



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

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICOQUÍMICO Y REOLÓGICO
EN ASFALTOS MODIFICADOS CON SARGAZO**

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Presenta:
Ing. Francisco Javier Escobar Medina
G14071372

Director de Tesis:
Dra. Beatriz Adriana Salazar Cruz

Co-director de Tesis:
Dr. José Luis Rivera Armenta

Cd. Madero, Tamaulipas

Agosto 2021

Cd. Madero, Tam: 24 de junio de 2021

OFICIO No. : U.071/21
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE
IMPRESIÓN DE TESIS

C. FRANCISCO JAVIER ESCOBAR MEDINA
No. DE CONTROL G14071372
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 Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICOQUÍMICO Y REOLÓGICO EN ASFALTOS MODIFICADOS CON SARGAZO"

El Jurado 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. HUGO EDUARDO DE ALVA SALAZAR
DIRECTOR DE TESIS:	DRA. BEATRIZ ADRIANA SALAZAR CRUZ
CO-DIRECTOR:	DR. JOSÉ LUIS RIVERA ARMENTA

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación 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"



MARCO ANTONIO CORONEL GARCÍA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



c.c.p.- Archivo
MACG 'mdcoa'



Av. 1° de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos.
C.P. 89440 Cd. Madero. Tam. Tel. 01 (833) 357 48 20, ext. 3110
e-mail: depi_cdmadero@tecnm.mx
tecnm.mx | cdmadero.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios quien me ha dirigido por el camino correcto, en el que todo momento ha estado conmigo ayudándome a aprender de mis errores donde me permitió llegar hasta esta etapa profesional de mi vida con fortaleza y perseverancia para alcanzar la meta.

A mi familia, el cual es fundamental en la vida de una persona, por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que incluye este. Muchas gracias por su apoyo incondicional, consejos y motivación para alcanzar mis metas.

A mis amigos por los buenos momentos que hemos compartido. Creo que todos aprendemos continuamente de todos y de uno mismo y eso sin duda es enriquecedor para ambos.

A mi directora de tesis la Dra. Beatriz Adriana Salazar Cruz, primero por darme la oportunidad de trabajar con usted, segundo por compartir sus conocimientos motivo por el cual fueron de gran ayuda para culminar esta tesis y por último por toda su paciencia, motivación, orientación y supervisión durante mi estancia en el posgrado.

Al comité de revisores de este proyecto de investigación el cual está integrado por el Dr. José Luis Rivera Armenta, el Dr. Hugo Eduardo de Alva Salazar y la Dra. Ana Beatriz Morales Cepeda por su profesionalismo demostrado y dedicado para la aportación de observaciones, comentarios, sugerencias y mejoras en este trabajo. También quiero hacer un espacio para la maestra Yolanda Chávez Cinco el cual estuvo siempre al pendiente de mi avance, así como de su apoyo y enseñanzas brindadas.

A la empresa Dynasol Elastómeros por los análisis generados de penetración y microscopía fluorescente para la caracterización de las mezclas asfálticas.

Al Centro de Investigación en Petroquímica (campus 3), Instituto Tecnológico de Ciudad Madero (ITCM) por proporcionarme las aulas de estudio para formarme y áreas de laboratorio para el desarrollo de este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para lograr este grado académico.

RESUMEN

El asfalto es un material importante para la construcción de carreteras y otras aplicaciones. Es por ello que se realiza la búsqueda de materiales que en combinación con el asfalto generen un producto de mejor calidad. Debido a la creciente preocupación por el calentamiento global y el cambio climático ha llegado al sector de las mezclas asfálticas donde se está intentando innovar y desarrollar nuevos materiales para carreteras que sean más respetuosos con el medio ambiente.

Para cubrir estas diferentes necesidades, debe contarse con asfaltos con un mejor desempeño, teniendo que modificar sus propiedades químicas, físicas y reológicas, con el fin de mejorar su comportamiento permitiendo así verse reflejado mayor resistencia del asfalto a las condiciones climáticas extremas y al tránsito.

En los últimos años, el sargazo ha sido un problema en nuestro país, ha invadido las playas de diferentes regiones del Golfo de México y el Mar Caribe debido a una reacción al aumento de nutrientes, temperatura y cambios en las corrientes marinas que ha ocasionado el cambio climático. Éste, al nutrirse de los contaminantes del mar, genera una producción acelerada de esta alga, siendo así una medida natural para corregir la contaminación producida por lo cual una opción sería utilizar este material aprovechando sus propiedades para mejorar el desempeño de mezclas asfálticas.

En este trabajo se estudió el efecto de añadir sargazo sobre el asfalto en forma de partículas con tamaño $850\mu\text{m}$ (malla 20) y $500\mu\text{m}$ (malla 35) respectivamente, llevándose a concentraciones de 0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0% wt. Se aplicaron técnicas para caracterizar tales como viscosidad dinámica, punto de reblandecimiento, caracterización por separación de fases, índice de penetración, espectroscopía infrarroja, microscopía fluorescente y reología.

Con los resultados obtenidos, modificar un asfalto con un material natural como el sargazo incorporado en forma de partículas se presenta respuestas favorables con un mayor grado de desempeño frente a las pruebas de ensayo realizadas.

ABSTRACT

Asphalt is an important material for road construction and other applications. That is why the search for materials that in combination with asphalt generate a better-quality product is being carried out. The growing concern about global warming and climate change has reached the asphalt mix sector, where efforts are being made to innovate and develop new road materials that are more environmentally friendly.

To cover these different needs, asphalts with better performance must be available, having to modify their chemical, physical and rheological properties in order to improve their behavior, thus allowing for greater resistance of the asphalt to extreme weather conditions and traffic.

In recent years, sargassum has been a problem in our country, it has invaded the beaches of different regions of the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea due to a reaction to the increase in nutrients, temperature and changes in ocean currents caused by climate change. This alga, by feeding on sea pollutants, generates an accelerated production of this algae, thus being a natural measure to correct the pollution produced, so one option would be to use this material, taking advantage of its properties to improve the performance of asphalt mixtures.

In this work, the effect of adding sargassum on asphalt was studied in the form of 850 μ m (20 mesh) and 500 μ m (35 mesh) particles, respectively, at concentrations of 0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0% wt. Characterization techniques such as dynamic viscosity, softening point, phase separation characterization, penetration index, infrared spectroscopy, fluorescence microscopy and rheology were applied.

With the results obtained, modifying an asphalt with a natural material such as sargassum incorporated in the form of particles presents favorable responses with a higher degree of performance compared to the tests carried out.

Índice

Introducción	8
Capítulo I. MARCO TEÓRICO	9
1. Antecedentes	10
1.1 Asfalto	12
1.2 Pavimentos	18
1.3 Propiedades de los asfaltos	19
1.4 Mezcla Asfáltica	20
1.5 Asfalto modificado	20
1.6 Algas	22
1.7 Algas pardas	24
1.8 Sargazo	28
Capítulo II. METODOLOGÍA.....	29
2. Materiales.....	30
2.1 Preparación de partículas de sargazo.....	30
2.2 Descripción del asfalto	31
2.3 Preparación de mezclas asfálticas.....	32
2.4 Técnicas de Caracterización	33
Capítulo III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
3. Caracterización elemental del sargazo.....	41
3.1 Análisis Termogravimétrico (TGA)	42
3.2 Viscosidad Dinámica.....	43
3.3 Punto de reblandecimiento	55
3.4 Separación de fases.....	56
3.5 Caracterización por penetración	58
3.6 Microscopía fluorescente.....	60
3.7 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	62
3.8 Reología.....	66
CONCLUSIONES.....	70
Referencias.....	72

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Clasificación de constituyentes de acuerdo al programa SHRP.....	13
Tabla 1.2 Composición química general de las algas	22
Tabla 1.3 Clasificación de algas y especies correspondientes	23
Tabla 3.1 Composición química del sargazo.....	41
Tabla 3.2 Relación de viscosidad con la velocidad rotacional.....	48
Tabla 3.3 Viscosidad dinámica a 160 °C.....	50
Tabla 3.4 Parámetros del modelo de Arrhenius de las mezclas asfálticas	54
Tabla 3.5 Resultados estabilidad al almacenamiento en mezclas asfálticas.....	57
Tabla 3.6 Valores de penetración e índice de penetración de asfaltos modificados	58
Tabla 3.7 Temperatura de falla para las mezclas asfálticas.....	69

Índice de Figuras

Figura 1.1 Asfalto.....	12
Figura 1.2 Estructura molecular de los asfaltenos	15
Figura 1.3 Esquema para la obtención de los diversos productos asfálticos.....	16
Figura 1.4 Organización de la pared celular de las algas cafés	25
Figura 1.5 Arreglo de fibras de celulosa	25
Figura 1.6 Unidad estructural del fucoïdan	26
Figura 1.7 Unidad estructural del alginato	27
Figura 1.8 Estructura del sargazo	28
Figura 2.1 Alga sargazo (a) y partículas de polvo de sargazo (b)	30
Figura 2.2 (a) Centrifuga escurridora y exprimidora de agua y (b) molido en licuadora Oster	31
Figura 2.3 Equipo de calentamiento y mezclado.....	32
Figura 2.4 Partes del viscosímetro rotacional.....	34
Figura 2.5 Análisis ring & Ball en muestra de asfalto.....	36
Figura 3.1 Termograma partículas de sargazo	43
Figura 3.2 Viscosidades de mezclas asfálticas a 135°C con geometría 21 para tamaño de partícula de 850 µm y 500 µm.....	44
Figura 3.3 Viscosidades de mezclas asfálticas a 135°C con geometría 27 para tamaño de partícula de 850 µm y 500 µm.....	44

Figura 3.4 Viscosidades de mezclas asfálticas a 150°C con geometría 21 para tamaño de partícula de 850 μm y 500 μm	45
Figura 3.5 Viscosidades de mezclas asfálticas a 150°C con geometría 27 para tamaño de partícula de 850 μm y 500 μm	45
Figura 3.6 Viscosidades de mezclas asfálticas a 160°C con geometría 21 para tamaño de partícula de 850 μm y 500 μm	46
Figura 3.7 Viscosidades de mezclas asfálticas a 160°C con geometría 27 para tamaño de partícula de 850 μm y 500 μm	46
Figura 3.8 Viscosidad de mezclas asfálticas a 180°C con geometría 21 para tamaño de partícula de 850 μm y 500 μm	47
Figura 3.9 Viscosidad de mezclas asfálticas a 180°C con geometría 27 para tamaño de partícula de 850 μm y 500 μm	47
Figura 3.10 Desviación estándar de la viscosidad a diferentes velocidades con tamaño de partícula de 850 μm	49
Figura 3.11 Desviación estándar de la viscosidad a diferentes velocidades con tamaño de partícula de 500 μm	49
Figura 3.12 Viscosidad a 180°C con geometría 21	51
Figura 3.13 Viscosidad vs temperatura para tamaño de partícula de 850 μm con geometría (a) 21 y (b) 27.	52
Figura 3.14 Viscosidad vs temperatura para tamaño de partícula de 500 μm con geometría (a) 21 y (b) 27.	52
Figura 3.15 Energía de activación de flujo de las mezclas asfálticas.....	53
Figura 3.16 Resultados de valores de temperatura de reblandecimiento	55
Figura 3.17 Coloración del sargazo sobre el asfalto.....	56
Figura 3.18 Sedimentación en tubo colapsible parte inferior.....	57
Figura 3.19 Microscopías con tamaño de partícula de 850 μm : (a) M1.0%, (b)M1.5%, (c)M2.0%, (d)M2.5% y (e)M3.0%. Aumento 5X	60
Figura 3.20 Microscopías con tamaño de partícula de 500 μm : (a) M1.0%, (b)M1.5%, (c)M2.0%, (d)M2.5% y (e)M3.0%. Aumento 5X	61
Figura 3.21 Microscopía mezcla al 2.0% con tamaño de partícula de 500 μm . Aumento 20X .	61
Figura 3.22 Espectro FT-IR del sargazo (alga parda)	62

Figura 3.23 Espectro infrarrojo mezclas asfálticas para tamaño de partícula de 850µm	65
Figura 3.24 Espectro infrarrojo mezclas asfálticas para tamaño de partícula de 500µm	65
Figura 3.25 Gráfica isocrónica del módulo complejo en función de la temperatura para tamaño de partícula de 850µm (malla 20).....	66
Figura 3.26 Gráfica isocrónica del módulo complejo en función de la temperatura para tamaño de partícula de 500µm (malla 35).....	67
Figura 3.27 Parámetro temperatura de falla $G^*/\sin\delta$ a frecuencia constante de 10 rad/s para tamaño de partícula de 850µm (malla 20).....	68
Figura 3.28 Parámetro temperatura de falla $G^*/\sin\delta$ a frecuencia constante de 10 rad/s para tamaño de partícula de 500µm (malla 35).....	68

Introducción

El asfalto es un material viscoso, pegajoso, de color negro y su consistencia es variable. Su utilización tiene formas muy variadas, pero es usado principalmente como material para revestir carreteras, impermeabilizar o aislar estructuras, presenta propiedades impermeables, adherentes y cohesivas, capaces de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes.

En los últimos años, se ha realizado una extensa investigación para mejorar las propiedades del asfalto buscando un mejor desempeño que permita prolongar su duración. Se ha demostrado que los modificadores pueden aumentar la resistencia de la mezcla al agrietamiento térmico, agrietamiento por fatiga y deformación permanente. Se han aplicado modificadores de asfalto de diferentes categorías, incluidos productos de caucho, fibras, polímeros (naturales y sintéticos) para mejorar las propiedades del asfalto.

Las preocupaciones sobre la protección del medio ambiente y los problemas económicos han motivado a encontrar otros materiales en la industria del pavimento de asfalto. Investigaciones previas han indicado que los materiales de desecho se pueden usar como relleno, agregado y modificador de asfalto en mezclas de asfalto (por ejemplo, conchas marinas, arcillas, plumas de aves, vidrio, ladrillos de desecho y pavimento de asfalto recuperado).

Con el arribo de algas del género Sargazo se presenta un fenómeno natural originado por el desprendimiento de agregaciones del Mar de los Sargazos favorecido por el aumento de los nutrientes en el mar, el cambio climático, las variaciones meteorológicas y oceanográficas. Dada la problemática de su acumulación en grandes cantidades en las playas mexicanas ha despertado interés para encontrar una aplicación y así remediar este problema natural, a partir de esto se toma la idea de su utilización como modificador natural sobre asfaltos.

Ante las situaciones mencionadas, en este trabajo de investigación se estudia el efecto de añadir al asfalto un modificador natural (sargazo) con tamaño de partículas 850 μm (malla 20) y 500 μm (malla 35) a distintas concentraciones utilizando técnicas para evaluar propiedades tales como viscosidad dinámica, punto de reblandecimiento, separación de fases, índice de penetración y reológicas. Esto con el fin de obtener una mejor mezcla asfáltica que presente propiedades adecuadas.

Capítulo I. MARCO TEÓRICO

1. Antecedentes

El asfalto es un material de particular interés porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia que da flexibilidad controlable a las mezclas con las que se combina usualmente. Se utiliza ampliamente en pavimentación de carreteras, revestimiento de obras hidráulicas, impermeabilización de edificios, etc (Institute, 1992).

Existen dos razones por las que en México el pavimento flexible (asfáltico) ha sido una solución más rentable que el pavimento rígido (concreto hidráulico). La primera es que en este país se cuenta principalmente con crudo pesado, obteniendo menor rendimiento de productos ligeros y mayor producción de asfalto que permite producir asfaltos a bajo costo, de tal manera que un pavimento flexible resulta de 2 a 2.5 veces más económico que uno rígido en su inversión inicial. La segunda es que las intensidades de tránsito nacional, al no ser demasiado altas, eran compatibles con los alcances de vida útil de un pavimento asfáltico (Sanchez, 2016).

Porto y col. (2019) estudiaron el efecto de añadir polisacáridos naturales en polvo dentro del cual usan un alga roja marina (*algae euchemae*) como aditivo en asfaltos donde obtuvieron resultados favorables y establecieron que las macromoléculas caracterizadas por cadenas largas, flexibles e hidrófilas del alga pueden establecer puentes blandos conectando los diferentes agregados polares de asfáltenos para así aumentar el rendimiento reológico a temperaturas más altas.

Susilorini y col. (2014) estudiaron el efecto sobre un mortero modificado con polímeros naturales con gel de algas (*Euclima Cottonii*) y polvo de algas (*Gracilaria Sp.*) sobre la resistencia a la compresión y a la tracción del material compuesto. Se informó que la presencia de agarosa y agarropectina en las algas marinas produce propiedades muy fuertes de gelificación y engrosamiento, lo que aumenta el mecanismo de unión. La composición de mezcla óptima se logró a partir del 0.5% de la adición de polvo de algas marinas. Encontraron que el mortero modificado con las algas tiene buenas propiedades de unión y adhesión a los agregados, donde las partes porosas se llenan y fortalecen el rendimiento del cemento.

Caro y col. (2016) en su trabajo exploran el impacto del uso de biomodificadores producidos a partir de tres desechos agroindustriales diferentes (bagazo de caña de azúcar, mazorcas de maíz y cáscara de arroz) obtenidos a través de la solvolisis, los resultados mostraron que los biomateriales contienen varios grupos funcionales hidrofóbicos e hidrofílicos que modificaron las propiedades químicas del aglutinante asfáltico. Además, los biomateriales produjeron un efecto de endurecimiento en el aglutinante asfáltico y afectaron fuertemente la calidad de la unión adhesiva con los agregados.

Nciri y col. (2018) utilizaron conchas de ostras de desecho como un nuevo biofiller para aplicaciones de pavimento de asfalto de mezcla en caliente. Una dosis más alta de concha de ostra alteró la morfología del aglutinante, mientras que las dosis más bajas e intermedias mejoraron su estabilidad térmica y mejoraron sus rendimientos de baja temperatura, deformación permanente y agrietamiento por fatiga con respecto al asfalto convencional.

Colunga y col. (2018) utilizaron 2% de un material de desecho en este caso partículas de quill de pollo que contiene queratina incorporado en un polímero del tipo SBS radial, el asfalto tiene un comportamiento mecánico aceptable y con características tales que permiten inferir un desempeño satisfactorio a largo plazo, reduciendo grietas, deformaciones en elementos estructurales como son los pavimentos.

Bellatrache y col. (2019) estudiaron el efecto de añadir fibras de palma sobre asfalto, los resultados señalaron que hasta un 6% de aditivo se tiene una mejor consistencia, mejores propiedades mecánicas y térmicas todo esto a la existencia de una red semicristalina en las fibras que indujo a un mejor desempeño en el asfalto.

Ding y col. (2020) estudiaron el efecto de añadir polvo de hule de llanta en mezclas asfálticas mediante análisis de viscosidad Brookfield. Los resultados mostraron un buen desempeño en la viscosidad y encontraron también que el tamaño de partícula influye al utilizar un modelo de rotor y condición de velocidad de mezclado afectando significativamente en la viscosidad.

Salazar y col. (2021) utilizaron por primera vez un alga marina (sargazo) como modificador en mezclas asfálticas. La prueba de estabilidad térmica fue eficaz para demostrar una mejora de la compatibilidad entre el sargazo y el asfalto causada por una reducción de la diferencia entre sus densidades.

1.1 Asfalto

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM 1998), define al asfalto como un material cementoso negro que se produce en la naturaleza o se obtiene por refinación de petróleo crudo (Nath, 2016).

El asfalto es un material que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando) a temperaturas ambientales normales como se muestra en la Figura 1.1. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual le permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de mezcla en caliente. Se adhiere fácilmente a las partículas del agregado y por lo tanto es un excelente cemento para unir partículas del agregado en un pavimento de mezcla caliente.

Es el componente que da cohesión en las mezclas para construcción de carreteras y es el principal responsable de las propiedades de éstas. Su consistencia puede modificarse con la temperatura lo que permite su fácil manipulación, la compactación de las mezclas y su adecuado comportamiento a temperaturas de servicio (Merino, 2003).



Figura 1.1 Asfalto

1.1.1 Composición química

Están constituidos principalmente por una mezcla de moléculas de alto peso molecular, de naturaleza principalmente hidrocarbonada, con pequeñas proporciones de heteroátomos S, O, N y pequeñas trazas de átomos metálicos (V, Ni, Fe, Ca, Mg).

Por otro lado, el modelo estructural del programa SHRP (por sus siglas en inglés, Programa de investigación estratégico en carreteras) clasifica a los compuestos constituyentes de los cementos asfalto de petróleo (CAP) en polares y no polares, ver Tabla 1.1, proponiendo que las fuerzas intra e intermoleculares son las responsables de la formación de redes tridimensionales que resultan en características elásticas y viscosas (Herencia, 2001).

Tabla 1.1 Clasificación de constituyentes de acuerdo al programa SHRP

Fuerza Intra e intermoleculares	Compuestos que se aglomeran
Van der Waals	Largas cadenas alifáticas
Puentes de hidrogeno	Polares/ Heteroátomos
Atracciones π - π	Aromáticos

Los cementos asfálticos contienen una combinación de las siguientes tres disposiciones mediante las cuales los átomos de carbono están unidos entre sí:

Cadenas lineales o ramificadas. Tales cementos asfálticos generalmente se denominan tipos alifáticos o parafínicos.

Anillos saturados simples o complejos. Saturado significa la relación de hidrógeno / carbono más alto posible en las moléculas de asfalto. Estos cementos de asfalto generalmente se denominan tipos nafténicos.

Una o más estructuras anulares estables condensadas de seis carbonos no aseguradas. Estos cementos asfálticos se denominan tipos aromáticos. El benceno y el naftaleno tienen tales estructuras.

Grupos funcionales o polares

Los heteroátomos están unidos a los átomos de carbono en las moléculas de asfalto en diferentes configuraciones y en forma de diferentes compuestos. Estas configuraciones son polares porque existe un desequilibrio de las fuerzas electroquímicas dentro de la molécula que produce un dipolo. Por lo tanto, la molécula polar tiene características electropositivas y electronegativas similares a un imán que tiene los polos norte y sur.

Dado que las cargas similares se repelen entre sí y las cargas diferentes se atraen entre sí, las interacciones moleculares se inducen en los cementos asfálticos que influyen fuertemente en sus propiedades físicas o de ingeniería y su rendimiento. Estas configuraciones de heteroátomos imparten funcionalidad y polaridad a las moléculas de asfalto y, por lo tanto, se denominan grupos funcionales o polares. Funcionalmente se relaciona con la forma en que las moléculas de asfalto interactúan entre sí o con superficies y / o moléculas de otros materiales. Además, los componentes no polares del cemento asfáltico, que actúan como disolventes o dispersantes para los grupos polares o funcionales, desempeñan un papel importante en la determinación del efecto que los grupos polares tendrán en las propiedades físicas y de envejecimiento del cemento asfáltico (Roberts, 1996).

El asfalto está constituido básicamente de cuatro fracciones genéricas, que representan grupos de hidrocarburos con propiedades químicas similares: Asfaltenos, Saturados, Aromáticos y Resinas conocidos como fraccionamiento SARA.

Asfaltenos

Son sólidos amorfos de color marrón oscuro o negro. Los asfaltenos son los componentes más complejos con la polaridad más alta. Por lo tanto, tienen una tendencia muy alta a interactuar y asociarse en conglomerados. Están constituidos, además de carbono e hidrógeno, por nitrógeno, azufre y oxígeno, que dan lugar a ciclos tiofénicos y piridínicos que confieren una elevada polaridad en la Figura 1.2 se observa la estructura de un asfaleno. El contenido en asfaltenos tiene un importante efecto en las características reológicas del betún.

Incrementando el contenido de asfaltenos se obtiene un betún de mayor dureza con menor penetración, mayor punto de reblandecimiento y consecuentemente mayor viscosidad. Los asfaltenos constituyen entre un 5 y un 25 % del betún.

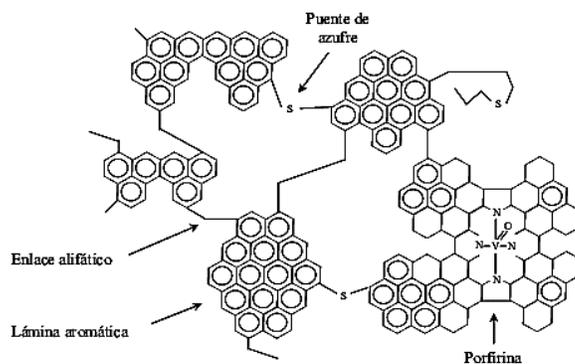


Figura 1.2 Estructura molecular de los asfáltenos

Saturados

Son aceites blancos no polares constituidos por hidrocarburos alifáticos lineales o con cadenas laterales alifáticas y aromáticas. Esta fracción representa entre un 5 y un 20 % del betún.

Nafteno-aromático

Comprenden los compuestos nafteno-aromáticos de menor peso molecular. Constituyen entre el 40 y el 65 % del total del betún y son un líquido viscoso de color marrón anaranjado.

Consisten en cadenas no polares de carbono en las que dominan los sistemas de anillos insaturados y tienen una gran capacidad para disolver los otros hidrocarburos de alto peso molecular.

Resinas

Al igual que los asfáltenos tienen una elevada proporción de hidrógeno y carbono y contienen pequeñas cantidades de oxígeno, azufre y nitrógeno. Son sólidos negros, brillantes y quebradizos y su naturaleza es muy polar. Esta particular característica les hace fuertemente adhesivos y peptizantes.

1.1.2 Proceso de Obtención

Técnicamente, el betún es la fracción del petróleo que se destila por encima de 535 °C y en la que se encuentran los compuestos químicos con pesos moleculares por encima de 600uma. Así pues, su obtención a partir del petróleo se realiza por distintos procesos de destilación, soplado, extracción de disolventes y reconstitución.

El primer proceso es una destilación fraccionada a presión atmosférica y 300-350 °C en la que se separan los gases (propano y butano), nafta (que posteriormente se utiliza para la obtención de gasolina), queroseno y gasoil, del crudo reducido. Posteriormente se somete el crudo reducido a una segunda destilación a vacío (10- 100 mm de Hg) y 350-400 °C en la que se obtiene una serie de cortes más pesados que sirven como base para la fabricación de aceites lubricantes. Queda un residuo de vacío que posee una elevada viscosidad y una penetración entre 10 y 500 dmm en función del origen del crudo. Una vez obtenido el residuo de vacío se dan diversos procesos y transformaciones como se puede observar en la Figura 1.3 (Martínez, 2008).

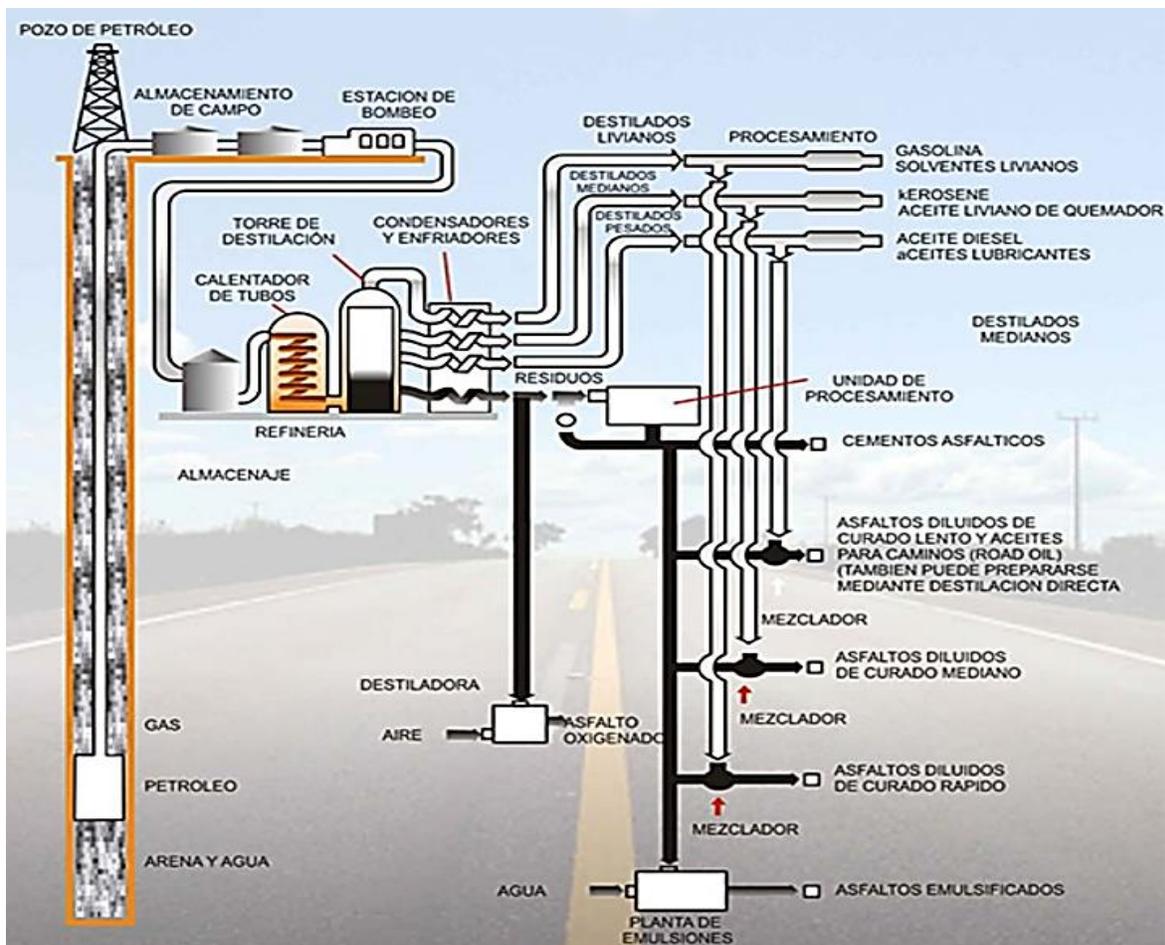


Figura 1.3 Esquema para la obtención de los diversos productos asfálticos

1.1.3 Clasificación

Los asfaltos más utilizados en la construcción de pavimentos flexibles se pueden dividir en tres tipos:

Cemento asfáltico

El cemento asfáltico se obtiene mediante el proceso de destilación del petróleo crudo utilizando diferentes técnicas de refinación. A temperatura ambiente, el cemento asfáltico es un material negro, pegajoso, semisólido y altamente viscoso. Es un material fuerte y duradero con excelentes características adhesivas e impermeabilizantes. También es altamente resistente a la acción de la mayoría de los ácidos, álcalis y sales. El mayor uso del cemento asfáltico es en la producción de asfalto de mezcla en caliente que se utiliza principalmente en la construcción de pavimentos flexibles en todo el mundo.

Se utilizan varios grados estándar de cemento asfáltico, basados en la penetración, la viscosidad o el rendimiento para clasificar los cementos asfálticos en diferentes grados. La clasificación de penetración del cemento asfáltico se especifica en ASTM D946 y se controla principalmente mediante la prueba de penetración. Se utilizan cinco cementos asfálticos clasificados de penetración estándar, 40-50, 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300, para pavimentar asfalto de grado. El segundo método para clasificar los cementos de asfalto es por clasificación de viscosidad, como se especifica en ASTM D3381. Esta clasificación se basa en la viscosidad del cemento original o en la viscosidad del cemento de asfalto después del envejecimiento en la prueba de horno de película delgada (RTFO). Ambas viscosidades se miden a 140 ° F (60 °C) y se informan en equilibrio. Los grados de viscosidad basados en los cementos de asfalto originales incluyen: AC-2.5, AC-5, AC-10, AC-20, AC-30 y AC-40. El tercer método para clasificar los aglutinantes de asfalto se basa en el rendimiento y se desarrolló en el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (SHRP).

Asfaltos emulsificados

Es una mezcla de cemento asfáltico, agua y agente emulsionante. Debido a que el cemento asfáltico no se disolverá en agua, el cemento asfáltico y el agua existen en fases separadas.

Los asfaltos emulsionados también se clasifican como asfaltos líquidos porque, a diferencia de los cementos de asfalto, son líquidos a temperatura ambiente. Las emulsiones están hechas para reducir la viscosidad del asfalto para temperaturas de aplicación más bajas. Cuando un asfalto emulsionado se mezcla con un agregado, se fragmenta o rompe porque las gotas de asfalto reaccionan con la superficie del agregado y se unen, exprimiendo el agua entre ellos.

Asfaltos rebajados

Son asfaltos líquidos que se fabrican agregando solventes de petróleo a los cementos de asfalto. Están hechos para reducir la viscosidad del asfalto para temperaturas de aplicación más bajas. La aplicación al agregado o al pavimento hace que el solvente escape por evaporación, dejando así el residuo de cemento asfáltico en la superficie (Roberts, 1996).

1.2 Pavimentos

Es un conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua.

1.2.1 Pavimento flexible

El cemento asfáltico también se conoce como pavimento de asfalto de mezcla en caliente o pavimento flexible. Es una mezcla de agregados gruesos, agregados finos y aglutinantes de asfalto.

Los HMA (por sus siglas en inglés, mezcla asfáltica en caliente) generalmente se producen calentando el cemento asfáltico a aproximadamente 160 ° C y mezclándolo en un 5 por ciento con agregado. El espesor típico de un pavimento de concreto asfáltico es de aproximadamente 4-8 pulgadas, pero en algunos casos es tan grueso como 20 pulgadas debido a un tráfico de alto volumen.

La naturaleza única del cemento asfáltico es su flexibilidad bajo carga. La mezcla de asfalto en caliente generalmente se aplica en una capa de 5-10 cm de espesor con la parte inferior del pavimento apoyando la capa superior conocida como la superficie gruesa.

Los agregados en la capa inferior son responsables de evitar la deformación permanente y el agrietamiento por fatiga, mientras que los agregados en la superficie gruesa son responsables de sus propiedades de fricción y durabilidad.

Resulta más económico en su construcción inicial, tiene un periodo de vida de entre 10 y 15 años, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil. Este tipo de pavimento está compuesto principalmente de una carpeta asfáltica, de la base y de la sub-base.

1.2.2 Pavimento rígido

Se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su periodo de vida varía entre 20 y 40 años; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas. Los pavimentos rígidos se construyen con una capa de hormigón de cemento Portland (PCC). El pavimento rígido 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.

1.3 Propiedades de los asfaltos

Las propiedades físicas más importantes del asfalto comprenden durabilidad, adhesión y cohesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

Durabilidad

Mide la capacidad del asfalto para conservar sus características originales en el servicio a largo plazo. La durabilidad de los aglomerantes de asfalto depende principalmente del rendimiento del pavimento. Se puede probar en el laboratorio mediante la prueba de horno de película delgada (TFOT) y la prueba de horno de película delgada rodante (RTFO).

Adhesión y cohesión

La tendencia de dos materiales con moléculas diferentes que se unen se conoce como adhesión.

Significa que la adhesión es la capacidad del asfalto de adherirse al agregado en la mezcla de pavimento. La cohesión es la capacidad del asfalto para mantener las partículas de agregado firmemente en su lugar en el pavimento terminado.

La pérdida de adhesión y cohesión ocurre cuando el agua interactúa o penetra en la interfaz entre el asfalto y el agregado. Se puede medir con la prueba de ductilidad.

Susceptibilidad de temperatura

La susceptibilidad a la temperatura juega un papel vital en las propiedades físicas del asfalto. Los aglutinantes de asfalto son de naturaleza termoplástica, es decir, se vuelve más duro (más viscoso) a medida que su temperatura disminuye y más suave (menos viscoso) a medida que aumenta su temperatura.

Envejecimiento

Los aglomerantes de asfalto se endurecen durante la mezcla, el transporte, la construcción y en el pavimento en servicio. El endurecimiento del asfalto es la causa principal del agrietamiento a baja temperatura en el pavimento flexible. La causa principal del endurecimiento es la oxidación (Nath, 2016).

1.4 Mezcla Asfáltica

Están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

1.5 Asfalto modificado

Son el producto de la disolución o en la incorporación de materiales nuevos en la mezcla, son sustancias estables, en el tiempo y cambio de temperatura; que se le añaden al asfalto para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, mejorando su reacción frente a cambios bruscos de cargas y temperaturas (Segura, 2016).

Los modificadores producen una actividad superficial iónica, que incrementa la adherencia en la interfase entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándola aun en presencia del agua. También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos y por lo tanto a la fatiga y reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura.

Estos modificadores por lo general se aplican directamente al material asfáltico, antes de mezclarlo con el material pétreo (Wulf, 2008).

Todos los ligantes y mezclas de asfalto no requieren modificación. Las siguientes son algunas razones técnicas específicas para usar aditivos y modificadores en HMA:

1. Obtener mezclas más rígidas a altas temperaturas de servicio para minimizar el enrutamiento.
2. Obtener mezclas más suaves a bajas temperaturas de servicio para minimizar el agrietamiento térmico sin carga.
3. Mejorar la resistencia a la fatiga de las mezclas de HMA.
4. Mejorar la unión del agregado de asfalto para reducir la eliminación o la susceptibilidad a la humedad.
5. Mejorar la resistencia a la abrasión de la mezcla para reducir el desgarro.
6. Minimizar los problemas de mezclas suaves durante la construcción.
7. Rejuvenecer aglutinantes de asfalto envejecido.
8. Permitir películas de asfalto más gruesas en el agregado para una mayor durabilidad de la mezcla.
9. Mejora la resistencia al envejecimiento u oxidación.
10. Volver a engrosar el espesor estructural de las capas del pavimento.
11. Reducir los costos del ciclo de vida de los pavimentos de HMA.
12. Mejorar el rendimiento general de los pavimentos de HMA (Roberts, 1996).

1.6 Algas

Son organismos acuáticos fotoautótrofos oxigénicos cuya vida se desarrolla ligada al agua dulce o salada y que no desarrollan flores ni cuentan con sistema vascular desarrollado.

La mayoría de las algas son capaces de elaborar sustancias orgánicas a partir del dióxido de carbono (CO₂) y sales inorgánicas disueltos en el agua, a través de un pigmento verde llamado clorofila, presente en sus células, que actúa transformando la energía luminosa en energía química a través de la fotosíntesis. Las sales y otras sustancias nutritivas pueden ingresar por cualquier punto de su cuerpo, en la Tabla 1.2 se observa la composición química general de las algas marinas.

Se pueden identificar dos tipos principales de algas: las macroalgas (algas marinas) ocupan la zona litoral, que incluye algas verdes, algas pardas y algas rojas, y las microalgas se encuentran en hábitats bénticos (crecen fijadas al sustrato) o litorales y también en las aguas oceánicas como fitoplancton.

Tabla 1.2 Composición química general de las algas (*Boraso, 2003*)

Componente	Composición
Agua	80-90%
Carbohidratos	50%
Proteínas	Algas pardas: 3-15% Algas verdes y rojas: 10-47%
Minerales	7-38%
Lípidos	1-3%

Taxonómicamente se clasifican en tres grupos:

Atendiendo al color de sus pigmentos, las macroalgas se pueden clasificar en tres grandes grupos: Algas pardas (*Phaeophyceae*), algas rojas (*Rhodophyceae*) y algas verdes (*Chlorophyceae*). Tanto las algas pardas como rojas son las algas más comúnmente utilizadas para la alimentación humana. Las algas pertenecientes a cada grupo se distinguen por la composición específica de los polisacáridos estructurales de la pared celular y de reserva.

En la Tabla 1.3 se detallan los diferentes polisacáridos específicos de la pared celular y de reserva clasificados como fibra soluble e insoluble en los tres grandes grupos de macroalgas.

Tabla 1.3 Clasificación de algas y especies correspondientes (Gómez, 2013)

Clasificación	Nombre común	Fibra soluble	Fibra insoluble	Ejemplos
Clorophyta	Algas verdes	<p>Xilano</p> <p>Celulosa Xilosa, ramificaciones arabinosa, glucosa, galactosa, ácidos urónicos</p> <p>Ulvano</p> <p>Ramnosa, xilosa,</p> <p>Galactanos sulfatados</p>	Celulosa β -(1,4) glucosa	Ulva spp., Codium spp.
Phaeophyta	Algas pardas	<p>Laminarano</p> <p>(1,3)-β-glucosa y (1,6)- β-glucosa, manitol β-(1,4) glucosa</p> <p>Alginato</p> <p>β-(1,4)-ácido manurónico y α-(1,4)- ácido gulurónico</p> <p>Fucano /Fucoidano /Furano</p> <p>Fucosa sulfato, ácido manurónico, xilosa</p>	Celulosa β -(1,4) glucosa	Laminaria spp., Lessonia spp., Sargassum spp.,
Rhodophyta	Algas rojas	<p>Agar</p> <p>Celulosa D-galactosa y (3,6)-anhidro-D-galactosa sulfato</p> <p>Carragenano</p> <p>D-galactosa y (3,6)-anhidro-L-galactosa sulfato</p> <p>Xilanos y Mananos</p>	Celulosa β -(1,4) glucosa	Gracilaria spp., Palmaria spp., Porphyra spp.

Así, la fibra alimentaria en las algas pardas se compone de cuatro familias de polisacáridos: laminaranos, alginatos, fucanos y celulosa. Los laminaranos constituyen polisacáridos de reserva, mientras que el resto son polisacáridos estructurales que forman parte de la pared celular.

1.7 Algas pardas

El color marrón de estas algas resulta del predominio de los pigmentos de xantofila y fucoxantina; esto enmascara los otros pigmentos, clorofila a y c, β -carotenos y otras xantofilas. Las reservas alimentarias de algas pardas son típicamente polisacáridos complejos y alcoholes superiores. Las algas flotantes ocasionalmente contienen un saco de aire para flotar en la superficie del agua y exponer la planta a la luz solar para la fotosíntesis.

Particularmente las algas cafés muestran una afinidad especial por los iones divalentes y específicamente por metales como el Pb, Hg, Cr, Cu y Cd, lo que resulta especialmente importante, ya que estos metales se consideran contaminantes tóxicos, debido a las altas cantidades descargadas al medio ambiente y a la elevada toxicidad que presentan alguna de sus formas químicas.

El hábitat natural de Phaeophyta (algas marrones) se encuentra principalmente en las áreas costeras, preferiblemente en cuerpos de agua fría. Físicamente, estas son las algas marinas más grandes, que pueden llegar a medir hasta 35 m (100 pies) de longitud. Kelps, *Macrocystis*, *Nereocystis* y *Sargassum* son las más comunes.

Estructura

La pared celular de las algas cafés presenta una matriz fibrosa con espacios intracelulares ricos en polisacáridos sulfatados, grupos hidroxilos y carboxílicos. La mezcla única de polisacáridos principalmente alginato y fucoïdan. Estos compuestos dan resistencia y flexibilidad al alga, ya que forman geles en la matriz intercelular, ayudándoles a resistir las tensiones provocadas por las olas y las corrientes marinas.

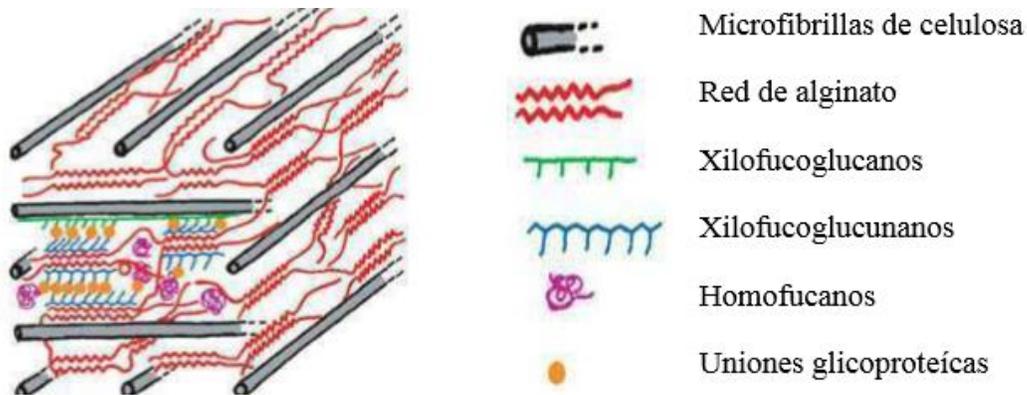


Figura 1.4 Organización de la pared celular de las algas caféas

Los polisacáridos estructurales más abundantes en la pared celular de las algas caféas son los siguientes:

Celulosa

Es un polisacárido compuesto exclusivamente de moléculas de glucosa, es rígido, insoluble en agua. La celulosa se forma por la unión de moléculas de β -Glucosa mediante enlaces β -1,4-O-glucosídico. Tiene una estructura lineal o fibrosa, en la que se establecen múltiples puentes de hidrogeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, haciéndolas impenetrables al agua, lo que origina fibras compactas y que sea insoluble en agua.

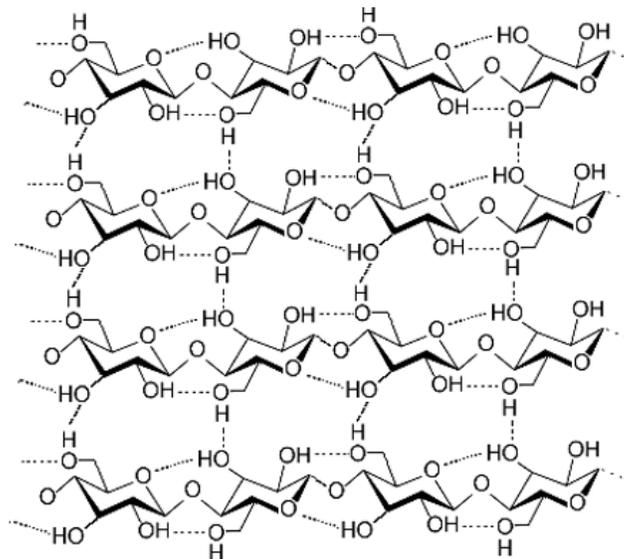


Figura 1.5 Arreglo de fibras de celulosa

Fucoidan

Es una clase única de polisacáridos altamente sulfatados que se encuentran en la matriz extracelular de las algas cafés. Este polisacárido es miembro de una familia de homo- y heteropolisacáridos principalmente constituidos por residuos de L-fucosa unidos mediante enlaces α -1-3 y α -1-4. También se pueden encontrar residuos de D-galactosa, D-manosa, D-xilosa, L-ramosa, ácido D-glucurónico y grupos acetil como parte del fucoidan. El fucoidan de la mayoría de las algas presenta un contenido de fucosa de 33-44%, aproximadamente un 26% de sulfato y puede contener también menores proporciones de galactosa, manosa, xilosa y ácidos urónicos.

El sulfato es un componente típico de las algas marinas derivado principalmente de los polisacáridos fucoidanos en las algas pardas, carragenanos. Este anión, que se encuentra unido al polisacárido mediante enlace éster (O-SO^{-3}) juega un papel muy importante desde el punto de vista de las propiedades biológicas de las algas. En ese sentido, en diversos estudios se ha encontrado una correlación positiva entre el contenido en sulfato y las propiedades biológicas como antioxidantes y anticoagulantes, entre otras. Como consecuencia los polisacáridos sulfatados de las algas suelen ser modificados estructuralmente mediante procesos de sobresulfatación para aumentar o mejorar las propiedades biológicas.

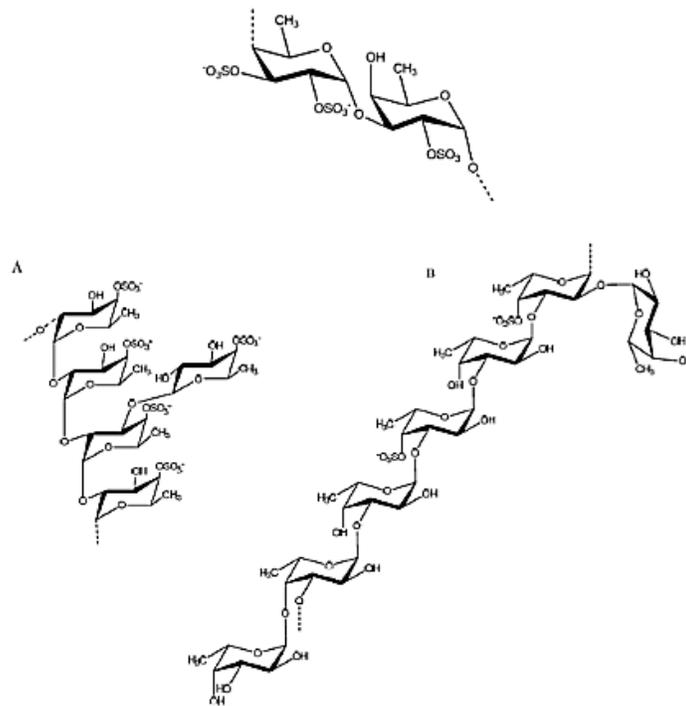


Figura 1.6 Unidad estructural del fucoidan

Alginato

Los alginatos son los polisacáridos más abundantes presentes en las algas marinas. Comprenden hasta el 40 % de su peso seco. Son componentes estructurales de la pared celular de las algas a la que aportan rigidez, elasticidad, flexibilidad y capacidad de enlazar agua. El ácido algínico es un compuesto de la pared celular de las algas pardas, formado por monómeros de ácido gulurónico y manurónico. Los alginatos son sales del ácido algínico, que se encuentran habitualmente con Na, K, Mg y Ca, poseen diferentes grados de solubilidad en agua y por ello presentan diversos grados de viscosidad. Este polímero biodegradable y biocompatible, forma geles con facilidad en presencia de iones calcio. Por su gran versatilidad, se utiliza como estabilizador, aglutinante, espesante, gelificante y formador de películas delgadas sobre superficies (Pérez, 2019). Es un polisacárido constituido por un copolímero lineal, está basado en dos unidades monoméricas, ácido β -D-manurónico y α -L-gulurónico (G), unidas por enlaces 1,4. Los monómeros M y G se encuentran dispersos en arreglos irregulares dentro del polímero. Estos residuos se encuentran generalmente formando bloques de secuencias MM, MG, unidos por enlaces glicosídicos β (1,4) y bloques de secuencia GG, GM unidos por enlaces glicosídicos α (1,4). Las secuencias de bloques MM y GG despliegan diferentes estructuras y sus proporciones en el alginato determinando las propiedades físicas y reactividad del polisacárido. Las regiones de bloques MM corresponden a cadenas lineales, mientras que los bloques GG presentan una estructura de bucle. Cuando dos cadenas de bloques GG se alinean lado a lado resulta en un hueco en forma de diamante (Patrón, 2012).

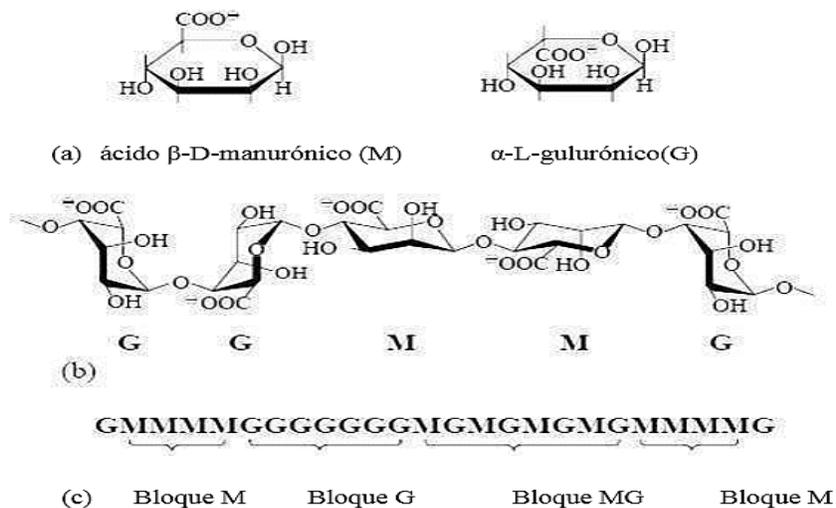


Figura 1.7 Unidad estructural del alginato

1.8 Sargazo

El sargazo son macroalgas marinas, de color pardo, que pertenecen al orden de las Fucales y al género *Sargassum*. Se encuentran clasificadas en el grupo de las “feofitas” (Phaeophyceae) o algas pardas, las cuales son las más abundantes y de mayor tamaño. Han desarrollado estructuras que facilitan su flotación y la fotosíntesis. Se les conoce comúnmente como sargazo el cual es exclusivo de ambientes marinos, cuya distribución se concentra principalmente en el llamado “Mar de los Sargazos”, en el Atlántico y llegan a las costas del Caribe con las corrientes del mar que se alteran por el cambio de temperatura y del clima.

Las algas, que pueden crecer en varios metros, son pardas o verde negruzcas. Algunas especies tienen vesículas llenas de gas para mantenerse a flote y promover la fotosíntesis. Muchas tienen texturas duras entrelazadas y con cuerpos robustos, pero flexibles, las ayudan a sobrevivir a corrientes fuertes. Se caracterizan por que cada nivel de ramificación con sus respectivos filoides se origina del eje principal (estipe) así como los receptáculos en ramas auxiliares. Hay dos especies de sargazo involucrados en la afluencia de sargazo: *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* (Neelesh, 2016).

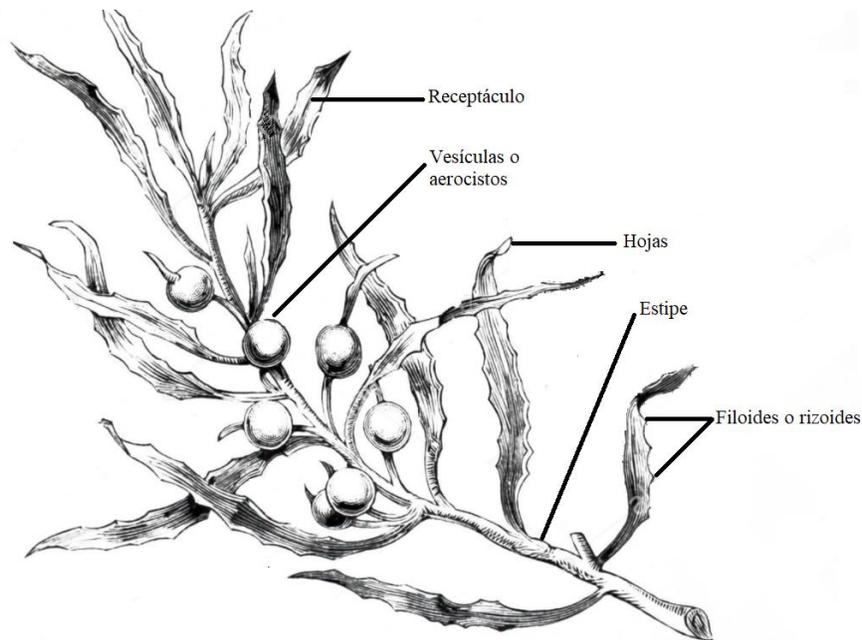


Figura 1.8 Estructura del sargazo

Capítulo II. METODOLOGÍA

2. Materiales

- Asfalto PG 64-22 (Ergon Asfaltos de México)
- Alga marina parda (Sargazo)
- Glicerina USP (para análisis Ring & Ball)
- Solvente dieléctrico cítrico (limpieza de material)

2.1 Preparación de partículas de sargazo

En primer lugar, se llevó a cabo la recolección del espécimen del género sargazo que llega a la orilla de playa Miramar localizada en el Golfo de México en Cd. Madero, Tamaulipas. La obtención del alga se realizó en la temporada Verano en los meses comprendidos de agosto-septiembre del 2020. Una situación por considerar es que en esas fechas no hubo un arribazón considerable, presentándose una escasa cantidad de material, para tener un amplio rango de colecta se realizó a través de los 10 km de orilla de la playa.

La morfología del alga está compuesta por un estipe (tallo) que da lugar a uno o más ejes dispuestos en filas verticales en lados opuestos para producir ramificaciones secundarias con hojas dentadas en forma de espiral y coloración café o marrón oscuro acompañadas de vesículas de aire (aerocistos), en un trabajo realizado por Hernández en 2014 generó la obtención de gas a partir de sargazo recolectado en playa Miramar, con características similares a las antes mencionadas.

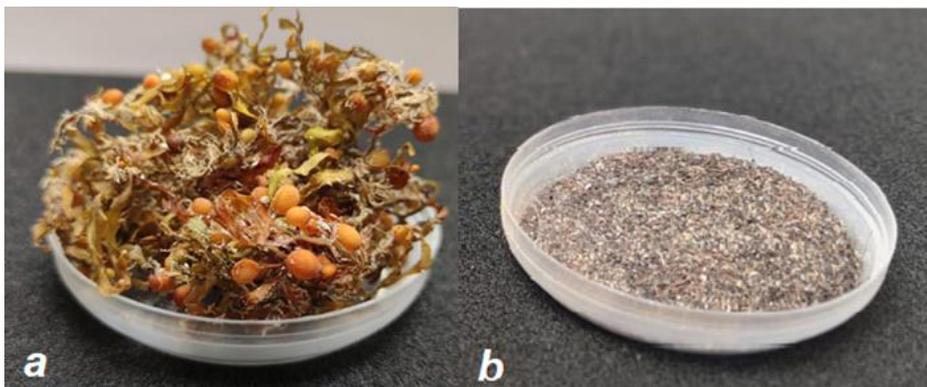


Figura 2.1 Alga sargazo (a) y partículas de polvo de sargazo (b)

Primero se realizaron tres lavados con agua destilada al alga dejando entre 1-3 min para remover el exceso de alcalinidad y cloruros del agua de mar, posteriormente se utilizó una centrifuga Max marca Betterware para eliminar el mayor contenido de agua posible del alga, observándose que al realizar los lavados y centrifugar, el agua quedaba con una coloración café esto se debe a la pigmentación característica del sargazo. Después se llevó a secar en una estufa de convección marca red Line Binder a 60°C por 24 horas. Posteriormente se molió en una licuadora marca Oster de 16 revoluciones para generar un polvo fino. Por último, se clasificó el tamaño de partícula con un tamiz de pruebas físicas de calidad certificada de malla número 20 y 35 para obtener un tamaño de partícula homogéneo.



Figura 2.2 (a) Centrifuga escurridora y exprimidora de agua y (b) molido en licuadora Oster

2.2 Descripción del asfalto

El asfalto empleado en este proyecto fue suministrado por la empresa Ergon (Asfaltos de México) la caracterización del asfalto en estado virgen se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Propiedades del asfalto Ergon

Características	Unidades	Método	Valor
Penetración	dmm	ASTM D-5	55.0
Temperatura de reblandecimiento	°C	ASTM D-36	56.0
Viscosidad de Brookfield 50 rpm	135 °C	CP	565
	160 °C	CP	170
	180 °C	CP	85.0
Saturados	%	Prueba SARA	2.27
Aromáticos	%		64.43
Resinas	%		18.95
Asfáltenos	%		13.35

2.3 Preparación de mezclas asfálticas

Para la preparación de las mezclas modificadas se añadió modificador al 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% y 3.0% respecto al peso total del asfalto, se realizaron 10 mezclas modificadas con sargazo además que también se contemplaron las muestras del asfalto virgen y el asfalto virgen sometido a 2 horas de mezclado, dando así un total de 12 mezclas que se evaluaron, en la Tabla 2.2 se observa la matriz experimental del proyecto.

Tabla 2.2 Matriz experimental de mezclas asfálticas

Material	% peso					Tamaño de partícula
Asfalto	99	98.5	98	97.5	97	850 μm
Modificador	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	500 μm

El mezclado se realizó con un agitador mecánico marca IKA–Euro-STPCV, compuesto por un eje vertical que en su extremo inferior tiene unas paletas tipo propela que permiten al asfalto fluir en forma de espiral vertical.



Figura 2.3 Equipo de calentamiento y mezclado

Además de un sistema de calentamiento tipo termopozo que consiste en un bloque de acero inoxidable 16x16x14 cm con un pozo de 8.5 cm de diámetro y 6 cm de profundidad, conectado a un controlador Yokogawa modelo UT14E y un termopar tipo K, en la Figura 2.3 se observa el equipo descrito.

Para preparar las mezclas modificadas primero se precalentó el bloque metálico durante 30 minutos, las mezclas se realizaron por un periodo de 120 min, este tiempo se establece (estudios previos) para obtener una buena dispersión de la mezcla y el modificador el cual se añadió en las relaciones anteriormente mencionadas. En este proceso se mantuvo el control de temperatura a 180°C con un desfase ± 2 °C y velocidad de 1500 rpm. Al término del tiempo de mezclado, todas las mezclas modificadas se filtraron en caliente a través de una malla número 20 esto con el fin para obtener una mezcla lo mejor homogénea posible.

2.4 Técnicas de Caracterización

2.4.1 Caracterización elemental

Permite la identificación de compuestos y cuantificación química. El sargazo se caracterizó por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) con el fin de identificar su composición. Se empleó un sistema GC-MS modelo Perkin Elmer Clarus A600S (Waltham, MA, EE. UU.), equipado con un inyector automático de espacio de cabeza Turbomatrix 40. Se colocó una muestra de 500 mg de sargazo en un vial de 40 ml herméticamente sellado con tapa superior de aluminio y septa de teflón. Las muestras se sometieron a las condiciones de extracción del espacio de cabeza para la separación del analito, utilizando una columna Elite-624, con helio de alta pureza (Praxair) como gas portador fluyendo a 0,8 mL / min. La temperatura del horno se mantuvo a 40 C durante 1 min. Después de la inyección y posteriormente programada a una velocidad de 8 °C / min a 220 °C, manteniendo la temperatura final durante 1 min.

2.4.2 Análisis Termogravimétrico (TGA)

Se usa para caracterizar las propiedades físicas y químicas de los materiales, en función de la temperatura en una atmósfera controlada. Se realizaron mediciones de análisis TGA para determinar la estabilidad térmica de las partículas de asfalto, utilizando un equipo TA Instruments modelo SDT Q600, empleando 14 mg de muestra, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en un rango de temperatura ambiente a 700°C.

2.4.3 Viscosidad dinámica

La viscosidad rotacional se determina midiendo el torque requerido para mantener una velocidad rotacional constante de un husillo cilíndrico mientras está sumergido en una muestra de asfalto a una temperatura constante. El par medido está directamente relacionado con la viscosidad del asfalto.

El viscosímetro rotacional utilizado para esta caracterización fue un viscosímetro RV-II marca Brookfield, constituido por un sistema thermocell y un controlador de temperatura, contando con límite de hasta 350°C. La metodología empleada para determinar la viscosidad se detalla en el Método ASTM D4402.

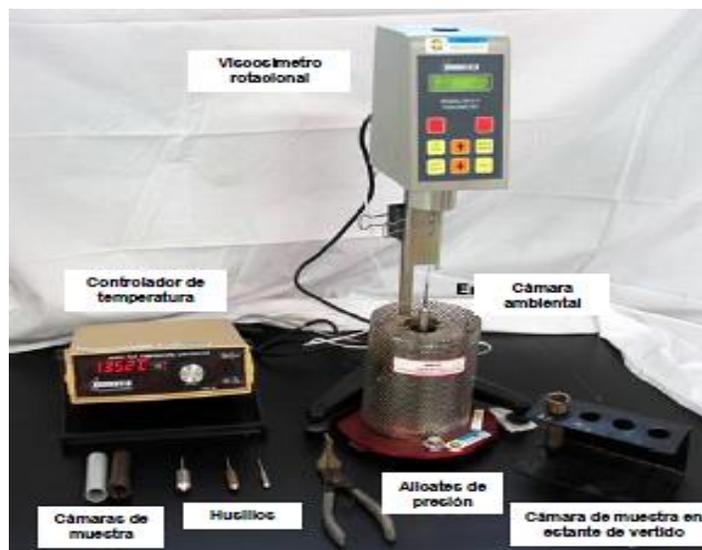


Figura 2.4 Partes del viscosímetro rotacional

La geometría a seleccionar se tomó como referencia de la norma ASTM D4402 de acuerdo a los siguientes criterios de trabajo:

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

El tamaño de muestra recomendado para el spindle es:

- Para el spindle 21: 8.0 g
- Para el spindle 27: 10.5 g

De acuerdo a la norma se midió la cantidad de muestra de acuerdo al tipo de geometría utilizada, cuando se estabilizó la temperatura se insertó el tubo de muestra a la termocelda asegurándose de fijar el tubo, se calentó la muestra durante 30 minutos, después se ambienta el spindle por 10 minutos, cumplido este tiempo se insertó la geometría y se realizó las mediciones a temperaturas de 135, 150°C, 160 y 180°C variando las velocidades de mezclado a 5, 10, 20, 50 y 100 rpm. Las lecturas para cada temperatura se realizaron en un lapso de 60 segundos para estandarizar la medición y estabilizar la viscosidad de la mezcla.

2.4.4 Determinación del punto de reblandecimiento (análisis Ring & Ball).

Consiste en situar una bola de acero en la superficie de un anillo relleno con la muestra de asfalto, luego se introduce en un baño que se calienta con una velocidad 5°C/min. La temperatura a la cual la bola cae una distancia de 25.4mm (1") se conoce como temperatura o punto de reblandecimiento del asfalto. Proporciona una medida de la resistencia de un material al cambio de sus propiedades debido a la temperatura.

La determinación del punto de reblandecimiento se realiza por medio del método de anillo y bola siguiendo la norma ASTM D-36 donde se requiere de los siguientes materiales:

- 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 1L)
- Un termómetro normalizado graduado (200 °C)
- Glicerina grado USP

Este método se realizó por duplicado llenando dos anillos metálicos el cual deben estar enrasados con la muestra asfáltica sobre una superficie metálica, después se colocan en la estructura y encima de estos las esferas y posteriormente se sumergen en 900 ml de glicerina dejando ambientar por 15 minutos, por último se calienta a razón de 5°C/min y se registra la temperatura a la cual las esferas tocan el límite señalado por la estructura traspasando el asfalto en la Figura 2.5 se puede observar a detalle.

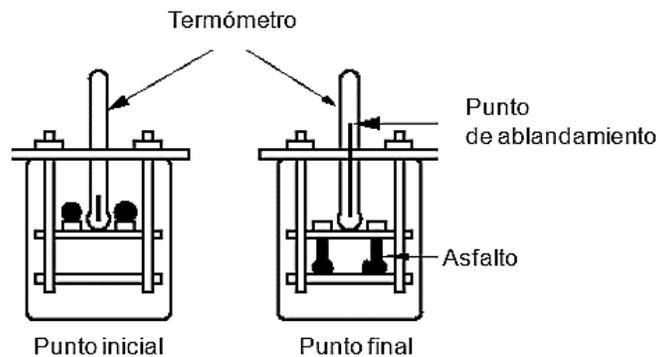


Figura 2.5 Análisis ring & Ball en muestra de asfalto

2.4.5 Caracterización por separación de fases

El método consiste en observar la estabilidad de compatibilidad de un modificador en el asfalto mediante una muestra que se sujeta a altas temperaturas durante un tiempo y después se coloca en un congelador.

Se tomó como referencia la norma ASTM D5892 en donde se vierten 50g de muestra asfáltica en un tubo de aluminio colapsible, sellándolo y dejándolo en posición vertical. A continuación, se coloca el tubo sellado en un horno a $163 \pm 6^\circ\text{C}$ donde deberá estar sin movimiento por un periodo de 48 horas. Al final del periodo de calentamiento, se remueve el tubo del horno e inmediatamente se lleva a $-7 \pm 6^\circ\text{C}$ por un mínimo de 4 horas para solidificar la muestra. Al remover el tubo del congelador, se coloca en una superficie plana y corta en tres porciones iguales. Se ponen en la parte inferior y superior en cápsulas en un horno a $163 \pm 6^\circ\text{C}$ hasta que estén lo suficientemente fluidos. Después de esto se vierten en anillos para prueba de anillo y bola para efectuar el análisis Ring & Ball.

Por último, se reportó el punto de reblandecimiento de las porciones superior e inferior de la muestra, considerando los siguientes criterios:

- Si temperatura de reblandecimiento (superior) – temperatura de reblandecimiento superior (inferior) $\leq 3^\circ\text{C}$: buena estabilidad al almacenamiento a altas temperaturas.
- Si temperatura de reblandecimiento (superior) – temperatura de reblandecimiento (inferior) $> 3^\circ\text{C}$: Inestable (Djaffar, 2013).

2.4.6 Caracterización por penetración

La prueba de penetración proporciona la consistencia del cemento asfáltico cerca de la temperatura de servicio anual promedio, por lo que tiene cierta influencia en el rendimiento general del pavimento. Consiste en medir la profundidad que una aguja estandarizada penetra cuando es sometida a una carga de 100g durante 5s a una temperatura de 25°C. La longitud que la aguja penetra al asfalto se expresa en unidades de 0,1dmm (décimas de milímetro) y se conoce como penetración (Pen) del material. Se realizó con el apoyo de Dynasol Elastómeros y se tomó como referencia el método ASTM D5-86, empleando un equipo digital marca Koehler modelo K95500 (Salinas, 2006).

Las penetraciones se realizan por triplicado para cada muestra asfáltica y los resultados obtenidos se promedian. Es evidente que cuanto más blando sea el betún asfáltico mayor será la cifra que indique su penetración. Los betunes asfálticos se clasifican en grados según su dureza o consistencia promedio de la penetración. A partir de este parámetro se calcula el índice de penetración o índice de susceptibilidad (IP).

El índice de penetración (PI) se considera como una medida de susceptibilidad a la temperatura del cemento asfáltico. La susceptibilidad a la temperatura de las muestras bituminosas. Se calcula utilizando los resultados obtenidos de las pruebas de penetración y punto de reblandecimiento de la siguiente manera por medio de la ecuación 2.1.

$$I_p = \frac{1952 - 500 \log(P) - 20T_{RB}}{50 \log(P) - T_{RB} - 120} \dots\dots\dots \text{Ec. (2.1)}$$

En donde:

I_p = índice de penetración o de susceptibilidad térmica, varía aproximadamente entre -2.6 y 8

T_{RB} = punto de ablandamiento en grados Celsius, y

P = penetración en dmm a 25 °C

En cuanto a la expresión de resultados obtenidos en la Ecuación 2.1 debe redondearse a la décima de la unidad más próxima, clasificando los cementos asfálticos según los siguientes límites de IP se tienen tres grupos:

- $IP > +1$: Son cementos asfálticos con poca susceptibilidad a la temperatura, presentando cierta elasticidad y tixotropía. Se les denomina tipo gel o soplado, ya que la mayoría de los asfaltos oxidados pertenecen a este grupo.

- IP < -1: Cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso.
- IP entre +1 y -1: Características intermedias entre los dos anteriores; pertenecen a este grupo la mayoría de los cementos asfálticos que se utilizan en la construcción de carreteras (Subiaga, 2011).

2.4.7 Microscopía fluorescente

Se realizó con el apoyo de Dynasol Elastómeros por medio de un microscopio marca Carl Zeiss Modelo Axio Tech n/s 180935 óptica: 20x, el cual separa la luz fluorescente emitida que brilla contra un fondo oscuro lo que la hace perceptible. Esta técnica permite determinar el nivel de dispersión y compatibilidad entre los componentes de las mezclas asfálticas. Se genera una imagen ampliada de un objeto pequeño por la técnica de inmunofluorescencia y así muestra los detalles de la estructura del material.

2.4.8 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier

La espectroscopía infrarroja proporciona información sobre los grupos funcionales presentes en un material. Las muestras fueron analizadas en un espectrofotómetro Perkin-Elmer modelo Spectrum 100 utilizando la técnica de impregnación (drop-casting) empleando una placa de cristal de bromuro de potasio. Para todas las mezclas asfálticas, se disolvió una pequeña cantidad de asfalto en tolueno para preparar una solución. Se tomó una pequeña gota de la solución y se colocó en la placa de KBr. Cuando el solvente se volatiliza completamente las muestras se colocaron en el FTIR. Para el análisis del sargazo se utilizó polvo con la geometría ATR (cristal de diamante). La resolución se realizó con un barrido de 12 escaneos y con rango de prueba de 4000 a 400 cm^{-1} .

2.4.9 Reología

Se utiliza para caracterizar el comportamiento viscoso y elástico de los aglutinantes de asfalto a temperaturas de servicio altas e intermedias. El reómetro rotacional mide el módulo de corte complejo G^* y el ángulo de fase de los aglutinantes de asfalto a la temperatura y frecuencia de carga deseadas.

El parámetro de deformación $G^*/\text{sen } \delta$ es la contribución de la resistencia al ahuellamiento (temperatura de falla) de los autos sobre el asfalto limitando el valor de $G^*/\text{sen } \delta$ a la temperatura de prueba para valores \geq de 1Kpa para el asfalto original. Este tipo de falla del pavimento es a alta temperaturas de servicio. Las deformaciones permanentes son causadas por la acumulación de pequeñas deformaciones ocasionadas por las cargas del tránsito.

El criterio para decidir alguna geometría se basa en la viscosidad de la muestra: para materiales muy fluidos se recomienda utilizar una geometría de cono y plato, mientras que para sustancias más viscosas se sugiere el uso de la geometría de platos paralelos. En el proyecto se utilizó un reómetro de corte dinámico (DSR) marca Anton Paar MCR300 con una geometría tipo plato paralelo de diámetro 25 mm y un gap de 1 mm (distancia entre la geometría y el plato fijo). El procedimiento seguido, según el método AASHTO T315 y ASTM D7175-15 indica colocar la muestra entre la geometría y la placa fija y compactar hasta alcanzar la medida propuesta de gap. La prueba se llevó a cabo mediante un barrido de frecuencia angular de 10 rad/s (1.585 Hz) y en un intervalo de temperaturas que abarca de 52°C hasta 94°C con salto de 6°C entre lecturas y se fijó un valor de 10% de deformación.

Capítulo III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. Caracterización elemental del sargazo

La composición química del sargazo se determinó con el objetivo de explicar las posibles interacciones químicas o físicas entre el sargazo y el asfalto. Los compuestos químicos encontrados en el sargazo, y sus concentraciones, se muestran en la Tabla 3.1. Se identificaron un total de 24 compuestos, que correspondían al 100% de los volátiles extraídos por la técnica de espacio de cabeza de CG-MS. El componente que se encontró en mayor proporción fue el propilenglicol (15.7% en peso), seguido del 5-metil-2-furancarboxaldehído (13.64% en peso).

Tabla 3.1 Composición química del sargazo

Componente	Tiempo de retención	Área	%AR (porcentaje área relativa)
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-hidroxiopropanamida	5.71	5,749,090	11.24
3-metilbutanal	5.99	713,849	1.40
Propilenglicol	6.14	8,043,904	15.73
Hexanal	9.24	4797487.00	9.38
Heptanal	11.59	3227770.50	6.31
Dimetil sulfoxido	11.89	417538.41	0.82
1-(2-furanyl) 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
Benzaldehido	13.47	608290.44	1.19
5-metil-2- furancarboxaldehído	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-hexenilo 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 nonaico	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

Rajeswari y col. identificaron compuestos similares a los obtenidos en este trabajo con sargazo wightii donde expuso la presencia de algunos compuestos bioactivos importantes como el ácido hexadecanoico, ácido nonaico y 2-metilpropanal.

Salazar Cruz y col. en su trabajo mencionan que Shekhar y col. caracterizó el sargazo de Irlanda del Norte y encontró 1-(2-furanil) etanona y 5- metil-2-furancarboxaldehido, en cantidades similares a las obtenidas en el presente trabajo, además de otros compuestos furanos y ésteres en menores proporciones.

Además, Wang et al. trabajó con sargazo chino reportando su composición como 30% de esteroides, 24% de alcohol, 18% de ácidos carboxílicos y derivados y 12% de cetonas.

Con lo anterior se tiene una idea que la variación de la composición química depende de la región en donde se encuentre el sargazo.

3.1 Análisis Termogravimétrico (TGA)

Se realizaron mediciones de análisis TGA para determinar la estabilidad térmica de las partículas de sargazo. Las partículas de sargazo presentaron una etapa de pérdida de peso de 250 °C a 800 °C con un residuo cercano al 29wt%.

En la Figura 3.1 se observa una caída inicial entre los 50 -150°C lo cual se puede relacionar con el contenido de humedad en la muestra. Debido a la baja temperatura de descomposición de la hemicelulosa, lignina y pectinas, se observa una temperatura de degradación de la muestra alrededor de 250°C (Thiripura, 2012), que culmina con una caída significativa cercana a los 350°C, mostrando una masa residual de compuestos carbonosos (Wang, 2013)

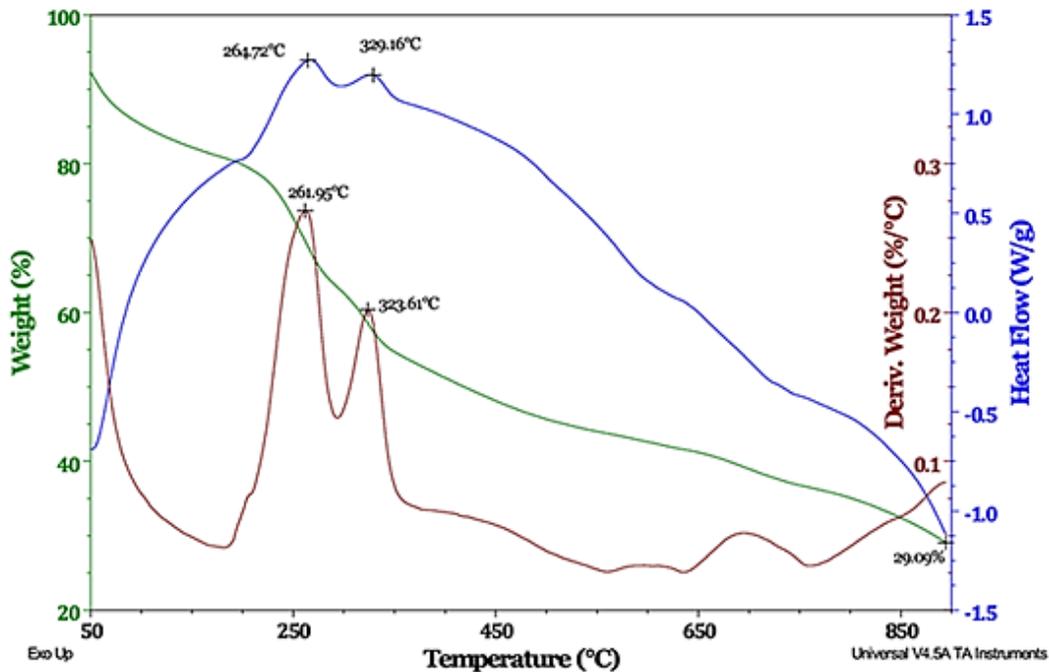


Figura 3.1 Termograma partículas de sargazo

3.2 Viscosidad Dinámica

Se define a la viscosidad como la resistencia de los cuerpos a la deformación, debido al rozamiento interno molecular, representando así una resistencia a fluir. Por lo que se refiere a la nomenclatura empleada en este proyecto en las mezclas analizadas, se entiende que M representa mezcla asfáltica acompañado del porcentaje de concentración añadido y la letra T acompañado de un número se refiere al número de malla empleado respectivamente (por ejemplo, M1.0%T20). Además, se evaluó el efecto de un asfalto original sin tiempo de mezclado y otro con dos horas de mezclado, a su vez mezclas modificadas con partículas de sargazo utilizando dos tipos distintos de geometría (número 21 y 27) y llevando a temperaturas de 135, 150, 160 y 180 °C.

3.2.1 Efecto de la velocidad de corte vs viscosidad

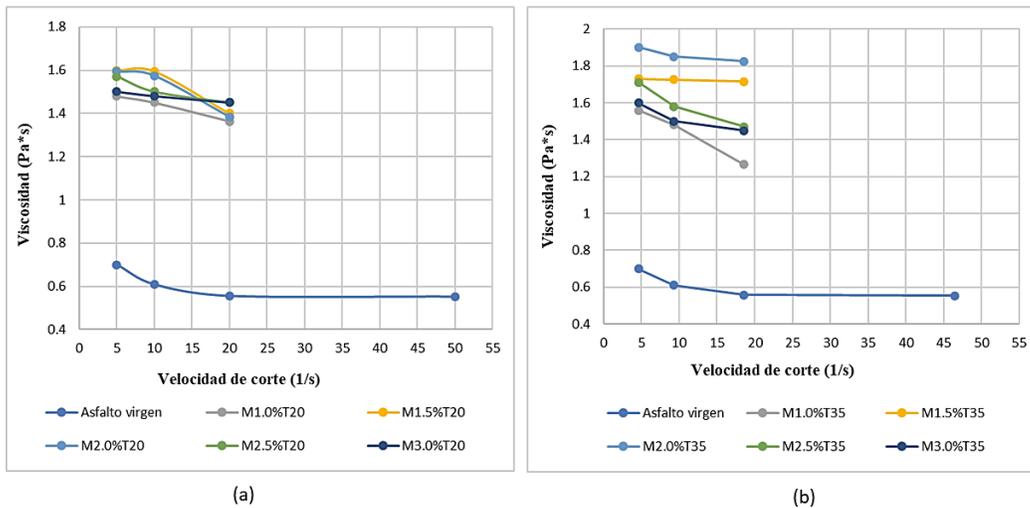


Figura 3.2 Viscosidades de mezclas asfálticas a 135°C con geometría 21 para tamaño de partícula de 850 μm y 500 μm

En la Figura 3.2 se observa que para la temperatura de 135 °C las mezclas asfálticas con geometría 21 hasta la velocidad de 20 rpm es la máxima velocidad de deformación, al tener más espacio, el torque es mayor y por tanto se opone más a la resistencia a fluir. Por tanto, la resistencia a alta temperatura a la deformación es más fuerte.

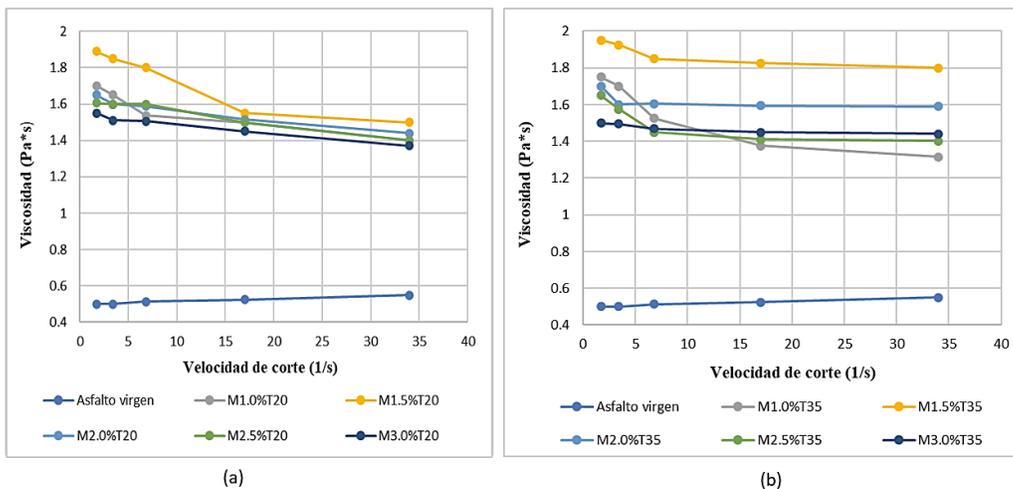


Figura 3.3 Viscosidades de mezclas asfálticas a 135°C con geometría 27 para tamaño de partícula de 850 μm y 500 μm

En la Figura 3.3 se observa que para una temperatura de 135 °C utilizando geometría 27 se alcanzan valores mayores de velocidad de corte, está claro que al utilizar una geometría con menor espacio se alcanzan mayores velocidades de corte. También se presenta un mejor comportamiento newtoniano a partir de 50 rpm.

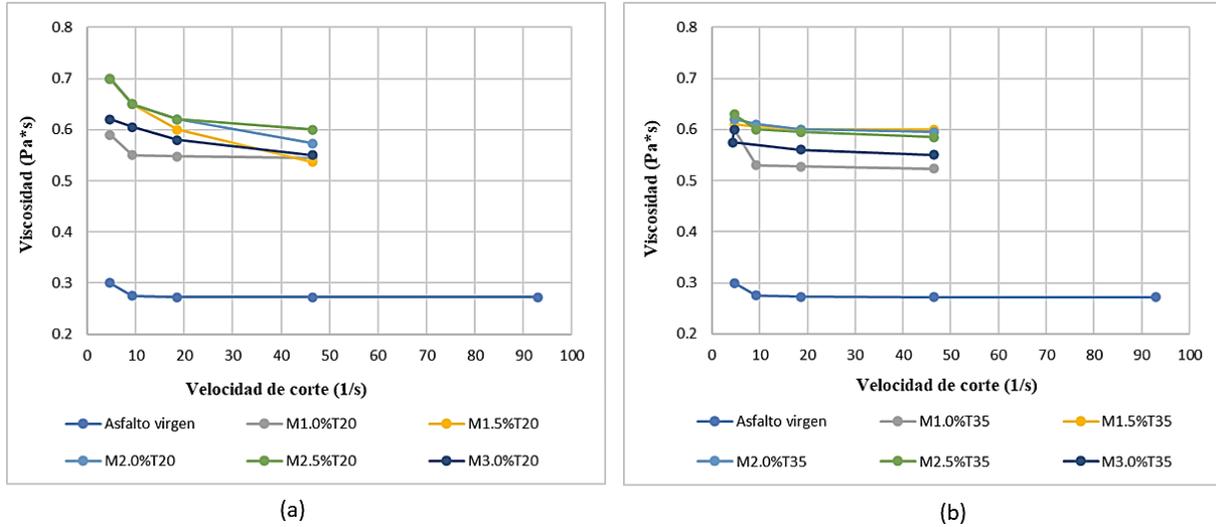


Figura 3.4 Viscosidades de mezclas asfálticas a 150°C con geometría 21 para tamaño de partícula de 850 µm y 500 µm

En la Figura 3.4 se muestra el comportamiento de la viscosidad de mezclas asfálticas utilizando número de malla 20 y (b) utilizando número de malla 35 a temperatura de 150°C. A medida que aumentó la temperatura se presentó un mejor comportamiento newtoniano a partir de velocidad de 20 rpm comparadas con las de 135 °C.

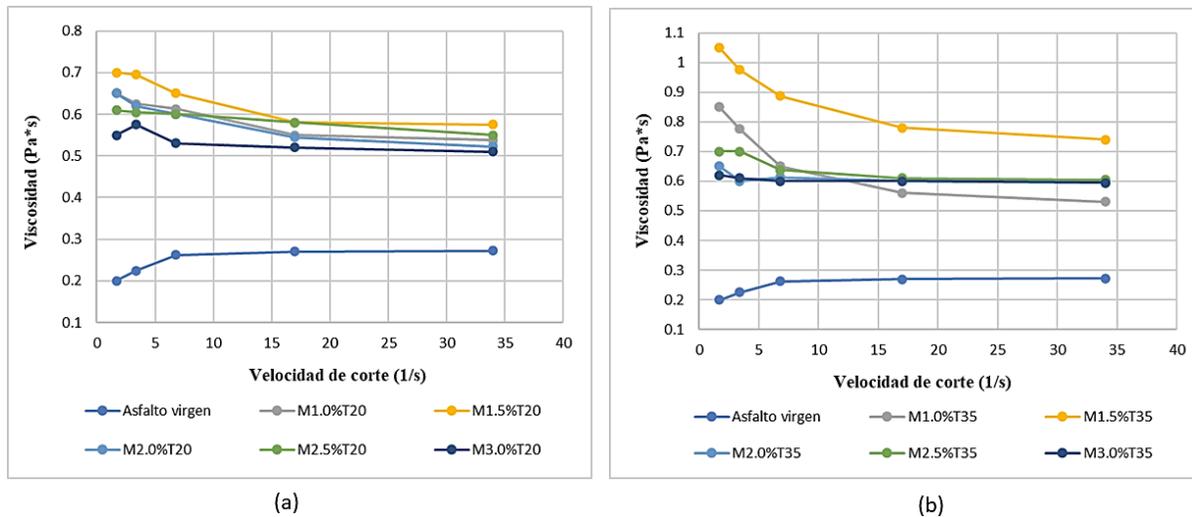


Figura 3.5 Viscosidades de mezclas asfálticas a 150°C con geometría 27 para tamaño de partícula de 850 µm y 500 µm

En la Figura 3.5 se presenta el comportamiento de las mezclas utilizando geometría número 27 a temperatura de 150°C. Se observa un ligero cambio en la abertura de las líneas para los dos tamaños de partículas a bajas velocidades comparadas con las de 135°C, esto debido que todos los fluidos sufren expansión volumétrica cuando experimentan un aumento de temperatura, ya

que el volumen y la densidad son propiedades inversamente proporcionales, es decir, cuando el volumen del fluido aumenta, su densidad se reduce simultáneamente. Esta reducción de densidad implica que existan menos moléculas por unidad de volumen que puedan transferir impulso desde una capa de fluido hacia el resto de las capas. Como resultado, se afecta la velocidad de las distintas capas, por lo que la viscosidad del fluido disminuye. (Águeda Casado y colaboradores, 2012).

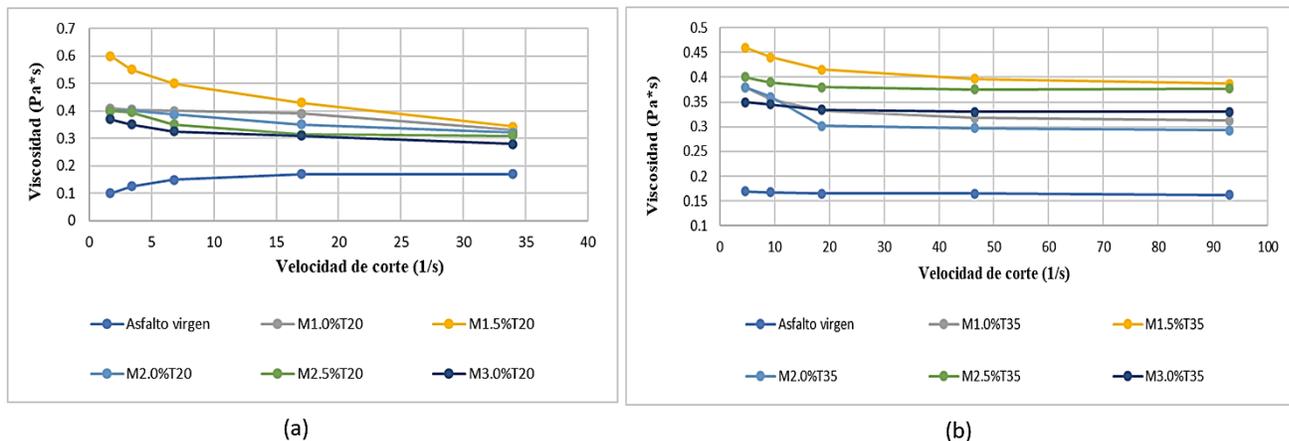


Figura 3.6 Viscosidades de mezclas asfálticas a 160°C con geometría 21 para tamaño de partícula de 850 μm y 500 μm

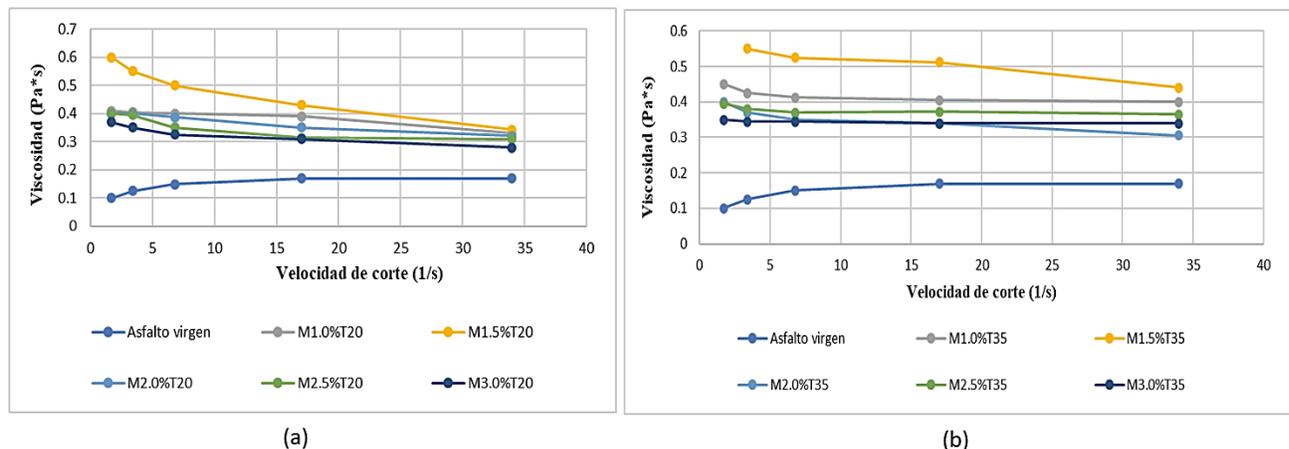


Figura 3.7 Viscosidades de mezclas asfálticas a 160°C con geometría 27 para tamaño de partícula de 850 μm y 500 μm

En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestra el comportamiento de la viscosidad de mezclas asfálticas utilizando número de malla 20 y (b) utilizando número de malla 35, ambas a temperatura de 160°C. No presentan una gran variación de acuerdo con el aumento de velocidad. En las Figuras 3.8 y 3.9 se muestra el comportamiento de la viscosidad de las mezclas asfálticas utilizando tamaño de partícula 850μm y 500μm a temperatura de 180°C. Se observa conforme aumenta la

velocidad de corte los valores de viscosidad tienen un comportamiento newtoniano en donde las partículas con el asfalto se estabilizan y conforme avanza se presenta un efecto de reducción en la viscosidad debido al aumento en la velocidad de corte.

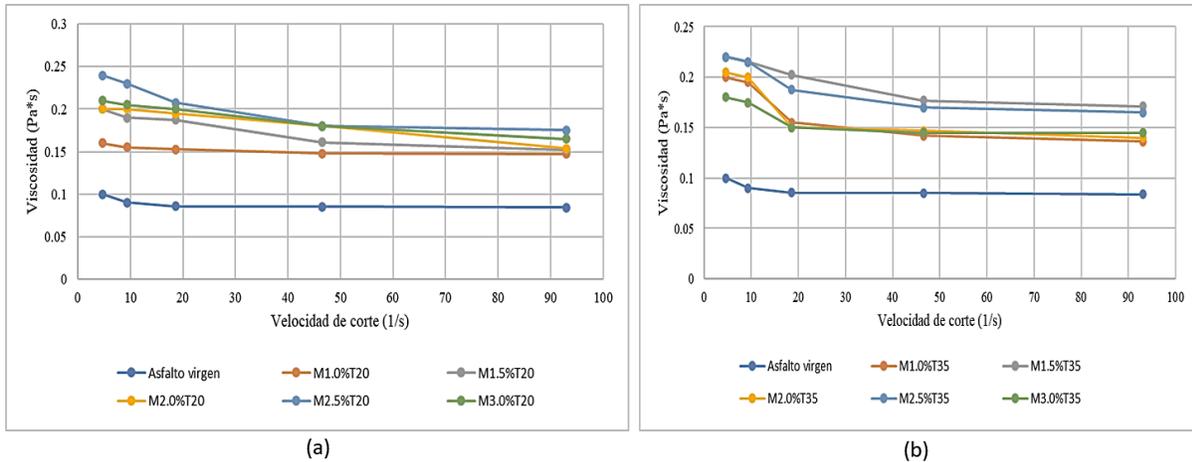


Figura 3.8 Viscosidad de mezclas asfálticas a 180°C con geometría 21 para tamaño de partícula de 850µm y 500 µm

La viscosidad no se ve influenciada con respecto a la velocidad. El cambio en la tendencia de la viscosidad para diferente tipo de rotor no cambia con la velocidad de corte. Ding y col. (2020) en su trabajo mencionan que no está asociado el comportamiento del rotor sino al efecto de la partícula que tiene dominio en la composición del asfalto.

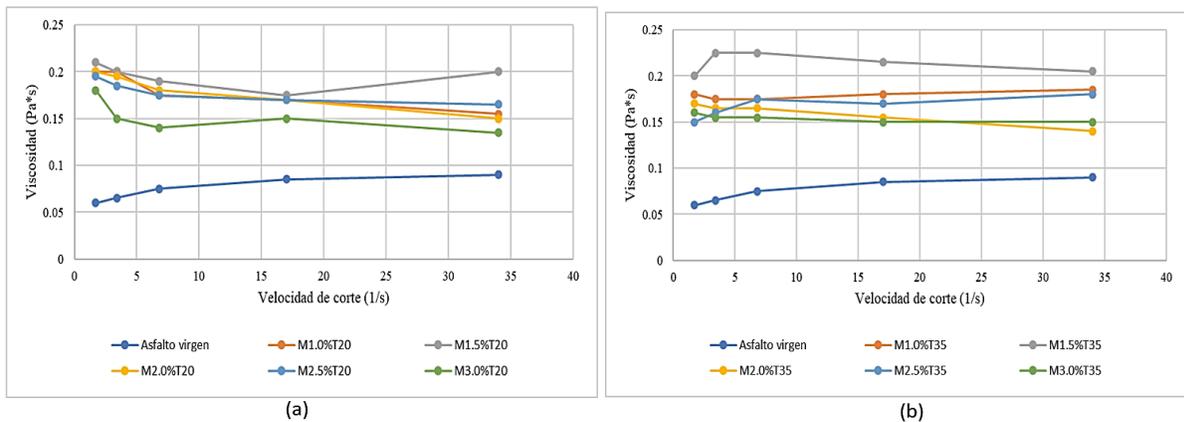


Figura 3.9 Viscosidad de mezclas asfálticas a 180°C con geometría 27 para tamaño de partícula de 850µm y 500 µm

La relación entre la viscosidad y la velocidad rotacional de las mezclas asfálticas fue probada en los dos tipos de geometrías 21 y 27. Es posible generar un modelo matemático que simule el comportamiento la viscosidad a diferentes velocidades por una fórmula propuesta por Ding y col (2020) en su trabajo:

$$\eta = a * (1 + n)^b \dots\dots Ec. (3.1)$$

Donde:

η = es la viscosidad (Pa*s)

n= es la velocidad (rpm)

a y b= son parámetros que reflejan las características del material que actúa como modificador y son obtenidos a partir de regresión lineal

En la tabla 3.2 se observa los resultados del análisis de regresión de la viscosidad y velocidad rotacional en donde se obtiene una buena correlación.

Tabla 3.2 Relación de viscosidad con la velocidad rotacional

Tamaño de partícula 20 (850 μ m)				
Contenido (%)	Geometría 21		Geometría 27	
	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación R^2	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación R^2
1.0%	$y=0.167*(1+x)^{-0.0289}$	0.9453	$y=0.2404*(1+x)^{-0.0933}$	0.9286
1.5%	$y=0.2435*(1+x)^{-0.1009}$	0.9510	$y=0.2151*(1+x)^{-0.0317}$	0.9651
2.0%	$y=0.2448*(1+x)^{-0.089}$	0.8286	$y=0.2436*(1+x)^{-0.0994}$	0.9576
2.5%	$y=0.3017*(1+x)^{-0.1227}$	0.9722	$y=0.213*(1+x)^{-0.0576}$	0.9561
3.0%	$y=0.2512*(1+x)^{-0.0864}$	0.9428	$y=0.191*(1+x)^{-0.0762}$	0.8520
Tamaño de partícula 35 (500 μ m)				
Contenido (%)	Geometría 21		Geometría 27	
	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación R^2	Ecuación de regresión	Coefficiente de correlación R^2
1.0%	$y=0.263*(1+x)^{-0.1507}$	0.9171	$y=0.2136*(1+x)^{-0.0831}$	0.8902
1.5%	$y=0.2674*(1+x)^{-0.0984}$	0.9645	$y=0.3248*(1+x)^{-0.1083}$	0.8546
2.0%	$y=0.2641*(1+x)^{-0.1469}$	0.8381	$y=0.1938*(1+x)^{-0.0635}$	0.8601
2.5%	$y=0.2715*(1+x)^{-0.1128}$	0.9526	$y=0.139*(1+x)^{-0.0573}$	0.8503
3.0%	$y=0.2071*(1+x)^{-0.0852}$	0.8385	$y=0.1652*(1+x)^{-0.0225}$	0.8959

En las Figuras 3.10 y 3.11 se observa la desviación estándar de viscosidad para las mezclas asfálticas con diferentes contenidos a diferentes velocidades. Se puede observar que altas y bajas velocidades la diferencia en el valor de desviación es alto pero a velocidades intermedias, en específico a 20 rpm, el valor es más estrecho teniendo así un efecto considerable a tomar en cuenta para la medición, donde queda claro que al utilizar cualquier tipo de rotor a este valor de velocidad es aceptable, este mismo comportamiento se presenta en el trabajo realizado por Ding y col. (2020), a su vez es un punto importante a mencionar debido que en la norma ASTM D-4402 consideran que a este valor de velocidad de 20rpm recomiendan trabajar para realizar análisis de viscosidad.

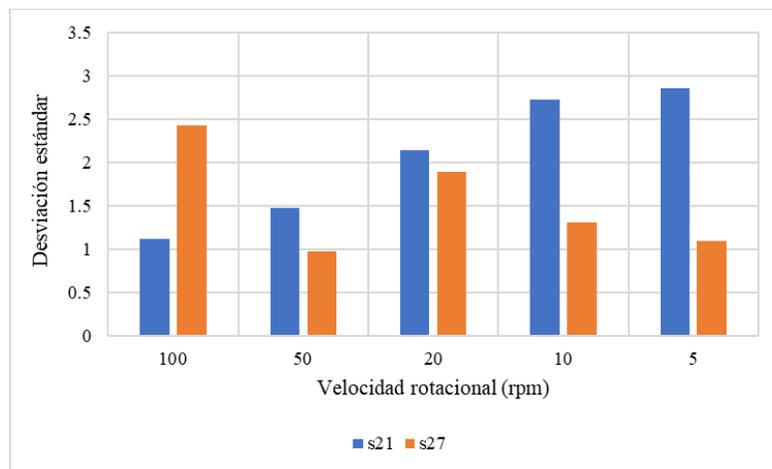


Figura 3.10 Desviación estándar de la viscosidad a diferentes velocidades con tamaño de partícula de 850µm

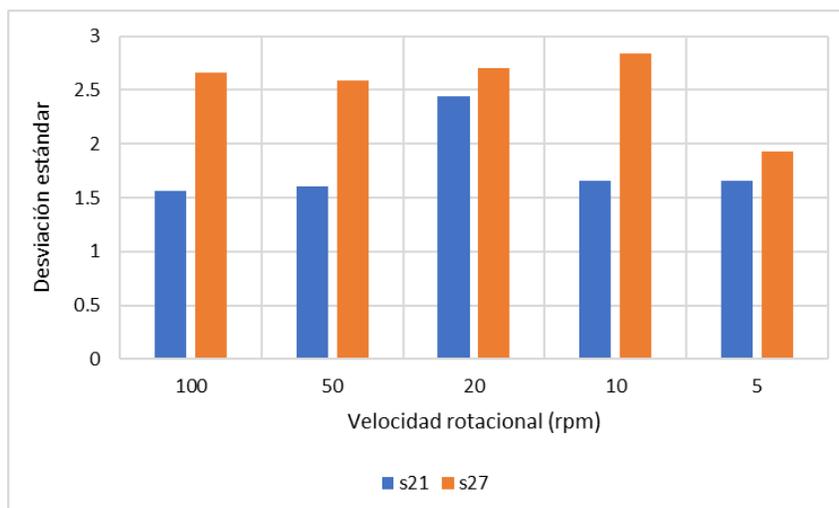


Figura 3.11 Desviación estándar de la viscosidad a diferentes velocidades con tamaño de partícula de 500µm

3.2.2 Efecto de la viscosidad vs tamaño de partícula

Tabla 3.3 Viscosidad dinámica a 160 °C

Mezcla Asfáltica	Malla 20 (850 μm)	Malla 35 (500 μm)
M0.0%	150.0	150.0
M0.0% con envejecimiento	280.0	280.0
M1.0%	400.0	413.0
M1.5%	500.0	513.0
M2.0%	350.0	388.0
M2.5%	350.0	370.0
M3.0%	325.0	345.0

Para evaluar el efecto de la concentración y el tamaño de la partícula de sargazo en la medición de la viscosidad dinámica sobre las mezclas asfálticas fue seleccionado el rotor SC4-27, a una velocidad rotacional de 20rpm y una temperatura de 160°C con el fin de establecer condiciones similares de medición, se determinaron los valores correspondientes al 50% de torque, si el torque no se encuentra dentro del 10-98% de torque durante la medición, el valor de viscosidad queda invalidado. Se observa en la Tabla 3.3 que las mezclas con tamaño de partícula de 500 μm tienen un incremento en la viscosidad hasta contenido de 1.5% comparado con la de tamaño de partícula de 850 μm esto se puede atribuir a que por tener un menor tamaño las partículas se logran dispersar mejor en la mezcla generando así un mejor acomodo entre ellas, pero a concentraciones mayores empieza a disminuir la viscosidad, este hecho se explica en el trabajo realizado por Ding y colaboradores (2017) mencionan que demasiado modificador en un asfalto a altas temperaturas puede causar deterioro provocando la degradación del material o también la aparición de algunas zonas aglomeradas dando así valores de viscosidad bajos.

Además, Venugopal y colaboradores (2019) explican que en las algas pardas contienen alginatos y en pequeñas cantidades fucoídan, a partir de esto la solubilidad tanto del alginato con los polisacáridos sulfatados pueden estar asociados en la matriz asfáltica con el nivel de ramificación, dependiendo del contenido de grupos se ve influenciada la viscosidad por acción de los compuestos presentes en el asfalto, en pequeñas concentraciones es muy viscoso, pero conforme aumenta la concentración disminuye la viscosidad, hecho que se puede observar en las mezclas de mayor contenido con partículas de sargazo. A su vez como menciona Martínez y colaboradores (2014) las cadenas de polímero de alginato adyacentes pueden desarrollar

fuerzas de atracción, lo que da como resultado la formación de una red transitoria similar a un gel actuando como soporte. A cierta concentración crítica, las cadenas de polímero pueden enredarse dando como resultado una mayor viscosidad, esto debido a la constitución fisicoquímica del material que presenta una red de fibras y su asociación en la matriz asfáltica.

3.2.3 Efecto de envejecimiento del asfalto

En la Figura 3.12 muestra el comportamiento de la viscosidad de los asfaltos vírgenes con y sin envejecimiento ambos a temperatura de 180°C. Se observa para el asfalto virgen y con envejecimiento que el efecto de la velocidad no se ve influenciado, sin embargo, si se nota un aumento significativo para el de envejecimiento en la viscosidad a causa de la exposición térmica por los grupos moleculares que realizan uniones con el oxígeno. Estas transformaciones químicas conducen a un grupo polar fuerte como los sulfóxidos, ácidos carboxílicos y cetonas, donde tienden hacer micelas, incrementando la viscosidad (Branthaver, 1994).

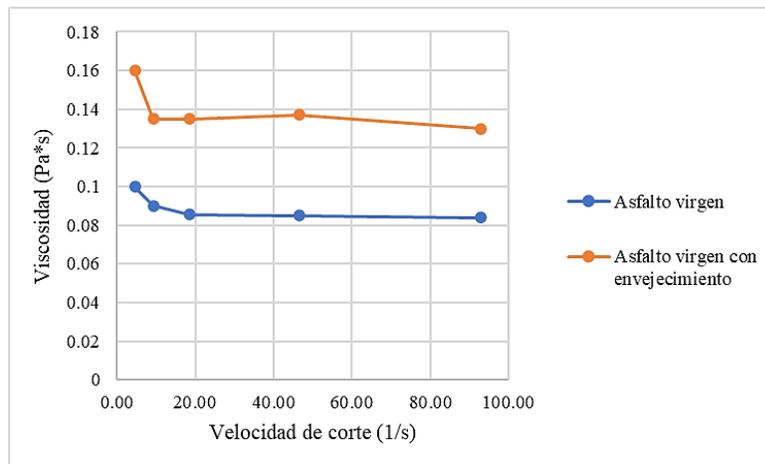


Figura 3.12 Viscosidad a 180°C con geometría 21

3.2.4 Efecto de la concentración vs temperatura

El estudio del efecto de la temperatura y la concentración en la viscosidad ha sido también estudiado. Los valores experimentales pueden ajustarse a un modelo matemático mediante una función tipo Arrhenius. La ecuación se puede utilizar para describir la influencia de la temperatura sobre la viscosidad a una velocidad de corte constante. Se escogió un valor de velocidad de corte para todas las concentraciones que fueron evaluadas, esta consideración se toma donde se mantenga lineal la viscosidad y de acuerdo con los datos obtenidos para este proyecto se observa dicho comportamiento a 20 rpm.

Para lograr obtener los estimados de los parámetros de la ecuación se grafica el logaritmo de la viscosidad experimental contra $1/T$ en K^{-1} . Al ajustar los valores del $\ln \eta$ en función del inverso de la temperatura $1/T$ se obtiene una línea recta, a partir de cuya pendiente es posible obtener el valor de la energía de activación, mientras que de la ordenada al origen se obtiene la constante η_0 .

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \dots\dots\dots Ec. (3.2)$$

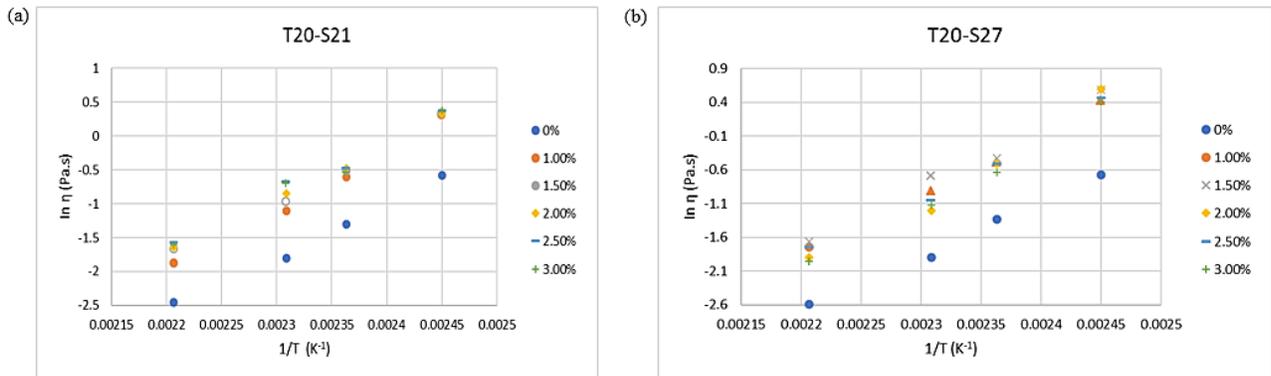


Figura 3.13 Viscosidad vs temperatura para tamaño de partícula de 850 μ m con geometría (a) 21 y (b) 27.

En la Figura 3.13 se observa que las mezclas preparadas con tamaño de partícula 20 utilizando tanto la geometría 21 y 27 se presenta un comportamiento lineal de fluido newtoniano con respecto a las diferentes concentraciones, pero se repite el mismo comportamiento con la viscosidad donde disminuye para cada temperatura a partir de concentración con 1.5% de modificador en donde los puntos empiezan a variar estando unos arriba de otros. Chen y Lin (2005) mencionan que la adición de una gran cantidad de fibras conduce a una interacción fibra-fibra, donde demasiado contenido de refuerzo puede dar lugar a mezclas quebradiza.

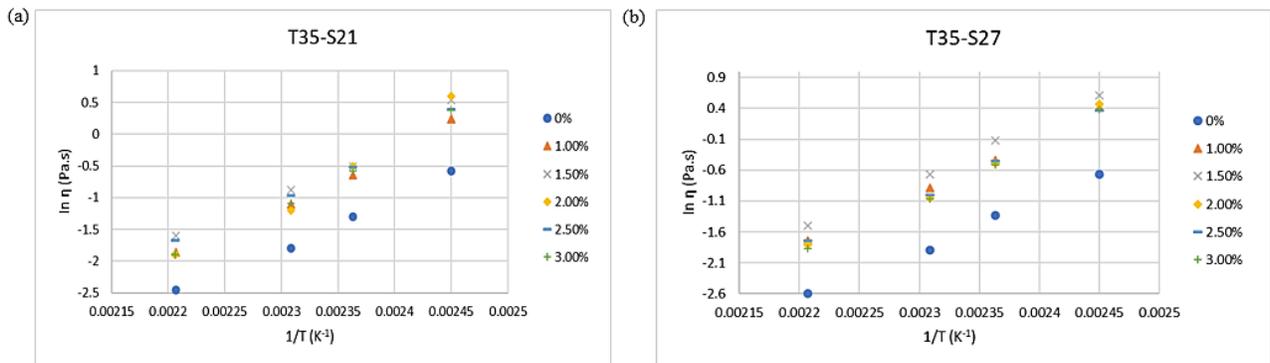


Figura 3.14 Viscosidad vs temperatura para tamaño de partícula de 500 μ m con geometría (a) 21 y (b) 27.

En la Figura 3.14 se muestra los valores de mezclas preparadas con tamaño de partícula 500 μm utilizando geometría 21 y 27 se tiene un efecto lineal mejor marcado que con el tamaño de partícula de 850 μm esto se atribuye que por ser un tamaño más pequeño se tiene una mejor dispersión de los componentes, pero se observa el mismo comportamiento de la viscosidad disminuyendo a partir de 1.5% de concentración de modificador. También al ser mas pequeña la partícula hay mayor área superficial.

3.2.5 Efecto de la concentración vs energía de activación

En 1936, Henry Eyring, describió este modelo de la barrera de energía de activación de flujo cuando fluye un líquido, son las capas de moléculas líquidas que se deslizan una sobre de otra para sobreponerse a las fuerzas intermoleculares que causan resistencia al flujo. Fue bajo este modelo que Eyring afirmó que es posible modelar la relación entre viscosidad y temperatura utilizando la ecuación de Arrhenius. La energía de activación de flujo en general para los distintos ligantes asfálticos oscila de 44 kJ/mol a 90 kJ/mol.

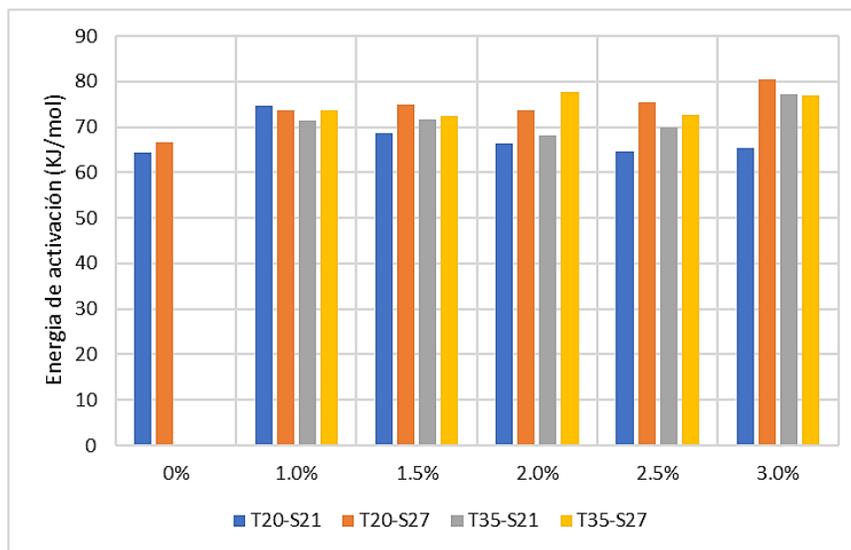


Figura 3.15 Energía de activación de flujo de las mezclas asfálticas

En la Figura 3.15 se observa los resultados obtenidos de las energías de activación a distintas concentraciones donde para el asfalto virgen se tienen los valores bajos, conforme se adiciona el modificador se van teniendo energías de activación más altas, esto se atribuye a dos hechos, primero debido a la acumulación de moléculas polares del asfalto con el modificador que incrementa las fuerzas intermoleculares el cual conducen a interacciones más fuertes.

Estas interacciones dentro del ligante asfáltico resultan en una mayor resistencia al flujo y por consecuencia a una mayor barrera de energía de activación de flujo. Segundo, por el tipo de geometría empleada al tener una de mayor volumen se presenta un mayor contacto con las capas de fluido de asfalto comparado con la geometría 27 donde es por ello que las energías de activación son mayores puesto que la resistencia al flujo es menor.

Los parámetros del modelo de Arrhenius, energía de activación (E_a), factor de frecuencia (η_0) y el coeficiente de correlación se presentan en la Tabla 3.4. Los valores del coeficiente de correlación obtenidos demuestran que hay una relación lineal entre el $\ln \eta$ (Pa s) y $1/T$ (K).

Tabla 3.4 Parámetros del modelo de Arrhenius de las mezclas asfálticas

Geometría	Tamaño de partícula	Concentración	E_a (kcal/mol)	η_0	Coefficiente de correlación
21	850 μm	0%	64.4742386	3.0079E-3	0.9943
		1.0%	74.6073418	3.5925E-10	0.9929
		1.5%	68.5173368	2.2194E-9	0.9913
		2.0%	66.3199466	4.3157E-9	0.9965
		2.5%	64.6114196	7.4653E-9	0.985
		3.0%	65.4794012	5.6647E-9	0.9782
27	850 μm	0%	66.512	1.5562E-9	0.9949
		1.0%	73.5938652	5.4840E-10	0.994
		1.5%	74.8825352	4.3529E-10	0.9857
		2.0%	73.666197	5.3862E-10	0.9879
		2.5%	75.5052538	3.1169E-10	0.9824
		3.0%	80.4870026	6.8307E-11	0.9895
21	500 μm	1.0%	71.4288996	8.5578E-10	0.9937
		1.5%	71.733192	9.8932E-10	0.975
		2.0%	85.733968	1.6962E-11	0.974
		2.5%	69.9423564	1.5057E-9	0.9881
		3.0%	77.2711474	1.7347E-10	0.9923
27	500 μm	1.0%	73.6254584	5.5502E-10	0.9981
		1.5%	72.5097196	9.6779E-10	0.9986
		2.0%	77.744214	1.6501E-10	0.9883
		2.5%	72.560435	7.1552E-10	0.9946
		3.0%	76.991797	1.9442E-10	0.9944

3.3 Punto de reblandecimiento

El punto de reblandecimiento es un indicativo de la tendencia del material a fluir a elevadas temperaturas de uso. En la Figura 3.16 se muestran los resultados de punto de reblandecimiento en donde se tienen los promedios obtenidos de las temperaturas para cada mezcla asfáltica. En relación con los asfaltos vírgenes se observa un aumento de 4 grados con respecto al asfalto sin llevar a tiempo de mezclado, mismo efecto se observó con la prueba de viscosidad rotacional.

Los mejores resultados se tienen utilizando un tamaño de partícula de 500 μm en donde igual hasta un contenido de 1.5% de polvo se obtiene mayor valor de temperatura. Este mismo hecho sucede en el trabajo de Nciri y colaboradores (2018) cuando evaluaron polvo de concha de ostra en asfalto, esta propiedad física está estrechamente vinculada, es decir, es lógico asumir que los asfaltos con un punto alto de reblandecimiento tienen más viscosidad que uno de menor reblandecimiento y conforme va subiendo la cantidad de modificador empieza a bajar este valor de reblandecimiento, hecho que se observó en la prueba de viscosidad. Dicho de otra manera, el modificador a grandes cantidades permanece formando una mezcla no homogénea no soluble con las fracciones aromáticas del asfalto teniendo así variaciones en los resultados obtenidos. La mezcla con 1.5% T35 obtuvo un 19% de mejora con respecto al asfalto original, con esto se puede decir que las partículas de sargazo aportan un efecto de mejora a la resistencia a altas temperaturas. Esto debido a la buena compatibilidad y la interacción óptima entre el modificador y el asfalto.

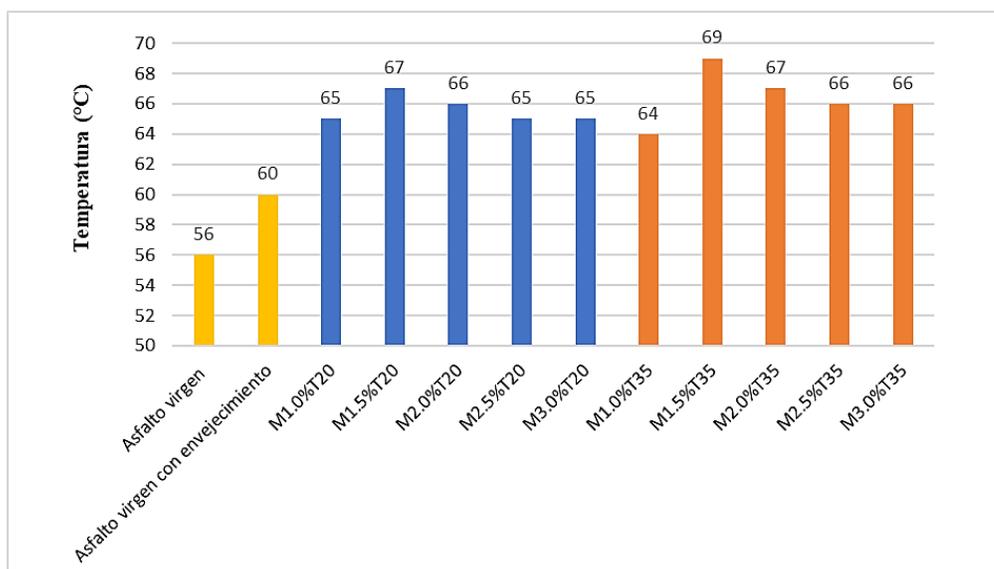


Figura 3.16 Resultados de valores de temperatura de reblandecimiento

3.4 Separación de fases

El objetivo de esta prueba es verificar si el polímero está bien incorporado y no existe separación al someterlo a altas y bajas temperaturas.

Al término del periodo de prueba cuando se llevó a cabo el vaciado de los tubos colapsibles a los anillos, se percató que las mezclas modificadas presentaban un olor característico del alga este hecho podría deberse al contenido de ciertos compuestos azufrados que por acción de envejecimiento se pudieran percibir de manera olfativa, además que cuando se llevaron a fundir las mezclas empezaron a realizar como una especie de tronidos. Esto se explica en un estudio realizado en una revista marina de ciencias por Milledge y col. (2016) mencionan que el género de sargazo *Natans* y en todas las demás subespecies contienen un 1.4% en peso de polisacáridos sulfatados el cual producen un olor intenso en forma de sulfuro de hidrógeno. A su vez Venugopal y col. (2019) explican que el sargazo contiene en pequeñas cantidades fucooidan, un compuesto sulfatado encontrado en la pared celular de las algas pardas unido con pequeñas proporciones de ácido urónico, galactosa, xilosa y manosas.

También al momento de realizar el vaciado en cuestión de la consistencia se notó que los asfaltos vírgenes tenían una condición más fluida que los modificados confirmando así que la viscosidad con el modificador efectivamente aumentó.

Y se notó un color café presente en todas las mezclas modificadas con sargazo como se observa en la Figura 3.17 presente en el alga que interactuó con el asfalto.



Figura 3.17 Coloración del sargazo sobre el asfalto

Se considera un asfalto estable aquel en donde la diferencia entre la temperatura superior e inferior sea menor a 3°C (Djaffar, 2013). A continuación, se muestra en la Tabla 3.5 las mediciones obtenidas para las mezclas asfálticas.

Tabla 3.5 Resultados estabilidad al almacenamiento en mezclas asfálticas

Mezcla	Punto de reblandecimiento (°C)		Separación de fases (°C)
	Inferior	Superior	
Asfalto virgen	57	57	0
Asfalto virgen con envejecimiento	67	64.5	2.5
M1.0%T20	66	64	2
M1.5%T20	65	62.5	2.5
M2.0%T20	67.3	64.5	2.8
M2.5%T20	64	62	2
M3.0%T20	68	65.5	2.5
M1.0%T35	65	63	2
M1.5%T35	69.75	67.75	2
M2.0%T35	64	61.5	2.5
M2.5%T35	67	64.5	2.5
M3.0%T35	75	71	4

Todas las mezclas presentan buena estabilidad al ser llevadas a cambios bruscos de temperatura, esto indica que las mezclas presentan una buena densidad homogénea en todo el tubo con excepción de la M3%T35 que no paso esta prueba. Este cambio se pudo percatar al observar en el tubo colapsible en la parte inferior se obtuvo un mayor valor de temperatura, asimismo, que de manera física se observó una sedimentación del modificador en parte inferior como se observa en la Figura 3.18, este hecho explica Zapién y colaboradores (2015) que la fracción de compuestos malténicos en el asfalto es propensa a ser absorbida por la porción presentes de un modificador, lo cual resulta en una competencia entre los componentes del sargazo y los asfáltenos por dispersarse en los máltenos, y como consecuencia de estos procesos, tendrá lugar el fenómeno de separación de fases y se provocará que las partículas tiendan a agruparse.



Figura 3.18 Sedimentación en tubo colapsible parte inferior

3.5 Caracterización por penetración

Esta prueba determina la consistencia de los asfaltos expresada por medio de la distancia. Las mediciones obtenidas para la penetración de las mezclas asfálticas se reportan en decimas de milímetro (dmm).

Tabla 3.6 Valores de penetración e índice de penetración de asfaltos modificados

Mezcla asfáltica	Penetración 25°C, dmm	Índice de penetración
Asfalto virgen	41.6	-0.2362
Asfalto virgen con envejecimiento	21.3	-0.7731
M1.0%T20	21.3	0.1027
M1.5%T20	20.2	0.3341
M2.0%T20	19.5	0.1071
M2.5%T20	21.2	0.0940
M3.0%T20	13	-0.7349
M1.0%T35	25.1	0.2441
M1.5%T35	18.7	0.5097
M2.0%T35	25.1	0.7506
M2.5%T35	18.6	0.0224
M3.0%T35	13	-0.5757

En la tabla 3.6 se observa que para el asfalto virgen con envejecimiento hay una considerable disminución del valor de penetración con respecto al asfalto virgen, todo lo expuesto en las pruebas anteriores se ha repetido debido por la exposición térmica que tuvo. Con este hecho se confirma lo explicado en la prueba de viscosidad donde se van acumulando micelas de asfaltenos provocando que estas le confieran una mayor cohesión interna en la estructura del asfalto.

En el caso de los asfaltos modificados con partículas de sargazo también se aprecia una disminución del valor de penetración, incrementar la dureza se relaciona con la resistencia a deformaciones permanentes, es decir, a menores valores de penetración mayor es la rigidez del asfalto.

Otro punto a mencionar es que se puede observar que no hay un comportamiento secuencial de disminución en orden de concentración, para concentraciones mayores de 2.0% la interacción entre el modificador y el asfalto no es del todo estable hasta en un cierto punto de concentración

puesto se presentan variaciones en los valores dando una idea en el posible contacto que tengan los componentes del alga con las fracciones asfálticas debido a que pueda ser por la afinidad entre los componentes polares. Habría que añadir también con la teoría de acumulación de micelas que por su naturaleza química puede ser más fuerte que las que presentan los componentes del alga por ello es que hasta cierto punto se presentan las variaciones en los valores de penetración.

Por otra parte, se puede explicar ahora con el tamaño de partícula que, si influye en la modificación, es evidente que para los de tamaño partícula de 500 μm al ser uno de menor tamaño se obtienen los valores bajos de penetración comparados con los de tamaño partícula de 850 μm , donde se puede decir que la dispersión es más homogénea en toda la matriz asfáltica dando así un mejor acomodo interno y por tanto una mayor rigidez.

A partir de la ecuación 2.1, que se muestra en el capítulo 2, se calculó el índice de penetración (IP) para las mezclas de asfalto, tomando en cuenta las temperaturas de reblandecimiento expuestas en la figura 3.16 y las unidades de penetración de la tabla 3.6. Los valores de IP correspondientes a cada mezcla asfáltica se muestran en la tabla 3.6 y los límites establecidos por el método se pueden clasificar las mezclas asfálticas como:

- $IP > +1$ son cementos asfálticos con poca susceptibilidad a la temperatura
- $IP < -1$ se consideran cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso.
- IP oscilante a +1 y -1 poseen características intermedias entre los dos anteriores (Subiaga, 2011)

A pesar de que el asfalto virgen con envejecimiento presentó mayor valor de penetración comparado al asfalto virgen sin envejecer, en este criterio se evidencia que sea más susceptible a la temperatura debido a ese periodo térmico que tuvo de envejecimiento. Las mezclas con tamaño de partícula de 500 μm resultaron con los mejores valores de índice de penetración dando una idea por la mejor dispersión que pudo tener las partículas en la matriz asfáltica. Con esto se confirma que el sargazo mejora las propiedades en cuanto de reducir la susceptibilidad térmica el cual es buscado en el diseño de carreteras en donde se busca llevar a ambientes con variable condición climática.

3.6 Microscopía fluorescente

En las micrografías, el fondo oscuro representa la fase asfáltica y las áreas fluorescentes están asociados al modificador, se debe tener en cuenta que las muestras que no presentan partículas fluorescentes indican una mejor dispersión del aditivo en el asfalto.

En la Figura 3.19 se muestran las micrografías de las mezclas asfálticas con tamaño de partícula de 850 μm , está claro que a la concentración de 1.0% se observa un bajo nivel de heterogeneidad debido a algunas partículas aglomeradas de menor tamaño dando así una fase continua de uniformidad del modificador sobre la matriz asfáltica.

Para las mezclas al 1.5% y 2.0% se presentan algunas zonas con partículas de mayor tamaño debida al bajo nivel de dispersión de las partículas. Por último, en el caso de las mezclas al 2.5% y 3.0% es evidente conforme aumenta la concentración ahora la fase rica en partículas de sargazo cubre la fase asfáltica presentando así una fase heterogénea más marcada, con lo que utilizar más contenidos de modificador afectan la calidad de dispersión del asfalto.

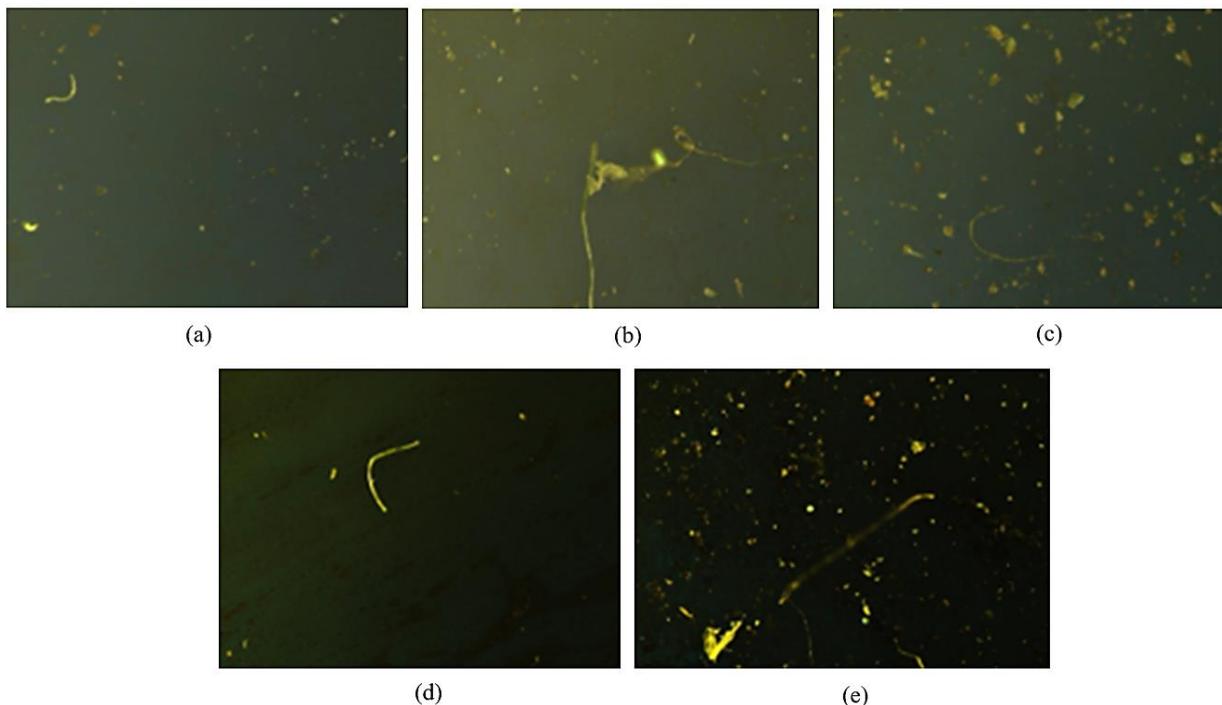


Figura 3.19 Microscopías con tamaño de partícula de 850 μm : (a) M1.0%, (b)M1.5%, (c)M2.0%, (d)M2.5% y (e)M3.0%. Aumento 5X

En la Figura 3.20 se muestran las micrografías de las mezclas asfálticas con tamaño de partícula de 500 μm . Ahora bien, al utilizar un menor tamaño de partícula se observa un mejor nivel de dispersión, en donde la mezcla al 1.0% confirma que se encuentra una fase continua homogénea. De igual manera conforme va aumentando la concentración se va presentando algunas zonas con acumulación de partículas aglomeradas, pero a diferencia con las de tamaño de partícula de 850 μm se observa una mejor distribución y compatibilidad.

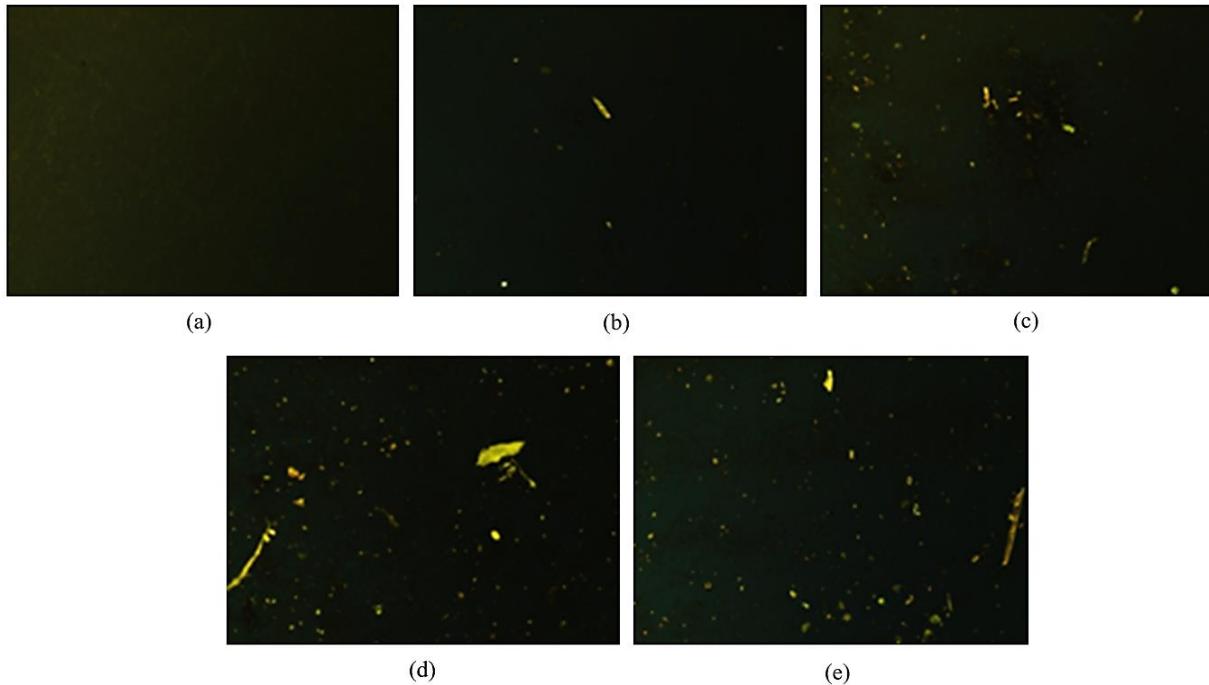


Figura 3.20 Microscopías con tamaño de partícula de 500 μm : (a) M1.0%, (b)M1.5%, (c)M2.0%, (d)M2.5% y (e)M3.0%. Aumento 5X

Un punto para mencionar es que quizás las partículas del sargazo deban ser tratadas en un menor tamaño y así se pueden obtener mejores resultados en las propiedades debido a que se miden las partículas de material disperso con unidades muy grandes en tamaños entre 10 y 40 micras debido a aglomeraciones de las partículas.

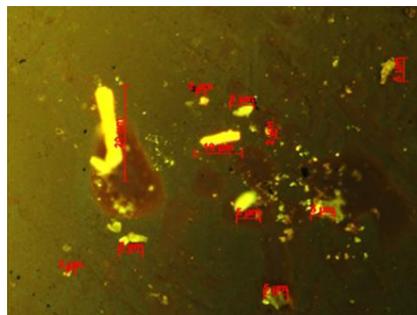


Figura 3.21 Microscopía mezcla al 2.0% con tamaño de partícula de 500 μm . Aumento 20X

3.7 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Esta técnica estudia 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 permitiendo obtener un espectro que permite conocer la composición química de una muestra a través de los picos característicos de los grupos funcionales.

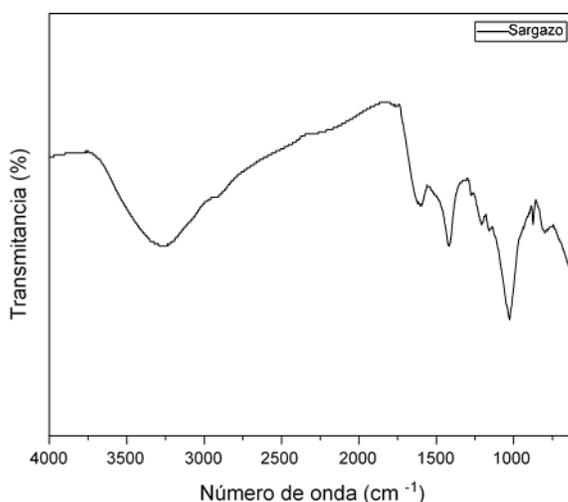


Figura 3.22 Espectro FT-IR del sargazo (alga parda)

Las algas pardas que se encuentran en el medio marino contienen una fuente de materiales funcionales incluidos como polisacáridos, proteínas, minerales y otros grupos en su estructura. En la Figura 3.22 se muestra el espectro del sargazo, se observa una banda de absorción fuerte a 3250 cm^{-1} que se puede relacionar con flexiones de tipo N-H y O-H generadas por la presencia de polisacáridos y aminoácidos. Se puede asociar con el alginato ya que es el compuesto más abundante en las algas pardas cerca del 40% en peso de acuerdo con un estudio realizado por Khalil y colaboradores (2017) el cual está conformado por arreglos de celulosa que dan forma a la pared celular de las algas. La pequeña banda localizada a 2890 cm^{-1} se atribuye a vibraciones de flexión de compuestos alifáticos como $-\text{CH}_2$ y $-\text{CH}_3$. La banda localizada a 1620 cm^{-1} es debida a las flexiones de tipo C=O y N-H por grupos esterés asociadas a la pectina. En 1560 cm^{-1} se presenta una banda de absorción media debida por el estiramiento de flexión C=C asociada a la lignina presente en la estructura del sargazo. La absorción de banda a 1250 cm^{-1} son debidas a presencia de grupos S=O relacionados con compuestos sulfatados como fucanos. Las bandas de absorción fuertes localizadas en la región de la huella dactilar a 1100 cm^{-1} son estiramientos del tipo C-H, relacionada con la molécula de la celulosa.

Finalmente, la banda en 670 cm^{-1} corresponde a los enlaces C-S y C=S en modo de vibración de tensión de los compuestos sulfatados (Kannan, 2014).

Debido a que las algas son capaces de absorber todo tipo de compuesto a través del agua, el cual podría entenderse como algunos nocivos siendo uno de ellos el arsénico, se optó por buscar y explicar bibliografía para fundamentar los tipos de especies de arsénico que se encuentran en las algas y a través de espectroscopia infrarroja por medio de una banda de absorción característica.

Las principales rutas de exposición al arsénico son la ingesta y la inhalación. La toxicidad de arsénico es altamente dependiente de la especie química de arsénico. El orden de toxicidad de las especies de arsénico es: arsina > As(III) inorgánico > As(III) orgánico > As(V) inorgánico > As(V) orgánico > compuestos metilados de As (MMA y DMA) > arsénico elemental.

Las especies orgánicas, ácido monometilarsónico (MMA) y ácido dimetilarsínico (DMA) son menos tóxicas para los organismos, mientras que la arsenobetaína (AsB) y arsenocolina (AsC) son consideradas no tóxicas.

El grupo de investigación de Benson (1981) fue el primero en estudiar la formación de arsenolípidos en algas unicelulares, mediante el empleo de arseniato marcado isotópicamente y monitorización de los productos mediante radiocromatografía.

Estos autores demostraron que el arseniato era absorbido por las algas unicelulares, las cuales lo transformaban en especies de arsénico hidro y liposolubles. La arsenobetaína (AsB) es el compuesto mayoritario presente en la fauna marina, y su biosíntesis se ha propuesto a partir de los arsenoazúcares presentes en las algas, incorporados a través de la cadena alimentaria.

El proceso comienza con la absorción de arseniato por parte de las algas marinas, el cual se transforma en compuestos orgánicos de diversa complejidad, como arsenoazúcares y especies liposolubles. Las especies orgánicas de ácido monometilarsónico (MMA) y ácido dimetilarsínico (DMA) son intermediarias en este proceso, por lo que también pueden encontrarse en las algas.

La hidrólisis de la adenina y posterior glicosidación dan lugar a los arsenoazúcares, que a su vez son la base para la formación de arsenolípidos. A partir de esto se puede considerar que las especies orgánicas están presentes en las algas pardas (García Salgado, 2013).

En un trabajo realizado por Zhang y colaboradores (2019) estudiaron la evaluación de la bioacumulación de iones de arsenito (AsI) y el arsenato (AsV) disueltas en la pared celular usando algas marinas verdes. Los efectos tóxicos en la pared celular se observaron a través de los cambios morfológicos de las células de las algas por microscopía electrónica de transmisión (TEM) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) en conjunto revelaron evidencias espectroscópicas con las interacciones de los iAs con los grupos funcionales C–O–C, C–O–H y NH₂ en las proteínas de tipo tirosina y triptófano presentes en la pared celular del alga como sitios de unión.

Este estudio proporciona por primera vez pruebas exhaustivas sobre las interacciones iAs-pared celular. Encontraron un cambio con intensidad máxima entre 825 a 470 cm⁻¹ comparado con el alga sin tener el arsénico a la interacción con AsIII y AsV. Estos cambios indicaron que los grupos funcionales activos O-H, N-H, C-O y C-O-C y los grupos fosfato están involucrados en la interacción de unión pared celular-iAs.

Teniendo esto en cuenta, en el espectro que se obtuvo en este proyecto no se encuentra una banda de absorción característica como se menciona en el trabajo anterior. Se entiende que las algas son organismos que tienen la capacidad de absorber en el agua todo tipo de compuestos como nutrientes, pero estas transforman el arsénico inorgánico a orgánico donde este tipo de especies no son nocivas para el ser humano, además que el enfoque de este proyecto no es para consumo humano sino va dirigido para diseño de mezclas asfálticas en carreteras.

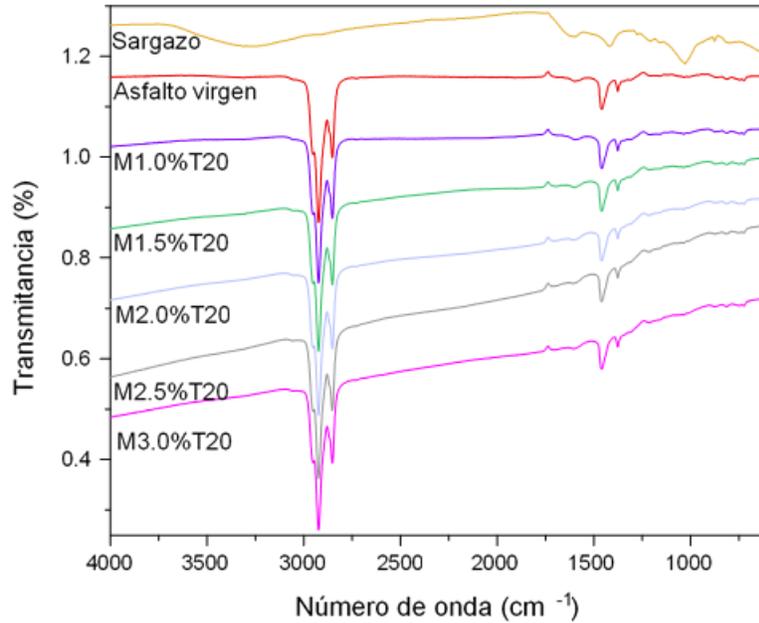


Figura 3.23 Espectro infrarrojo mezclas asfálticas para tamaño de partícula de 850µm

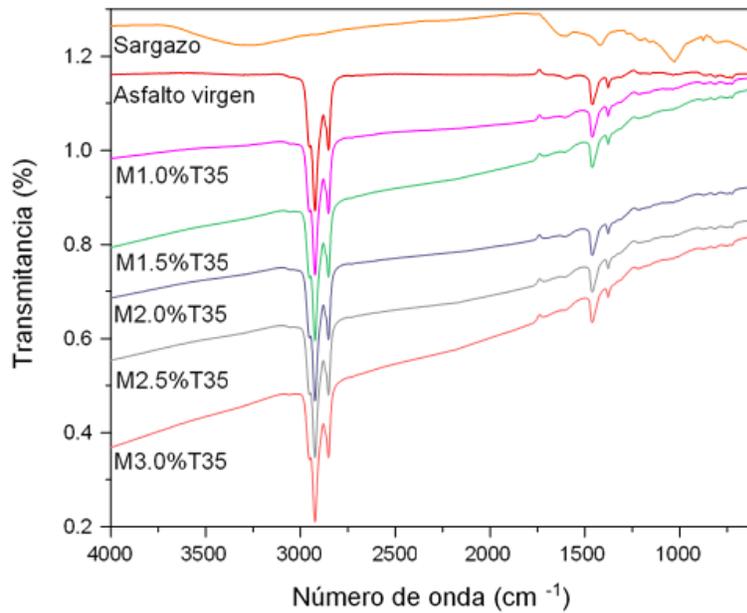


Figura 3.24 Espectro infrarrojo mezclas asfálticas para tamaño de partícula de 500µm

Las bandas de absorción características del asfalto virgen, sargazo y mezclas modificadas con sargazo con tamaño de partícula T20 (a) y T35 (b) en los espectros FTIR se indican en la Figuras 3.23 y 3.24. Las bandas localizadas entre 2800-2700 cm^{-1} son vibraciones de tensión de cadenas alifáticas debida a los compuestos saturados.

La banda de absorción a 1650cm^{-1} se atribuye a grupos carbonilo $\text{C}=\text{O}$. La región entre $1500\text{-}1400\text{cm}^{-1}$ se relaciona con vibraciones de compuestos con anillos aromáticos, al igual que las bandas ligeras señaladas a 900 cm^{-1} se debe a los aceites ligeros ambas relacionadas con asfaltos de características aromáticas.

La técnica es comúnmente utilizada para identificar formaciones y cambios en los principales grupos funcionales del asfalto virgen debido a posibles nuevos enlaces químicos generados y como se observa no presentan ningún tipo de interacción química debido a que no se presentan picos nuevos a los establecidos por los componentes originales de la mezcla, por lo que se asume la interacción presente es por adsorción física ocasionado por algunas interacciones de tipo van der Waals y fuerzas electrostáticas.

3.8 Reología

Las deformaciones permanentes de las capas asfálticas son básicamente un problema de flujo por tanto es coherente realizar la elección del asfalto en función de propiedades reológicas del mismo. Entre las variables que sin duda afectan las deformaciones permanentes se destacan la temperatura y las cargas a la que está expuesto el pavimento. Se consideraron los valores correspondientes a las lecturas llevadas a cabo a una frecuencia angular de 10 rad/s , debido a que esta frecuencia ha sido relacionada con una velocidad de tráfico carretero igual a 100 km/h (Djaffar, 2013).

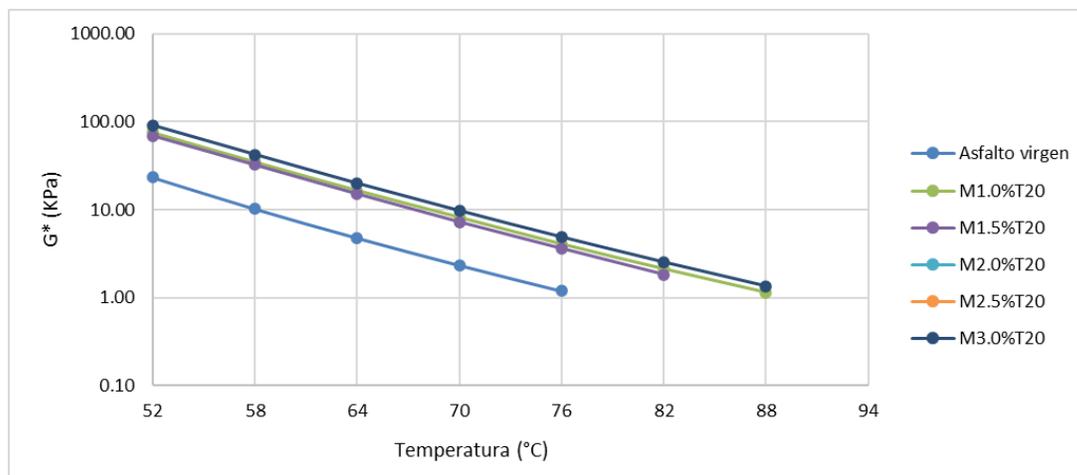


Figura 3.25 Gráfica isocrónica del módulo complejo en función de la temperatura para tamaño de partícula de $850\mu\text{m}$ (malla 20)

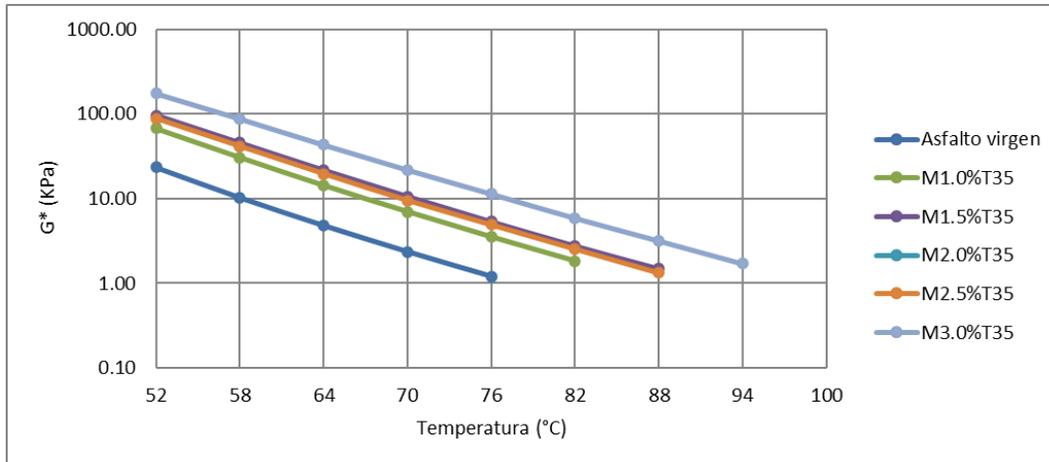


Figura 3.26 Gráfica isocrónica del módulo complejo en función de la temperatura para tamaño de partícula de 500µm (malla 35)

En la Figura 3.25 se muestra la gráfica isocrónica del módulo complejo en función de la temperatura con tamaño de partícula de 850µm donde se observa que las mezclas modificadas aumentan el módulo complejo con la adición de sargazo, aunque las lecturas entre cada punto se encuentran más próximos entre sí hasta la temperatura de 88°C con lo cual quiere decir que el efecto reológico de recuperar su forma inicial tras someterse a un esfuerzo no es tan significativo con el aumento de la temperatura. En cambio, como se observa en la Figura 3.26, para el tamaño de partícula de 500µm los valores de modulo complejo son mayores donde se encuentran un poco más separados, el cual existe una fuerte correlación entre la resistencia a las deformaciones permanentes a altas temperaturas al incrementarse el módulo complejo se espera una resistencia a las deformaciones más prometedora a altas temperaturas. La mezcla M3.0%T35 obtuvo un 29% de mejora en el parámetro del módulo complejo con respecto al asfalto virgen. A su vez se puede observar que el módulo complejo de las diferentes mezclas disminuye gradualmente con el efecto de la temperatura, esto indica que este decremento es debido a que en la mezcla quien domina a altas temperaturas es el módulo viscoso.

3.8.1 Determinación de la temperatura de falla

De acuerdo con el programa de investigación de carreteras estratégicas (SHRP), $G^* / \sin \delta$ (factor deformación permanente) a 10 rad/s se utiliza para estimar la resistencia del asfalto a la deformación permanente a altas temperaturas. Un valor más alto del factor implica una mejor resistencia del aglutinante de asfalto a las deformaciones y esta cantidad debe ser mayor que 1.0 kPa a la temperatura máxima de diseño del pavimento (Wang, 2015).

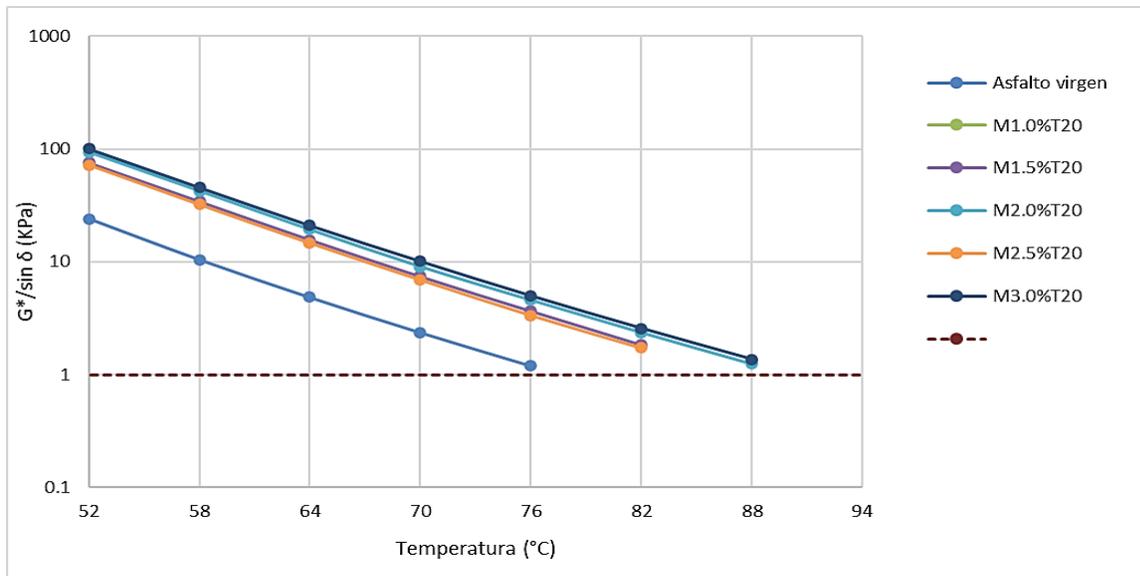


Figura 3.27 Parámetro temperatura de falla $G^*/\sin \delta$ a frecuencia constante de 10 rad/s para tamaño de partícula de 850 μm (malla 20)

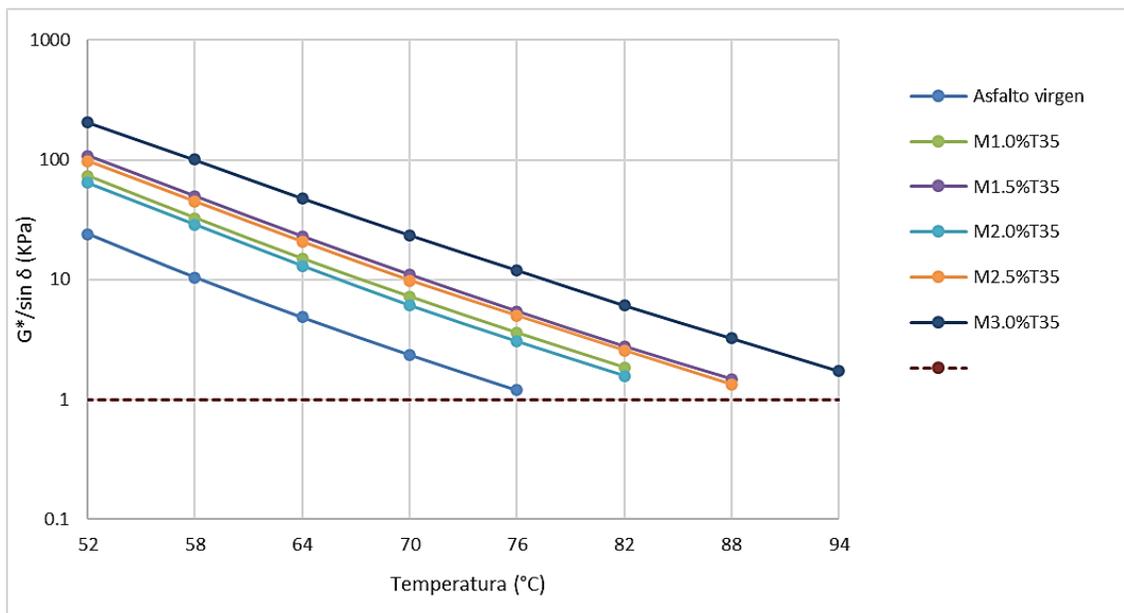


Figura 3.28 Parámetro temperatura de falla $G^*/\sin \delta$ a frecuencia constante de 10 rad/s para tamaño de partícula de 500 μm (malla 35)

En las Figuras 3.27 y 3.28 se muestra las gráficas de la temperatura de falla para (a) con tamaño de partícula de 850 μm y 500 μm, se observa que la adición de partículas de sargazo mejora significativamente la estabilidad de la mezcla asfáltica hacia las altas temperaturas.

Los resultados indican que los valores de la temperatura de falla de las mezclas asfálticas para las mezclas con tamaño de partícula 850 μm no presentan cambios significativos en el parámetro de la resistencia a la deformación permanente. Por otro lado, las mezclas con diferentes relaciones de partículas de sargazo de tamaño de 500 μm si presentan cambios significativos en el parámetro de la resistencia a la deformación permanente. Es importante mencionar que el parámetro de deformación incrementa con el incremento de porcentaje de partículas orgánicas y decrece con el incremento de la temperatura. En la Tabla 3.7 se presentan las temperaturas de falla de las mezclas evaluadas. Cuando se incrementa el contenido de partículas para tamaño de partícula de 500 μm , la temperatura de falla se hace más grande, lo cual es indicativo de un mejor desempeño del asfalto a altas temperaturas, caso contrario para las de tamaño de 850 μm donde no se presentan cambios significativos.

Tabla 3.7 Temperatura de falla para las mezclas asfálticas

Mezcla asfáltica	T _{falla} (°C)
Asfalto virgen	77.1
Asfalto virgen con envejecimiento	88.4
M1.0% T20	89.7
M1.5% T20	87.9
M2.0% T20	89.1
M2.5% T20	87.3
M3.0% T20	90.2
M1.0% T35	87.9
M1.5% T35	90.7
M2.0% T35	85.2
M2.5% T35	91.4
M3.0% T35	93.3

CONCLUSIONES

Las mezclas asfálticas preparadas con partículas de polvo de sargazo resultaron con buenas propiedades en donde destaca la incorporación con tamaño de partícula de 500 μ m (malla 35) donde presentó cambios significativos en las propiedades del asfalto comparadas con las de tamaño de partícula de 850 μ m (malla 20), teniendo en cuenta que el efecto de tamaño si tiene influencia sobre las propiedades del asfalto. Con lo anteriormente mencionado se puede concluir lo siguiente:

El incremento del parámetro de viscosidad con la adición de las partículas de sargazo en el asfalto presenta una mejora en la resistencia a la deformación de las mezclas asfálticas esto puede deberse a la constitución del material en donde ayuda a formar una red continua de fibras a lo largo de la matriz asfáltica, a su vez al aumentar la temperatura esta viscosidad disminuye en la mezcla asfáltica el cual este cambio es positivo en el aspecto de operaciones de bombeo y mezclado del asfalto.

En la prueba de punto de reblandecimiento las partículas de polvo de sargazo generan tenacidad donde se obtienen resultados favorables, esto debido a las fibras orgánicas aportadas por el sargazo que ayudan al asfalto a presenta valores de susceptibilidad a altas temperaturas.

En la prueba de separación de fases los valores obtenidos en esta experimentación determinan que existe una buena compatibilidad entre el asfalto y las partículas de sargazo. El comportamiento que presentan las mezclas realizadas con sargazo demuestra un comportamiento homogéneo, este comportamiento se atribuye a la interacción entre los grupos celulósicos y polisacáridos con los componentes polares de los asfaltos (resinas y asfáltenos).

Los resultados en la prueba de penetración muestran una disminución en los valores, esto es favorable debido a que las mezclas con asfalto con valores más bajos son menos susceptibles a las deformaciones permanentes. El parámetro IP (índice de penetración) se presenta en el intervalo de -3 y +7, y exhiben mejores resultados generando una disminución de sensibilidad a la temperatura.

En la prueba de microscopía, la morfología de la dispersión depende de la concentración de las partículas de sargazo y del tamaño de dicha partícula, indicando una tendencia hacia la formación de una fase continua.

Los espectros IR demostraron que no se han producido bandas que indiquen reacciones aparentes entre el modificador y el asfalto por lo que se puede concluir que el fenómeno presentado en las mezclas asfálticas es el de adsorción física, debido por la fuerte unión de los polisacáridos y aminoácidos presentes en el sargazo y las moléculas aromáticas presentes en el asfalto ocasionan interacciones de van der Waals y fuerzas electrostáticas, asimismo no se presentaron compuestos con arsénico.

Los resultados indican que los valores de la temperatura de falla de las mezclas asfálticas aumentan significativamente con la adición de partículas de sargazo el cual es punto para destacar para evitar la formación de surcos en el pavimento.

En resumen, utilizar un material natural como el sargazo es una opción viable para utilizar en el diseño de mezclas asfálticas gracias a las propiedades que aporta como modificador el cual tendría un gran impacto en la gestión de residuos orgánicos dando solución a su acumulación en las playas.

Referencias

- Aguirre Muñoz, A. (2019). El sargazo en el Caribe mexicano: de la negación y el voluntarismo a la realidad. *Sustentabilidad, Gaceta Digital del Centro Interdisciplinario de Biodiversidad y Ambiente, A.C. CeIBA*. Número 2. CDMX, 5 de septiembre de 2019. Disponible de: https://www.conacyt.gob.mx/sargazo/images/pdfs/El_Sargazo_en_el_Caribe_Mexicanopdf.
- Abdul 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), 244–265.
- Bellatrache, Y., Ziyani, L., Dony, A., Taki, M., & Haddadi, S. (2020). Effects of the addition of date palm fibers on the physical, rheological and thermal properties of bitumen. *Construction and Building Materials*, 239, 117808.
- Benson, A., & Summons, R. (1981). Arsenic accumulation in Great Barrier Reef invertebrates. *Science*, 211(4481), 482–483.
- Rico, A., Borasco, A. y Perales, S. (2003). *Algas marinas de la Patagonia*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
- Branthaver JF, Petersen JC, Robertson RE, Duvall JJ, Kim SS, Harnsberger PM, Mill T, Ensley EK, Barbour FA, Schabron JF (1993) Binder characterization and evaluation, Vol 2: Chemistry, SHRP-A-368. National Research Council, Washington, D. C.
- Caro, S., Vega, N., Husserl, J., & Alvarez, A. E. (2016). Studying the impact of biomodifiers produced from agroindustrial wastes on asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 126, 369–380.
- Colunga Sánchez, L., (2018). Tesis de licenciatura. Modificación de propiedades fisicoquímicas del asfalto utilizando un material compuesto de SBS – Queratina de pluma de pollo. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Tamaulipas, México.
- Coe, D.; Cui, Z. “Determinación de la energía de activación de flujo en ligantes asfálticos”, XII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto CILA, Quito 2003. Disponible en [www: technopave. com/publications/CILA-2003](http://www.technopave.com/publications/CILA-2003).

Chen, J.-S., & Lin, K.-Y. (2005). Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers. *Journal of Materials Science*, 40(1), 87–95.

Ding, Z., Li, P., Zhang, J., Bing, H., & Yue, X. (2020). Analysis of viscosity test conditions for crumb-rubber-modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 245, 118454.

Dirección de comunicación social. (2020). CONTIENE SARGAZO ELEMENTOS DAÑINOS PARA HUMANOS Y ECOSISTEMAS MARINOS. Recuperado de: https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2020_572.html

Djaffar S., Samy D., Khadidja A. (2013). Rheological properties and storage stability of SEBS polymer modified bitumen, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 5, No. 05.

Elizondo Arrieta, F. (2010). Análisis reológico de asfaltos modificados. Costa Rica: lanamme.

Eyring, H. (1936). Viscosity, Plasticity, and Diffusion as Examples of Absolute Reaction Rates. *The Journal of Chemical Physics*, 4(4), 283–291.

Gómez-Ordoñez, E. (2013). Tesis de doctorado. Evaluación nutricional y propiedades biológicas de algas marinas comestibles. Estudios in vitro e in vivo. Universidad complutense de Madrid. Madrid, España.

Herencia Peña, W. L. (2001). Tesis de licenciatura. Modificación de asfaltos con polímeros. Universidad nacional de ingeniería. Lima, Perú.

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, 341-351.

R.B. Kolsi, H.B. Salah, N. Jardak, R. Chaaben, I. Jribi, A. El Feki, T. Rebai, K. Jamoussi, N. Allouche, C. Blecker, H. Belghith, K. Belghith, Sulphated polysaccharide isolated from *sargassum vulgar*: characterization and hypolidimedi effects, *Carbohydr. Polym.* 170 (2017) 148–159.

Roberts, F.L., et al. (1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. 2nd Edition, NAPA Education Foundation, Lanham.

Loazia, A., García, E., & Colorado, H. (2018). Evaluation of asphalt binder blended with coconut coir dust and residual coconut fibers for structural applications. *Construction and building materials*. Vol.17, n.3, pp.542-554.

Galán Marín, C., Rivera Gómez, C. & Petric, J. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials*. Vol. 24, 1462-1468.

Martínez A., Martín 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.

Martínez León F.M., P.F.de, Cano-Barrita J., Lagunez Rivera L., Medina Torres L. (2013). Study of nopal mucilage and marine brown algae extract as viscosity-enhancing admixtures for cement based materials. *Construction and Building Materials*. Vol. 53, 190 – 202.

Merino Quezada, V. H. (2003). Tesis de maestría. Aplicaciones de las emulsiones asfálticas y los asfaltos diluidos en mezclas asfálticas en frío utilizando agregados del río Aguaytia - Ucayalí. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Milledge, J., & Harvey, P. (2016). Golden Tides: Problem or Golden Opportunity? The Valorisation of Sargassum from Beach Inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(3), 60.

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

Neelesh, T. (2016). Sargassum: Occurrence, Features and Reproduction. Recuperado de: <https://www.biologydiscussion.com/algae/sargassum-occurrence-features-and-reproduction/46977>.

Nciri N., Shin T., Lee H. & Cho N. (2018). Potential of Waste Oyster Shells as a Novel Biofiller for Hot-Mix Asphalt. *Applied Sciences*, 1-25.

Patrón-Prado, M. (2012). Tesis de doctorado. Factibilidad del uso de un sistema de flujo continuo para la remoción de iones de cadmio y cobre de soluciones acuosas utilizando alga

Sargassum sinicola. Centro de investigaciones biológicas del noroeste, S.c. Baja california sur, México.

R Rajeswari, K Jeyaprakash. (2019). Analysis of Biogenic Molecules in Sargassum Wightii Extract using Gas Chromatography – Mass Spectrometry. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics* 9 (1), 150-153

Salazar Cruz B. A., “Modificación de asfalto con polímero SBS y arcillas pilareadas, evaluando su efecto térmico y reológico”, Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, (2010).

Salazar-Cruz B. A., Zapien-Castillo, S., Hernández-Zamora, G. (2021). Investigation of the performance of asphalt binder modified by sargassum. *Construction and Building Materials* 271, 121876.

Sánchez-Miranda, N. (2016). Pavimentos asfálticos de alto modulo (Caso de estudio; libramiento Dr. González, N.L.). México, D.F.: ESIA.

Salinas M., Maxil R. (2006). Tesis de Licenciatura. Ventajas y desventajas del uso de polímeros en el asfalto. /Apéndice B: Ensayos que se aplican para determinar la calidad de los asfaltos (modificados y convencionales). Universidad de las Américas Puebla, Escuela de Ingeniería y Ciencias.

García Salgado, S. (2013). Tesis de doctorado. Estudios de especiación de arsénico y acumulación de metales en muestras de interés medioambiental. Universidad politécnica de Madrid. Madrid, España.

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

Susilorini Rr M I, Hardjasaputrab H, Tudjonoc S, Hapsaria G, Sa R W, Hadikusumoa G and Sucipto J. (2014). The Advantage of Natural Polymer Modified Mortar with Seaweed: Green Construction Material Innovation for Sustainable Concrete. *Science Direct, Procedia Engineering*. Vol. 95, 419-25.

S.H.S. Shekhar, G. Lyons, C. McRoberts, D. McCall, E. Carmichael, F. Andrews, R. McCormack, Brown seaweed species from Strangford Lough: compositional analyses of seaweed species and biostimulant formulations by rapid instrumental methods, *J. Appl. Phycol.* 24 (2012) 1141–1157.

The Asphalt Institute. (1992). *Manual del asfalto*. Bilbao, España: Urmo S.A

Thiripura Sundari, M., & Ramesh, A. (2012). Isolation and characterization of cellulose nanofibers from the aquatic weed water hyacinth—*Eichhornia crassipes*. *Carbohydrate Polymers*, 87(2), 1701–1705.

V Venugopal. “Sulfated and Non-Sulfated Polysaccharides from Seaweeds and their Uses: An Overview”. *EC Nutrition* 14.2 (2019):126-141.

Wang, L., & Chang, C. (2015). Rheological evaluation of polymer modified asphalt binders. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 30(4), 695–702. doi:10.1007/s11595-015-1214-6

S. Wang, Q. Wang, X. Jiang, X. Han, H. Ji, Compositional analysis of bio-oil derived from pyrolysis of seaweed, *Energy Convers. Manag.* 68 (2013) 273–280.

Wulf Rodríguez, F. A. (2008). Tesis de licenciatura. Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero. Universidad Austral. Santiago, Chile.

Zapién Castillo, S. (2015). Tesis de maestría, Obtención de mezclas de asfalto modificado con SEBS y nanoarcilla. Cd. Madero, Tamaulipas.

Zhang, J., Zhou, F., Liu, Y., Huang, F., & Zhang, C. (2019). Effect of extracellular polymeric substances on arsenic accumulation in *Chlorella pyrenoidosa*. *Science of The Total Environment*, 135368.