, Argentina.
- [34]. Mexpolimeros. (s/f). Grupo vinilo. Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos. <https://www.mexpolimeros.com/etp/VINILO.html>
- [35]. Piñón Balderrama, C. (2013). *Funcionalización Mediante Grupos Sulfónicos de Copolímeros en Bloque y Radiales de Poli (estireno-butadieno-estireno) SBS*. Tesis de maestría. Cinvestav. Nuevo León, México.
- [36]. Djaffar, S. B., Samy, D. & Khadidja, A. M. (2013). Rheological properties and storage stability of SEBS polymer modified bitumen. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5(5), 1031-1038.
- [37]. Maxil Coyoptl, R. & Salinas Hernández, M. A. (2006). *Ventajas y desventajas del uso de polímeros en el asfalto*. Tesis de licenciatura. Universidad de las Américas Puebla. Puebla, México.
- [38]. Pfeiffer, J. & Van Doormal, P. (1936). The rheological properties of asphaltic bitumens. *Journal of Institute of Petroleum Technologists*, 22, 414–440.
- [39]. Maila Paucar, M. E. (2013). *Comportamiento de una mezcla modificada con polímero Etileno Vinil Acetato (EVA)*. Tesis de licenciatura. Universidad Central de Ecuador. Quito, Ecuador.
- [40]. Iqbal, M., Hussain, A., Khattak, A., & Ahmad, K. (2020). Improving the aging resistance of asphalt by addition of polyethylene and sulphur. *Civ. Eng. J*, 6(5), 1017-1030. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2020-03091525>
- [41]. Régules Reyes, A. (2008). *Efecto de la composición del asfalto sobre las propiedades termomecánicas de asfalto modificado con SBS*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

- [42]. Salazar Cruz, B. A. (2010). *Modificación de asfalto con polímeros SBS y arcillas pilareadas, evaluando su efecto térmico y reológico*. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Tamaulipas, México.
- [43]. 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*, 25(3), 285-293.
- [44]. Zapién Castillo, V. (2022). *Mezclas asfálticas empleando como agentes modificadores partículas de cáscaras de ajo modificadas químicamente*. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Tamaulipas, México.
- [45]. Zapién Castillo, S. (2015). *Obtención de mezclas de asfalto modificado con SEBS y nanoarcilla*. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Tamaulipas, México.
- [46]. Anguas, P. G., Alamilla, H. D., López, J. G., & MADRIGAL, A. (2004). Comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con SBR. *Publicación Técnica*, (254).
- [47]. Rioux, L. E., Turgeon, S. L., & Beaulieu, M. (2007). Rheological characterisation of polysaccharides extracted from brown seaweeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(9), 1630-1638. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2829>
- [48]. Surco Acahuana, R. (2019). *Determinación de temperaturas de mezclado y compactado para mezclas asfálticas preparadas en caliente en base al método de viscosidad rotacional ASTM D4402 utilizando ligantes asfálticos convencionales y modificados tipo SBS*. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- [49]. Eyring, H. (1936). Viscosity, plasticity, and diffusion as examples of absolute reaction rates. *The Journal of chemical physics*, 4(4), 283-291.

- [50]. Wang, J., Yuan, J., Kim, K. W., & Xiao, F. (2018). Chemical, thermal and rheological characteristics of composite polymerized asphalts. *Fuel*, 227, 289-299. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.100>

- [51]. Lv, S., Xia, C., Yang, Q., Guo, S., You, L., Guo, Y., & Zheng, J. (2020). Improvements on high-temperature stability, rheology, and stiffness of asphalt binder modified with waste crayfish shell powder. *Journal of cleaner production*, 264, 121745. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121745>

- [52]. Zhang, H., Gong, M., Gao, D., Yang, T., & Huang, Y. (2020). Comparative analysis of mechanical behavior of composite modified asphalt mixture based on PG technology. *Construction and Building Materials*, 259, 119771. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119771>

- [53]. Hernández, G., Medina, E. M., Sánchez, R., & Mendoza, A. M. (2006). Thermomechanical and rheological asphalt modification using styrene–butadiene triblock copolymers with different microstructure. *Energy & fuels*, 20(6), 2623-2626. <https://doi.org/10.1021/ef050393t>

- [54]. Ren, S., Liu, X., Fan, W., Wang, H., & Erkens, S. (2019). Rheological properties, compatibility, and storage stability of SBS latex-modified asphalt. *Materials*, 12(22), 3683. <https://doi.org/10.3390/ma12223683>

- [55]. Zhang, F., & Hu, C. (2013). The research for SBS and SBR compound modified asphalts with polyphosphoric acid and sulfur. *Construction and Building Materials*, 43, 461-468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.001>

- [56]. Liang, M., Xin, X., Fan, W., Wang, H., Ren, S., & Shi, J. (2017). Effects of polymerized sulfur on rheological properties, morphology and stability of SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 150, 860-871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.069>

- [57]. Zeng, Y., Liu, Q., Zeng, Q., He, Y., & Xu, Z. (2021). Research on the Mechanism of Interaction between Styrene–Butadiene–Styrene (SBS) and Asphalt Based on

Molecular Vibration Frequency. *Materials*, 14(2), 358. <https://doi.org/10.3390/ma14020358>

- [58]. Masson, J. F., Pelletier, L., & Collins, P. (2001). Rapid FTIR method for quantification of styrene-butadiene type copolymers in bitumen. *Journal of Applied Polymer Science*, 79(6), 1034-1041. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20010207\)79:6%3C1034::AID-APP60%3E3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010207)79:6%3C1034::AID-APP60%3E3.0.CO;2-4)
- [59]. Liu, J., Min, X., Zhang, X., Zhu, X., Wang, Z., Wang, T., & Fan, X. (2019). A novel synthetic strategy for styrene–butadiene–styrene tri-block copolymer with high cis-1,4 units via changing catalytic active centres. *Royal Society Open Science*, 6(6), 190536. <https://doi.org/10.1098/rsos.190536>
- [60]. Guilment, J., & Bokobza, L. (2001). Determination of polybutadiene microstructures and styrene–butadiene copolymers composition by vibrational techniques combined with chemometric treatment. *Vibrational Spectroscopy*, 26(1), 133-149. [https://doi.org/10.1016/S0924-2031\(01\)00111-4](https://doi.org/10.1016/S0924-2031(01)00111-4)
- [61]. Nizamuddin, S., Jamal, M., Gravina, R., & Giustozzi, F. (2020). Recycled plastic as bitumen modifier: The role of recycled linear low-density polyethylene in the modification of physical, chemical and rheological properties of bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121988. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121988>