

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA



TITULACIÓN INTEGRAL
TESIS PROFESIONAL

ASFALTOS MODIFICADOS CON MATERIALES COMPUESTOS DE
ESTIRENO-BUTADIENO/PLUMA DE POLLO

Que para obtener el Título de
Ingeniero Químico

Presenta
Francisco Javier Escobar Medina
14071372

Asesor
Dra. Claudia Esmeralda Ramos Galván

Cd. Madero, Tamaulipas

Mayo 2019



Nombre del documento: Horario de sinodales

Código: FR-G-ITCM-7.5.1-32

Revisión: 2

Referencia a la Norma ISO 9001:2008
7.5.1

Página 1 de 1



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Ciudad Madero, Tam., 11/ABRIL/2019

ÁREA: DEPTO. DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
BIOQUÍMICA.

No. OFICIO: T.006/19.

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN.

C. FRANCISCO JAVIER ESCOBAR MEDINA
No. CONTROL 14071372

De acuerdo al fallo emitido por el Jurado asignado para la revisión de su trabajo profesional, integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE: DRA. CLAUDIA ESMERALDA RAMOS GALVÁN
SECRETARIO: DR. JOSÉ LUIS RIVERA ARMENTA
VOCAL: DRA. BEATRIZ ADRIANA SALAZAR CRUZ
VOCAL SUPLENTE: DR. RICARDO GARCÍA ALAMILLA

Y considerando que llena todos los requisitos del reglamento de titulación en vigor del Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, doy a Usted autorización para que proceda a imprimir su trabajo profesional de la Opción Titulación Integral (TESIS).

**"ASFALTOS MODIFICADOS CON MATERIALES COMPUESTOS DE
ESTIRENO-BUTADIENO/PLUMA DE POLLO"**

Lo hago de su conocimiento para los efectos y fines correspondientes a su Examen Profesional, esperando que el logro del mismo sea congruente con sus deseos profesionales.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica*
"Por mi patria y por mi bien"*

M.A. FRANCISCO RAFAEL ARTEAGA FANG
JEFE DEL DEPTO. DE INGENIERÍA QUÍMICA BIOQUÍMICA

c.c.p. Archivo
FRAP/pechr*



Av. 1ª de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz Col. Los Mangos, Cd. Madero, Tam.

Tel. 01 (833) 357 48 20, e-mail: dirULcdmadero@tecnm.mx

www.tecnm.mx | www.cdmadero.tecnm.mx

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

Agradecimientos

Primeramente doy gracias a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes y sobre todo felicidad.

A mi mamá Guadalupe Medina Arzola por darme la vida. Por la paciencia que has tenido para enseñarme, por el amor que me das, por tus cuidados en el tiempo que hemos vivido juntos, por los regaños que me merecía y que no entendía. Gracias mamá por estar al pendiente durante toda esta etapa.

A mi papá Francisco Javier Escobar Lara por estar siempre pendiente de mí, desde el momento que nací ya estabas buscando maneras de ofrecerme lo mejor. Has trabajado duro, y sin importar si llegarás cansado de tu trabajo, siempre te preocupabas por tu familia. Las ayudas que me has brindado han formado bases de gran importancia y ahora soy consciente de ello por eso te agradezco de mucho corazón.

A mi familia el cual es una pieza fundamental en la vida de una persona, es casi que imprescindible, puesto que el vínculo que se tiene con estas personas, permite recibir grandes ayudas, crecer como individuo regido por principios y valores, que siempre creyó en mí y por ser la motivación para cada día llegar más lejos en mi vida y carrera profesional.

A mis amigos gracias por los buenos momentos que hemos compartido. Creo que todos aprendemos continuamente de todos y de nosotros mismos, tanto profesional como personalmente y eso es enriquecedor en ambos ámbitos.

Al Tecnológico Nacional de México (TeCNM) por el financiamiento con el proyecto “Preparación de asfaltos modificados utilizando pluma de pollo como agente modificante”, con clave 6687.18-P

A todos mis maestros por los conocimientos que adquirí a través de ellos en mi formación académica como estudiante y siempre impulsándome seguir hacia adelante, sobre todo a ustedes por su profesionalismo demostrado y dedicado Dra. Claudia Esmeralda Ramos Galván, Dra. Beatriz Adriana Salazar Cruz, Dr. José Luis Rivera Armenta y también por brindarme la oportunidad y ayudarme a crecer de manera profesional al realizar este proyecto.

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, menores impactos ambientales y bajos costos, permitiendo así verse reflejado mayor resistencia del asfalto a las condiciones climáticas extremas y al tránsito. 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 al esfuerzo cortante, deformación, fatiga, envejecimiento, elasticidad, etc.

En este trabajo se estudió el efecto de añadir materiales compuestos con polímero del tipo SBS lineal (estireno-butadieno-estireno) y la pluma de pollo, llevándose a concentraciones de 1, 3 y 5 PHR (partes por cien de hule) en proporciones de 2, 4 y 6% en relación al peso del asfalto. Se aplicaron técnicas para caracterizar tales como viscosidad dinámica, punto de reblandecimiento, caracterización por separación de fases, índice de penetración y microscopía fluorescente.

Como resultado el utilizar un polímero del tipo SBS lineal incorporándole queratina de la pluma de pollo como refuerzo para el asfalto no se presenta 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 it is done the search for materials that in combination with the asphalt generate a product of better quality, lower environmental impacts and low costs, thus allowing to be reflected greater resistance of the asphalt to the extreme climatic conditions and traffic. To cover these different needs, asphalts with a better performance must be counted, having to modify their chemical, physical and rheological properties, in order to improve their behaviour to the shearing, deformation, fatigue, ageing, elasticity, etc.

In this work, studied the effect of adding composite materials with polymer of the type SBS lineal (Styrene-butadiene-styrene) and the feather of chicken, taking concentrations of 1, 3 and 5 PHR (parts per hundred of rubber) in ratios of 2, 4 and 6% in relation to the weight of asphalt. Techniques were applied to characterize such as dynamic viscosity, softening point, phase separation characterization, penetration index and fluorescent microscopy.

As a result, using a polymer of the linear SBS type incorporating keratin from the chicken plume as reinforcement for the asphalt does not present a higher degree of performance compared to the test tests carried out.

Índice

	Página
Agradecimientos	i
Resumen.....	ii
Abstract	iii
Introducción	1
1. Antecedentes	3
1.1 Asfalto	6
1.1.1 Composición química	7
1.1.2 Proceso de obtención	8
1.1.3 Clasificación de asfaltos para pavimentación	9
1.1.4 Propiedades de los asfaltos	9
1.2 Polímero	15
1.3 Asfalto modificado	17
1.3.1 Principales modificadores de asfaltos	17
1.3.2 Mecanismo de modificación de asfaltos	19
1.3.3 Propiedades en la modificación de asfaltos	20
1.4 Polímeros elastómeros.....	21
1.4.1 Copolímero estireno-butadieno-estireno.....	21
1.5 Pluma de pollo.....	23
1.5.1 Queratina.....	23
1.5.2 Propiedades de la pluma de pollo	25
1.6 Composito.....	26
1.6.1 Matriz polimérica.....	28
1.6.2 Fibras como refuerzo en materiales compuestos	29
2. Metodología	31
2.1 Materiales	31
2.2 Preparación de mezclas asfálticas.....	33
2.3 Caracterización	34
2.3.1 Viscosidad dinámica	34
2.3.2 Determinación del punto de reblandecimiento (análisis Ring & Ball).....	35
2.3.3 Caracterización por separación de fases	36

2.3.4	Caracterización por penetración	37
2.3.5	Microscopía fluorescente	39
3.	Resultados y discusiones	40
3.1	Viscosidad dinámica.....	40
3.2	Determinación del punto de reblandecimiento (Análisis Ring & Ball).....	42
3.3	Caracterización por separación de fases	43
3.4	Caracterización por penetración	44
3.5	Microscopía fluorescente.....	45
4.	Conclusiones	47
Anexo A.	Datos técnicos del asfalto ÉKBE (modificado).....	48
Anexo B.	Datos obtenidos en caracterizaciones de mezclas asfálticas	49
Anexo C.	Análisis de velocidad de corte vs viscosidad de mezclas asfálticas	51
Bibliografía		54

Índice de tablas

Tabla 1.1 Clasificación de constituyentes de acuerdo al programa SHRP	7
Tabla 2.1 Propiedades fisicoquímicas del asfalto	31
Tabla 2.2 Propiedades fisicoquímicas del polímero	31
Tabla 2.3 Matriz experimental de muestras SBS lineal/pluma de pollo.....	33
Tabla 3.1 Índice de penetración de mezclas asfálticas a 25°C	45
Tabla 3.2 Micrografías de fluorescencia de mezclas asfálticas	46
Tabla B.1 Datos de prueba viscosidad dinámica	49
Tabla B.2 Datos de prueba punto de reblandecimiento	50
Tabla B.3 Datos de prueba separación de fases	50
Tabla B.4 Datos de prueba de penetración	50

Índice de figuras

Figura 1.1 Asfalto	6
Figura 1.2 Obtención de los diversos productos asfálticos.....	8
Figura 1.3 Clasificación de polímeros por su estructura	16
Figura 1.4 Tipos de modificadores utilizados en los asfaltos	18
Figura 1.5 Proceso de modificación de asfalto	19
Figura 1.6 Propiedades mejoradas del asfalto modificado	20
Figura 1.7 Representación de varios elastómeros.....	21
Figura 1.8 Estructura del elastómero termoplástico SBS	22
Figura 1.9 Estructura de la pluma de pollo.....	23
Figura 1.10 Estructura de la queratina	24
Figura 1.11 Materiales compuestos. (a) Con partículas, (b) Con fibras, (c) Laminar	27

Figura 1.12 (a) Termoplásticos (b) Termoestables (c) Elastómeros.....	29
Figura 1.13 Clasificación de los distintos tipos de fibras	29
Figura 2.1 Compositos obtenidos (a) SBS/Q0-phr, (b) SBS/Q1-phr, (c) SBS/Q3-phr, (d) SBS/Q5-phr	32
Figura 2.2 Equipo de calentamiento y mezclado	33
Figura 2.3 Análisis de viscosidad en viscosímetro Brookfield.....	34
Figura 2.4 Análisis ring & ball en muestra de asfalto	36
Figura 2.5 Tubo colapsible para muestra de asfalto	37
Figura 2.6 Análisis índice de penetración.....	37
Figura 2.7 Análisis y fundamento de emisión de fluorescencia	39
Figura 3.1 Viscosidades de mezclas asfálticas al 2% a 135°C	40
Figura 3.2 Viscosidades mezclas asfálticas al 4% a 135°C.....	41
Figura 3.3 Análisis de datos prueba punto de reblandecimiento	42
Figura 3.4 Análisis de datos prueba separación de fases	43
Figura 3.5 Análisis de datos prueba penetración	44
Figura C.1 Viscosidades de mezclas asfálticas al 2% (a) 135, (b) 160 y (c) 190°C.....	51
Figura C.2 Viscosidades de mezclas asfálticas al 4% (a) 135, (b) 160 y (c) 190°C.....	52
Figura C.3 Viscosidades de mezclas asfálticas al 6% (a) 135, (b) 160 y (c) 190°C.....	53

Introducción

El asfalto es un material destinado para la construcción de pavimentos. Su utilización tiene formas muy variadas, pero es usado principalmente como material para revestir carreteras, impermeabilizar o aislar estructuras, presenta propiedades altamente impermeables, adherentes y cohesivas, capaces de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes.

El uso de asfaltos modificados en la construcción de pavimentos flexibles se ha extendido a nivel mundial como respuesta a condiciones más severas durante su vida útil y buscando un mejor desempeño que permita prolongar su duración.

La modificación de asfaltos con polímeros busca mejorar sus propiedades viscoelásticas para cumplir con los requerimientos específicos del material; de manera muy concisa se puede decir que mediante la modificación se desea mejorar la elasticidad y la flexibilidad, la consistencia y la durabilidad con el fin de evitar que una mezcla asfáltica ante los cambios climatológicos y cargas a que están expuestos los pavimentos se fisure, se deforme o que existan desprendimientos.

En estudios recientes los polímeros p. ej. hule sintético estireno-butadieno (SBR), copolimero estireno-butadieno-estireno (SBS), etilen vinil acetato (EVA), polipropileno atáctico (APP), etilen-glicilacrilato (EGA) han sido usados en la modificación de asfaltos para pavimentos, estudiándose las propiedades reológicas de los mismos y relacionándolos con la morfología.

Se sabe a partir de muchos estudios que los copolímeros de estireno-butadieno-estireno, son los materiales que mejor actúan como agentes modificantes del asfalto. Poseen los requerimientos estructurales óptimos para modificar efectivamente al asfalto; la característica primordial que deben poseer es que faciliten la formación de estructuras reticuladas o redes que atrapen fácilmente las moléculas de asfalto para proporcionarle mayor rigidez y con ello se eviten problemas como deformaciones y agrietamientos.

La mala disposición de los desechos sólidos de los recursos naturales que afectan adversamente el medio ambiente ha desarrollado un interés relacionado con el desarrollo de polímeros biodegradables para obtener compuestos mejorados, no solo por razones ambientales sino también por sus propiedades y sostenibilidad. La industria avícola genera más de cinco millones de toneladas de plumas de pollo cada año en todo el mundo.

La queratina es una proteína presente en la pluma de pollo es el componente estructural, tiene varias funciones, incluyendo el control de temperatura y protección física o química, y también proporciona resistencia mecánica y elasticidad. Se considera material de desecho y puede ser aprovechada en conjunto con un polímero para mejorar notablemente propiedades de otros materiales.

Los materiales compuestos han tomado importancia dentro de la modificación de asfaltos. Estos se realizan por la combinación de dos o más materiales diferentes. Puede presentar propiedades mecánicas y físicas con mejores propiedades ya que las combina de sus componentes originales. Suelen elaborarse con una matriz polimérica la mayor parte se utilizan elastómeros y plastómeros con un agente modificador extra como fibras naturales.

Una opción viable es elaborar materiales compuestos utilizando plumas de pollo. La queratina es el componente principal de la pluma el cual tiene propiedades extraordinarias, es un material liviano con alta resistencia mecánica y térmica.

Ante las situaciones mencionadas, en este trabajo de investigación se estudia el efecto de añadir al asfalto un polímero del tipo lineal SBS (estireno-butadieno-estireno) con la pluma de pollo, llevándose a distintas concentraciones y se utilizan técnicas para caracterizar tales como viscosidad dinámica, punto de reblandecimiento, separación de fases e índice de penetración. Esto con el fin de obtener una mejor mezcla asfáltica que presente propiedades adecuadas.

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. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Se utiliza ampliamente en pavimentación de carreteras, revestimiento de obras hidráulicas, impermeabilización de edificios, etc (The Asphalt 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 con abundante petróleo y ello 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. Cabe mencionar que en la actualidad se trata de cambiar el diseño de pavimentos, intentando construir los rígidos, pero al ser demasiados costosos respecto a los flexibles su construcción sigue siendo considerablemente menor (Sanchez, 2016).

Ante la necesidad de mejorar las propiedades del asfalto, los investigadores se han dado la tarea de ver la aplicación de ciertos materiales denominados modificadores entre los cuales destacan algunos polímeros (naturales y sintéticos), látex, fibras vegetales y minerales, asbesto, entre otros (Herrera, 1995).

Desde hace 30 años se han empezado a utilizar los asfaltos modificados con polímeros (AMP). Su uso ha sido un éxito, debido a que son más resistentes a la fatiga y a los cambios de temperatura, además de presentar un aumento de la recuperación elástica y la viscosidad (Yildirim, 2007).

Loria (2007) analizó polímeros SBS, EGA y negro de humo sobre el asfalto con el fin de obtener un asfalto modificado estable con mejores características mecánicas que el asfalto convencional a menor costo.

Daquan y col. (2006) estudiaron pruebas de estabilidad al almacenamiento y de caracterización morfológica al añadir SBS y un agente acoplante al asfalto, donde se obtuvo una mayor estabilidad en el almacenamiento así como en las propiedades reológicas, al agregar el agente acoplante se reflejaron mejores propiedades mecánicas en el asfalto.

Dong y col. (2014) estudiaron el comportamiento del copolímero SBS al combinarse con asfalto para investigar el efecto de la modificación de SBS sobre las propiedades del aglutinante de asfalto. El tipo de asfalto, la estructura y el contenido de SBS tienen un impacto significativo en la distribución del tamaño de partícula del polímero SBS y en el rendimiento del asfalto modificado por SBS.

Zhang y col. (2017) estudiaron el desempeño de la incorporación de polímero SBS a altas temperaturas donde demostraron mejores rendimientos sobre muestras asfálticas.

El copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS) cuya macromolécula está constituida por una sección corta de poliestireno, seguida por otra sección larga de polibutadieno y finalmente por otra sección corta de poliestireno. El poliestireno es un polímero duro y resistente y le da al SBS su durabilidad. El polibutadieno es un material parecido al caucho y le confiere al SBS sus características similares al caucho. El SBS es el polímero más apropiado para su uso en AMP no obstante presenta dificultades de procesamiento y costos elevados Sin embargo, el SBS es el polímero más utilizado para modificar asfaltos (Becker, 2001).

Se pueden remediar problemas de contaminación y minorizar altos costos utilizando materiales biodegradables obtenidos a partir de fuentes renovables como proteínas y pueden ser empleados como modificadores frente a una matriz polimérica o un asfalto (Yao, 2016).

Prochon y col. (2011) estudiaron las propiedades para producir un material acolchado mediante el recubrimiento de tela de algodón con una mezcla de látex de estireno-butadieno carboxilado que contiene la queratina hidrolizada del cabello de ganado. Como resultados se tiene que la queratina se facilita su introducción en la matriz del elastómero, otorgando al producto final mejores propiedades mecánicas y térmicas a través del aumento del grado de reticulación del elastómero. Además, sus propiedades antioxidantes hacen que la estera agrícola resultante sea resistente al envejecimiento termooxidante acelerado.

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.

Zapién y col. (2016) prepararon un nanocomposito obtenido a partir de copolímero de bloques de SEBS (estireno-etileno-butileno-estireno) y nanoarcillas de montmorillonita se preparó a través de una técnica de mezcla por fusión para la modificación del asfalto. La incorporación del nanocompuesto como elemento modificador en el asfalto condujo a una mejora de sus propiedades físicas y reológicas cuando se compararon con las características del asfalto puro y el asfalto modificado con SEBS.

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, formación de surcos y fatiga con respecto al asfalto convencional.

Chen y col. (2018) estudiaron el efecto de modificación del uso de dos tipos de aceite de soja epoxidado acrilado (AESO) en el aglutinante de asfalto en varios niveles de concentración. Los resultados indican que AESO tiene efectos suavizantes positivos al disminuir la rigidez del ligante asfáltico, lo que reduce la viscosidad y reduce las temperaturas de mezcla y compactación y esto es buena para regiones frías.

Colunga y col. (2018) utilizaron 2% de un material de desecho en este caso la 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.

1.1 Asfalto

La asociación americana de ensayo de materiales (ASTM) define al asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido, principalmente, por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se presenta en proporciones variables en la mayoría de los petróleos crudos.

El betún según ASTM, es una sustancia ligante (sólida, semisólida o viscosa) oscura o negra, natural o artificial, compuesta principalmente por hidrocarburos de alto peso molecular, como los asfaltos, alquitranes, breas y asfálticas.

El asfalto es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientes normales ver 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.

Usos

El asfalto es usado principalmente como material para revestir carreteras, impermeabilizar o aislar estructuras. Su mayor utilización es para la construcción de carreteras. La capacidad que tiene el asfalto para permitir una excelente unión y cohesión entre los agregados, su condición impermeabilizante que hace a la estructura del pavimento escasamente sensible a la humedad, su eficacia para impedir la penetración del agua que proviene de las lluvias, al tiempo que es capaz de resistir la acción de presión y disgregación ocasionadas por las cargas vehiculares, ha logrado que éste producto se haya constituido en el aliado indiscutido en los proyectos de construcción de vías pavimentadas (Medina, 2003).



Figura 1.1 Asfalto

1.1.1 Composición química

Son mezclas complejas de hidrocarburos de alto peso molecular, con una notable proporción de heteroátomos (oxígeno, azufre, nitrógeno) y cierta cantidad de metales, tales como vanadio y níquel.

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.

Por otro lado, el modelo estructural del programa SHRP (Programa de investigación estratégico en carreteras) clasifica a los compuestos constituyentes de los CAP (cemento asfalto de petróleo) en polares y no polares, ver tabla 1.1 (Herencia, 2001), proponiendo que las fuerzas intra e intermoleculares, listadas seguidamente, son las responsables de la formación de redes tridimensionales que resultan en características elásticas y viscosas. Por aumento de la temperatura o por la acción de fuerzas cizallantes, ocurre la distribución de aglomerados y como consecuencia la reducción de elasticidad y el aumento de las características viscosas.

Tabla 1.1 Clasificación de constituyentes de acuerdo al programa SHRP

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

Desde el punto de vista estructural los constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de hidrocarburos pesados (asfaltenos) se encuentran dispersas en un medio aceitoso más ligero (maltenos) compuesto por hidrocarburos saturados, resinas y aromáticos, sin que exista una separación entre estas dos fases sino una transición.

1.1.2 Proceso de obtención

Existen varios procedimientos para la obtención de los asfaltos a partir de petróleo crudo. Se debe tener en cuenta que de las características propias del crudo, especialmente de su composición química, dependerá la obtención de los asfaltos. Por ejemplo, si el crudo presenta características asfálticas, solo se requiere una destilación al vacío, en cambio para aquellos crudos que poseen un rendimiento medio de asfalto es necesario dos etapas de destilación: una a presión atmosférica y otra a vacío. Para crudos muy livianos de bajo rendimiento de asfaltos, es necesaria una etapa de extracción, además de las etapas mencionadas. Estos procesos de obtención por destilación y extracción, consisten básicamente en la separación básica de los hidrocarburos constituidos como mezclas en el crudo, por sus diferencias en el punto de ebullición y de condensación.

Esto significa que en una destilación primaria las fracciones más ligeras se obtendrán por el tope de la fraccionadora (nafta, gasolina, keroseno y otros) y por los fondos se obtendrá el crudo reducido, que servirá de alimentación para la destilación al vacío, de donde análogamente por el tope y laterales se obtendrá los gasóleos y por el fondo el residual asfáltico o de vacío, esto se puede observar en la figura 1.2 (Avellan, 2007).

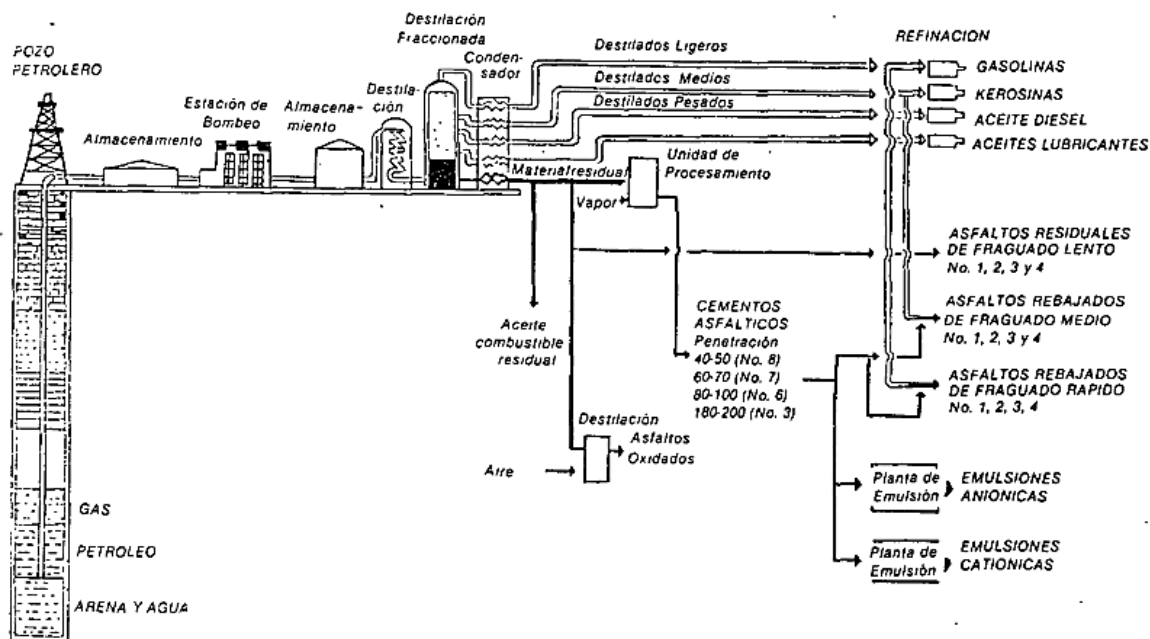


Figura 1.2 Obtención de los diversos productos asfálticos

1.1.3 Clasificación de asfaltos para pavimentación

Cemento asfáltico

Es el más ampliamente conocido el cual se conoce como A.C. (Cemento Asfáltico) y utilizado. Es un líquido muy viscoso, de semisólido a sólido a temperatura ambiente, presenta comportamiento termoplástico, es decir, cuando se calienta se torna líquido y cuando se enfría retorna a su estado original. Son preparados especialmente para su uso directo en la construcción de pavimentos asfálticos por sus propiedades aglutinantes, impermeabilizantes, flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a los ácidos y álcalis en general.

Asfaltos líquidos

También denominados asfaltos rebajados o “cut backs” están compuestos de una base asfáltica (cemento asfáltico) y un fluidificante volátil, donde el solvente es agregado con el fin de disminuir la viscosidad del asfalto para poderlo mezclar y trabajar con los agregados. Existen tres clases:

- Asfalto de curado rápido (RC)
- Asfalto de curado medio (MC)
- Asfalto de curado lento (SC)

Emulsiones asfálticas

Las emulsiones asfálticas son productos bituminosos obtenidos por la dispersión de pequeñas partículas de un betún asfáltico en agua o en una solución acuosa con un agente emulsionante; o de manera inversa, es decir de una fase acuosa en una fase asfáltica, presentando partículas electrizadas y un tiempo de ruptura variable (Herencia, 2001).

1.1.4 Propiedades de los asfaltos

Para la utilización de cualquier material asfáltico, sea convencional o modificado, es necesario evaluar su calidad con el fin de prever un comportamiento físico y mecánico adecuado, ante la exposición a condiciones extremas de esfuerzo y/o temperatura. A continuación, se presentan las principales propiedades a considerar.

Las propiedades fundamentales de los cementos asfálticos para su empleo en el diseño de mezclas asfálticas en caliente y/o construcción de carreteras son:

- **Carácter termoplástico:** al incrementar la temperatura, la consistencia del cemento asfáltico debe disminuir de manera que sean capaces de “mojar” y envolver los agregados. Al enfriarse deben adquirir la consistencia primitiva y dar cohesión a la mezcla.
- **Buena adhesividad a los agregados pétreos:** para cumplir su poder aglomerante y evitar la desenvuelta y desprendimientos de agregados.
- **Buen comportamiento mecánico y reológico:** para resistir las tensiones y deformaciones impuestas conjuntamente por el tránsito y el clima, con el fin de diseñar y construir mezclas resistentes y durables.

Debido a que existe un gran número de propiedades del asfalto para caracterizar a los cementos asfálticos, se pueden agrupar en función de la propiedad que se pretende evaluar:

- Propiedades másicas o propiedades relativas al estado del asfalto
- Propiedades mecánicas, relativas a su comportamiento frente a esfuerzos o deformaciones producidas por cargas (tráfico)
- Adhesividad, relativa a la adhesión del asfalto con el agregado pétreo en presencia de agua
- Durabilidad o resistencia al envejecimiento y a la fatiga

Propiedades másicas

Se consideran propiedades másicas aquellas que hacen referencia al estado del cemento asfáltico o a la variación del mismo por efecto, fundamentalmente, de la temperatura. Pueden distinguirse:

- Viscosidad
- Consistencia
- Susceptibilidad térmica

a) Viscosidad

Es la resistencia que presenta un material a ser deformado, en función de la velocidad de aplicación de una carga, y se debe al rozamiento o fricción interna de sus moléculas. Es una propiedad que frena la libre y rápida deformación de un material.

La viscosidad es una característica esencial del asfalto, desde el punto de vista de su comportamiento dentro de una mezcla asfáltica en caliente durante su aplicación, por sus efectos sobre la trabajabilidad, adhesividad y dosificación. La viscosidad de los asfaltos es función de su temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas da una buena idea de cuál es su susceptibilidad térmica.

b) Consistencia

Es el estado físico que presenta en un momento dado el asfalto, con relación a los estados sólido, líquido y gaseoso de la materia.

Los ensayos más habituales para la determinación de la consistencia de un asfalto son: el ensayo de penetración y la determinación del punto de reblandecimiento. Esta propiedad está ligada a la susceptibilidad térmica, que indica la sensibilidad que presenta el asfalto a variar su viscosidad por aumento o disminución de la temperatura. Es un indicador de que tan buena adherencia, trabajabilidad, compactación y estabilidad posee un asfalto.

c) Susceptibilidad térmica

La viscosidad de un cemento asfáltico está muy relacionada con la temperatura, ya que al elevarse ésta última, su viscosidad disminuye. Esto es debido a que al aumentar la temperatura disminuye la viscosidad del líquido y las fuerzas de absorción que tienden a unir las moléculas se debilitan. El aumento de la temperatura de un cemento asfáltico produce transformaciones reológicas importantes en el mismo, que son de gran utilidad a la hora de ponerlo en obra.

La susceptibilidad de un producto asfáltico indica la sensibilidad que presenta el mismo a variar su viscosidad por elevación de la temperatura.

Esta susceptibilidad debería ser lo más baja posible para la gama de temperaturas de servicio, sin que llegue a ser un sólido quebradizo a temperaturas frías o un líquido relativamente viscoso a temperaturas elevadas

Los cementos asfálticos son puestos en obra con viscosidades bajas, obtenidas generalmente por calentamiento del material, de forma que permitan la envuelta y mojado con los áridos. Una vez fríos adquieren de nuevo su consistencia primitiva, cohesionando el esqueleto mineral (agregados pétreos), al que dota en estas condiciones, de la resistencia adecuada para soportar la acción del tráfico. No obstante, el producto bituminoso una vez puesto en obra, debe conservar su consistencia ante los cambios de temperatura del ambiente. De no ser así, si aquélla baja más de lo debido, al elevarse la temperatura el firme se deformará bajo las cargas del tráfico. Por otra parte, si el betún se endurece, se hace frágil y el firme puede agrietarse.

Propiedades mecánicas de los cementos asfálticos

Las propiedades mecánicas de los cementos asfálticos dependen de la temperatura a la que se encuentran y del tiempo durante el cual está sometido a una determinada carga, a esto se le denomina comportamiento reológico. Por ello, al variar la temperatura o el tiempo de sollicitación (carga), un mismo asfalto presenta características similares a las de un cuerpo visco-elástico.

A continuación se explicará algunas pruebas y propiedades mecánicas de los cementos asfálticos.

a) Ductilidad

La ductilidad es la capacidad que posee un cemento asfáltico de deformarse por alargamiento sin que su masa se disgregue. Esta propiedad, junto con la adherencia, es de sumo interés para los asfaltos, debido a su forma de trabajar en las aplicaciones que con ellos se hacen y en las que generalmente van a estar sometidos a acciones alternadas de tracción y compresión, provocadas por el tráfico o variaciones térmicas, que deben resistir sin romper.

Para un mismo cemento asfáltico, la ductilidad es tanto mayor cuanto mayor es la temperatura a la que está sometido, y para materiales diferentes, la ductilidad crece con la penetración y disminuye con la viscosidad del producto.

b) Fragilidad

Esta propiedad indica la facilidad de alcanzar la rotura de un material, en este caso cemento asfáltico, bajo impacto o pequeñas deformaciones. No puede hablarse de una fragilidad absoluta en un material bituminoso, debido a la propia reología del mismo; sin embargo, por debajo de determinadas temperaturas el asfalto puede presentar un comportamiento frágil.

c) Cohesión

Permitirá evaluar la capacidad del asfalto para mantener firmemente unidas las partículas entre ellas.

d) Rigidez

Los cementos asfálticos son materiales visco elásticos cuyo comportamiento depende del tiempo de aplicación de una carga y de la temperatura. Así como un cuerpo elástico está caracterizado por un módulo de elasticidad, los materiales visco elásticos se caracterizan por su módulo de rigidez.

Aunque el comportamiento mecánico de los cementos asfálticos está influido por el estado de esfuerzos y la relación entre esfuerzos y deformaciones es no lineal, su influencia es muy pequeña si se compara con el efecto producido por la temperatura o el tiempo de aplicación de carga. Por lo tanto, se puede suponer un comportamiento lineal y que su respuesta sólo depende de la temperatura y del tiempo de aplicación de carga, y considerar los asfaltos como un material visco elástico lineal.

Adhesión

Se denomina adhesividad a la acción de adhesión del asfalto al agregado pétreo en presencia de agua. La adhesión es la fuerza por unidad de superficie que une las moléculas del cemento asfáltico a las moléculas del agregado pétreo. En la práctica, este concepto científico se ha sustituido por otro de tipo pragmático denominado adhesión mecánica.

Para que se produzca la adhesión del asfalto a los agregados es necesario que éste lo moje adecuadamente; ello exige que el cemento asfáltico tenga una baja viscosidad en el momento de su empleo, obtenida bien por calentamiento del material, por incorporación de disolventes volátiles o por emulsificación en agua, en el caso del presente trabajo, el calentamiento del cemento asfáltico es el utilizado.

En el contorno de la superficie de contacto del asfalto con los agregados actúa un sistema de fuerzas: la tensión superficial del cemento asfáltico, la tensión superficial del sólido y la tensión superficial en la zona de contacto cuya resultante determina que el cemento asfáltico moje o no los agregados.

Estabilidad

La estabilidad del asfalto modificado, determina la posible separación o sedimentación del polímero en el asfalto, principalmente luego de periodos de almacenamiento, afectando la dispersión del polímero y evitando crear la microestructura adecuada, para proporcionar mejores propiedades reológicas al asfalto modificado. El procedimiento empleado para representar las condiciones de almacenamiento con exposición a altas y bajas temperaturas, es la prueba de separación anillo esfera.

Durabilidad

Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento (Velásquez, 2016).

1.2 Polímero

Los polímeros son compuestos formados por la unión covalente de muchas unidades simples llamadas monómeros. Son sustancias de alto peso molecular, la unión de dichos monómeros forman moléculas más grandes en distintos arreglos: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.

Estructura

Los polímeros presentan dos características básicas: estructura química y distribución del peso molecular. Estas dos características determinan todas las propiedades de los polímeros. De modo directo, ellas determinan fuerzas cohesivas, densidad de empaquetamiento (cristalinidad), movilidad molecular (transiciones de fase). De modo indirecto ellas controlan la morfología y fenómenos de relajación.

La estructura química comprende:

- La naturaleza de las unidades de repetición.
- La naturaleza de los grupos terminales.
- La composición de las posibles ramificaciones y redes entrelazadas.
- La naturaleza de los defectos en la secuencia estructural

Clasificación

a) Por su origen

- Polímeros Naturales: También conocidos como biopolímeros, son los que se formaron de manera natural y se encuentran en plantas o animales.
- Polímeros Semisintéticos: Formados por la modificación de un polímero natural.
- Polímeros Sintéticos: Son polímeros formados por enlaces químicos inducidos por medio de un proceso denominado reacción de polimerización.

b) Por la variedad de monómeros

- Homopolímeros: Son aquellos polímeros formados por un solo tipo de moléculas.
- Copolímeros: Son polímeros formados por más de un tipo de moléculas, permitiendo combinar las propiedades de cada una formando una sola estructura.

c) Por el tipo de estructura

- Lineales: Se forman por una sola reacción de polimerización, creando cadenas que no presenta ramificaciones, son polímeros de alta densidad y funden por calentamiento.
- Ramificados: Inicialmente son polímeros lineales, que bajo algunas consideraciones en el proceso de polimerización, se pueden obtener ramificaciones en su estructura, aumentando la distancia entre cadenas y otorgando mayor volumen. Forman polímeros de baja densidad.
- Entrecruzados: Forman una red tridimensional, compuesta por la unión de cadenas cercanas con iguales o diferentes propiedades, forman un polímero rígido, insoluble y resistente a la fundición, en la figura 1.3 se ven a detalle las estructuras.

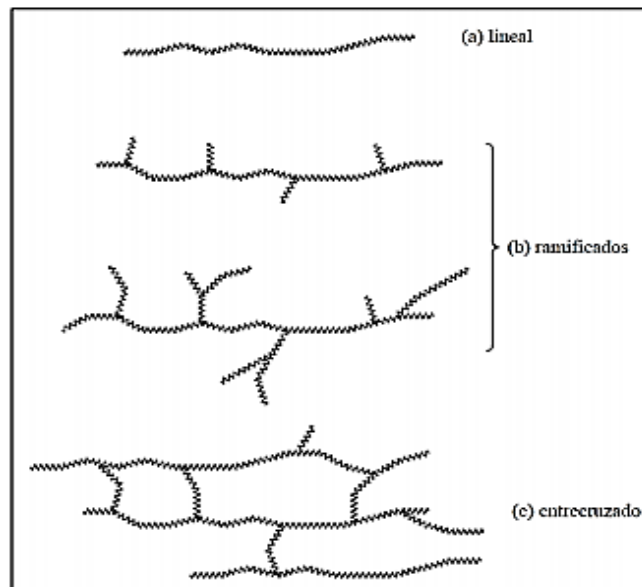


Figura 1.3 Clasificación de polímeros por su estructura

1.3 Asfalto modificado

Son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero donde forman una red tridimensional que atrapa dentro de sus espacios a las moléculas del asfalto. Esta red absorberá gran parte de los esfuerzos a los que se vería sometido el asfalto en un pavimento.

Una mezcla asfáltica ideal debe tener las siguientes características:

- Baja rigidez o viscosidad a las temperaturas normales de manejo en planta y colocación en obra.
- Alta rigidez a temperaturas altas de servicio para reducir el ahuellamiento.
- Baja rigidez y buenas características elásticas a temperaturas bajas de servicio para reducir el riesgo de la aparición de fisuras por cambios de temperatura.
- Buenas características adherentes en presencia de humedad, con el propósito de reducir el stripping o pérdida de adherencia.

1.3.1 Principales modificadores de asfaltos

Los polímeros se pueden clasificar en dos grandes grupos: termoendurecibles y termoplásticos.

a) Termoendurecibles

Polímeros con estructura entrecruzada, formados por la reacción química de un componente base y un endurecedor, se convierten en elementos más rígidos luego de aplicarles calor, no tiene capacidad de recuperarse para ser transformados nuevamente, y por lo general son resistentes a los disolventes.

b) Termoplásticos

Son polímeros lineales o suavemente ramificados, su característica principal es que reblandecen con el calor y son fácilmente moldeables, luego de enfriarse recuperan sus propiedades iniciales. Estos polímeros se dividen en plastómeros y elastómeros.

- **Plastómeros**

Aumentan la resistencia del asfalto aportando mayor rigidez, pero disminuyendo su capacidad de deformación (reducción de elasticidad), y una vez superado el esfuerzo de fluencia, el asfalto no retorna a su longitud inicial.

- **Elastómeros**

Son polímeros constituidos por macromoléculas lineales unidas entre sí transversalmente, por puentes de enlace (reticulación suelta). En los elastómeros o cauchos las cadenas de polímero se encuentran enrolladas y retorcidas de forma arbitraria, al azar, lo que les confiere gran flexibilidad para permitir que el material sea capaz de soportar deformaciones muy grandes. Se caracterizan por su alta deformación recuperable, manteniendo su forma original y sin presentar deformaciones permanentes.

Químicamente: la reticulación se deshace a temperaturas altas, convirtiéndose en termoplásticos amorfos o semicristalinos que, cuando la temperatura sigue aumentando, adquieren consistencia termoplástica (López, 2017). Se puede mencionar que se han probado polímeros de los siguientes tipos como se observa en la figura 1.4:

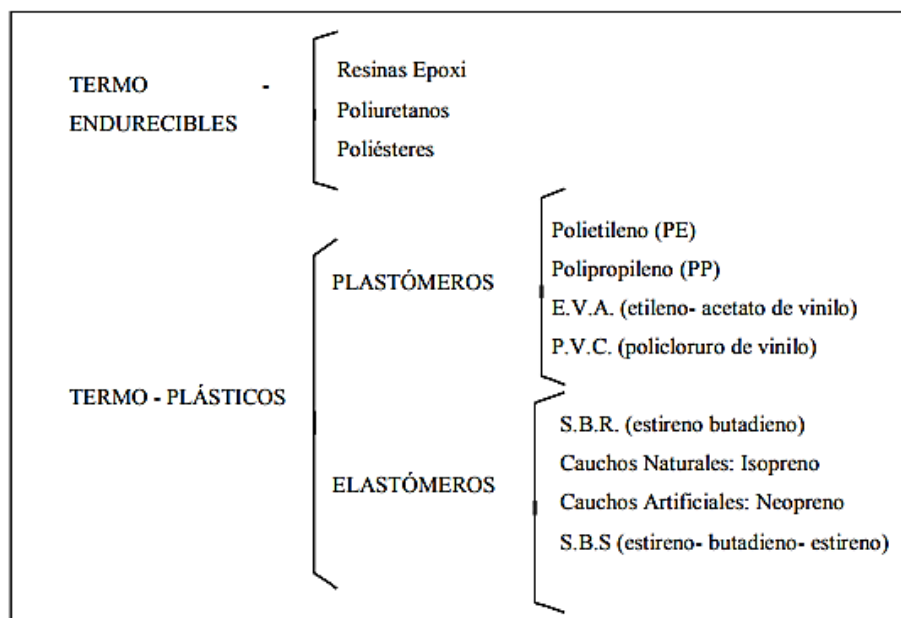


Figura 1.4 Tipos de modificadores utilizados en los asfaltos

1.3.2 Mecanismo de modificación de asfaltos

Primera etapa

El polímero está completamente encogido en estado en reposo (fracciones estireno y butadieno)

Segunda etapa

El polímero empieza a desenredarse por absorción del aceite contenido en el asfalto, el mismo que se impregna (el aceite) e hincha el polibutadieno, produciéndose la disolución del polímero

Tercera etapa

El polímero se extiende, disolviéndose completamente dentro del asfalto por su geometría y por su anclaje con otros elementos, ver figura 1.5

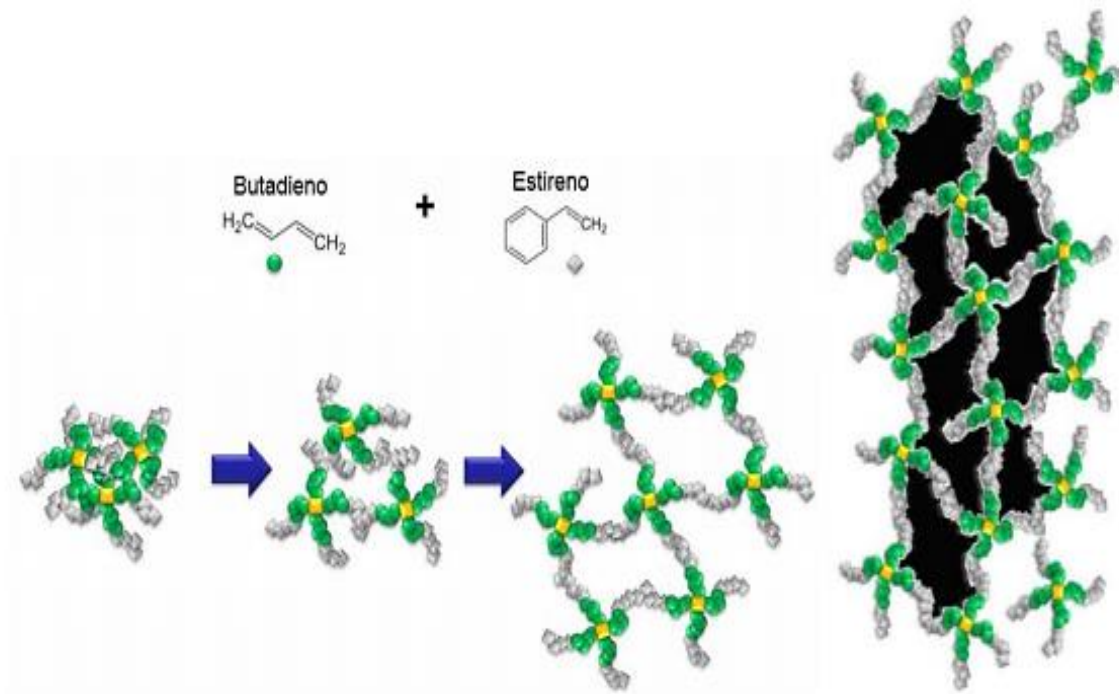


Figura 1.5 Proceso de modificación de asfalto

1.3.3 Propiedades en la modificación de asfaltos

El objetivo perseguido con las adiciones de polímero en el asfalto, es cambiar las propiedades físicas y reológicas del ligante ver figura 1.6, buscando:

- Aumenta la viscosidad por ejemplo: AC-20 sin polímero = 380 cP, asfalto con polímero desde 625 hasta 1120cP, dependiendo de la cantidad y tipo de polímero para aumentar rigidez.
- Disminuir la penetración.
- Aumentar el punto de reblandecimiento del asfalto entre 8 y 12 grados.
- Disminuir la susceptibilidad a las variaciones de temperatura.
- Subir entre uno y dos grados la clasificación PG (Penetration Grade ó Grado de Penetración) del asfalto.
- Mayor cohesión.
- Mayor resistencia a la acción del agua.
- Mayor resistencia al envejecimiento (Wulf, 2008).

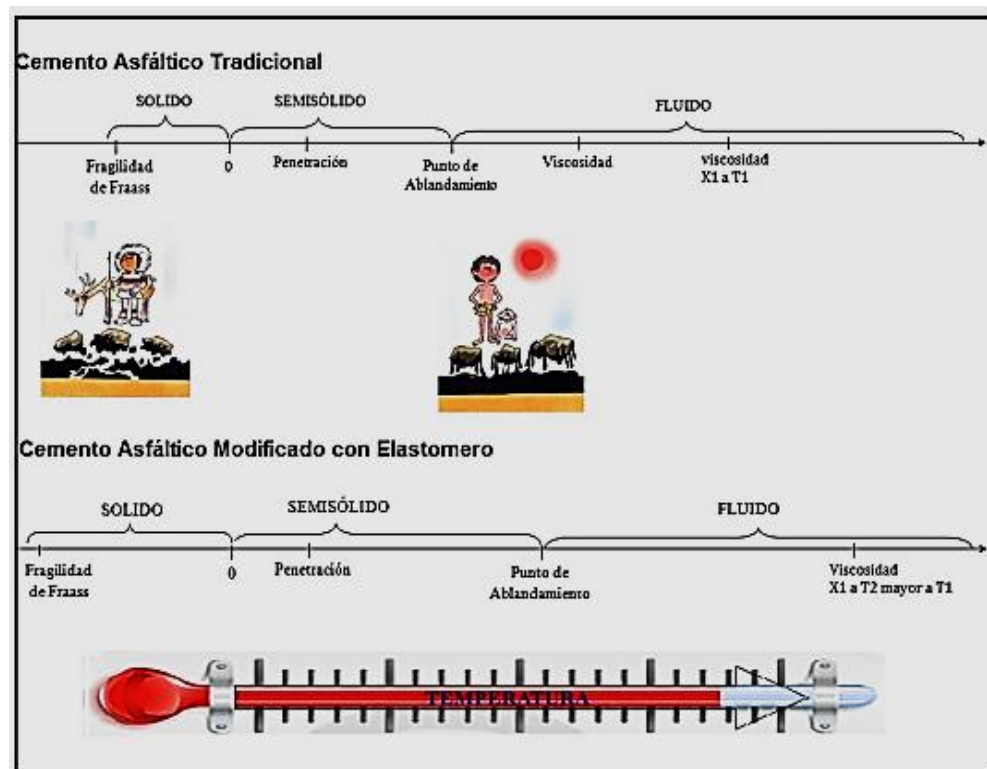


Figura 1.6 Propiedades mejoradas del asfalto modificado

1.4 Polímeros elastómeros

También conocidos como polímeros tipo I, es un tipo de polímero con propiedades visco-elásticas, es decir que pueden recuperar su posición original al sufrir esfuerzos de tensión. Se caracterizan por ser un modificador de asfalto que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto altas como a bajas temperaturas, incrementando la temperatura de desempeño. Varios tipos de homopolímeros y copolímeros pueden ser usados. Los más comunes son copolímeros SBR, copolímeros en dibloques SB o tribloques SBS. Los tribloques pueden ser lineales o ramificados o parcialmente hidrogenados SEBS. Otros ejemplos son también los copolímeros del estireno isopreno SIS, terpolímeros EPDM, policloroprenos y polímeros SBS carboxilados ver figura 1.7.

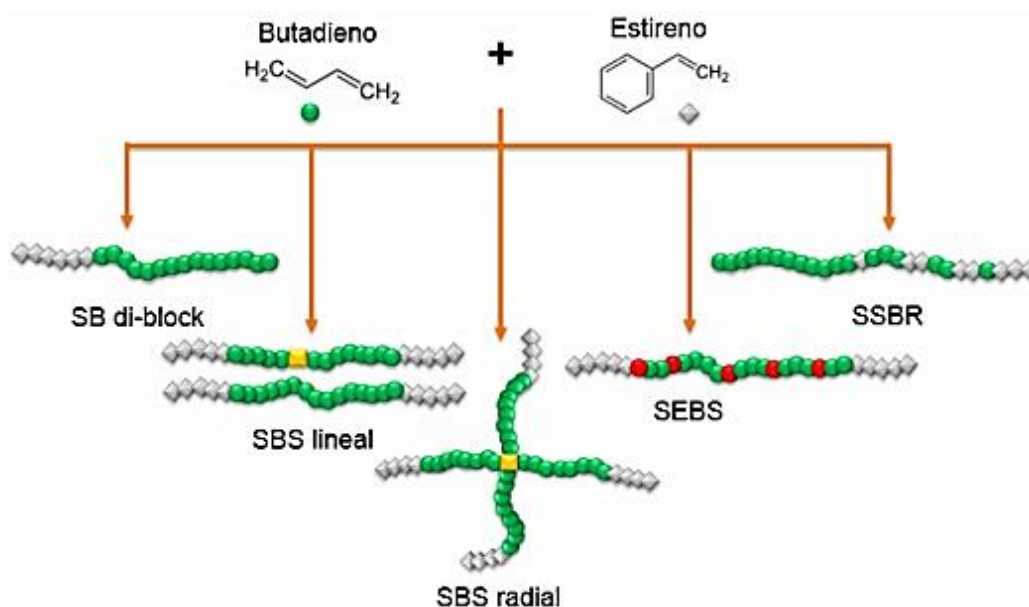


Figura 1.7 Representación de varios elastómeros

1.4.1 Copolímero estireno-butadieno-estireno

El polímero SBS es un copolímero en bloque de estireno y butadieno, cuyo proceso de polimerización es del tipo aniónico, debido a que los monómeros estírenos presentan una estructura en la que la densidad electrónica del doble enlace se mueve con facilidad estando está parcialmente polarizada.

Su cadena principal está constituida por tres segmentos. El primero es una corta cadena de poliestireno (dependiendo de la composición), el del medio es una cadena de polibutadieno, y el último es otro pequeño bloque de poliestireno. El principal modificador utilizado en materiales asfálticos que mejora el comportamiento tanto a altas como a bajas temperaturas.

Los polímeros SBS, denominados cauchos termoplásticos, presentan bloques finales de poliestireno asociados en dominios incorporados a una matriz de caucho de butadieno. Cuando el polímero es dispersado en el asfalto en caliente, los dominios de poliestireno se disuelven completamente, asumiendo características termoplásticas que facilitan la mezcla y la compactación de la mezcla asfáltica.

Por enfriamiento, los bloques de poliestireno se reasocian, y promueven un entrelazamiento entre las cadenas de polibutadieno, de ese modo forman una red tridimensional (entrecruzamiento físico), que confiere al asfalto propiedades de resistencia y elasticidad (Cóndor, 2014).

La conformación espacial del SBS está formada de dos regiones distintas, llamadas microdominios de estirénicos y butadiénicos, figura 1.8. Las esferas son los microdominios estirénicos y las cadenas los microdominios butadiénicos. El SBS posee un comportamiento elastomérico, pues los microdominios estirénicos actúan como puntos de reticulación. (Herencia, 2001).

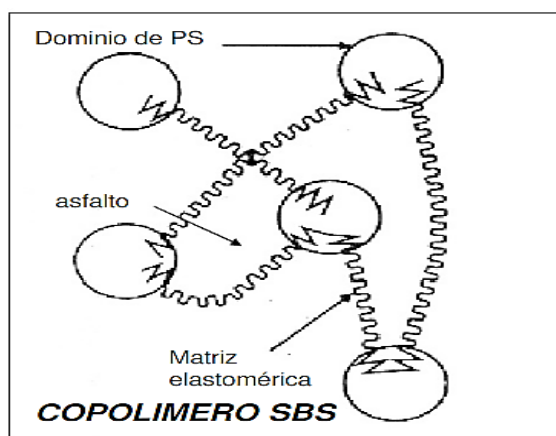


Figura 1.8 Estructura del elastómero termoplástico SBS

El componente de poliestireno imparte fuerza y eleva el punto de ablandamiento del betún, mientras que el componente de butadieno es responsable de hacer que el aglutinante sea más elástico reduciendo efectivamente el componente viscoso (Beltran, 2002).

1.5 Pluma de pollo

Se trata de una lámina subdividida finamente en gran cantidad de elementos. La pluma es una estructura epidérmica que consta de un eje central rígido llamado raquis y tiene el aspecto de una caña hueca, a pesar de ser una estructura muy ligera, le da la rigidez necesaria para mantenerla firme, con paletas más suaves en cada lado, la paleta se compone de numerosas ramas laterales llamadas barbas. La parte inferior de raquis es más ancha y hueca, generalmente desnuda, y se denomina cálamo, es la parte por la cual la pluma está insertada en la piel, con paletas más suaves en cada lado, como se puede ver en la figura 1.9 (Quintero, 2017).

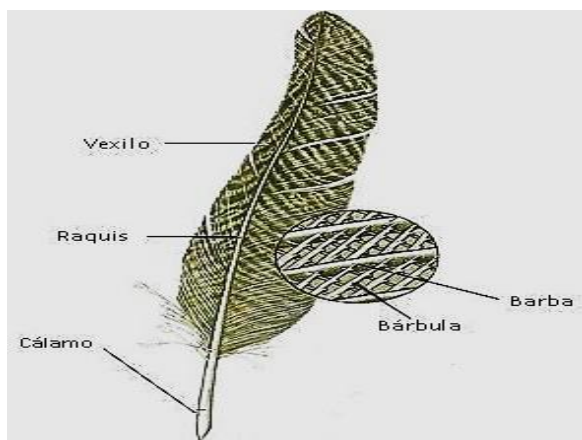


Figura 1.9 Estructura de la pluma de pollo

1.5.1 Queratina

Las plumas, igual que las fibras de lana, son materiales biogénicos constituidos principalmente por queratina, un polímero natural que tiene unas propiedades estructurales y físico-químicas únicas y constituye las capas más externas de la epidermis de los vertebrados (aves y mamíferos): plumas, pelos, cuernos, uñas, pezuñas. La queratina es una proteína fibrosa cuyas macromoléculas están unidas principalmente por enlaces disulfuro y por puentes de hidrógeno. Esta proteína es resistente a los agentes ambientales, insoluble en agua, ácidos

débiles y en álcalis, disolventes orgánicos y son insensibles al ataque de enzimas proteolíticas tales como tripsina o pepsina.

La queratina posee una nanoestructura autoensamblada y jerárquica de tipo fibrilar, cuya cadena poli-peptídica contiene diferentes aminoácidos con grupos funcionales de carácter ácido y alcalino. En las plumas de las aves se han identificado una secuencia de 95 aminoácidos para la queratina. Los aminoácidos más abundantes son: serina (Se), prolina (Pro), glicina (Gly), valina (Val). Cisteína (Cys) y leucina (Leu). Otros aminoácidos como el aspartato (Asp), asparagina (Asn), glutamina (Glu), treonina (Thr) la arginina (Arg) se encuentran en concentraciones inferiores al 6%.

Las cadenas poli-peptídicas estarán formadas por la unión de los distintos aminoácidos a través del enlace peptídico formando la estructura primaria de la proteína. Conforme se van sintetizando proteínas, éstas tienden a enrollarse, ya que en los extremos, los residuos de los aminoácidos son hidrófobos y tienden a quedar agrupados en la parte interna de la proteína. La estructura secundaria se forma en hélice o placas dejando fuera los residuos (Figura 1.10). La estructura terciaria viene a ser como dos secundarias unidas con dos materiales diferentes, como un ovillo de lana hecho con dos hilos de diferentes colores. Finalmente, la estructura cuaternaria corresponde a la de la proteína formada por dos unidades diferentes, es exactamente como el acoplamiento de dos unidades terciarias.

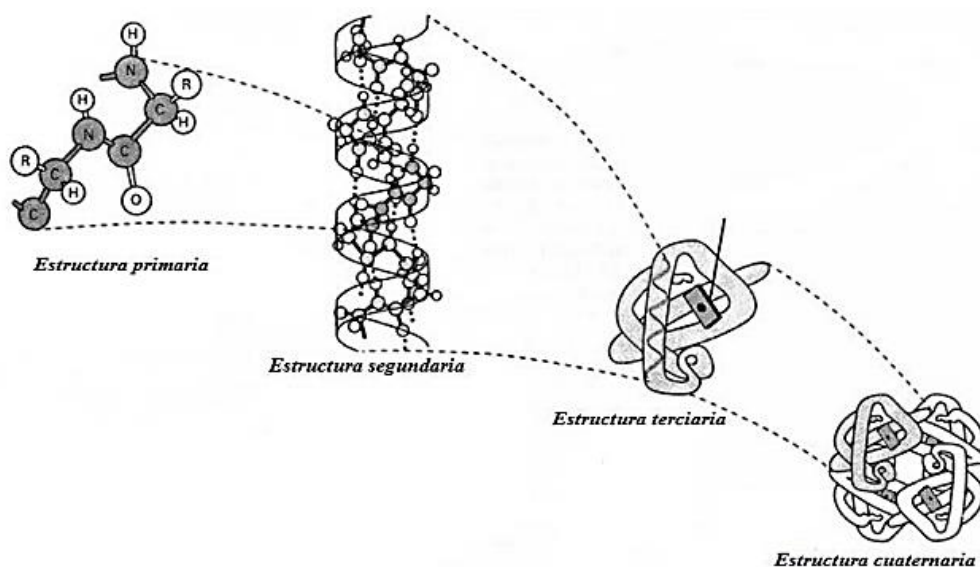


Figura 1.10 Estructura de la queratina

1.5.2 Propiedades de la pluma de pollo

Las plumas de pollo están constituidas por un 91% de proteína (queratina), 1% de lípidos, y 8% de agua. Pese a que ésta proteína posee un bajo valor biológico nutricional puede tener interesantes aplicaciones en el campo de los materiales poliméricos.

Las plumas de pollo se componen de dos partes diferenciadas: las fibras (barbas y bárbulas) y el raquis. La fibra es delgada y se compone de materiales filamentosos elásticos. El raquis es el eje principal de la pluma (Rahhali, 2015).

La resistencia mecánica, dureza y flexibilidad de las plumas está muy relacionada con su composición química y su estructura molecular. La humedad y el calor modifican la estructura de la queratina al alterar los enlaces químicos de dicha proteína (Machuca, 2015).

En referencia a su microestructura, las fibras de queratina procedentes de plumas del pollo destacan por una estructura jerárquica compleja que les confiere propiedades como sólido biodegradable, alta flexibilidad, baja densidad buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico, alta superficie específica y buenas propiedades adsorbentes. Debido a su concentración en aminoácidos con grupos hidrófobos, su solubilidad en agua es muy baja. La mitad de los aminoácidos presentados en la queratina son hidrófilos, siendo la otra mitad hidrofóbicos. Las propiedades de la superficie de la fibra dependen del grado en que los aminoácidos hidrofóbicos son externos o internos en relación a dicha superficie. Dicha hidrofobicidad sería una ventaja para su dispersión en diferentes matrices poliméricas.

La composición de las fibras de queratina en las plumas incluye 41% de hélice α , 38% de lámina β y 21% de estructuras aleatorias. Las barbas de la pluma de pollo contienen mayor cantidad de α – queratina, ya que se encuentran abundantemente en tejidos suaves. Por otro lado, el raquis está estructurado de ambas formas, aunque su contenido es mayormente β – queratina (Colunga, 2018).

La α -queratina tiene una estructura secundaria y terciaria fuerte, con una elevada proporción de puentes de disulfuro entre residuos de cistina, proporcionando así una estructura más firme.

La β -queratina no presenta cisteína, o lo hace en muy baja proporción, por lo tanto contiene pocos entrecruzamientos intermacromoleculares a través de puentes disulfuro (cistina). Sin embargo la queratina de tipo beta, presenta mayor proporción de plegamientos de forma lámina- β . La alta cohesión dada por el gran número de asociaciones por puentes de hidrógeno de las láminas- β , hace que la presencia de queratina- β resulte en materiales de gran resistencia tales, frecuentemente se encuentra en la tela de araña (Quintero, 2017).

Aunque las plumas son materiales muy estables, éstas pueden ser atacadas por diferentes agentes químicos, principalmente por tratamiento con oxidantes y álcalis. La variación del grado de reticulación se presenta en tratamientos donde se rompe el enlace disulfuro, como se puede dar en operaciones con peróxidos o en tratamientos de cloración. Hay también que considerar la formación de enlaces reticulantes que sucede durante la aplicación de tratamientos alcalinos a los que pueda ser sometida la fibra. El ataque de la cadena lateral es debido a reactivos de diversos tipos, sobretodos alcalinos y oxidantes. El ataque sobre las plumas puede afectar significativamente a sus propiedades, limitando sus aplicaciones (Rahhali, 2015).

Las fibras de queratina de las plumas son no abrasivas, ecológicas, biodegradables, insolubles en disolventes orgánicos, y también tienen buenas propiedades mecánicas, baja densidad, comportamiento hidrofóbico y, finalmente, bajo costo. Se han encontrado importantes mejoras en las propiedades mecánicas de materiales compuestos a base de polímero (Quintero, 2017).

1.6 Composito

Es un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí, pero que se caracterizan principalmente por tres aspectos esenciales:

- En primer lugar, debe tratarse de un material fabricado artificialmente, con intención expresa de combinar varias fases para obtener un material con nuevas propiedades.

- En segundo lugar, los constituyentes deben tener propiedades claramente distintas, y estar distribuidos de tal modo que exista una separación definida.
- En tercer lugar, los constituyentes deben encontrarse en una proporción significativa. La figura 1.11 muestra la estructura de un material compuesto.

Basados en el criterio de la naturaleza de la microestructura de la fase dispersa, para la clasificación de los materiales compuestos se pueden establecer tres grupos.

- Compuestos reforzados con partículas.
- Compuestos reforzados con fibras.
- Compuestos estructurales

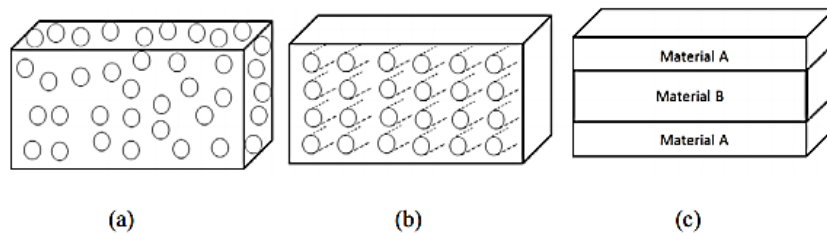


Figura 1.11 Materiales compuestos. (a) Con partículas, (b) Con fibras, (c) Laminar

Por otra parte, los materiales compuestos también pueden clasificarse en función de la naturaleza de la matriz:

- Compuestos de matriz metálica (CMM).
- Compuestos de matriz cerámica (CMC).
- Compuestos de matriz polimérica (CMP)

Los CMP, principalmente cuando están reforzados con fibras, son los de mayor importancia tecnológica. En comparación con los materiales termoplásticos sin reforzar, los reforzados ofrecen las siguientes ventajas:

- Mejores propiedades mecánicas, mayor resistencia a tracción, compresión, flexión y cizalladora.
- Mayores temperaturas de deformación por calor.
- Excelente resistencia al impacto a baja temperatura.

- Buena estabilidad dimensional y pequeña expansión térmica.
- Baja contracción por el moldeo

1.6.1 Matriz polimérica

Los materiales compuestos de mayor producción son los de matriz polimérica, generalmente reforzados con componentes de origen sintético o natural. A diferencia de otros materiales (p.e. metálicos) las matrices poliméricas se caracterizan por tener una baja densidad y consecuentemente permiten obtener materiales compuestos más ligeros. El objetivo de la matriz es proteger el relleno o refuerzo y, además, transferirle las tensiones externas a las que se vea sometida. Además, la matriz confiere ductilidad al material compuesto, mientras que las fibras de refuerzo son las encargadas de soportar las tensiones a las que se ve sometido el material.

Las matrices poliméricas, en general, son compuestos orgánicos de elevado peso molecular, producto de reacciones de polimerización por adición o condensación de diferentes compuestos de base. Los compuestos poliméricos son macromoléculas constituidas por la unión repetida de muchas unidades pequeñas (monómeros) a través de enlaces covalentes.

La unidad estructural que se repite a lo largo de la cadena polimérica se denomina unidad repetitiva y el número de unidades determina su peso molecular que puede alcanzar varios cientos de unidades de longitud. Cuando el peso molecular aumenta, generalmente las propiedades mecánicas (como la tensión máxima a la tracción y tenacidad) mejoran.

Sin embargo, el aumento de las propiedades mecánicas es menos acusado cuanto mayor es el peso molecular, y además la facilidad de procesar un polímero disminuye rápidamente debido a que el punto de fusión y la viscosidad de éste aumentan.

Las matrices poliméricas, a diferencia de los materiales metálicos, suelen ser amorfas, aunque, en algunas ocasiones, pueden presentarse parcialmente cristalizadas. La microestructura y el grado de interacción entre las macromoléculas del polímero determinan sus propiedades macroscópicas, pudiendo destacarse tres tipos según se comporten como termoplásticos, termoestables o elastómeros ver figura 1.12.

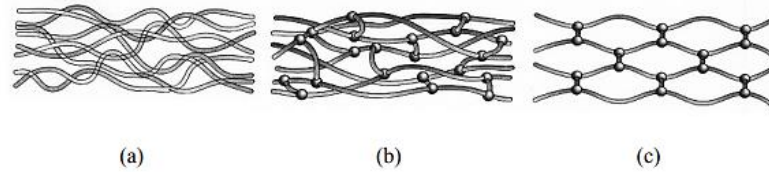


Figura 1.12 (a) Termoplásticos (b) Termoestables (c) Elastómeros

1.6.2 Fibras como refuerzo en materiales compuestos

Se conoce con el nombre genérico de fibras a un amplio conjunto de materiales (de origen orgánico, vegetal o animal, mineral o sintético). Los materiales fibrosos se han clasificado tradicionalmente en dos grandes grupos:

- Fibras naturales de origen vegetal, animal o mineral.
- Fibras químicas que pueden ser artificiales o sintéticas.

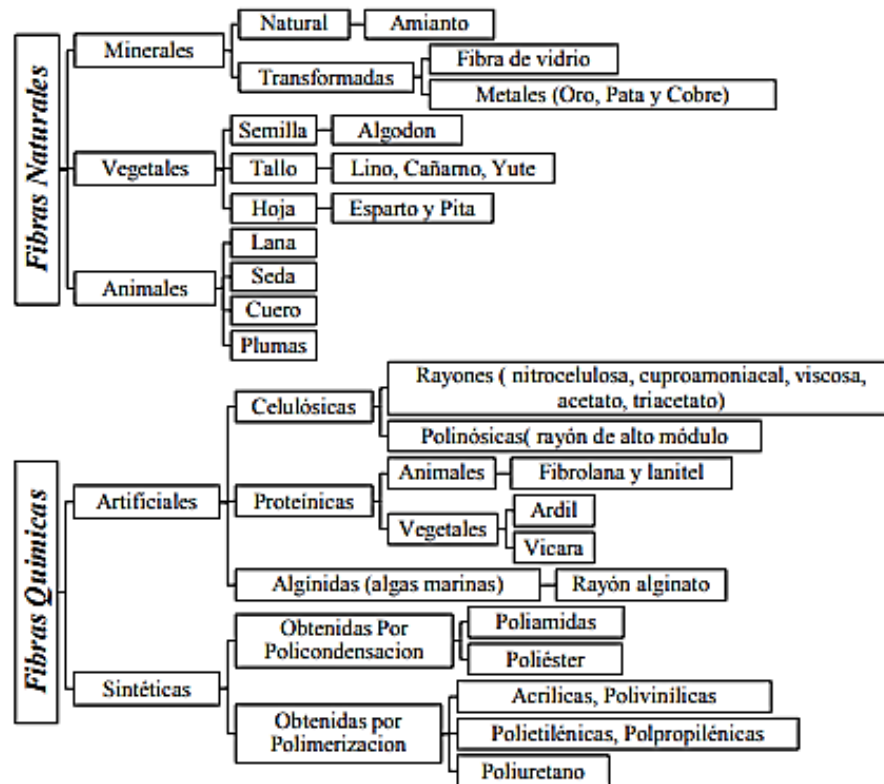


Figura 1.13 Clasificación de los distintos tipos de fibras

En general, las fibras naturales cuentan con una serie de propiedades que para determinadas aplicaciones pueden ser una buena alternativa como refuerzo de materiales compuestos de matriz polimérica. Concretamente, estas fibras se caracterizan y destacan frente a los refuerzos convencionales por:

- Ser un recurso renovable y biodegradable, por lo tanto su impacto ambiental es bajo.
- Tener un coste considerablemente bajo comparado con otras fibras de ingeniería
- Presentar una baja densidad.
- Desempeñar un buen comportamiento como aislante térmico y acústico.
- Presentar unas buenas propiedades específicas de resistencia a la tensión.

Sin embargo, el uso de fibras naturales en materiales compuestos también presenta ciertos inconvenientes:

- Baja estabilidad dimensional.
- Absorción de agua.
- Baja resistencia térmica.
- Calidad variable.
- Baja adhesión a refuerzo-matriz.

El estudio de fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos se ha desarrollado exitosamente durante las últimas décadas. El interés en su uso radica principalmente en sus ventajas de bajo coste, ligereza y menor impacto ambiental de los productos fabricados. Las diferentes investigaciones han resaltado principalmente las posibilidades de las fibras vegetales de celulosa como material de refuerzo para materiales compuestos. No obstante, las fibras de origen animal son también una gran área de oportunidad. Ejemplo de ello son las biofibras de queratina obtenidas a partir de plumas de ave de corral que se han estudiado recientemente (Rahhali, 2015).

2. Metodología

2.1 Materiales

- **Asfalto EKBÉ**

El asfalto empleado en el desarrollo de este proyecto fue del tipo EKBÉ (Refinería Madero) la caracterización del asfalto en estado virgen se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Propiedades fisicoquímicas del asfalto

Características		Unidades	Método	Valor
Penetración (IP = 0.723)		10 ⁻¹ mm	ASTM D-5	44.0
Temperatura de reblandecimiento		°C	ASTM D-36	60.0
Viscosidad de brookfield 50 rpm	135 °C	CP	ASTM D-4402	545
	160 °C	CP		175
	190 °C	CP		60.0
Separación de fases		Δ °C	ASTM D-5892	0.00
Índice de penetración		---	Ecuación 2.1	-1.00

- **Copolímero SBS lineal**

El polímero utilizado en el composito es de tipo estireno–butadieno SBS 501 termoplástico 69/31 proporcionado por Dynasol elastómeros S.A de C.V. Polimerizado en solución y con una estructura lineal. Los datos referentes a este material se pueden encontrar en la tabla 2.2

Tabla 2.2 Propiedades fisicoquímicas del polímero

Propiedades del polímero	Valor típico	Método de ensayo
Viscosidad en tolueno 25% Pa.s	5	MA 04-3-064
Viscosidad en tolueno 5.23% cSt	13	MA 04-3-003
Materia volátil, %	0.4	ASTM D-5668
Hunterlab color	2	ASTM D-1925-70
Estireno total (sobre polímero), %	31	ASTM D-5775
Dureza, °Shore A	76	ASTM D-2240
Insolubles en tolueno, malla 325, %	<0.1	MA 04-3-018
Cenizas, %	<0.35	ASTM D-5669

- **Queratina de origen natural**

Las plumas de pollo se obtuvieron de un rastro local en Altamira, Tamaulipas. Se hizo un lavado con agua y se dejó secando al sol dos días. El raquis se separó de las barbas de la pluma. Se cortó el raquis en pequeños trozos que posteriormente fueron molidos en una pica lica T-faL en tiempos de 45s. Finalmente el polvo se tamizó en una malla tamaño 25 y con un tamaño de partícula de 707 micrones.

- **Preparación de compositos**

Se prepararon materiales compuestos anteriormente con polímero SBS lineal y queratina a partir de la pluma de pollo en concentraciones de 1phr, 3phr y 5phr, para la codificación de los compositos se identificaron como SBS/Q-phr y en la realización de mezclas asfálticas ira acompañado en la proporción que fue añadida al asfalto, ver figura 2.1. La obtención de los materiales compuestos se realizó en un equipo con cámara de mezclado intelli-Torque Plasti-Corder/reómetro marca C.W. Brabender Instruments PL2000, se llevó a cabo el mezclado a temperatura de 130°C con velocidad de 70 rpm. Los productos generados en la cámara de mezclado se llevaron a una prensa hidráulica marca Dake para la elaboración de las placas. Este equipo se operó a 350°F, con tres diferentes presiones y cada presión con su respectivo tiempo, se empezó con una presión de 0 toneladas en un tiempo de 20 minutos, posteriormente una presión de 5 toneladas con un tiempo de 10 minutos y finalmente una presión de 8 toneladas con un tiempo de 8 minutos. El espesor de las placas fue de 1/8”.

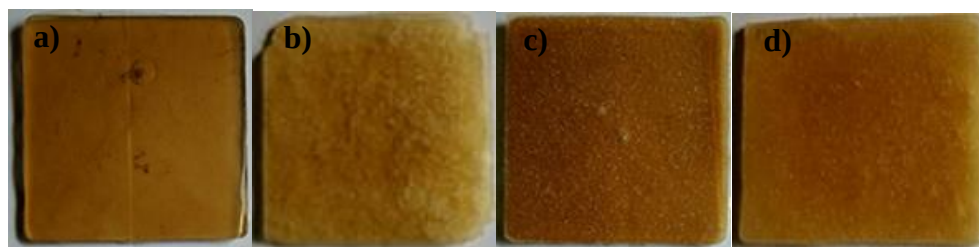


Figura 2.1 Compositos obtenidos (a) SBS/Q0-phr, (b) SBS/Q1-phr, (c) SBS/Q3-phr, (d) SBS/Q5-phr

- Glicerina USP (United States Pharmacopeia) para la prueba punto de reblandecimiento y separación de fases.
- Solvente dieléctrico cítrico (limpieza)

2.2 Preparación de mezclas asfálticas

Para la preparación de las mezclas modificadas se añadió compuesto al 2%, 4%, 6% respecto al peso total del asfalto, se realizaron 12 mezclas en total, previamente se trituró el composito para aumentar el contacto superficial y así lograr una mejor dispersión en el asfalto, en la tabla 2.2 se observa la matriz experimental para el proyecto.

Tabla 2.3 Matriz experimental de muestras SBS lineal/pluma de pollo

		% peso		
		98	96	94
Composito	Asfalto	98	96	94
	SBS/Q-0phr	2	4	6
	SBS/Q-1phr	2	4	6
	SBS/Q-3phr	2	4	6
	SBS/Q-5phr	2	4	6

El mezclado se realizó con un equipo IKA–Eurostar Power control-visc 6000 Overhead Stirrer que se muestra en la figura 2.2, 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. Además de un sistema de calentamiento 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.



Figura 2.2 Equipo de calentamiento y mezclado

Para preparar las mezclas modificadas primero se precalentó el bloque metálico durante 30 minutos, las mezclas se realizaron en un periodo de 120 min, este tiempo se estableció por pruebas previas hasta observar visualmente que no existiera material polimérico en la mezcla, el compuesto fue respectivamente añadido a una relación del 2%, 4% y 6% en peso del asfalto. En este proceso se mantuvo un control de temperatura a 190°C con un desfase ± 2 °C y velocidad de 1200 rpm para lograr la mejor dispersión posible.

2.3 Caracterización

Es la obtención de información a partir de la respuesta de un material al ser perturbado por una señal el cual sirve para conocer las propiedades de un material y así valorar su utilidad en diversas aplicaciones. Estas se obtienen a partir de técnicas instrumentales o de análisis, todo esto regido por procedimientos que son instrucciones escritas para llevar a cabo un método (Normas ASTM, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales). La información que ofrecen son composición, estructura, morfología, propiedades (Color, etc.).

2.3.1 Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica es la propiedad de los fluidos que se caracteriza por su resistencia a fluir, debida al rozamiento entre sus moléculas. Este rozamiento (fricción) se manifiesta cuando se provoca que una capa del fluido se mueva respecto al resto, mientras más grande sea la fricción, se requerirá más fuerza para causar este movimiento, es decir, mayor esfuerzo cortante.

Esto se logra por medio de un viscosímetro brookfield modelo DV-II+ Pro conectado a una cámara termostatzada, donde mide la viscosidad de fluidos a rangos de corte dados, ver figura 2.3, el principio de operación del viscosímetro es guiar un spindle (vástago) aplicando una velocidad de giro constante (que está sumergido en el líquido a ensayar) a través de un resorte calibrado. El arrastre debido a la viscosidad del fluido contra el husillo, esta medido por la deflexión del resorte. El grado de resistencia de deflexión del resorte (par de torsión) está medida por un transductor giratorio donde es proporcional a la viscosidad del fluido.

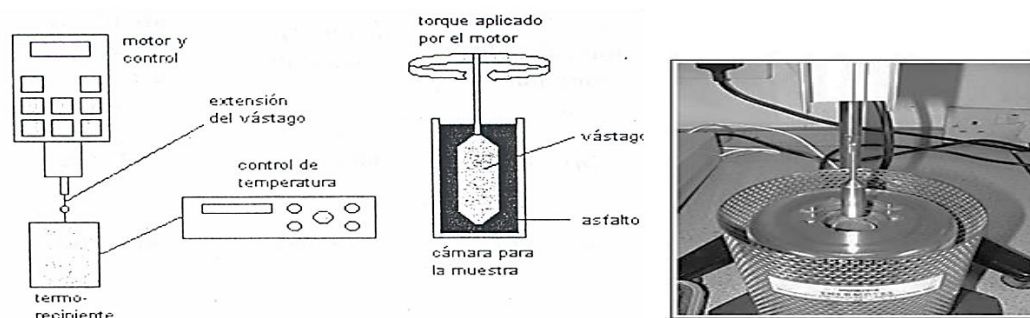


Figura 2.3 Análisis de viscosidad en viscosímetro Brookfield

El torque a seleccionar se tomará 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, 28 o 29.
- Asfaltos por debajo de 100°C : spindle 29

El tamaño de muestra recomendado para el spindle es:

- Para el spindle 21: 8.5 g
- Para el spindle 27: 10.5 g
- Para el spindle 28: 11.0 g
- Para el spindle 29: 12.5 g

De acuerdo a la norma se midió la viscosidad de 10.5g de mezcla asfáltica, cuando estabilizó la temperatura se insertó el tubo de muestra a la termocelda asegurándose de fijar el tubo, se calienta la muestra durante 30 minutos, después se ambienta el spindle 27 por 10 minutos, cumplido este tiempo se insertó la geometría o spindle y se procedió con las mediciones a tres temperaturas 135, 160 y 190°C variando las velocidades de mezclado a 20, 30, 50, 60 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.

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

Esta prueba mide el grado de consistencia a una temperatura a la cual se estima que el asfalto deja de comportarse como un sólido. El ablandamiento de los materiales asfálticos, generalmente no se efectúa en un momento o a una temperatura definidos. A medida que esta aumenta, en forma gradual e imperceptible, cambian de un estado frágil o excesivamente espeso o de flujo lento, a un estado líquido más blando y menos viscoso.

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 cubierta con vaselina, después se colocó en la estructura y encima de estos las esferas y posteriormente se sumergieron en 900 ml de glicerina dejando ambientar por 15 minutos, por último se calentó a razón de 6°C/min y se registró la temperatura a la cual las esferas tocan el limite señalado por la estructura traspasando el asfalto en la figura 2.4 se puede observar a detalle.



Figura 2.4 Análisis ring & ball en muestra de asfalto

2.3.3 Caracterización por separación de fases

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

Se toma como referencia la norma ASTM D5892 en donde se vertieron 50g de muestra asfáltica en un tubo de aluminio colapsible ver figura 2.5, sellándolo y dejándolo en posición vertical. A continuación se colocó 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 removió el tubo del horno e inmediatamente se llevó a $-7 \pm 6^\circ\text{C}$ por un mínimo de 4 horas para solidificar la muestra. Al remover el tubo del congelador, se colocó en una superficie plana y corta en tres porciones iguales. Se pusieron la parte inferior y superior en capsulas en un horno a $163 \pm 6^\circ\text{C}$ hasta que estén lo suficientemente fluidos. Después de esto se vertió en anillos para prueba de anillo y bola para efectuar el análisis Ring & Ball.

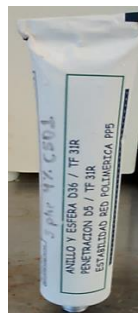


Figura 2.5 Tubo colapsible para muestra de asfalto

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) ≤ 3 °C: buena estabilidad al almacenamiento a altas temperaturas.
- Si temperatura de reblandecimiento (superior) – temperatura de reblandecimiento (inferior) ≥ 3 °C: Inestable.

2.3.4 Caracterización por penetración

La penetración se mide por medio del penetrometro empleando una aguja estándar que se aplica a la muestra. La penetración de un material bituminoso es la distancia en decimas de milímetro que a una aguja estándar penetra verticalmente en la muestra, bajo condiciones normalizadas de temperatura, carga y tiempo.

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 como el que se muestra en la figura 2.6.



Figura 2.6 Análisis índice de penetración

La caracterización se llevó a cabo al incidir verticalmente una aguja estándar en la muestra asfáltica, donde el peso ejercido sobre la muestra debe ser de 100 g a una temperatura de 25 °C durante un periodo de 5 segundos. Las penetraciones se realizaron por triplicado para cada muestra asfáltica y los resultados obtenidos se promediaron.

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), ya que el asfalto es un material que a baja temperatura se comporta como un sólido, a altas temperaturas como un líquido viscoso y a temperaturas intermedias tiene propiedades visco-elásticas, este relaciona la temperatura de reblandecimiento y el valor de penetración del asfalto.

El fundamento para calcular el IP fue establecido por Pfeiffer y Van Droomal en 1936, observaron la relación lineal entre el logaritmo de la penetración y la temperatura de reblandecimiento cuya pendiente se relaciona con la susceptibilidad térmica del asfalto al representar el logaritmo de la penetración en función de la temperatura. De dicha representación se dedujo que los asfaltos tienen una penetración de 800 en su punto de reblandecimiento. El cálculo del índice de penetración se da por medio de la ecuación 2.1.

$$I_p = \frac{500 \log(P) + 20(T_{RB}) - 1951}{120 - 50 \log(P) + T_{RB}} \dots\dots\dots \text{Ec (2.1)}$$

En donde:

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

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

P = penetración en 0.1 mm a 25 °C

En cuando a la expresión de resultados la norma NLT-181-88 establece que el IP obtenido 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.

2.3.5 Microscopía fluorescente

Dynasol elastómeros contribuyó al desarrollo de esta prueba, 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, es un proceso de interacción entre la radiación y la materia en el cual un material absorbe radiación de una fuente específica y muy rápidamente emite luz cuya energía es menor (de mayor longitud de onda) que la de la radiación que ha absorbido. Se genera una imagen ampliada de un objeto pequeño por la técnica de inmunofluorescencia y así muestra los detalles de la estructura del material.

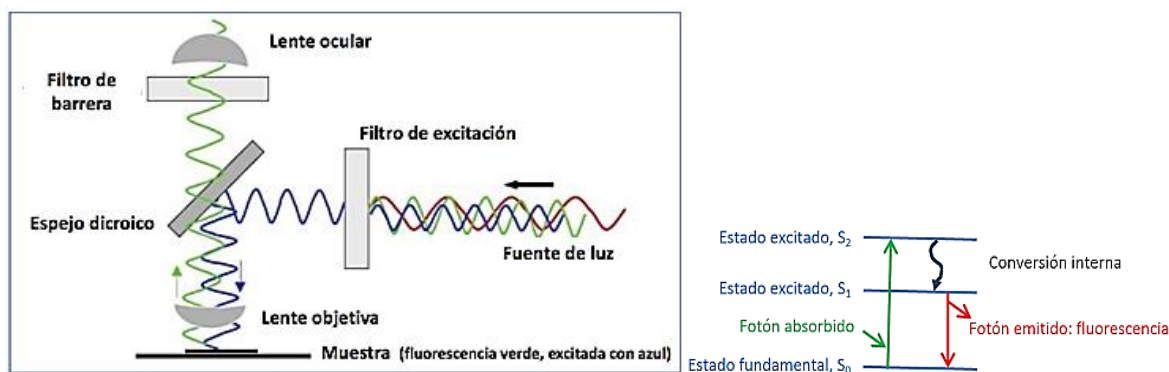


Figura 2.7 Análisis y fundamento de emisión de fluorescencia

3. Resultados y discusiones

3.1 Viscosidad dinámica

El objetivo de la prueba de acuerdo a la norma ASTM D-4402 es medir la viscosidad aparente del asfalto a diferentes temperaturas que fueron de 135, 160 y 190 °C con velocidades de corte de 6.8, 10.2, 17, 20.4 y 34 1/s.

Se analiza el efecto que tiene el composito cuando se lleva a proporciones de 2, 4 y 6% en el asfalto a temperatura de 135°C, este mismo comportamiento se presenta con temperaturas de 160 y 190°C es por ello que no se incluyen en esta sección pero se puede consultar en el anexo C las figuras correspondientes.

En la figura 3.1 cuando se lleva en proporción al 2% se puede observar que la mezcla SBS/Q0-phr-2% presenta valores alto de viscosidad y esto es debido a que por ser puro polímero la interacción entre moléculas que contienen los dobles enlaces que presenta el butadieno con misma fuerza molecular hace que se atraigan y tengan una mayor cohesión molecular generando así una mezcla con menor movimiento entre moléculas.

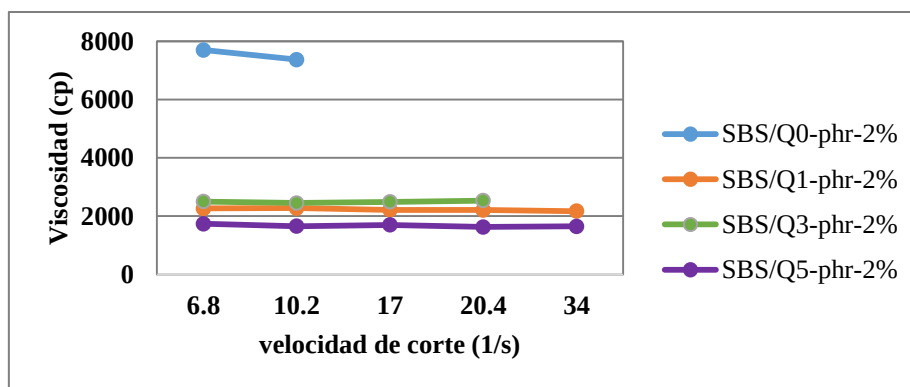


Figura 3.1 Viscosidades de mezclas asfálticas al 2% a 135°C

Cuando se añade queratina en las mezclas SBS/Q1-phr-2%, SBS/Q3-phr-2% y SBS/Q5-phr-2% lo que provoca es un efecto que suaviza la mezcla asfáltica generando una disminución en la viscosidad, esto se puede deber que por presentar enlaces con azufre estos por medio del calor rompan el doble enlace del butadieno, se incorporen al polímero y se generan cadenas cada vez más grandes y estas se rompan al tener un peso molecular grande y por ello se puedan mover más fácilmente.

En la figura 3.2 se observa que aumenta la viscosidad para la mezcla SBS/Q5-phr-4% esto se puede interpretar debido a que por haber mayor cantidad de composito aumenta la viscosidad pero conforme aumenta la temperatura no hay un cambio significativo, consultar figuras del anexo C. Para las mezclas preparadas al 6% se nota un efecto de saturación porque vuelven a presentar valores de viscosidad similares a las del 2%.

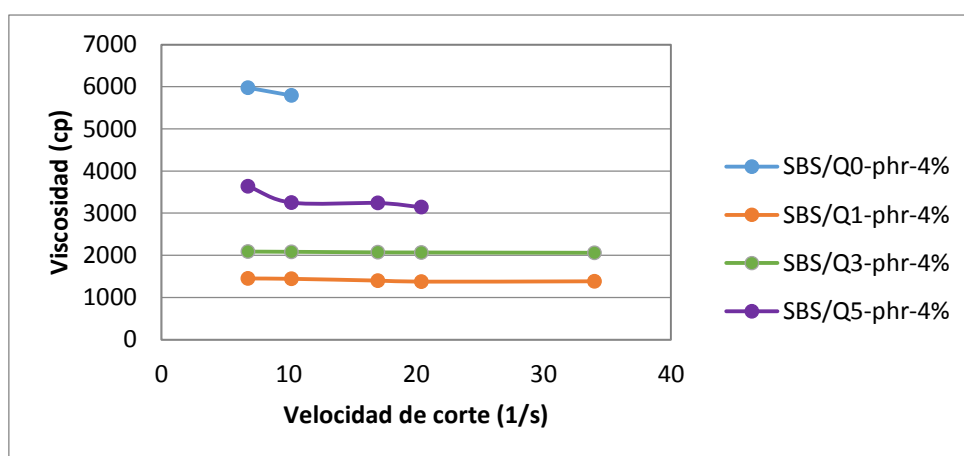


Figura 3.2 Viscosidades mezclas asfálticas al 4% a 135°C

Las mezclas presentan buen comportamiento debido que la viscosidad no se ve influenciada por otros parámetros más que por la temperatura en este caso cuando se lleva a diferentes velocidades de corte, va generando un comportamiento semi-lineal, esto se observa con valores de viscosidad similares y constantes en las diferentes temperaturas que se manejaron. Este comportamiento es bueno debido a procesos como el mezclado y compactacion es necesario que sea manejable la viscosidad sin que sea vea afectada por otros factores. Aunque cabe aclarar que al utilizar viscosímetro brookfield el equipo utiliza velocidades de corte altas, por experiencia se sabe que para el proceso de compactación en campo el paso del rodillo sobre la mezcla asfáltica genera esfuerzos de corte muy altos y el desplazamiento de los materiales es lento reflejándose en velocidades de corte bajas. Si se quieren saber las temperaturas de mezclado y compactación se puede realizar un análisis para medir la viscosidad a corte cero en un reómetro de corte dinámico dado que utiliza velocidades de corte bajas.

3.2 Determinación del punto de reblandecimiento (Análisis Ring & Ball)

El punto de reblandecimiento es un buen indicador de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas. Trata de establecer la temperatura, donde el asfalto obtiene una fluidez determinada. Es un valor relativo, los betunes son cuerpos viscosos sensibles a la temperatura y a la duración de las cargas.

En la figura 3.4 se observa que las mezclas que presentan el valor más alto son los compuestos con puro polímero. Se puede observar que la relación de adicionar el polímero al 2, 4 y 6% el parámetro de R&B es muy similar y no afecta significativamente agregar mayor cantidad de polímero para mejorar la propiedad.

Por otro lado la adición de queratina causa un efecto de disminución a la propiedad al momento de añadir 1phr y se ve un comportamiento de aumento hasta alcanzar 3phr. Las mezclas preparadas a 3phr se pueden considerar que sobresalen en comparación con los demás compuestos con queratina con una ligera mejora en la propiedad, esto se puede atribuir a que la queratina al estar en esa cantidad en equilibrio con el asfalto le proporciona un mayor tiempo de duración de carga ya que es un material que proporciona buena resistencia mecánica pero posterior a ello hay una saturación. Con lo anteriormente mencionado añadir refuerzo de queratina obtenida de la pluma de pollo junto con polímero SBS del tipo lineal no se nota un efecto mayor en contraste con los blancos de referencia.

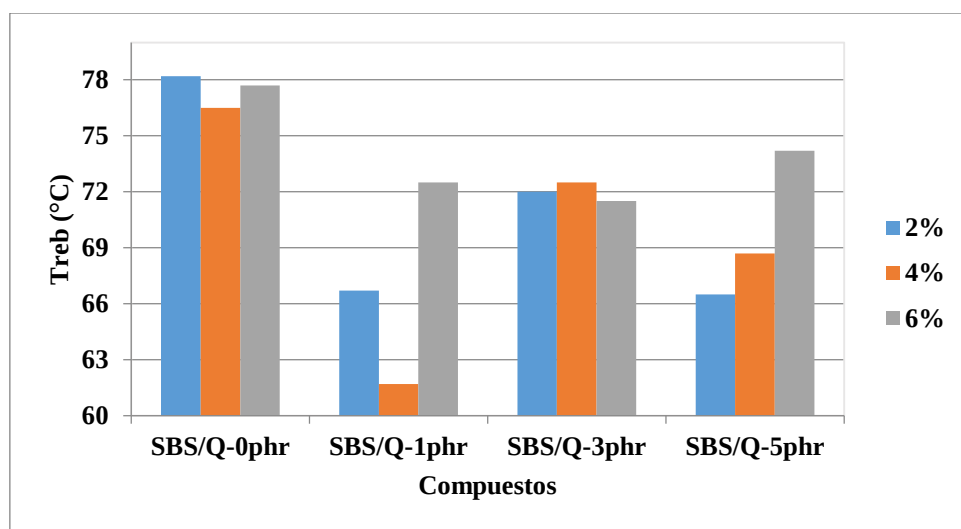


Figura 3.3 Análisis de datos prueba punto de reblandecimiento

3.3 Caracterización por separación de fases

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

En la figura 3.5 se observa que los compuestos con queratina presentaron separación de fases al obtener valores altos de temperatura tomando en cuenta que si logra pasar el $TRB \geq 3^{\circ}\text{C}$ para esta prueba se considera que la mezcla asfáltica es inestable.

Una observación es que durante el proceso de vertido en los anillos de R&B, dichas mezclas con queratina se mostraron con apariencia muy pegajosa en gran parte del volumen de asfalto mientras que los compuestos con puro polímero presentaban una condición más fluida.

Analizando los compuestos con puro polímero presentan un mejor valor que los compuestos con queratina y el efecto de agregar más cantidad de polímero no afecta significativamente al asfalto. Para los compuestos en proporción al 2% de compuesto con queratina presentan una ligera mejora en la propiedad del asfalto más no favorable como se desea en menor valor.

El hecho de adicionar queratina a la mezcla no mejora en nada la propiedad y al contrario se ve influenciada con valores mucho más altos, ahora presenta un efecto no deseado esto se puede deber al periodo de exposición que se encuentra la queratina en el cual se puede formar un ambiente oxidante con los enlaces de azufre y cause esta situación.

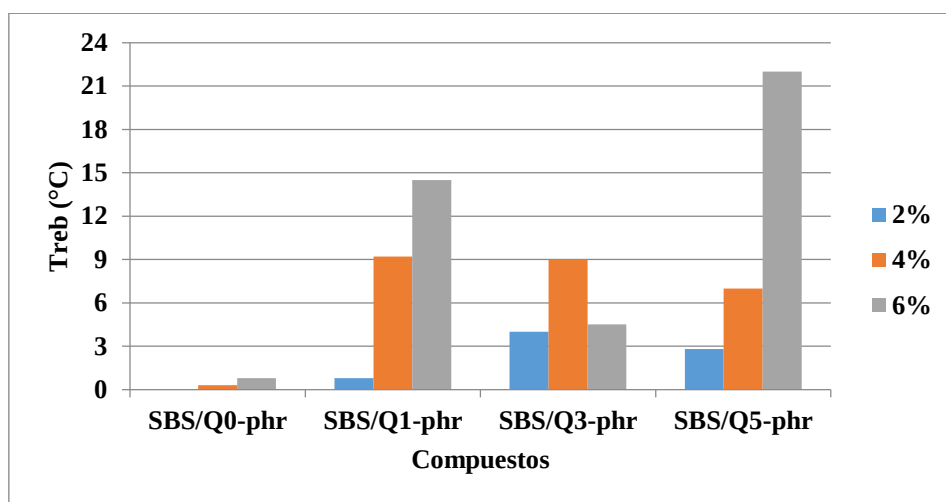


Figura 3.4 Análisis de datos prueba separación de fases

3.4 Caracterización por penetración

Esta prueba determina la consistencia de los asfaltos expresada por medio de la distancia. Incrementar la dureza se relaciona con la resistencia a deformaciones permanentes, es decir, a menores valores de penetración mayor es la rigidez del asfalto. Las mediciones obtenidas para la penetración de las muestras asfálticas se reporta en decimas de milímetro (dmm) en el anexo C tabla C.4.

En la figura 3.6 los blancos de referencia vuelven a presentar mayor contraste que los compuestos de queratina al tener menores valores de penetración.

Cuando se adiciona compuesto al 2% de puro polímero el valor de penetración disminuye un 53% en comparación con el asfalto virgen. Sin embargo agregar más polímero no mejora esta propiedad y al contrario se incrementa su valor de penetración.

Se observa que a medida que se aumenta la concentración de compuesto con queratina se tiene mayores valores de índice de penetración. Este hecho como se había comentado anteriormente se atribuye por generarse cadenas grandes por acción de los enlaces de azufre con el polímero se rompan y la cohesión molecular ya no es tan fuerte generando en las mezclas una menor rigidez en el asfalto y también por el tipo que se utiliza al presentar cadenas lineales favorece aún más esto porque presentan mayor movilidad.

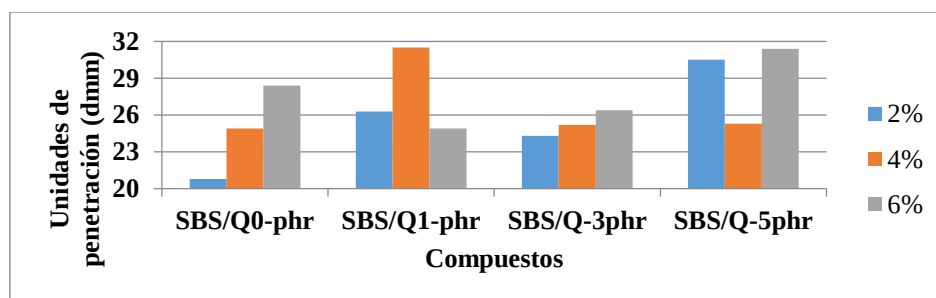


Figura 3.5 Análisis de datos prueba penetración

A partir de la ecuación 2.1, que se muestra en la sección 2.3.4, se calculó el índice de penetración (IP) para las muestras de asfalto, tomando en cuenta las temperaturas de reblandecimiento expuestas en la tabla B.2 y las unidades de penetración de la tabla B.4 del anexo B. Los valores de IP correspondientes a cada mezcla asfáltica se muestran en la tabla 3.1.

A partir de la tabla 3.1 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

Se verifica que las mezclas no presentan buenas propiedades en la prueba de separación de fases. La modificación del asfalto con polímeros lineales y queratina se ven expuestas a cambios de temperatura de acuerdo a los resultados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Índice de penetración de mezclas asfálticas a 25°C

Mezcla asfáltica	T_{RB} [°C]	P [mm]	I_p (Índice de penetración)	Clasificación
B-2%	78.2	2.08	-1.250	Mayor susceptible
B-4%	76.5	2.49	-1.261	
B-6%	77.5	2.84	-0.997	
C1-PHR-2%	66.7	2.63	-2.456	
C1-PHR-4%	61.5	3.15	-3.013	
C1-PHR-6%	72.5	2.49	-1.754	
C3-PHR2%	72.0	2.43	-1.842	
C3-PHR-4%	72.5	2.52	-1.741	
C3-PHR-6%	71.5	2.64	-1.820	
C5-PHR-2%	66.5	3.05	-2.334	
C5-PHR-4%	68.7	2.53	-2.227	
C5-PHR-6%	74.2	3.14	-1.290	

3.5 Microscopía fluorescente

En las micrografías, el fondo oscuro representa la fase asfáltica y los destellos de color 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.

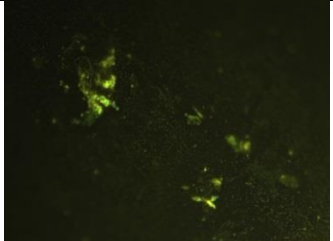
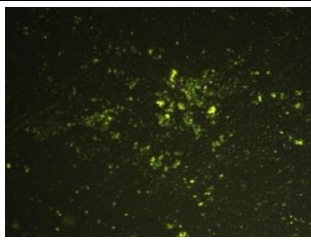
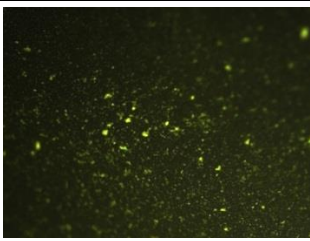
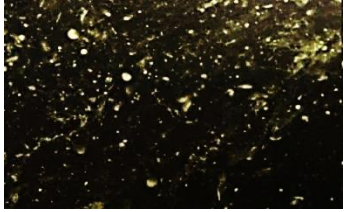
Para las microscopias de SBS-Q0-phr al 2 y 4% no se identifica dispersión de material y por eso no incluyen y para la de 6% se ven pequeñas partes de polímero hinchado, esto se puede atribuir al hecho de que el tipo de polímero que se utiliza no logra dispersarse bien en el

asfalto y al tener en su estructura cadenas lineales estas se mueven fácilmente donde no permitan formar una red estable dando así una mezcla heterogénea.

Cuando se adiciona queratina a 1phr y 3phr se empieza a ver una mejor dispersión del polímero en el asfalto esto se debe que al haber queratina en el asfalto, los enlaces con azufre empiezan a unirse con los dobles enlaces del butadieno y le confieren un mejor ordenamiento en su estructura formando así una mezcla cada vez homogénea.

Con 5phr y al agregar mayor cantidad de compuesto en proporción del asfalto se observa una saturación de polímero debido a que tanto el polímero como la fase maltenica al no haber asfaltenos se reflejan zonas donde se produce una inversión de fases acumulándose polímero hinchado y huecos donde se ve parcialmente homogénea la mezcla asfáltica.

Tabla 3.2 Micrografías de fluorescencia de mezclas asfálticas

	2%	4%	6%
SBS/Q0-phr			
SBS/Q1-phr			
SBS/Q3-phr			
SBS/Q5-phr			

4. Conclusiones

Las técnicas utilizadas para caracterizar permitieron evidenciar en el caso de la prueba de índice de penetración se obtienen valores mayores generando asfaltos poco rígidos y que son susceptibles a altas y bajas temperaturas confirmándose en la prueba de caracterización por separación de fases y esto da como resultado asfaltos que son propensos a presentar fallas como agrietamientos a bajas temperaturas y deformaciones permanentes a temperaturas ambientales.

Una ligera mejoría se presenta con el análisis ring & ball donde se obtienen temperaturas de ablandamiento mayores para concentraciones en 3phr por debajo de los blancos de referencia.

En el caso de proporciones en mayor cantidad de compuesto los resultados no son lo esperado debido a que durante este proceso la adición de cauchos termoplásticos a un asfalto, con un peso molecular igual o mayor que el de los asfáltenos, altera la fase de equilibrio. El polímero y los asfáltenos compiten por el solvente de la fase de los máltenos.

De acuerdo con los resultados obtenidos utilizar un polímero del tipo SBS lineal incorporándole queratina como refuerzo para el asfalto no presenta un mayor desempeño, esto debido al tipo de polímero que se utiliza en este caso lineal al no tener una estructura tan reticulada como la de un tipo radial. La queratina al presentar en sus enlaces azufre y estar expuestos a un ambiente de temperatura alta le confiera al polímero lineal en su estructura un mayor grado de despliegue y esto haga un rompimiento entre las dobles ligaduras del hule polibutadieno con los policiclos del asfalto.

Anexo A. Datos técnicos del asfalto ÉKBE (modificado)

Características	Tipo de cemento asfáltico (Tipo de modificador)				
	AC-5 (Tipo I ó II)	AC-20 (Tipo I)	AC-20 (Tipo II)	AC-20 (Tipo III)	AC-20 (Hule Molido)
Del cemento asfáltico modificado:					
Viscosidad Saybolt-Furol a 135°C; s, máximo	500	1000	1000	1000	—
Viscosidad rotacional Brookfield a 135°C; Pa s, máximo	2	4	3	4	—
Viscosidad rotacional Brookfield (tipo Haake) a 177°C; Pas, máximo	—	—	—	—	7
Penetración:					
• A 25°C, 100 g, 5 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	80	40	40	30	30
• A 4°C, 200 g, 60 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	40	25	25	20	15
Punto de inflamación Cleveland; °C, mínimo	220	230	230	230	230
Punto de reblandecimiento; °C, mínimo	45	55	55	53	57
Separación, diferencia anillo y esfera; °C, máximo	3	3	3	4	5
Recuperación elástica por torsión a 25°C, %, mínimo	25	30	30	15	40
Resiliencia, a 25°C; %, mínimo	20	20	20	25	30
Del residuo de la prueba de la película delgada, (3.2 mm, 50 g):					
Pérdida por calentamiento a 163°C; %, máximo	1	1	1	1	1
Ductilidad a 4°C y 5cm/min; cm, mínimo	10	7	10	5	5
Penetración a 4°C, 200 g, 60 s; 10 ⁻¹ mm, mínimo	—	—	—	—	10
Penetración retenida a 4°C, 200 g, 60 s; %, mínimo	65	65	65	55	75
Recuperación elástica en ductilómetro a 25°C; %, mínimo	50	50	60	30	55
Incremento en temperatura anillo y esfera; °C, máximo	—	—	—	—	10
Módulo reológico de corte dinámico a 76°C ($G^*/\sin \delta$); kPa, mínimo	—	2.2	2.2	2.2	2.2
Módulo reológico de corte dinámico a 64°C ($G^*/\sin \delta$); kPa, mínimo	2.2	—	—	—	—
Ángulo fase (δ) {visco-elasticidad}, a 76°C; ° (grados), máximo	—	75	70	75	—
Ángulo fase (δ) {visco-elasticidad}, a 64°C; ° (grados), máximo	75	—	—	—	—

Figura A.1 Requisitos de calidad para cementos asfálticos AC-20 (EKBE) modificados

Anexo B. Datos obtenidos en caracterizaciones de mezclas asfálticas

Tabla B.1 Datos de prueba viscosidad dinámica

Mezcla asfáltica	1/s	Viscosidades (Cp)		
		135 °C	160 °C	190°C
SBS/Q0-phr-2%	6.8	7700	1525	337.5
	10.2	7367	1350	325
	17	-	1340	305
	20.4	-	1317	300
	34	-	1303	292.5
SBS/Q0-phr-4%	6.8	5975	1400	450
	10.2	5792	1325	408.3
	17	-	1295	365
	20.4	-	1271	358.3
	34	-	1255	340
SBS/Q0-phr-6%	6.8	6713	1612	512.5
	10.2	6517	1558	475
	17	-	1540	460
	20.4	-	1504	450
	34	-	1495	445
SBS/Q1-phr-2%	6.8	2263	487.5	137.5
	10.2	2275	483.5	141.7
	17	2215	485	135
	20.4	2208	483.5	137.5
	34	2175	482.5	135
SBS/Q1-phr-4%	6.8	1450	450	137.5
	10.2	1442	425	141.7
	17	1400	395	140
	20.4	1375	395.8	133.3
	34	1383	390	130
SBS/Q1-phr-6%	6.8	6625	1425	475
	10.2	6608	1417	458.3
	17	-	1355	420
	20.4	-	1396	450
	34	-	1345	407.5
SBS/Q3-phr-2%	6.8	2500	513	125
	10.2	2450	525	125
	17	2490	505	135
	20.4	2533	508	133.5
	34	-	-	132.5
SBS/Q3-phr-4%	6.8	2088	500	150
	10.2	2083	500	150
	17	2070	510	160

	20.4	2067	504.2	154
	34	1962	510	160
SBS/Q3-phr-6%	6.8	1883	537.5	175
	10.2	1900	500	158.3
	17	1867	500	165
	20.4	1880	483.3	158.3
	34	-	482.5	152.5
SBS/Q5-phr-2%	6.8	1737	425	137.5
	10.2	1658	408.3	141.7
	17	1700	395	140
	20.4	1629	391.7	133.3
	34	1650	387.5	127.5
SBS/Q5-phr-4%	6.8	3638	725	300
	10.2	3250	716.7	266.7
	17	3240	675	240
	20.4	3142	704.2	229.2
	34	-	695	215
SBS/Q5-phr-6%	6.8	4475	1075	362.5
	10.2	4133	1042	358.3
	17	4165	1015	335
	20.4	3979	1004	329.2
	34	-	992.5	320

Tabla B.2 Datos de prueba punto de reblandecimiento

Proporción	phr (Partes por cien de hule)			
%	SBS/Q0-phr	SBS/Q1-phr	SBS/Q3-phr	SBS/Q5-phr
2	78.2	66.7	72.0	66.5
4	76.5	61.7	72.5	68.7
6	77.5	72.5	71.5	74.2

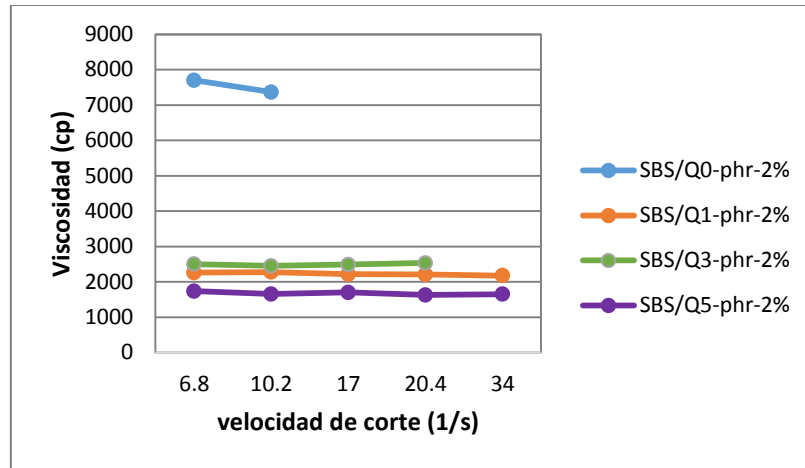
Tabla B.3 Datos de prueba separación de fases

Proporción	phr (Partes por cien de hule)			
%	SBS/Q0-phr	SBS/Q1-phr	SBS/Q3-phr	SBS/Q5-phr
2	0	0.8	4	2.8
4	0.3	9.2	9	7.0
6	0.8	14.5	4.5	22.0

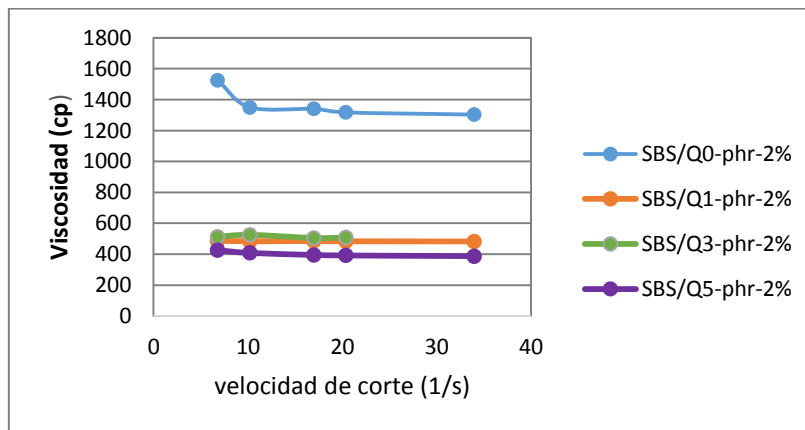
Tabla B.4 Datos de prueba de penetración

Proporción	phr (Partes por cien de hule)			
%	SBS/Q0-phr	SBS/Q1-phr	SBS/Q3-phr	SBS/Q5-phr
2	20.8	26.3	24.3	30.5
4	24.9	31.5	25.2	25.3
6	28.4	24.9	26.4	31.4

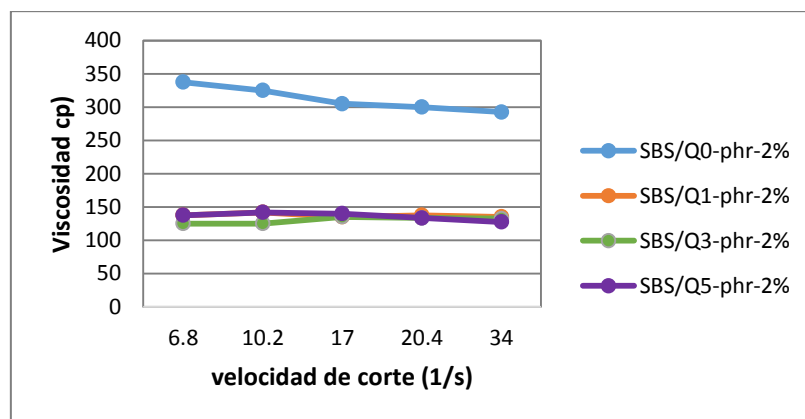
Anexo C. Análisis de velocidad de corte vs viscosidad de mezclas asfálticas



a)

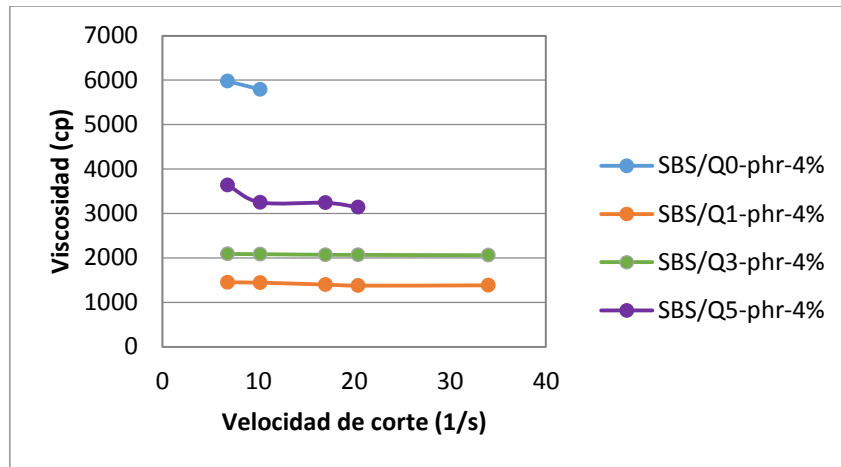


b)

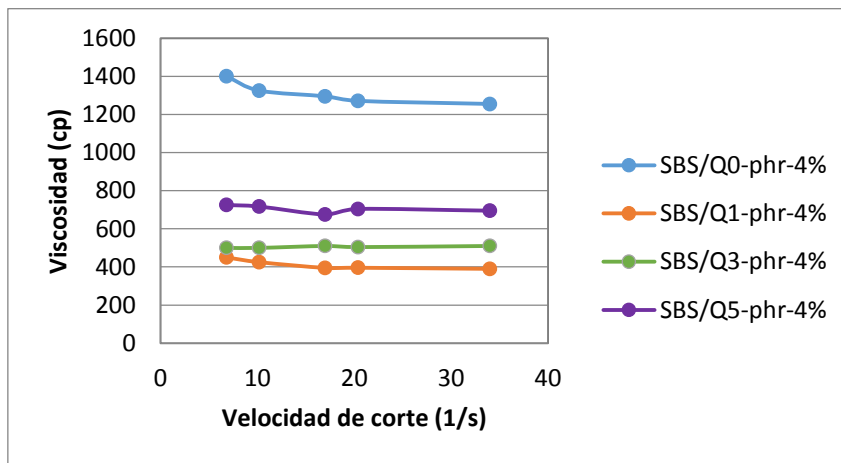


c)

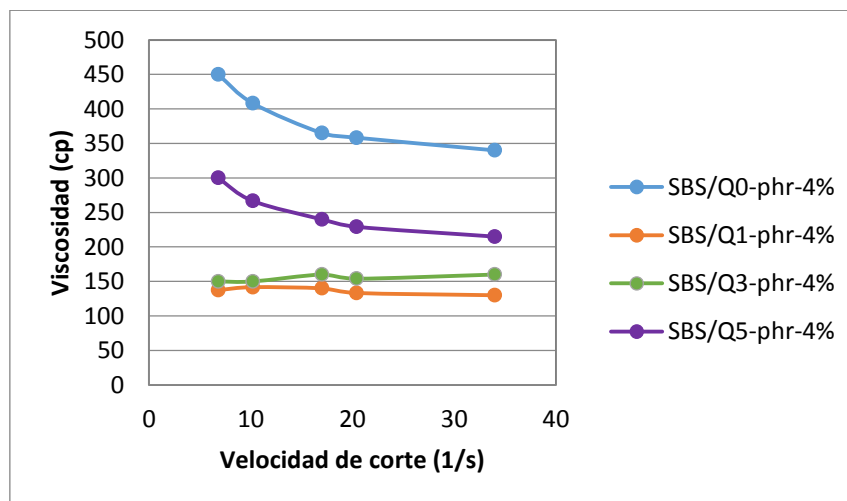
Figura C.1 Viscosidades de mezclas asfálticas al 2% (a) 135, (b) 160 y (c) 190°C



a)

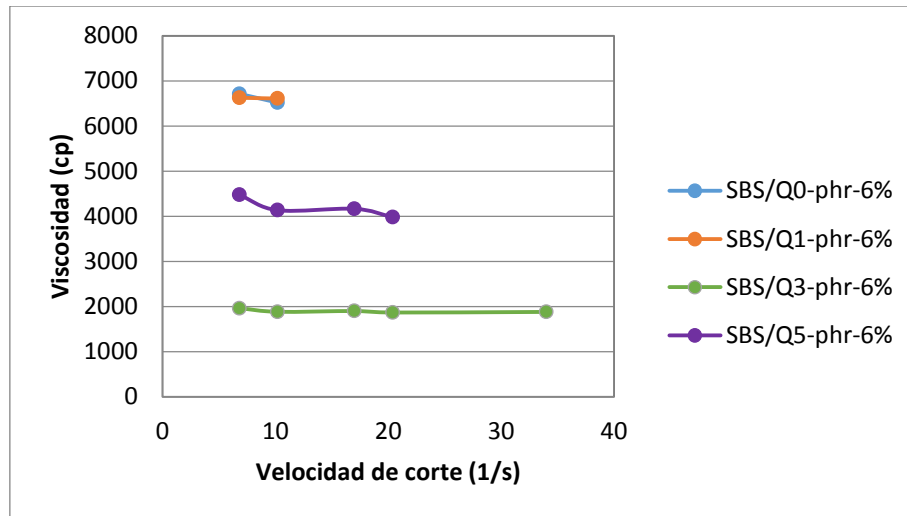


b)

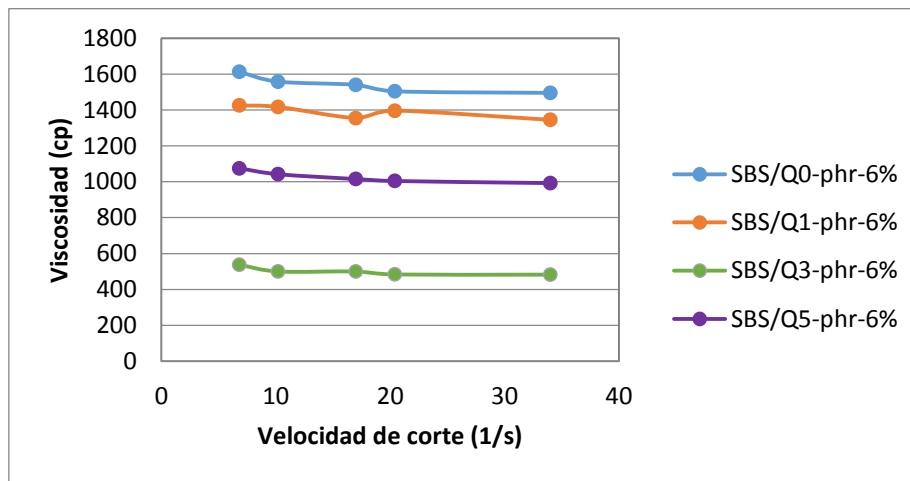


c)

Figura C.2 Viscosidades de mezclas asfálticas al 4% (a) 135, (b) 160 y (c) 190°C



a)



b)

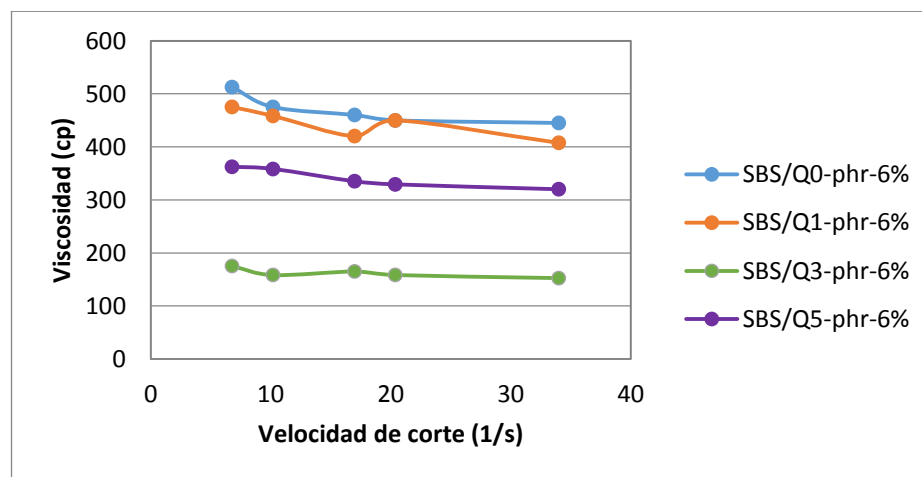


Figura C.3 Viscosidades de mezclas asfálticas al 6% (a) 135, (b) 160 y (c) 190°C

Bibliografía

Ahmed Rahhali. (2015). Valorización de residuos queratínicos para la obtención de materiales biocompuestos. Tesis de doctorado de la carrera de ingeniería química. Universidad Politécnica de Cataluña. Terrassa, España.

Becker, Y., Méndez, M. & Rodríguez Y. (2001). Polymer modified asphalt. *Visión Tecnológica*. Vol. 9. No. 1, 39-50.

Beltrán, M. & Marcilla, A. (2002). Tipos de plásticos, aditivos y mezclado. Tesis de licenciatura de la carrera de tecnología de polímeros. Universidad de alicante. Madrid, España.

Avellán Cruz, M. D. (2007). Asfaltos modificados con polímeros. Tesis de Licenciatura de la carrera de ingeniería civil. Universidad de San Carlos. Guatemala, Guatemala.

Caro S., Vega N., Husserl J. & Alvarez A.. (2016). Studying the impact of biomodifiers produced from agroindustrial wastes on asphalt binders. *Construction and Building Materials*. Vol. 126, 369-380.

Colunga Sánchez, L. (2018). Modificación de propiedades fisicoquímicas del asfalto utilizando un material compuesto de SBS – Queratina de pluma de pollo. Tesis de Licenciatura de la carrera de ingeniería química. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Tamaulipas, México.

Cóndor Villegas, J. C. (2014). Comportamiento del asfalto pen 85/100 modificado con polímeros sbs aplicado en el mantenimiento de carreteras costeras aplicación sullana - aguas verdes. Tesis de licenciatura de la carrera de ingeniería civil. Universidad nacional de ingeniería. Ambato, Ecuador.

Chen C., Podolsky J., Williams C. & Cochran E. (2018). Laboratory investigation of using acrylated epoxidized soybean oil (AESO) for asphalt modification. *Construction and building materials*. Vol. 187, 267-279.

Cremades, I. Recuperado el 7 de Noviembre de 2018, de Surfax: http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/1cma_1999/08.pdf

Daquan, S., Fen, Y., Fangzhi, S., & Weimin, L. (2006). Storage stability of SBS modified road asphalt: preparation, morphology, and rheological properties. *Petroleum, science and technology*, 1067 - 1077.

Dou, Y., Zhang, B., He, M., & Yin, G. (2016). The structure, tensile properties and water resistance of hydrolyzed feather keratin-based bioplastics. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 24, 415 – 420.

Dong F., Zhao W., Zhang Y., Wei J., Fan W., Yu Y. & Wang Z. (2014). Influence of SBS and asphalt on SBS dispersion and the performance of modified asphalt. *Construction and Building Materials*. Vol. 62, 1-7.

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

Herrera Lozano, J. E., & Limón Limón, R. A. (1995). Modificadores de Asfalto. México, DF.: Asociación mexicana de ingeniería de vías terrestres AC.

Jiménez-Cervantes Amieva E, Velasco-Santos C, Martínez-Hernández AL, Rivera Armenta JL, Mendoza-Martínez AM, Castaño VM. Composites from chicken feathers quill and recycled polypropylene. *Journal of Composite Materials*. 2015;49(3):275-283. DOI: 10.1177/0021998313518359

Josmin, P. (2012). Introduction to polymer composites. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*. Vol. 1, No 1, 3-15.

Juárez D., Balart R., Ferrándiz S., García D. (2013). Estudio y análisis de los polímeros derivados del estireno butadieno. *Revista Ciencias*. No. 2, 1-17.

Loria Salazar, L. G. (2007). Evaluación de asfaltos modificados en laboratorio de distintos polímeros. *Infraestructura vial*. No 17, 1-8. San José, Costa Rica

López Laberian, M. E. (2004). Utilización de aditivos polímeros en pavimentos flexibles. Trabajo de Licenciatura de la carrera de ingeniería civil. Universidad nacional de ingeniería. Lima, Perú.

López Pérez, D. J. & Puma Vásquez, C. J. (2017). Caracterización de mezclas asfálticas en caliente elaboradas con cemento asfáltico modificado con polímeros SBS y RET, mediante la determinación del módulo de rigidez. Trabajo de licenciatura de la carrera de ingeniería civil. Universidad central de ecuador. Quito, Ecuador.

Machuca Loja, G. J. (2015). Obtención de queratina a partir de plumas de pollo, utilizando queratinasas producidas por bacillus spp. Trabajo de Licenciatura de la carrera de bioquímica y farmacia. Universidad técnica de Machala. Quito, Ecuador.

Medina, V. H. (2003). Aplicaciones de las emulsiones asfálticas y los asfaltos diluidos en mezclas asfálticas en frío utilizando agregados del río Aguaytia - Ucayalí. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú. Obtenido de <http://www.catalogo.uni.edu.pe/cgi-bin/koha/opacdetail.pl?biblionumber=67635>.

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.

Prochon M., Janowska G., Przepiorkowska A., Kucharska-Jastrzabek A., “Thermal properties and combustibility of elastomer-protein composites”, *J Therm Anal Calorim*, (2011), vol.109, 1563-1570.

Quintero-Curvelo, G.A., Huertas-Díaz E., Ortega-David, E. (2017). Procesamiento de plumas de pollo para la obtención de queratina. *UGCiencia*, 23, 81-87

Ran Zhang, Hainian Wang, Junfeng Gao, Zhanping You & Xu Yang. (2017). High temperature performance of SBS modified bio-asphalt. *Construction and Building Materials*. 100-105.

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

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

Velásquez Mayén, J. A. (2016). Rehabilitación de carreteras pavimentadas utilizando mezcla asfáltica en caliente modificada con polímeros. Tesis de licenciatura de la carrera de ingeniería civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, Guatemala.

Victoria, C., Ortiz, J., Avalos, F. & Castañeda A. (2001). “Modificación de asfalto con elastómeros para su uso en pavimentos”. *Afinidad LXIII*. p. 121.

Wulf, Rodríguez, F. A. (2008). Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero. Tesis de Licenciatura de la carrera de ingeniería constructor. Universidad Austral. Santiago, Chile.

Yildirim Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*. Vol. 21, 66-72.

Zapién-Castillo, S., Rivera-Armenta, J. L., Chávez- Cinco, M. Y., Salazar-Cruz, B.A. & Mendoza-Martínez, A. M. (2016). Physical and rheological properties of asphalt modified with SEBS/montmorillonite nanocomposite. *Construction and Building Materials*. Vol. 106, 349-356.