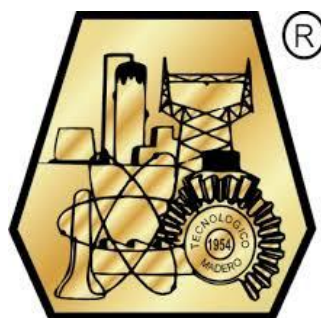


INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO

Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

MODIFICACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL ASFALTO UTILIZANDO UN MATERIAL COMPUESTO DE SBS – QUERATINA DE PLUMA DE POLLO.

Titulación Integral

Tesis

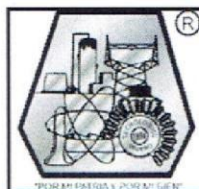
Que para obtener el Título de
Ingeniero Químico

Presenta

Leslie Mariella Colunga Sánchez
13071655

Asesor

Dr. José Luis Rivera Armenta



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

Ciudad Madero, Tam, 22/Mayo/2018

ÁREA: **DEPTO. DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
BIOQUÍMICA**

No. OFICIO: **T.0379/18**

ASUNTO: **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

C. LESLIE MARIELLA COLUNGA SÁNCHEZ

No. CONTROL 13071655

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

PRESIDENTE: DR. JOSÉ LUIS RIVERA ARMENTA
SECRETARIO: DRA. BEATRIZ ADRIANA SALAZAR CRUZ
VOCAL: DRA. CLAUDIA ESMERALDA RAMOS GALVÁN
SUPLENTE: DRA. REBECA SILVA RODRIGO

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 TI (TESIS)**

**"MODIFICACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DEL ASFALTO UTILIZANDO UN
MATERIAL COMPUESTO DE SBS-QUERATINA DE 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"™



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO

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

c.c.p. Archivo

FRAF/dahb*



Av. 1º de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz Col. Los Mangos
C.P. 89440, Cd. Madero, Tam. Tels. (833) 357 48 20, e-mail: itcm@itcm.edu.mx,
www.itcm.edu.mx

Agradecimientos

*Y todo lo que hacéis, sea de palabra o de hecho, hacedlo todo en el nombre del Señor Jesús,
dando gracias a Dios Padre por medio de él*

Colosenses 3:17

Gracias al único Rey de mi corazón, porque por ti y para ti hago todas las cosas; Tú me amaste aunque no te conocía, tus planes para mí los fijaste antes de la fundación del mundo y Señor, tu sabes que confié en que son perfectos.

Sólo Tú me diste fuerza para concluir esta etapa de la vida e iniciar otra nueva. Me mostraste fielmente tu camino todas las veces que me extravié de él, concediéndome sabiduría siempre que la necesité. Gracias por que además de ser mi padre y amigo eres mi maestro, con paciencia me has mostrado que Tú eres Dios de paz, amor, justicia, misericordia y por supuesto de ciencia.

Gracias porque todo lo que he aprendido durante estos cuatro años, me confirma claramente que solo Tú eres capaz de crear algo tan minuciosamente perfecto como el universo, y porque aun siendo este infinito jamás te has olvidado de mí. Si no que me rodeaste de gente que me ama grandemente y que son mis pilares cada que vez que flaqueo.

Gracias querido padre porque eres excepcional, de ti he aprendido a ser firme, determinada y a lograr todas mis metas trabajando honestamente. No conozco a nadie más responsable en todos los aspectos que tú; se cuánto amabas a tu padre y espero poder ser al menos, la mitad de lo buen hijo que tú fuiste y de la misma forma que mi abuelo estaba orgulloso de ti, lo llegues a estar de mí.

Mami a ti te debo mi vida, por medio de ti llegue a este mundo, pero por ti me salve de él. Tú me llevaste a los pies de mi Salvador y esa será tu recompensa para siempre. Papá y tú cumplieron la misión por la cual Dios creó la familia, no te preocupes mamá porque a su tiempo plantaste en mi corazón la semilla y el Señor dará el crecimiento, Él se encargará de convertirme en la persona que soñabas cuando yo aún estaba en tu vientre.

Julieta, hermana tú eres mi felicidad, con tu vida Dios me ha enseñado muchas cosas; principalmente a cuidarte con todo mi corazón, sé que no existe otra persona más afín a mi alma que tú. Cada que veo tu rostro, Dios me recuerda que también venimos a este mundo para disfrutarlo y lo mucho que se puede llegar a amar a una persona, gracias porque siempre me brindas tu apoyo, no olvides que tú siempre tendrás el mío y si con alguien quisiera compartir el resto de mi vida, es contigo.

Queridas tías Teresa y Lupe, Dios me bendijo con dos mamás más, no puedo describir lo agradecida que estoy por todo el amor que le tienen a mi familia y lo mucho que las quiero. Gracias porque todo el tiempo nos han ayudado incondicionalmente, créanme que eso nunca lo olvidaré y estoy segura de que mi Señor tampoco. De ustedes he aprendido a ganarme las cosas con trabajo, mucho esfuerzo y perseverancia; son las mujeres más trabajadoras que he conocido y realmente las admiro, gracias por querernos tanto a Julieta y a mí.

Por último queridos maestros, extendiendo este sincero agradecimiento hacia ustedes, Dr. José Luis Rivera Armenta, Dra. Beatriz Adriana Salazar Cruz y M.C. Ma Elena González. Como alumna les digo que existen muy pocos docentes como ustedes, y por este motivo resulta difícil o imposible olvidarlos; estoy muy agradecida por que mi camino se cruzó con personas tan cálidas y profesionales como ustedes, dispuestos a compartir tantos años de trabajo y experiencias conmigo. Por favor no pierdan esa pasión que los caracteriza de los demás, pues un buen profesionista siempre es el resultado de un excelente maestro, y ustedes son mucho más que eso.

Resumen

Los asfaltos constituyen la fracción más pesada del petróleo crudo, es una sustancia pegajosa que físicamente varía con los cambios de temperatura; a bajas temperaturas pareciera un sólido quebradizo, mientras que a altas temperaturas se comporta como un líquido sumamente viscoso; su alta resistencia a la mayor parte de los ácidos, sales y álcalis presentes en el suelo y el medio ambiente lo convierten en un material ideal para la pavimentación, sin embargo, el asfalto convencional no satisface las demandas actuales referentes al volumen vehicular, por lo que la modificación con la finalidad de mejorar su desempeño ha ganado interés en los últimos años.

El presente trabajo, estudió el efecto de la adición de un hule tipo estireno–butadieno–estireno (SBS) modificado con queratina contenida en las plumas de pollo (CF), sobre un asfalto. Para lograr el objetivo propuesto, se prepararon diferentes mezclas asfálticas a mismas condiciones de temperatura y velocidad de mezclado, las cuales posteriormente fueron sometidas a métodos de caracterización como viscosidad Brookfield, punto de reblandecimiento, separación de fases, índice de penetración y microscopia fluorescente, encontrando que el solo uso de la queratina como aditivo sobre el asfalto reflejó un resultado significativo en comparación del asfalto convencional o el asfalto modificado con hule.

Abstract

Asphalts are the heaviest fraction of crude oil, it is a sticky substance that physically varies with temperature changes; at low temperatures it looks like a brittle solid, while at high temperatures it behaves like an extremely viscous liquid; its high resistance to most of the acids, salts and alkalis present in the soil and the environment makes it an ideal material for paving, However, conventional asphalt does not meet current demands regarding vehicle volume, so the modification to improve its performance has gained interest in recent years.

The present work, studied the effect of add styrene-butadiene-styrene (SBS) modified with keratin contained in chicken feathers (CF), on an asphalt. To achieve the proposed objective, different asphalt mixtures were prepared at the same temperature and mixing speed conditions, which were later subjected to characterization methods as Brookfield viscosity, softening point, phase separation, penetration index and fluorescent microscopy, finding that the only use of keratin as an additive on asphalt reflected better characteristics than conventional asphalt or modified asphalt with rubber.

Índice

Página

Agradecimientos	i
Resumen	iv
Abstract.....	v
 Introducción.....	 1
1. Antecedentes.....	3
1.1. Asfalto	6
1.1.1. Composición química.....	6
1.1.2. Propiedades del asfalto	10
1.1.3. Obtención del betún asfáltico	11
1.1.4. Materiales asfálticos.	13
1.1.5. Modificación de asfaltos	13
1.2. Polímero estireno – butadieno – estireno (SBS).....	14
1.2.1. Estructura química del SBS.....	16
1.2.2. Propiedades y aplicación	18
1.3. Pluma de pollo (CF)	20
1.3.1. Estructura de la pluma de pollo.....	20
2. Metodología.....	24
2.1. Preparación del composito	24
2.2. Preparación de mezclas asfálticas modificadas	26
2.3. Caracterización de mezclas asfálticas	28
2.3.1. Viscosidad dinámica.....	28
2.3.2. Determinación del punto de ablandamiento (análisis Ring & Ball).....	30

2.3.3. Caracterización por separación de fases.....	31
2.3.4. Caracterización por penetración y cálculo del índice de penetración	33
2.3.5. Microscopía fluorescente	35
3. Resultados y discusiones.	36
3.1. Selección de los compositos.....	36
3.2. Mezclas asfálticas.....	36
3.3. Prueba de temperatura de ablandamiento (Ring and Ball).	38
3.4. Viscosidad dinámica.....	40
3.5. Separación de fases	44
3.6. Penetración e índice de penetración	46
3.7. Microscopia fluorescente.....	48
4. Conclusiones.....	52
Bibliografía.....	54
Anexo A. Tipos de asfaltos y sus principales aplicaciones	56
Anexo B. Datos técnicos del SBS-416	57

Índice de tablas

No. Tabla	Página
1.1. Composición elemental de diferentes asfaltos.....	8
1.2. Modificadores asfálticos comunes y su distribuidor respectivo	14
2.1. Propiedades fisicoquímicas del Asfalto AC–20 EKBÉ.....	24
3.1. Temperaturas de reblandecimiento de las mezclas asfálticas.....	38
3.2. Índice de modificación, caracterización por Ring and Ball.....	39
3.3. Viscosidades a diferentes temperaturas de mezclas asfálticas.	42
3.4. Índice de modificación, para las viscosidades de las muestras asfálticas.	43
3.5. Diferencia de temperaturas ring and ball superior e inferior.....	45
3.6. Unidades de penetración de las mezclas asfálticas.....	47
3.7. Índice de penetración de las muestras asfálticas a 25°C.	48
3.8. Clasificación de las muestras asfálticas según su índice de penetración.....	48

Índice de figuras

No. Figura	
1.1. Composición química general del asfalto.....	7
1.2 Estructura de diferentes asfaltos.	9
1.3. Destilación de los productos bituminosos.	12
1.4. Polimerización por adición del estireno.	15
1.5. Reacción de polimerización del copolímero estireno – butadieno.....	16
1.6. Representación esquemática de una cadena estireno – butadieno – estireno.....	17
1.7. Estructura reticular del SBS, con zonas flexibles y puntos de entrecruzamiento reversibles.	18
1.8. Estructura de la pluma de pollo.	21
1.9. Estructura química general de la queratina.....	22
1.10. Estructura de la queratina α – helicoidal y β – plisada.	23
2.1. (a) Procesadora picalica T-fal y (b) Queratina uniformemente molida.....	25
2.2. (a) y (b) Extrusor Brabender® Intelli–Plasticorder.....	25

2.3. Pluma de pollo molida manualmente (barbas + raquis).	26
2.4. Equipo de calentamiento y mezclado IKA–Eurostar 6000.	27
2.5. Componentes del Viscosímetro Brookfield DV-II+Pro.	29
2.6. Equipo empleado en el análisis Ring & Ball.	31
2.7. Tubo de aluminio colapsible para separación de fases.	32
2.8. Penetrómetro digital Koehler K95500.	33
2.9. Ensayo normal de penetración.	34
3.1. Compositos SBS – 416/queratina, (a) 65°C y 100rpm, (b) 80°C y 50 rpm y (c) 80°C y 70rpm.	36
3.2. Dispersión de la mezcla B. Asfalto–queratina (barbas + raquis).	37
3.3. Viscosidad dinámica de mezclas asfálticas a 135°C.	40
3.4. Viscosidad dinámica de mezclas asfálticas a 160°C.	41
3.5. Viscosidad dinámica de mezclas asfálticas a 190°C.	41
3.6. Micrografía fluorescente de a) Asfalto–queratina molida (raquis), b) Asfalto– queratina (barbas + raquis) y c) Asfalto–2% SBS416.	49
3.7. Micrografía fluorescente de a) Asfalto–composito 70rpm, b) Asfalto–composito.	50
3.8. Microscopía fluorescente, a) Asfalto-2%(SBS414 + 1PHR desecho de pollo) y b) Asfalto–2%(1PHR desecho de pollo + SBS416).	51

Introducción

En términos generales, el asfalto es un constituyente del petróleo, es un material que gracias a sus propiedades altamente adhesivas y permeables es destinado, entre otras múltiples aplicaciones, a la pavimentación de autopistas y carreteras.

Actualmente factores como las condiciones climáticas, la degradación de la estructura del suelo, el volumen de tránsito vehicular así como el elevado porcentaje de vehículos de carga que según las encuestas más recientes del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) del año 2000 al 2012 ha incrementado alrededor de 57.9% y un 47.50% respectivamente; han provocado daños permanentes en la superficies asfálticas como deformación permanente, desmenuzamiento de la superficie o roturas (Fernández Bisso, 2011). Para evitar este tipo de deterioro, generalmente el asfalto es mezclado con aditivos capaces de mejorar sus características basales otorgándole una mayor durabilidad y mejor resistencia frente a los cambios de temperatura.

Sin embargo, con el fin de reducir problemas relacionados con los altos costos en la producción de asfaltos dependientes del precio del crudo a nivel internacional y la contaminación ambiental que esto acarrea, se llega a la necesidad de descubrir nuevos materiales que satisfagan las características necesarias de un material de calidad y que al mismo tiempo sea amigable ambientalmente y menos costoso. Siendo los materiales reciclados o de desecho una alternativa más viable en la modificación de asfaltos.

La β -queratina es una proteína de estructura fibrosa, presente en las plumas de las aves (CF) que se considera material de desecho y que puede ser aprovechada en conjunto con un polímero para mejorar notablemente propiedades de otros materiales (en este caso, asfalto).

Aunado a esto y considerando la pluma de pollo como un desperdicio sólido, la Industria de Procesamiento de Aves de Corral dispone anualmente alrededor de 3 a 4 mil millones de libras de plumas secas en los Estados Unidos y más de 1.5 billones de libras en China (Dou Yao y otros 2016), la que al encontrarse en vertederos acarrea un gran problema de contaminación y hablar acerca de eliminarlas como desecho implicaría un proceso aún más costoso, por lo que destinar la pluma de pollo como aditivo en la modificación de asfaltos es

una opción más viable e incluso benéfica al suplir el uso de agentes acoplantes presentes en reservas naturales como lo son las arcillas o porque no, de los mismos modificadores sintéticos como los elastómeros y algunos termoplásticos. Por lo cual, la posibilidad de añadir un compuesto elaborado a partir de hule CF sobre un asfalto representa un desarrollo en la implementación de fibras de desecho como agentes modificantes.

Hablando en cuanto a las propiedades del asfalto, la incorporación de un aditivo se puede reflejar directamente sobre estas; por ejemplo, una temperatura de ablandamiento elevada garantiza una larga vida de servicio en lo que se refiere a su aplicación más común como concreto asfáltico. De igual forma la posible compatibilidad entre el asfalto y el aditivo de no separarse cuando este se somete constantemente a temperaturas drásticas (envejecimiento) es otro punto de mejoría que ofrece resultados tales como resistencia a la acción destructiva de los agentes atmosféricos y la seguridad de proporcionar una flexibilidad suficiente para resistir roturas inducidas por su constante exposición a cargas pesadas.

Por tal motivo, este trabajo de investigación estudia el efecto producido en las propiedades fisicoquímicas de un asfalto al añadir un compuesto queratina-SBS, con la finalidad de verificar si el uso de este material de desecho significa un avance notable en la modificación de asfaltos convencional.

La estructuración de esta tesis comprende capítulos. En el primer capítulo se establece la fundamentación necesaria para sostener este trabajo a partir de la literatura consultada. En el segundo capítulo se detalla la metodología empleada para la experimentación realizada con el propósito de lograr el objetivo general planteado.

Con base a lo anterior, se desarrollan los capítulos tres y cuatro donde se registran y analizan uno a uno los resultados obtenidos que condujeron a la formulación de conclusiones, mismas que determinaron el grado de cumplimiento de los objetivos específicos para validar o rechazar la idea original, es decir, si realmente el uso de un material compuesto CF-SBS representa una mejora notable en las propiedades de un asfalto.

1. Antecedentes

El asfalto es un componente natural presente en el petróleo crudo, se obtiene después de someter a este último a un proceso de refinación en el cual se separan sus diferentes fracciones y el asfalto es recuperado; también se encuentra en depósitos naturales donde algunas veces puede estar libre de partículas o en su defecto acompañado de rocas y otros minerales. Entre sus múltiples aplicaciones principalmente es usado en la pavimentación de autopistas y carreteras, ya que sus propiedades adhesivas y permeables le conceden un tiempo de vida considerable, además de ser altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, sales y álcalis presentes en el suelo y el medio ambiente (The Asphalt Institute, s.f.).

Por otro lado, la necesidad de mejorar las propiedades del asfalto ha motivado a los investigadores a 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 Lozano & Limón Limón, 1995).

El elastómero estireno–butadieno–estireno (SBS) es el polímero más empleado en la modificación de asfaltos, forma parte de la familia denominada hules termoplásticos que combina el comportamiento elástico de los elastómeros y las características de procesabilidad de los termoplásticos; es empleado debido a la rigidez impartida por el estireno y su matriz blanda de butadieno que simultáneamente conceden al asfalto resistencia mecánica y elástica que es fundamental para prevenir deformaciones permanentes en carreteras pavimentadas.

Daquan Sun y otros (2006) realizaron ensayos de estabilidad al almacenamiento y de caracterización morfológica al añadir SBS y un agente acoplante al asfalto, sus resultados mostraron que la mezcla asfalto SBS–modificado poseía una mayor estabilidad en el almacenamiento así como en las propiedades reológicas cuando el asfalto modificado es el resultado de una verdadera reacción química. La adición de un agente acoplante dio como resultado mejores características mecánicas de la mezcla asfáltica preparada.

Virginie M. y otros (2008) comprobaron mediante IR que los asfaltos modificados con polímeros como el EVA son menos compatibles al someter la mezcla a envejecimiento, mientras que el SBS se acopla mejor ante dichas circunstancias; explicó cómo la oxidación y la

modificación estructural del asfalto después del envejecimiento le permite una modificación más o menos importante de la mezcla en base a su composición original.

Del mismo modo, S. Burak & Giray I. (2008) observaron que emplear un copolímero SBS lineal se presenta una distribución homogénea en gran porcentaje de área de la mezcla, también observó mejoras en las propiedades mecánicas, minimizando el envejecimiento a corto y largo plazo en las propiedades tensiles.

No obstante, todos los modificadores comparten el mismo propósito otorgar al asfalto importantes características como flexibilidad, mejor respuesta elástica, cohesión, menor sensibilidad a la temperatura, mayor intervalo de plasticidad, así como alta permeabilidad y aguante al envejecimiento (Figuroa Infante y otros 2009). También aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos, por lo tanto, a la fatiga; además, reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura.

Se debe tomar en cuenta que, a pesar de que el uso de un modificador polimérico representa una mejora significativa, existe una importante limitación, la compatibilidad. La perfecta afinidad entre el asfalto y el material polimérico debe estar segura, con el fin de minimizar el riesgo de que al estar la mezcla expuesta a los cambios de temperatura y presión ocurra una separación de fases que pueda afectar el tiempo de vida y la calidad del material asfáltico modificado (Zapién S. y otros 2016).

El trabajo realizado por Salazar Cruz (2008) muestra que la afinidad entre una matriz asfáltica y un copolímero tipo SBS-411 radial, es mayor cuando se emplea un agente acoplante, en este caso se prepararon mezclas empleando monmorinolita a diferentes concentraciones y por distintas formas de adición.

Este hecho sugiere que la compatibilidad natural del asfalto modificado con estireno – butadieno no es del todo aceptable, o al menos no satisface las necesidades antes descritas. Lo que se alude al doble enlace de carbono típico en los elastómeros, tal como lo explica S. Zapién y otros (2016) este enlace, es un sitio muy reactivo que promueve reacciones de degradación cuando es expuesto a agentes oxidantes o rayos UV. Por lo que el asfalto modificado con SBS

es propenso a sufrir los efectos adversos del envejecimiento y la degradación al destinarse como pavimento y ser expuesto condiciones ambientales desfavorables.

Actualmente existen otras alternativas remediar inconvenientes como lo es el elevado costo de estos modificadores y la contaminación que implica su fabricación. Algunos materiales biodegradables obtenidos a partir de fuentes renovables como proteínas, polisacáridos y lípidos, pueden ser empleados como modificadores frente a una matriz polimérica o un asfalto (Dou Yao y otros 2016).

Arabani M. & Seyed A. (2017) Aprovecharon las propiedades contenidas en las cenizas de cáscara de arroz (RHA) para modificar el asfalto, demuestran que la adición de fibras naturales al asfalto representa una mejora en sus características físicas y mecánicas, donde el contenido de RHA en mezclas asfálticas incrementa el rango de temperatura en el punto de reblandecimiento y disminuye el de penetración.

La queratina es una proteína durable y muy fibrosa, presente en el cuerpo humano como células epiteliales, y principalmente en las aves, mamíferos y reptiles. Su principal fuente de obtención es la industria alimentaria como un subproducto considerado “desecho”, siendo sus principales productores Estados Unidos, China y Brasil con más de 40 millones de toneladas al año (Sharma & Arun , 2016).

Las plumas son estructuras que contienen un 90% de queratina y que constituyen la piel de las aves, debido a que tiene una estructura rígida característica a los materiales de alta resistencia, después de ser sanitizadas pueden emplearse como refuerzo para una matriz polimérica; Villareal Lucio y otros (2017) prepararon compuestos de PVC–pluma de pollo, para mejorar las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica del termoplástico.

De la misma forma Cervantes y otros (2014) evaluaron las propiedades térmicas y termo mecánicas presentes en un composito preparado con polipropileno y pluma de pollo, este compuesto presento una excelente compatibilidad que fue examinada físicamente mediante microscopia electrónica de barrido; en todos los compositos el módulo de almacenamiento fue mayor que el del polímero no modificado además poseían una menor densidad.

Martínez Hernández y otros (2007) usaron pluma de pollo como refuerzo para una matriz de poli metil–metacrilato, por análisis térmico y mecánico–dinámico encontró que la

temperatura de transición y la estabilidad térmica era mayor que la del PMMA estándar, además el módulo de almacenamiento se comportó de manera más estable en los composites que contenían de un 1 a 2% en peso de queratina.

Barone J. y otros (2005) Prepararon compuestos basados en polietileno de alta densidad (HDPE) y queratina de plumas de pollo, la fibra se mezcló al 20% en peso del polímero. Por microscopía electrónica de barrido y pruebas de tracción encontró que la fibra de plumas de queratina proporciona un aumento de rigidez al HDPE, pero reduce el estrés por rotura por tracción. Además de que la pluma de pollo es térmicamente estable por largos periodos de tiempo y hasta 200 °C.

1.1. Asfalto

El asfalto es un material de consistencia sólida, semi-sólida o líquida dependiendo de la temperatura a la que esté expuesto; se encuentra en depósitos naturales o bien, representa la fracción más pesada en el proceso de refinación del petróleo crudo, debido a que contiene cadenas mayores a treinta y nueve carbonos ($>C_{39}$) ((ILCE), 1998) . Su color varía entre el negro y café oscuro, además es un material altamente resistente, adhesivo, permeable, con elevados estándares de durabilidad y económico, aludido a que es una mezcla remanente.

1.1.1. Composición química

Conocer la composición química específica de un asfalto es un tema muy complejo, podría decirse que principalmente son cadenas carbonatadas de muy alto peso molecular, y que entre otros componentes contiene anillos aromáticos y nafténicos, radicales ácidos, aldehídos, cetonas; algunos heteroátomos como O, N, H y S, así como complejos de níquel, vanadio, magnesio, hierro y calcio (Salazar Cruz, 2008).

En términos generales y de manera cuantitativa, el asfalto está compuesto por: carbono del 82 – 88%, hidrógeno de 8 – 10%, azufre 0 – 6%, oxígeno de 0 – 1.5% y nitrógeno de 0 – 1%; además de todos los agregados antes mencionados. Pese a que la composición particular de

un asfalto depende de la procedencia del petróleo crudo del cual se obtiene, se pueden distinguir dos principales grupos que lo conforman, asfaltenos y maltenos. Un esquema de los grupos principales que componen al asfalto se muestra en la figura 1.1. (Zapién Castillo, S.f.)

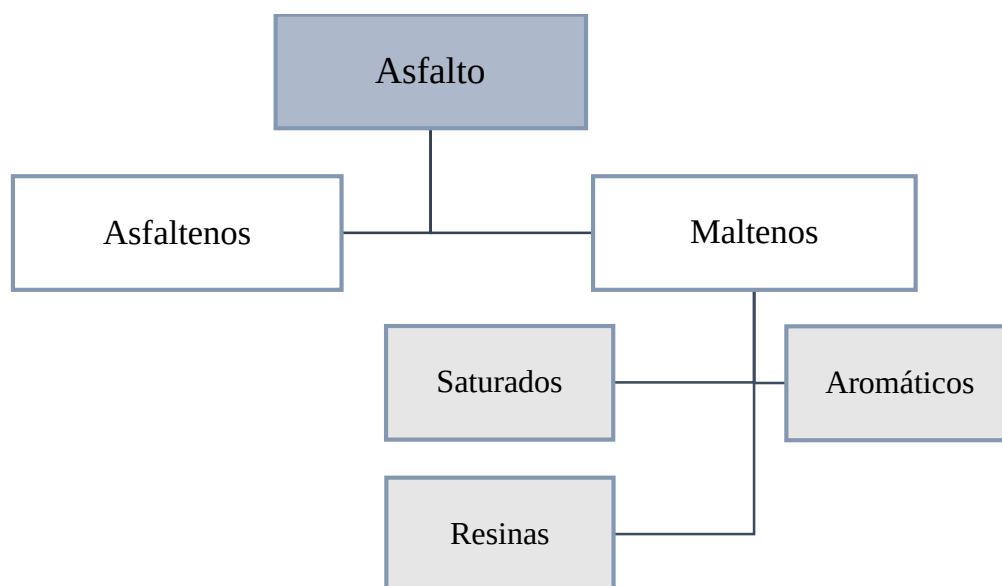


Figura 1.1. Composición química general del asfalto.

Se define como asfaltenos a la fracción de crudo insoluble en compuestos alifáticos de bajo peso molecular (n-pentano o n-heptano), pero solubles en tolueno o benceno; son compuestos polares cuyo peso molecular ronda entre 1000–100000 uma y su proporción en el asfalto varía de 5% a 25% en peso. Consta de estructuras complejas, formadas por anillos aromáticos ligados con cadenas alquílicas y ciclo alcanos, además de compuestos heterocíclicos que poseen oxígeno, nitrógeno y azufre. Su estructura básica y composición depende del crudo de procedencia.

La tabla 1.1 presenta la composición promedio de asfaltenos provenientes de diferentes regiones a nivel internacional (Delgado, 2006).

Tabla 1.1. Composición elemental de diferentes asfaltenos.

Origen	Agente Precipitante	Composición (% Peso)					Relaciones Atómicas			
		C	H	N	O	S	H/C	N/C	O/C	S/C
Canadá	n – pentano	79.5	8	1.2	3.8	7.5	1.21	0.013	0.036	0.035
	n – heptano	78.4	7.6	1.4	4.6	8	1.16	0.015	0.044	0.038
Irán	n – pentano	83.4	7.5	1.4	2.3	5	1.07	0.014	0.021	0.022
	n – heptano	84.2	7	1.6	1.4	5.8	1.00	0.016	0.012	0.026
Iraq	n – pentano	81.7	7.9	0.8	1.1	8.5	1.16	0.008	0.01	0.039
	n – heptano	80.7	7.1	0.9	1.5	9.8	1.06	0.01	0.014	0.046
Kuwait	n – pentano	82.4	7.9	0.9	1.4	7.4	1.14	0.009	0.014	0.034
	n – heptano	82.0	7.3	1.0	1.9	7.8	1.07	0.01	0.017	0.036

En cuanto a las relaciones atómicas, se puede apreciar una ligera diferencia que depende el agente de precipitación empleado, la relación Hidrógeno / Carbono de los asfaltenos obtenidos empleando n – heptano es más baja lo que indica su grado de aromaticidad; mientras que las relaciones Nitrógeno / Carbono, Oxígeno / Carbono y Azufre / Carbono usualmente son más elevadas debido a la alta proporción de heteroátomos en esta fracción.

Sin embargo, aunque es posible divisar una diferencia entre las relaciones atómicas de los diferentes asfaltenos. Acevedo S. y otros (1985) comprobaron que estas cantidades eran muy semejantes sin importar su sector de origen, por lo cual es posible tener una composición relativamente definida.

En la figura 1.2 se puede apreciar la estructura de algunos asfaltenos, que consiste principalmente en un núcleo aromático con cadenas alquílicas laterales y algunos heteroátomos incorporados en las estructuras cíclicas.

La determinación de esta estructura se lleva a cabo mediante técnicas analíticas entre las cuales destacan la difracción de rayos X, resonancia magnética nuclear, absorción óptica, espectroscopia molecular de fluorescencia, difracción de neutrones a pequeños ángulos, espectroscopia de masas, entre otras.

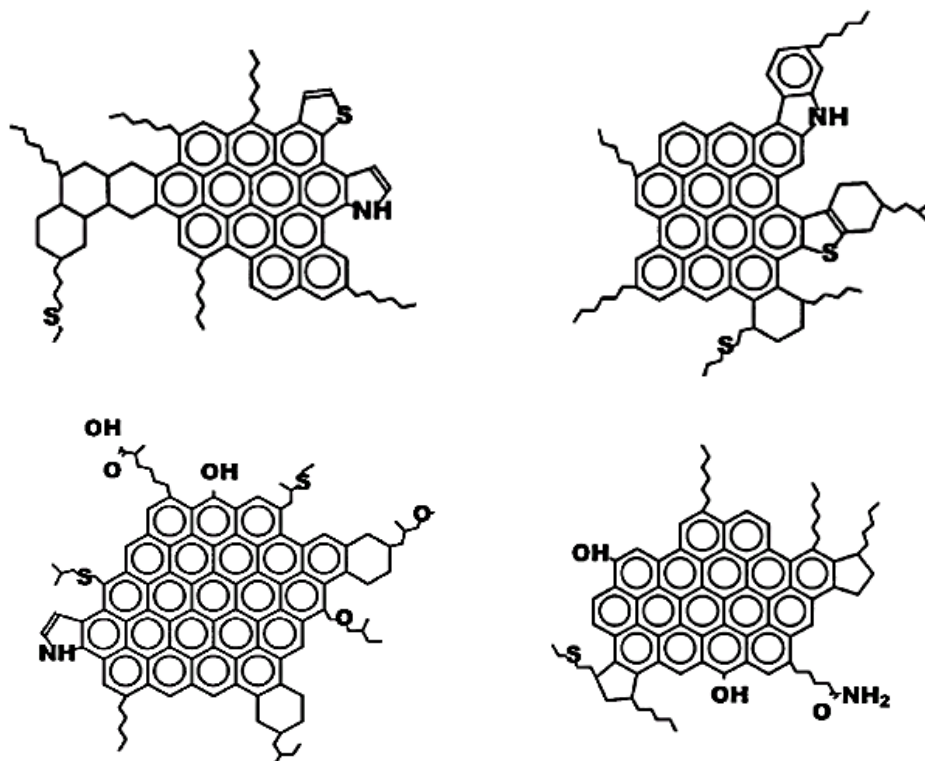


Figura 1.2 Estructura de diferentes asfaltenos.

Los maltenos son compuestos sólidos o semisólidos de alta polaridad y de coloración marrón claro. Son solubles en *n*-alcanos (*n*-heptano frecuentemente) y al igual que los asfaltenos son compuestos formados de carbono e hidrogeno pero con menor cantidad de heteroátomos. Estos a su vez se constituyen por resinas, aromáticos y saturados.

Las resinas son materiales adhesivos cuyo peso molecular varía entre 500 y 5000 uma, actúan como peptizantes o dispersantes de los asfaltenos, en otras palabras gracias a su alta polaridad el betún asfáltico es estable.

Los compuestos donde predominan las moléculas insaturadas con peso aproximado de 300 y 2000 uma son los aromáticos y constituyen la mayor parte de los asfaltos (40% – 65% en peso) son no polares y tienen la capacidad de actuar como solventes de otras cadenas hidrocarbonadas de alto peso molecular; de igual forma los saturados son compuestos no polares de peso molecular similar al de los aromáticos, pero su estructura consiste en cadenas de hidrocarburos alifáticos lineales y/o ramificadas muy poco reactivas.

1.1.2. Propiedades del asfalto

En general los betunes asfálticos comparten características semejantes, tal como color oscuro, buena adhesividad y permeabilidad frente al agua. Por otro lado, sus propiedades mecánicas son más complejas dependen de factores como la acción de carga, el tiempo y la temperatura a la que el asfalto sea sometido (Blazquez & Beivá García, 2000), y todo este complejo comportamiento se estudia desde el punto de vista de la reología.

Las propiedades físicas más importantes del asfalto, hablando de pavimentación de carreteras son las siguientes:

- a) Adhesividad: facilidad que presenta el betún asfáltico para adherirse a la superficie de una partícula mineral. Esta característica es muy importante cuando se desea obtener mezclas continuas y homogéneas, y puede mejorarse con la aplicación de agentes activantes.
- b) Viscosidad: se define como la resistencia que oponen las partículas a separarse, debido a los rozamientos internos del fluido. Varía con los cambios de temperatura.
- c) Susceptibilidad térmica: Indica que tan propenso es el fluido a variar sus propiedades reológicas principalmente la viscosidad, frente a la temperatura.
- d) Plasticidad: define el comportamiento mecánico del betún ante diferentes estados físicos y temporales de carga. Un asfalto poco plástico no soportará deformaciones excesivas sin que se produzcan grietas o desmenuzamiento.
- e) Envejecimiento: es un fenómeno de degradación y transformación química de los componentes del asfalto debido a la acción oxidante del aire, la presencia de humedad y radiaciones solares, lo que hace que se pierdan sus propiedades reológicas y adhesivas.

Resumiendo las características anteriores el asfalto ideal sería aquel que a altas temperaturas sea ligero y fácil de procesar, y que a temperatura ambiente sea lo suficientemente viscoso y consistente para resistir la acción continua de cargas de tráfico.

1.1.3. Obtención del betún asfáltico

En la destilación del petróleo el asfalto es el remanente, el petróleo en su estado primario o crudo, es una mezcla de compuestos orgánicos de estructura compleja y muy variada con diferentes pesos moleculares (Delgado, 2006), esta característica es el motivo por el cual la selección y diseño del método óptimo de refinación depende de la complejidad del crudo y los productos que se deseen extraer.

La ventaja a pesar que este proceso es bastante complejo radica en su extenso campo de aplicación, pues a partir de los componentes más livianos se puede obtener combustibles, aceites, fibras, plásticos, lubricantes, pinturas, entre otros; además de que el residuo (betunes asfálticos) procedente de su refinación es útil en la fabricación de adhesivos, construcción de viviendas y pavimentación de carreteras.

El petróleo se localiza naturalmente a grandes profundidades de la superficie terrestre y su composición cambia dependiendo de la procedencia del yacimiento así como su antigüedad, pero el promedio establecido es de 83% a 86% de carbono y entre el 11% y 13% de hidrógeno; y se puede decir que a mayor cantidad de carbonos existen más productos pesados (Zapién S. y otros 2016).

La obtención de los betunes asfálticos a partir de crudos se efectúa en refinerías, aplicando diversas técnicas industriales como la oxidación, en el que los betunes asfálticos se obtienen después de someter los componentes más pesados del crudo a un complicado proceso químico de oxidación; el cracking que consiste en romper físicamente los enlaces de grandes cadenas de hidrocarburos saturados, y la destilación, siendo esta última la más común a nivel nacional (Blazquez & Beivá García, 2000). La figura 1.3 describe gráficamente este proceso, que se puede definir como la separación de diferentes componentes del petróleo en base a su volatilidad.

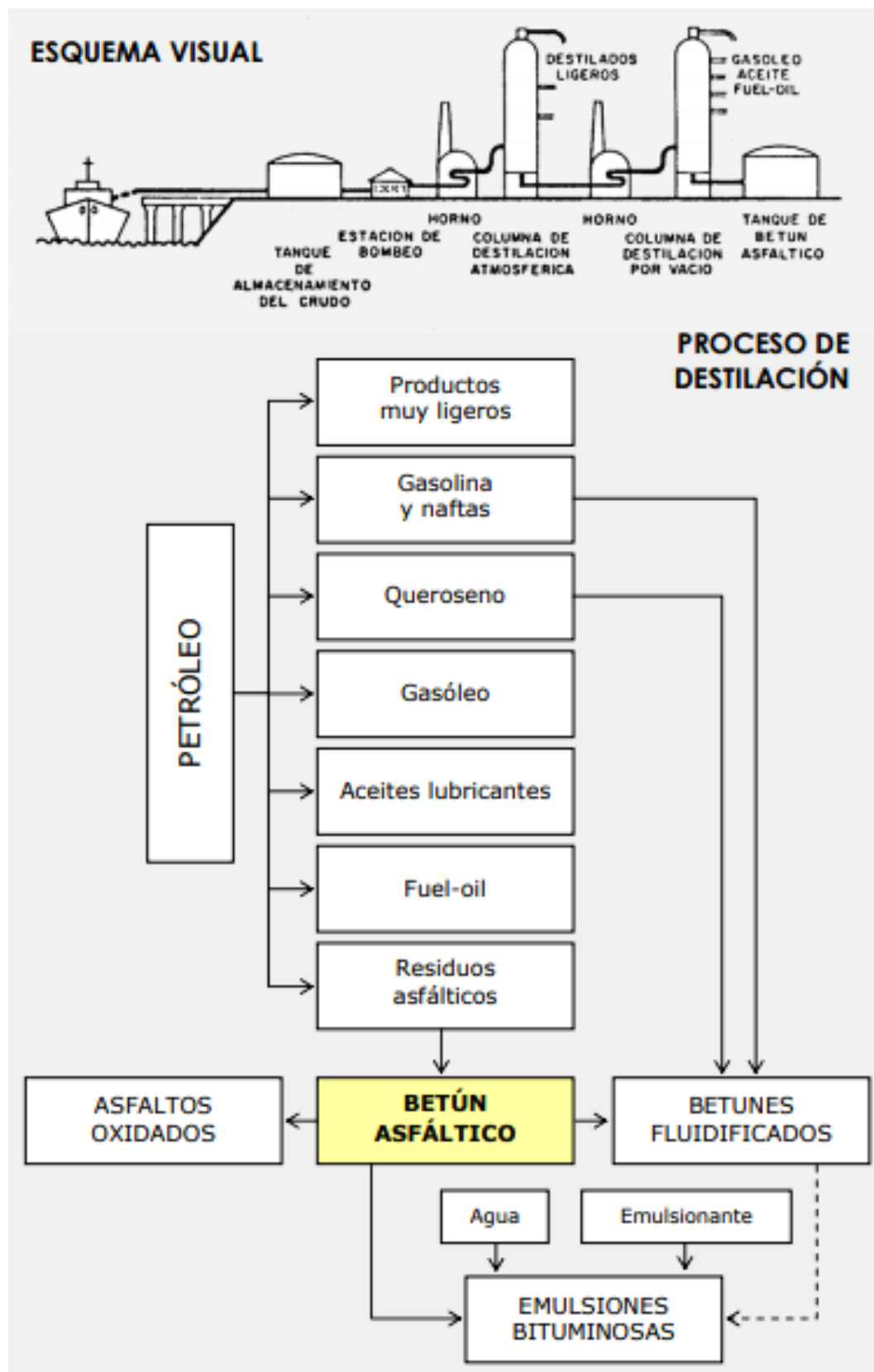


Figura 1.3. Destilación de los productos bituminosos.

1.1.4. Materiales asfálticos.

Las múltiples aplicaciones que posee este material han desarrollado la necesidad de modificar su estado físico e inclusive sus propiedades químicas, sin embargo estas variaciones deben preservar características esenciales como lo son la inmiscibilidad con el agua, una buena adhesividad, relación viscosidad – temperatura, plasticidad o resistencia a degradarse frente a los efectos abrasivos del ambiente. Los productos asfálticos comúnmente usados y sus aplicaciones se aprecian en el Anexo A.

1.1.5. Modificación de asfaltos

El término modificador es el nombre genérico para referirse a un agente que se utiliza como aditivo para ejercer influencia en una o varias de las propiedades de un material. La modificación de asfalto es una técnica empleada para su uso efectivo en la pavimentación de carreteras, su objetivo es producir ligantes con mejores características adhesivas, es decir, más viscosos a temperaturas elevadas para reducir ahuellamiento, y disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga aumentando su elasticidad (Angulo Rodríguez & Duarte Ayala, 2005).

Para que un aditivo modificador sea efectivo debe ser práctico, económico y a su vez cumplir con las siguientes características:

- Bajo costo
- Fácil incorporación a la mezcla asfáltica
- Resistente a la degradación a altas temperaturas
- Compatible con el asfalto
- Mejorar su fluidez a altas temperaturas sin hacer que el asfalto sea demasiado viscoso para su procesamiento o demasiado quebradizo a bajas temperaturas.

Los aditivos existentes en el mercado, empleados comúnmente en la modificación de asfalto se muestran en la tabla 1.2. (Herrera Lozano & Limón Limón, 1995)

Tabla 1.2. Modificadores asfálticos comunes y su distribuidor respectivo

Aditivos existentes en el mercado		
Producto	Proveedor	Tipo de producto
Kraton DI II 1	Shell	(SBS) Estireno - Butadieno
Kraton D1184	Shell	(SBS) Estireno - Butadieno
Europrene 405	Eniquen	(SBS) Estireno - Butadieno
Solprene 411	Negromex	(SBS) Estireno - Butadieno
Elvax 150	Dupont	(SBR) Estireno - Butadieno
Látex 115	Dupont	Hule
		(SBR) Estireno - Butadieno
Solprene 1205	Negromex	Hule
		(SBR) Estireno - Butadieno
Elvaloid	Dupont	Hule
		(SBR) Estireno - Butadieno
Chemcrete	Chemcrete Internal	Hule - Estireno
Gilsonita	American Gilsonite Co.	Modificador catalítico
Asbesto	Canadá Asbest Co.	Asfalteno Natural
		Fibras cortas de asbesto
Hule en polvo	Ruber products Co.	
	Planta Guadalajara	Hule molido de neumáticos
	Planta Lerma	

Como ya se mencionó, estos materiales usualmente son añadidos al asfalto con la finalidad de mejorar sus características intrínsecas, siendo los más empleados el polietileno (PE), el vinil acetato de etileno (EVA) y algunos copolímeros de estiro y butadieno; siendo el estireno–butadieno–estireno (SBS) el mayor empleado con este fin. (Zapién Castillo, S.f.)

1.2. Polímero estireno – butadieno – estireno (SBS)

Un polímero es una gran molécula construida por la repetición de pequeñas unidades químicas simples denominadas monómeros. En algunos casos la repetición es lineal, de forma semejante a los eslabones de una cadena. En otros casos las cadenas son ramificadas o interconectadas formando retículos tridimensionales (Fred W. Billmeyer, 1975).

De acuerdo a sus propiedades mecánicas los polímeros se pueden clasificar en dos grupos principales. Los más comunes son los termoplásticos, materiales que a temperaturas relativamente altas, se vuelven flexibles, y que se endurecen en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente.

Por otro lado, los elastómeros son polímeros con la capacidad de estirarse y regresar a su forma original, son amorfos y blandos pues a temperaturas ambiente están por encima de su temperatura de transición vítrea. Están formados por cadenas muy largas de monómeros que pueden ser tanto lineales como ramificadas y están entrelazadas tridimensionalmente.

La elasticidad que posee este tipo de materiales se debe a su capacidad de distribuir la tensión aplicada al cambiar la posición de sus cadenas monoméricas, mientras que los enlaces covalentes presentes en la estructura, aseguran que este recobrará su posición original una vez que cese la aplicación de la fuerza. Sin embargo, estos polímeros no tienen la capacidad de reciclarse, no de manera sencilla, ya que al calentarse en vez de fundirse se descomponen.

Cuando en la formación de la macromolécula durante la polimerización interviene solamente un tipo de monómero, el resultado es un homopolímero, figura 1.4. Caso contrario, si en la polimerización han intervenido dos o tres monómeros diferentes al producto se le llama copolímero o terpolímero respectivamente y las unidades repetitivas, comonómeros (Carey & Giuliano, 2006). La figura 1.5 ilustra la polimerización del copolímero en bloques estireno-butadieno.

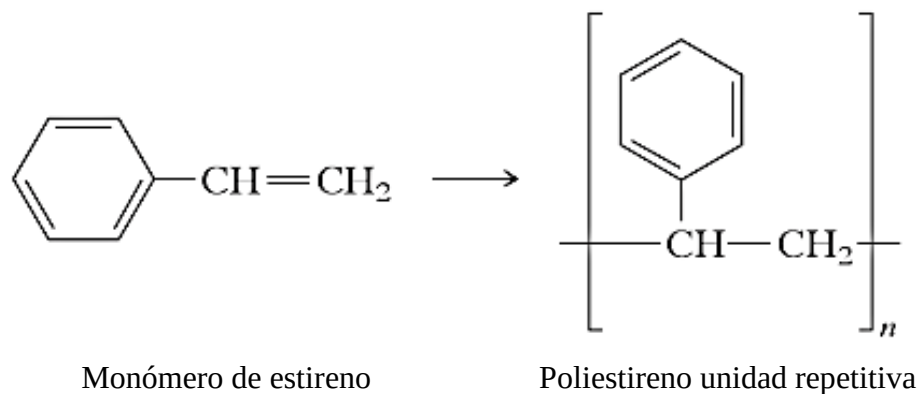


Figura 1.4. Polimerización por adición del estireno.

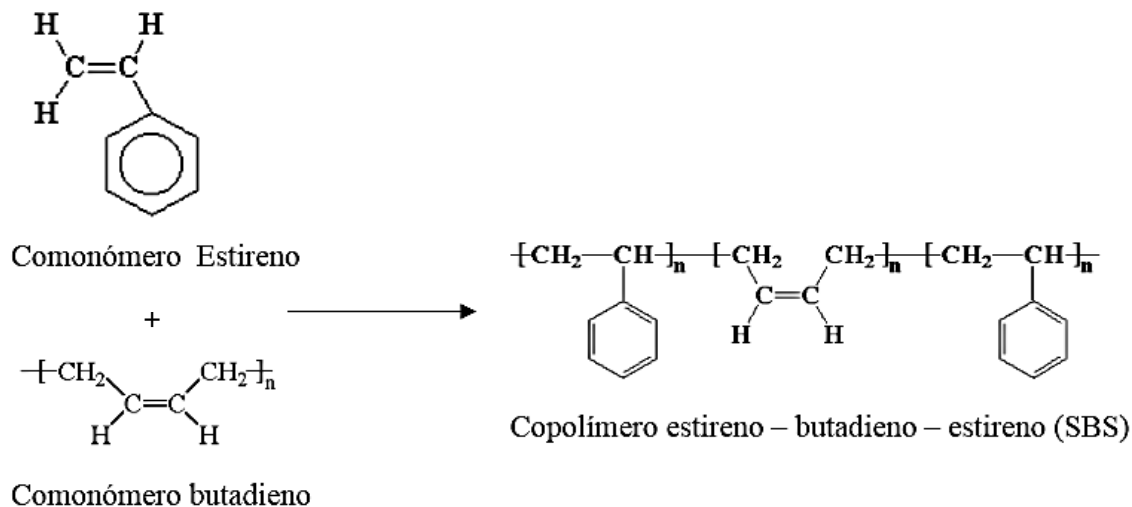


Figura 1.5. Reacción de polimerización del copolímero estireno – butadieno.

La obtención de copolímeros resulta una práctica muy habitual para conseguir estructuras con propiedades específicas, que cada homopolímero por separado no es capaz de ofrecer. Variando las proporciones relativas de cada monómero pueden obtenerse características mecánicas y de procesado adecuadas para aplicaciones específicas.

Los elastómeros del tipo termoestable y termoplástico son el resultado de este tipo de polimerización. Estos últimos son materiales poliméricos con características físicas tanto de los elastómeros como de los termoplásticos, son capaces de soportar grandes deformaciones elásticas y totalmente reutilizables. Se forman al combinar un polímero elastómero y un plástico; y generalmente se comportan de forma plástica y dúctil. La diferencia principal entre los elastómeros termoestables y los elastómeros termoplásticos es el grado de entrecruzamiento de sus cadenas, este es un factor estructural que contribuye a que el material adquiera mejores propiedades elásticas.

1.2.1. Estructura química del SBS

El copolímero más ampliamente utilizado como modificador de asfalto es el SBS, ya que como elastómero termoplástico reúne convenientemente los dominios rígidos de los bloques estirémonos dispersos en una matriz blanda de butadieno. Es un tipo de copolímero llamado

copolímero en bloque; su cadena principal está constituida por tres segmentos, el primero es una larga cadena de poliestireno, el del medio es una cadena de polibutadieno, y el último es otra larga sección de poliestireno, figura 1.6.

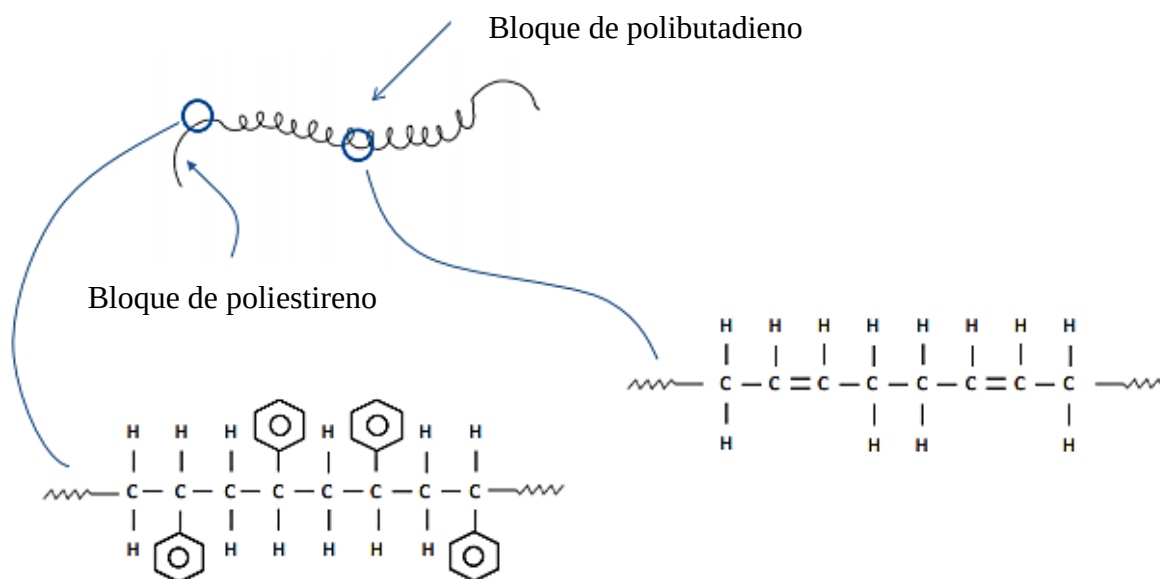


Figura 1.6. Representación esquemática de una cadena estireno – butadieno – estireno.

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 características similares. Las cadenas de poliestireno tienden a agruparse formando agregados mediante interacciones de baja intensidad que contribuyen a la formación de puntos de entrecruzamiento reversibles. Cuando un grupo estireno de una molécula de SBS se une a una de estas masas y la otra cadena de poliestireno de la misma molécula de SBS se une a otra masa, las diversas masas se ensamblan entre sí con las cadenas similares al caucho del polibutadieno, dándole la capacidad de conservar su forma después de ser estirado (Juárez D. y otros 2013).

La figura 1.7 muestra los bloques correspondientes a agregados de poliestireno, que son responsables de la formación de los puntos de entrecruzamiento reversibles. Lo que se debe a la fuerte polaridad del grupo estirénico/bencénico, dando lugar a la formación de enlaces dipolos permanentes que establecen interacciones de baja intensidad para constituir puntos de

entrecruzamiento. Debido a la debilidad de estas interacciones, la simple aplicación de calor es capaz de debilitarlas y llevar al material a condiciones de flujo, permitiendo el procesamiento del material como termoplástico.

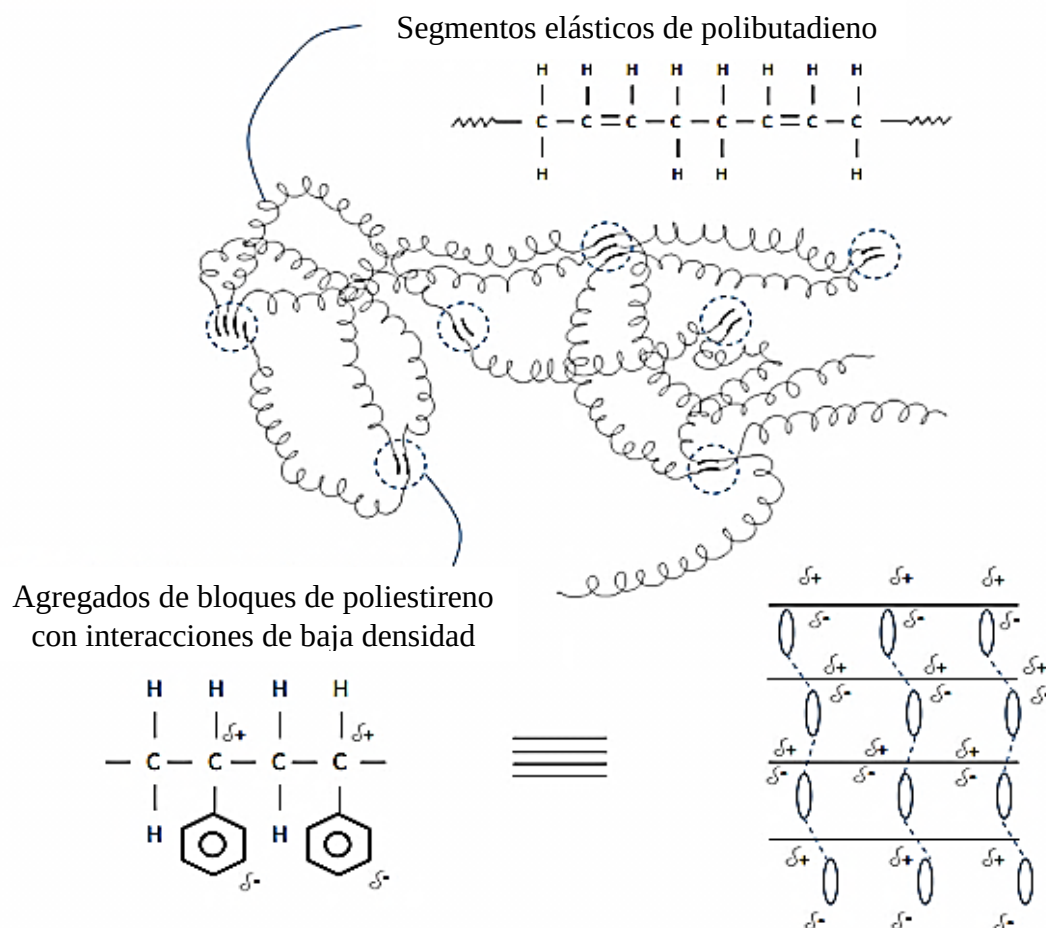


Figura 1.7. Estructura reticular del SBS, con zonas flexibles y puntos de entrecruzamiento reversibles.

1.2.2. Propiedades y aplicación

El SBS es un derivado del copolímero estireno–butadieno (SBR), esto lo convierte en uno de los cauchos sintéticos con mayor demanda a nivel mundial. Se desarrolló como alternativa para disminuir la aplicación de caucho natural. Las principales propiedades de los diferentes termoplásticos estirénicos son:

Propiedades mecánicas:

- Moderada resiliencia (cantidad de energía por unidad de volumen que almacena un material al deformarse elásticamente debido a una tensión aplicada).
- Excelente resistencia a la abrasión.
- Moderada resistencia al desgarro.
- Excelente resistencia al impacto.
- Moderada resistencia a la flexión.

Propiedades físicas:

- Temperatura de servicio: -10°C a 70°C .
- Baja resistencia a la intemperie (oxidación, ozono, luz solar).
- Excelente resistencia eléctrica.
- Muy baja permeabilidad a los gases.

Propiedades químicas:

- Buena resistencia al agua pero pobre resistencia al vapor de agua.
- No poseen resistencia a los hidrocarburos (alifáticos, aromáticos, clorados).
- Baja resistencia a ácidos diluidos, menor aún en caso de mayor concentración.
- Baja resistencia a los aceites (animal y vegetal).

Los cauchos sintéticos suelen contener un 25% de estireno y un 75% de butadieno y sus aplicaciones más importantes son la fabricación de neumáticos, espumas, empaques, suelas para zapatos, aislamiento de alambres y cables eléctricos.

Los copolímeros que contienen más butadieno (hasta 60%) se emplean en la fabricación de pinturas y recubrimientos acolchados. Otras aplicaciones son la fabricación de cinturones, mangueras para maquinarias y motores, juntas, y pedales de freno. En el área doméstica se encuentra en juguetes, masillas, esponjas, y baldosas. Entre los usos menos comunes esta la producción de productos sanitarios, guantes quirúrgicos y goma de mascar.

A pesar que un polímero por si sólo es capaz de transferir al asfalto u otros materiales sus características fisicoquímicas, estos usualmente son reforzados al mezclarse de forma

heterogénea con otros aditivos para crear un solo compuesto dotado de mejores propiedades físicas que mejoran la rigidez y la cohesión, asimismo haciendo su estructura más liviana y resistente.

Una manera de modificar polímeros es empleando fibras para obtener composites denominados por sus siglas en inglés FRB (Fiber Reinforced Plastics) o bien en español PRF (plásticos reforzados con fibras). Los criterios para la selección de estos materiales y su inclusión a una matriz polimérica tienen que ver con la compatibilidad refuerzo–polímero, el pleno conocimiento de sus características fisicoquímicas y deben estar totalmente libres de humedad. Haciendo alusión a los antecedentes las plumas son estructuras que contienen un 90% de queratina, con una estructura rígida característica a los materiales de alta resistencia y que después de ser sanitizadas pueden emplearse como refuerzo para una matriz polimérica;

1.3. Pluma de pollo (CF)

Las fibras naturales son proteínas de origen vegetal, animal o mineral, altamente resistentes a la mayoría de los ácidos orgánicos y que entre muchas otras propiedades destacan su abundancia, la capacidad de absorber dióxido de carbono del ambiente, bajo costo, baja densidad, además de ser un material renovable y biodegradable. Gracias a estas cualidades las fibras pueden ser empleadas para modificar las propiedades de algunos polímeros, además de otros materiales como el yeso o el asfalto.

En este caso, las plumas de pollo son estructuras fibrosas de queratina que conforman la piel de las aves, representan de un 5 a 7% del peso total de los pollos maduros, lo que equivale alrededor de 90 g por 1 kg de carne de pollo (Villareal Lucio y otros 2017).

1.3.1. Estructura de la pluma de pollo.

La pluma es una estructura muy compleja, que se puede describir como una lámina subdividida finamente, está compuesta por un eje central llamado raquis con aspecto de caña hueca, que a pesar de ser una estructura muy ligera es lo suficientemente rígido para mantener

la pluma firme. La parte inferior de la pluma que es más ancha y generalmente desnuda, se llama cálamo o cañón, por esta parte la pluma se inserta en la piel; a su vez el cálamo tiene un agujero en la parte inferior llamado ombligo por donde la pluma se alimenta durante su crecimiento.

El cálamo es hueco ya que la pluma es una estructura muerta como las uñas o el cabello, que cuando termina de crecer, los vasos sanguíneos que la alimentan se retiran quedando el espacio vacío; de igual forma el raquis está lleno de sustancias muertas, pigmentos y proteínas que quedaron ahí como resultado de su desarrollo (Reynoso, 2011).

Finalmente la pluma en su exterior está cubierta de bárbulas blandas que dan la textura de un tejido sumamente ligero; las bárbulas parten de láminas delgadas y rectas perpendiculares al raquis llamadas barbas distribuidas de forma paralela a lo largo del raquis. La estructura de las plumas se aprecia en la figura 1.8.

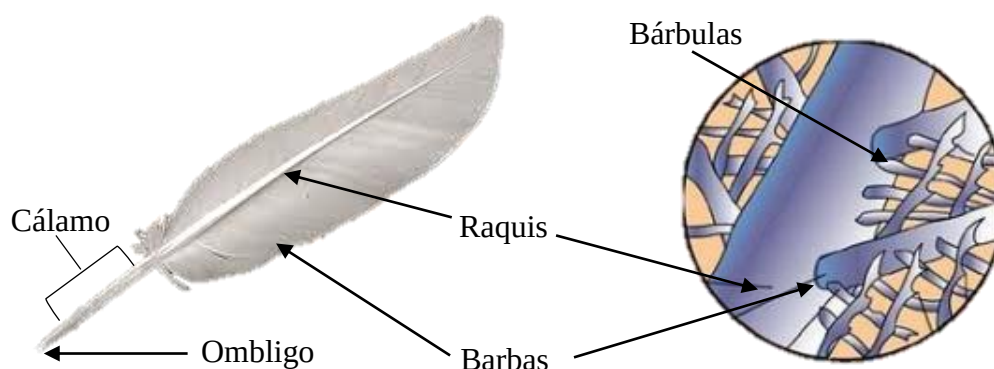


Figura 1.8. Estructura de la pluma de pollo.

Las plumas son fuentes de estructura natural, renovable, de bajo costo y hueca, que caracteriza su baja densidad (0.8 g/cm^3), son altamente flexibles e hidrofóbicos, donde su estructura tiene un alto contenido de carbono. También, son fibrosas y presentan buena compresibilidad y elasticidad, cuando se utiliza en productos textiles, películas y compuestos.

Belarmino D. y otros (2012) explica que a pluma se compone 90% de queratina, la cual es un polímero de origen natural caracterizado por ser un material ligero, de alta resistencia mecánica y térmica. La composición general de la queratina y sus tipos de enlaces se muestran en la figura 2.9.

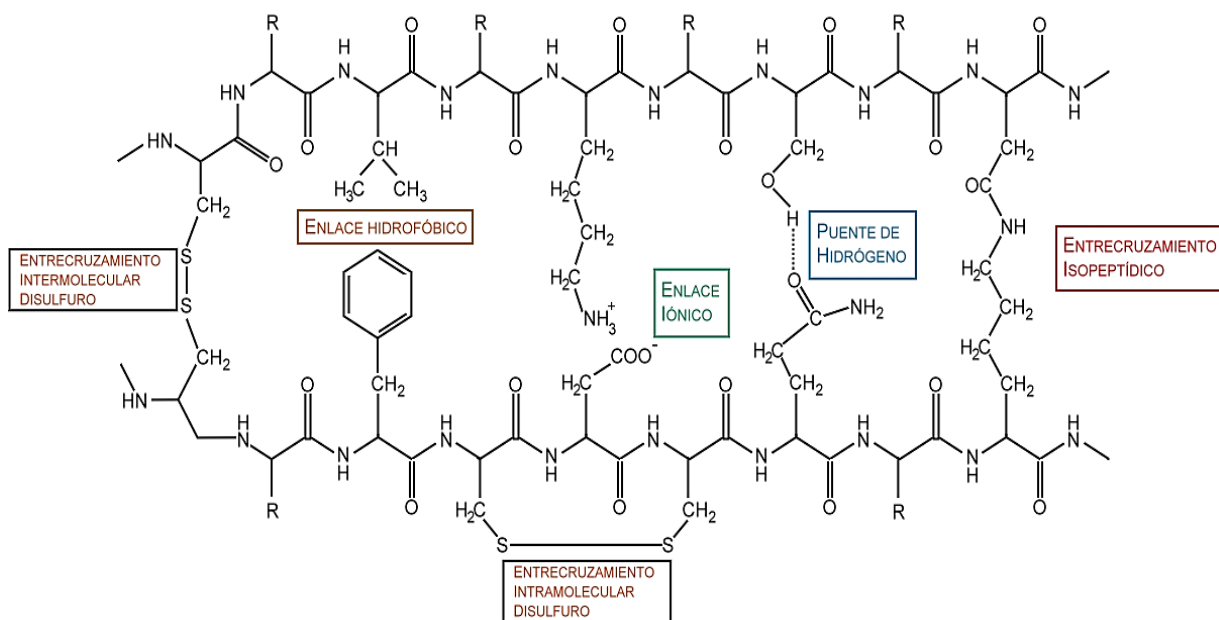


Figura 1.9. Estructura química general de la queratina.

La queratina presente en las plumas de pollo tiene una estructura característica de los materiales de alta resistencia mecánica. Se puede encontrar en dos arreglos diferentes, de forma α -hélice y β -plisada, figura 1.10. (Rye C. y otros 2013).

Como se aprecia en ambas figuras (1.9 y 1.10) la queratina comprende aproximadamente 20 aminoácidos, principalmente cisteína y su estructura consta de un carbono central unido a grupos funcionales amino -NH₂ y carboxílico -COOH; átomos de hidrógeno y azufre (grupo R).

Las barbas de la pluma de pollo contienen mayor cantidad de α – queratina, ya que se encuentran abundantemente en tejidos suaves, son ricas en cisteína y contienen menos cantidad de hidroxiprolina y prolina amino ácidos. Por otro lado, el raquis está estructurado de ambas formas, aunque su contenido es mayormente β – queratina; este tipo de queratina a su vez es rico en alanina y glicina, pobre en cisteína, hidroxiprolina y prolina (Sharma & Arun , 2016).

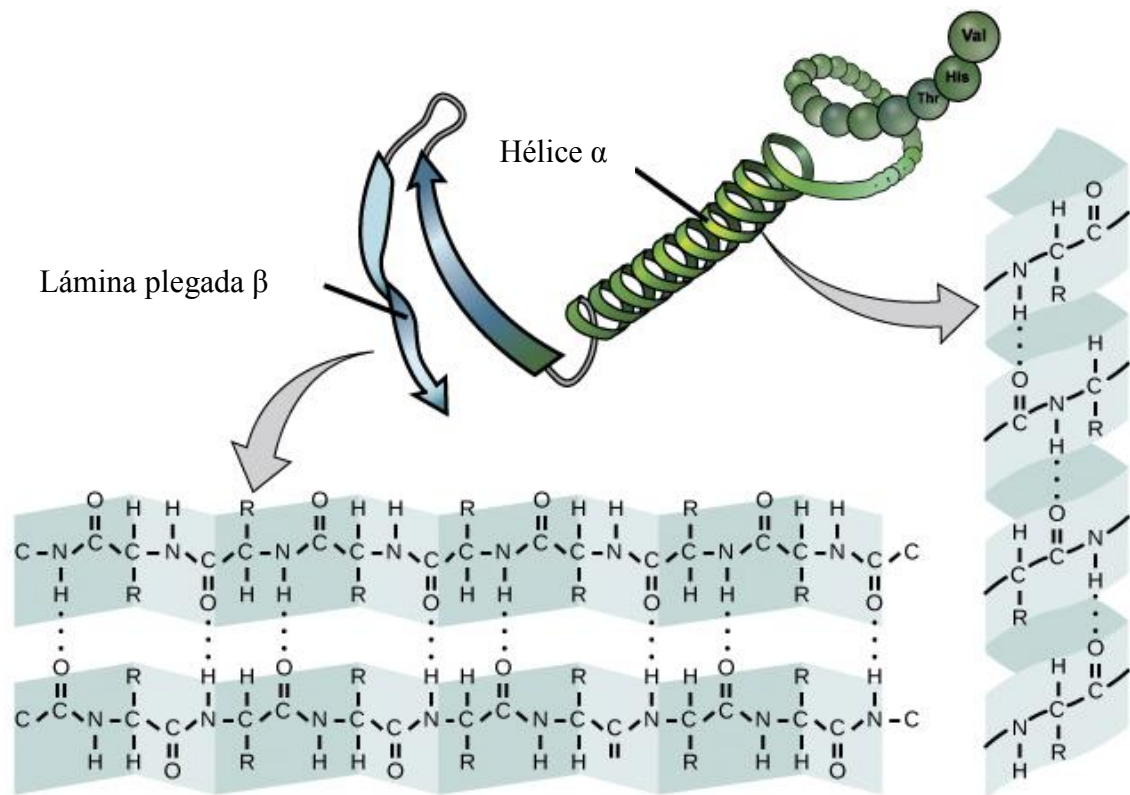


Figura 1.10. Estructura de la queratina α – helicoidal y β – plisada.

2. Metodología

Para la modificación de las propiedades fisicoquímicas del asfalto se utilizaron plumas de pollo suministradas por un rastro ubicado en el municipio de Altamira Tamaulipas. Previo a la preparación del composito la pluma de pollo se lavó y secó al exterior por un periodo de 48 horas para eliminar cualquier rastro de humedad, posteriormente fue separada físicamente en dos partes el raquis y las barbas, ya que en el raquis se encuentra la mayor parte de β -queratina.

También se utilizó copolímero tipo estireno-butadieno SBS 416 radial proporcionado por Dynasol elastómeros, con 30% de estireno total, formado mayormente por un bloque de estireno que da al polímero características típicas de termoplástico y con propiedades de caucho vulcanizado, sin requerir proceso de vulcanización. Físicamente se presenta en forma de grumo poroso y ligero de fácil manejo y disolución. Los datos técnicos pertenecientes a este material se pueden consultar en el anexo B.

El asfalto empleado en el desarrollo de este proyecto fue del tipo AC-20 EKBÉ, la caracterización del asfalto en estado virgen se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades fisicoquímicas del Asfalto AC-20 EKBÉ.

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 Brookfield 50rpm	135°C	CP	ASTM D - 4402	545
	160°C	CP		175
	190°C	CP		60.0
Separación de fases		$\Delta^{\circ}\text{C}$	ASTM D - 5892	0.00
Índice de penetración		---	Ecuación 2.1	-1.00

2.1. Preparación del composito

En la preparación de los compositos hule-pluma de pollo, primeramente para mejorar la dispersión de la queratina se aumentó su área superficial, para esto el raquis se cortó en trozos pequeños de 5mm aproximadamente y fue molido en un procesador de alimentos modelo

MF6021MX Picalica T-fal[®], seguidamente el producto se tamizó con una malla número 25 y tamaño de partícula de 707 micrones. En la figura 2.1 se aprecia el equipo antes descrito empleado para la molienda del raquis y el aspecto final de este, en forma de polvo blanco.

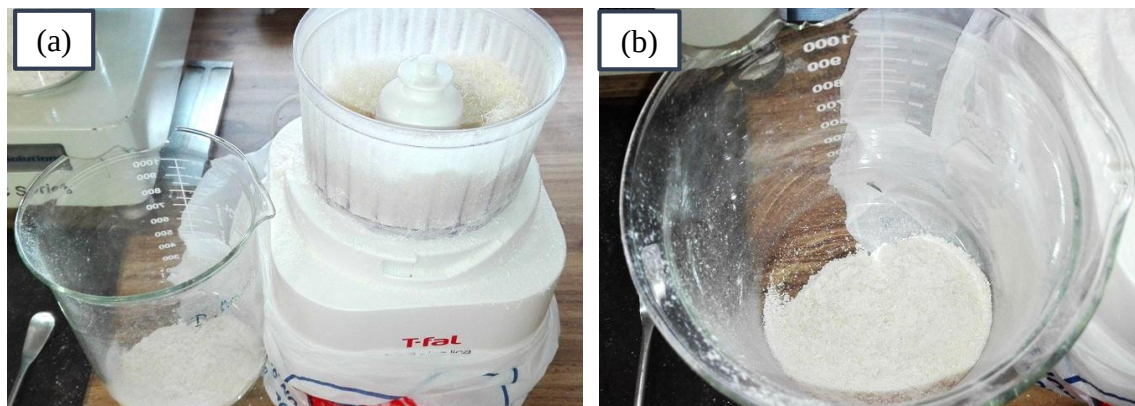


Figura 2.1. (a) Procesadora picalica T-fal y (b) Queratina uniformemente molida.

Para preparar el compuesto hule–queratina, se empleó un extrusor de doble usillo, modelo Intelli–Torque Plasticorder marca Brabender[®], con dimensiones (H x W x L) de 48” x 21.5” x 44.5”, ver figura 2.2. Se mezcló el SBS–416 y queratina molida a una relación de 1 PHR, partes por cien de hule. Elaborando tres compositos diferentes con temperatura de mezclado en frío de 60 y 80°C, y diferente velocidad de mezclado, 50, 70 y 100rpm.

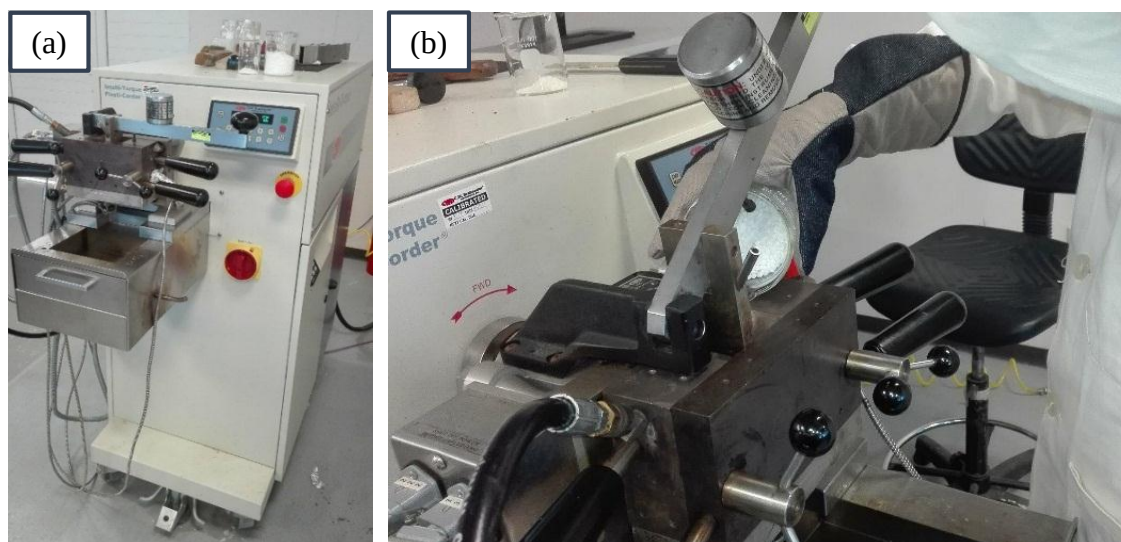


Figura 2.2. (a) y (b) Extrusor Brabender[®] Intelli–Plasticorder.

Para seleccionar las condiciones óptimas de temperatura y mezclado se hizo una prueba posterior teniendo en cuenta color, textura y rigidez del composito. Los compositos con mejor apariencia fueron separados y reducidos en tamaño a 2mm aproximadamente para mejor dispersión y menor tiempo de mezclado al preparar las mezclas asfálticas.

2.2. Preparación de mezclas asfálticas modificadas

Para la preparación de las mezclas modificadas se añadió aditivo al 2% del peso total del asfalto, se realizaron siete modificaciones:

- A. Asfalto–queratina molida (raquis)
- B. Asfalto–queratina (pluma de pollo completa, barbas + raquis)
- C. Asfalto–SBS416
- D. Asfalto–composito 70rpm
- E. Asfalto–composito 50rpm
- F. Asfalto–2% (SBS416 + queratina 1PHR)
- G. Asfalto–2% (queratina 1PHR + SBS416)

La mezcla A. Asfalto – queratina molida (raquis) se preparó con la finalidad de ratificar si el uso de la queratina como aditivo pudiese representar una mejora en las propiedades fisicoquímicas del asfalto. De igual forma se trabajó con una variante física utilizando la pluma de pollo completa (mezcla B) lo que significa la presencia de mayor contenido de α – queratina. Esta última se preparó pulverizando la pluma manualmente en un molino de metal obteniendo un material de bajo peso y muy denso, ver figura 2.3.



Figura 2.3. Pluma de pollo molida manualmente (barbas + raquis).

Como punto de comparación se elaboró la muestra C. Asfalto–SBS 416. También modificó el asfalto utilizando dos de los compositos preparados mediante el procedimiento 2.1 (mezclas D y E), mientras que las últimas dos combinaciones se realizaron adicionando los modificadores hule–queratina por separado al asfalto, y no como un composito.

El mezclado se realizó con un equipo IKA–Eurostar Power control-visc 6000 Overhead Stirrer que se muestra en la figura 2.4, compuesto por un eje vertical que en su extremo inferior tiene unas paletas 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, moderado por un controlador.

Como reactor se utilizaron latas de metal de 500 ml, se pesaron y se vertió asfalto en ellas, se registró el nuevo peso y por diferencia se calculó es peso del asfalto sólo.



Figura 2.4. Equipo de calentamiento y mezclado IKA–Eurostar 6000.

Para preparar las mezclas modificadas primero se precalentó el bloque metálico durante 1 hora, la modificación se realizó en un periodo de 90 minutos y todos los aditivos fueron respectivamente añadidos después de un lapso de 30 minutos iniciado el calentamiento, a una

relación del 2% en peso del asfalto, las mezclas se supervisaron de forma visual por intervalos de 30 minutos. En este proceso se mantuvo un control de temperatura a 190°C (P.F. del asfalto) y velocidad de 1200 rpm aumentado gradualmente hasta 1500 rpm para lograr la mejor dispersión posible.

2.3. Caracterización de mezclas asfálticas

La caracterización de materiales se refiere a la identificación de un material a partir del estudio de sus propiedades fisicoquímicas, estructurales, entre otras. Para ello, dependiendo del tipo de material se aplican técnicas de caracterización, y una vez conocidas sus características se puede establecer su naturaleza y sus posibles aplicaciones. En el caso de los asfaltos existen métodos que permite conocer su comportamiento a altas y bajas temperaturas, para determinar el fin al que será destinado o si reúne las características necesarias para ser aplicado.

Todas las caracterizaciones descritas a continuación fueron realizadas a altas temperaturas después del mezclado asfalto-aditivo, dejando que la mezcla reposara un día en los respectivos moldes para cada prueba.

2.3.1. Viscosidad dinámica

En este análisis se determina la viscosidad aparente del asfalto, es decir la viscosidad de un fluido medida a una determinada velocidad de corte y a una temperatura fija. Permite calcular una medida de fricción interna del fluido lo que se debe a su natural resistencia a fluir, esta 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.

Para determinar la viscosidad dinámica se utilizó un viscosímetro Brookfield modelo DV-II+ Pro, ver figura 2.5, que consiste en dos cilindros que comparten el mismo eje, el cilindro superior gira a velocidad constante mientras que el inferior mantiene la muestra asfáltica a una temperatura fija. Este equipo calcula la viscosidad captando el par de torsión necesario para

hacer girar a velocidad constante el torque inmerso en la muestra, donde el par de torsión es proporcional a la resistencia viscosa sobre el eje sumergido, y en consecuencia, a la viscosidad del fluido.

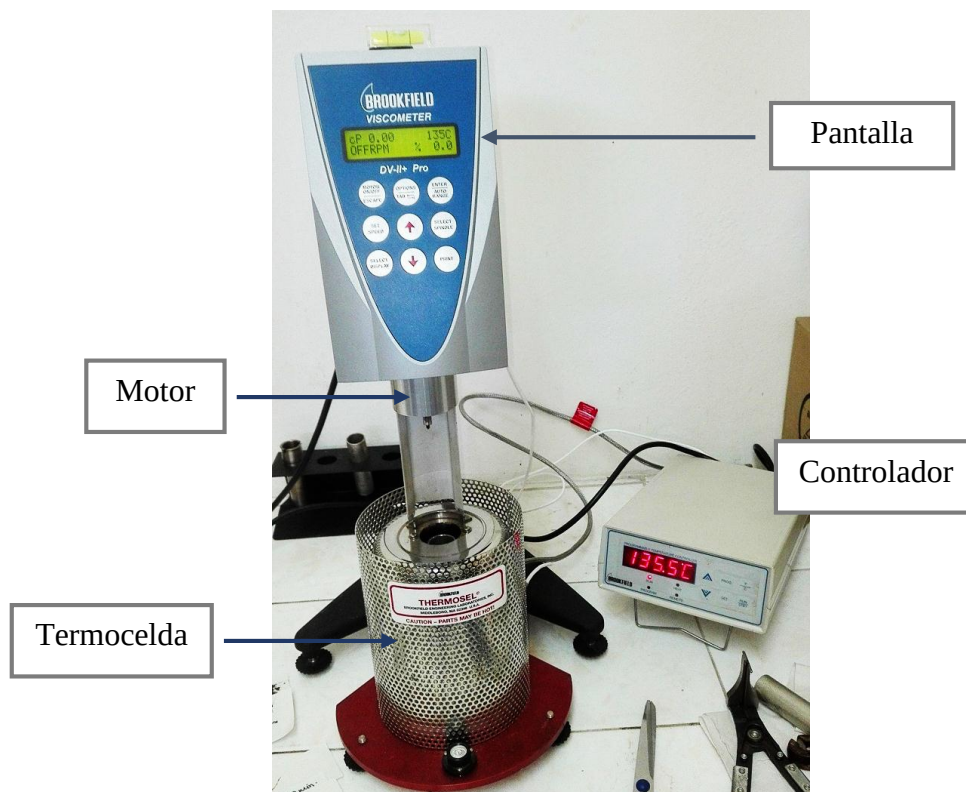


Figura 2.5. Componentes del Viscosímetro Brookfield DV-II+Pro.

En la operación primero se revisa que el viscosímetro este calibrado, de lo contrario se debe calibrar, después de encender el equipo y fijar la temperatura deseada en el controlador, se debe esperar a que la temperatura de la termocelda llegue al setpoint (15min. aproximadamente). Para la selección del torque se tomó como referencia el método ASTM D4402 que describe las siguientes condiciones 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 cada tipo de vástago 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

Considerando la norma se midió la viscosidad de 10.5gr de muestra asfáltica, para esto se calienta la muestra durante 30 minutos, después se ambienta el spindle #27 por 10 minutos, cumplido este tiempo se monta el torque y se procede 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 deben realizar en un lapso de 60 segundos.

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

El análisis ring and ball determina el punto de ablandamiento del asfalto es decir, la temperatura a la cual los asfaltos pasan de un estado sólido a otro semi-líquido. Se tomó como referencia el método ASTM D36, que señala el uso 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 con la muestra asfáltica sobre una superficie metálica cubierta con vaselina, después se colocan en la estructura y encima de estos las esferas y posteriormente se sumergen en 900ml de glicerina dejando ambientar por 15 minutos, por último se calienta a razón de 6°C/min y se registra la temperatura a la cual las esferas tocan el límite señalado por la estructura traspasando el asfalto. El equipo empleado para esta caracterización se muestra en la figura 2.6.



Figura 2.6. Equipo empleado en el análisis Ring & Ball.

2.3.3. Caracterización por separación de fases

La caracterización por separación de fases determina la compatibilidad asfalto – modificador, sometiendo a la muestra a cambios drásticos de temperatura (envejecimiento), mide la estabilidad al almacenamiento a altas temperaturas del asfalto modificado y en general es un parámetro que indica la eficiencia de la modificación. El envejecimiento ocurre cuando se producen una serie de cambios en las propiedades de los materiales, las principales causas de este fenómeno es la pérdida de volátiles y la oxidación de ciertas moléculas con la formación de interacciones fuertes entre grupos que contiene oxígeno.

Para llevar a cabo este análisis se siguió la norma ASTM D5892, sometiendo a la mezcla de asfalto a condiciones extremas de envejecimiento; para esto se vierte 50 g de la muestra en un tubo de aluminio colapsible, ver figura 2.7, con dimensiones de 25 mm de diámetro y 144 mm de altura, el cual debe sellarse y mantenerse en forma vertical.



Figura 2.7. Tubo de aluminio colapsible para separación de fases.

Posteriormente se calienta en una estufa a $163 \pm 6^\circ\text{C}$ por 48 horas, al término de este periodo el contenedor de aluminio se coloca en un congelador a $-7 \pm 6^\circ\text{C}$ por un mínimo de 4 horas para solidificar la muestra. Una vez que se remueve del congelador, se corta el tubo en tres partes iguales, la sección media se descarta y los extremos se colocan en charolas de aluminio que se llevan a la estufa a $163 \pm 6^\circ\text{C}$ el tiempo necesario para que el asfalto fluya y se vierta en los moldes para Ring and Ball.

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

- Si $\text{TRB (sup)} - \text{TRB (inf)} \leq 3^\circ\text{C}$: buena estabilidad al almacenamiento a altas temperaturas.
- Si $\text{TRB (sup)} - \text{TRB (inf)} \geq 3^\circ\text{C}$: Inestable.

2.3.4. Caracterización por penetración y cálculo del índice de penetración

El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico, esta caracterización 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 2.8



Figura 2.8. Penetrómetro digital Koehler K95500.

La caracterización se lleva 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, figura 2.9. 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, el Instituto del Asfalto clasifica los asfaltos para pavimentación en cuatro grados con penetraciones comprendidas entre 60–70, 85–100, 120–150 y 200–300.

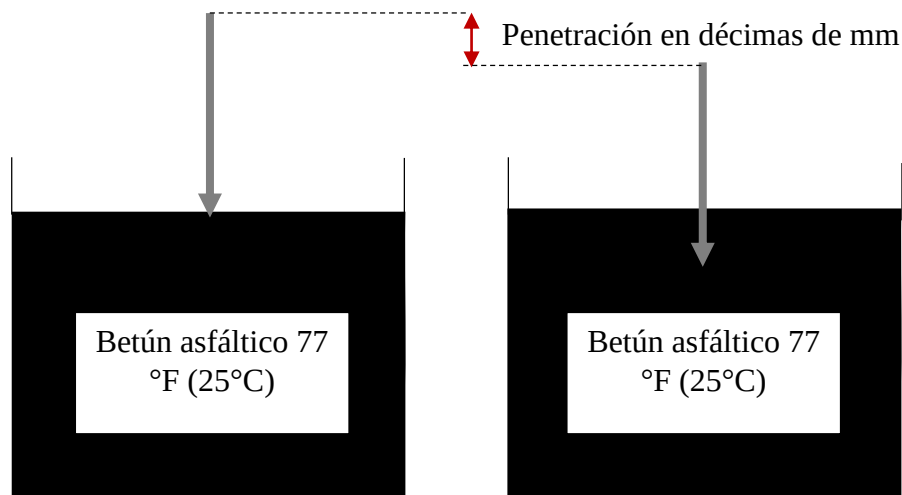


Figura 2.9. Ensayo normal de penetración.

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.

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

Donde:

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

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

P = penetración en 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 contribuyo al desarrollo de este método, por medio de un microscopio marca Carl Zeiss Modelo Axio Tech n/s 180935 óptica: 20x, el cual separa la luz fluorescente emitida que brilla contra un fondo oscuro lo que la hace perceptible.

Esta técnica permite determinar el nivel de dispersión y compatibilidad entre los componentes de las mezclas asfálticas, se fundamenta en la fluorescencia que es un fenómeno producido cuando una muestra absorbe radiación electromagnética, estado excitado, que al relajarse puede transferir la energía como calor o bien emitiendo radiación a una menor longitud de onda.

3. Resultados y discusiones.

3.1. Selección de los compositos.

Después de preparar las mezclas asfálticas a partir del procedimiento 2.1, se analizaron visualmente los compositos teniendo en cuenta color, rigidez y textura, ver figura 3.1.

Después de esto el composito SBS–416/queratina, 65°C y 100rpm se descartó por ser más opaco y duro al tacto en comparación con los otros dos compositos; dichas características pueden ser aludidas a la temperatura de mezclado, siendo 65°C insuficientes para que el material se homogeneizará totalmente, además se apreció que 100 rpm era una velocidad demasiado alta, pues se perdió un poco de hule y queratina.

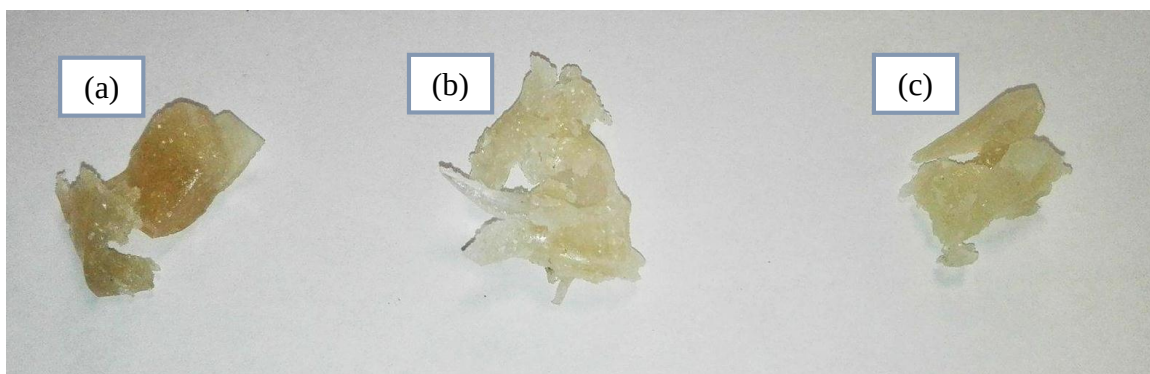


Figura 3.1. Compositos SBS – 416/queratina, (a) 65°C y 100rpm, (b) 80°C y 50 rpm y (c) 80°C y 70rpm.

3.2. Mezclas asfálticas.

La preparación de las mezclas de asfalto se realizó en un tiempo de 90 min. Para mantener un control en cuanto a su dispersión, se inspeccionó la consistencia después de los primeros 20 minutos de mezclado, a los 40, 60 y finalmente a 90 min. Todas las muestras asfálticas aparentaron buena homogeneidad, a excepción de la B asfalto–queratina (barbas + raquis), ver figura 3.2.

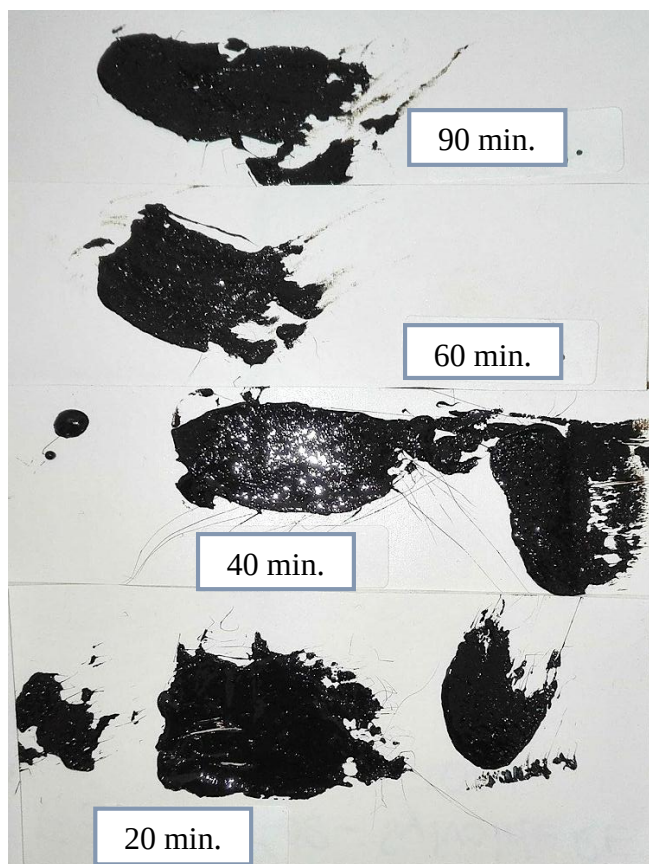


Figura 3.2. Dispersión de la mezcla B. Asfalto–queratina (barbas + raquis).

Analizando la figura se puede observar que a los primeros 20 minutos, distribuir la muestra sobre la superficie plástica era difícil, pues el asfalto y la pluma lucían parcialmente heterogéneos, por lo tanto el material era viscoso y muy denso.

Pasados 40 minutos, la mezcla fue mucho más ligera pero aun grumosa. Y en los últimos 50 minutos de mezclado parecía más manejable, no obstante, al contener las barbas de la pluma que son de muy bajo peso molecular, la mezcla seguía presentando grumos.

Belarmino D. y otros (2012) explican que al calentar la proteína queratina, se forman enlaces cruzados, que fortalecen su estructura; y tal vez este efecto se pueda atribuir a su escasa miscibilidad con el asfalto. Esta característica física habla de propiedades intermedias, ya que su alta viscosidad garantiza un material resistente a deformaciones, pero al no ser del todo homogéneo, posiblemente reflejaría otros problemas como agrietamiento o desmenuzamiento.

3.3. Prueba de temperatura de ablandamiento (Ring and Ball).

El punto de ablandamiento es la temperatura a la cual el asfalto cambia de un estado sólido a otro semi-líquido, y la adición de un aditivo modificante puede representar un aumento importante en esta propiedad física del asfalto. Las temperaturas registradas durante la caracterización de las muestras de asfalto se aprecian en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Temperaturas de reblandecimiento de las mezclas asfálticas.

Mezcla asfáltica	T _{RB} [°C]
A. Asfalto – queratina molida (raquis)	63.25
B. Asfalto – queratina (pluma de pollo completa, barbas + raquis)	64.50
C. Asfalto – SBS416	63.00
D. Asfalto – 2% Composito 70 rpm	60.00
E. Asfalto – 2% Composito 50 rpm	60.00
F. Asfalto – 2%(SBS416 + 1PHRqueratina)	54.25
G. Asfalto – 2%(1PHR queratina + SBS416)	60.00

Sin embargo, para establecer una comparación aceptable entre el asfalto virgen y los valores obtenidos, se hace uso del concepto de índice de modificación (Im), este proporciona una medida cuantitativa de eficiencia de la modificación y se calcula por medio de la Ecuación 3.1.

$$\text{Índice de modificación} = \frac{\text{Propiedad del asfalto modificado}}{\text{propiedad del asfalto virgen}} \times 100 \dots\dots\dots (3.1)$$

Donde:

- Si $Im \geq 100\%$ la propiedad del asfalto modificado rebasa la del asfalto original mientras que
- Si $Im \leq 100\%$ la propiedad medida en el asfalto modificado es más baja que la propiedad primigenia del asfalto sin modificar

A partir de la ecuación anterior se elaboró la tabla 3.2 que muestra el índice de modificación para cada mezcla tomando como blanco TRB = 60°C del asfalto AC-20 EKBÉ y las temperaturas de reblandecimiento de la tabla 3.1.

Tabla 3.2. Índice de modificación, caracterización por ring and ball.

Mezcla asfáltica	Im[%]
A. Asfalto – queratina molida (raquis)	105.42
B. Asfalto – queratina (barbas + raquis)	107.50
C. Asfalto – 2% SBS416	105.00
D. Asfalto – 2% Composito 70 rpm	100.00
E. Asfalto – 2% Composito 50 rpm	100.00
F. Asfalto – 2%(SBS416 + 1PHR queratina)	90.42
G. Asfalto – 2%(1PHR queratina + SBS416)	100.00

Se puede apreciar que el punto máximo de este parámetro lo alcanzó la mezcla B. Asfalto–queratina (barbas + raquis) con una TRB de 64.5°C e Im =107.5% a comparación del asfalto virgen, esto se debe a la estructura fibrosa de la pluma de pollo que al ser un material denso y de bajo peso molecular provocó que el asfalto adoptara esta apariencia haciéndolo más resistente a la deformación ejercida por la esfera metálica.

De igual forma en el caso de las mezclas A. Asfalto–2% queratina molida y C. Asfalto–2% SBS412 esta propiedad rebasa al asfalto no modificado, también se observa que la modificación efectuada con queratina concede al asfalto propiedades similares a las obtenidas mediante un hule sintético como lo es el SBS. Por otro lado, la adición de un composito (mezclas D y E) no se reflejó en un incremento de la TRB. La adición de los modificadores por separado en el caso de la mezcla G. Asfalto–2% (1PHR queratina + SBS416) implicó un descenso en este parámetro, mientras que la F. Asfalto–2% (SBS416 + 1PHR queratina) permaneció en 60°C.

Si estos resultados se relacionan con lo estimado por (Arabani & Seyed, 2017), usar como aditivo 2% de queratina supone un mejor punto de ablandamiento para el asfalto que emplear 5% de ceniza de cascara de arroz. Comparando las dos modificaciones efectuadas con 2% de queratina, es lógico suponer que la TRB para la mezcla B sea mayor puesto que al emplear toda la pluma y no sólo el raquis la mezcla es más rica en fibra por lo tanto también espesa y

viscosa. Aunque no se aprecia una gran mejoría para este parámetro las mezclas A, B, C, D, E y F satisfacen el mínimo punto de ablandamiento para asfaltos modificados establecido por la norma N-CMT-4-05-001-05 de 55°C.

3.4. Viscosidad dinámica

Este análisis se realizó a tres temperaturas 135, 160 y 190°C según el método establecido ASTM D4402 a las cuales el asfalto se comporta parcialmente como fluido; y cinco velocidades de corte 20, 30, 50, 60 y 100 rpm, en las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 se compara la viscosidad dinámica en unidades de centipoise (cP) correspondiente a las mezclas A, C, F y G contra las diferentes velocidades de corte en rpm. De forma cuantitativa en la tabla 3.3 se aprecian las viscosidades obtenidas para cada mezcla a una velocidad y temperatura determinadas.

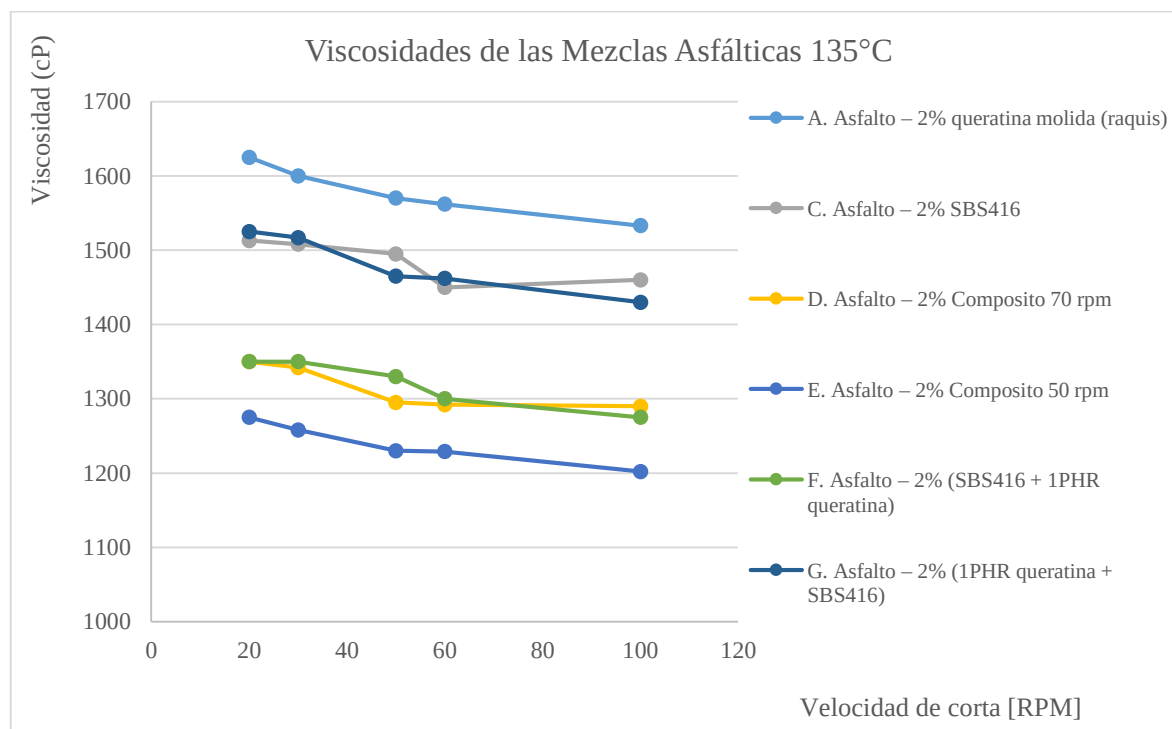


Figura 3.3. Viscosidad dinámica de mezclas asfálticas a 135°C.

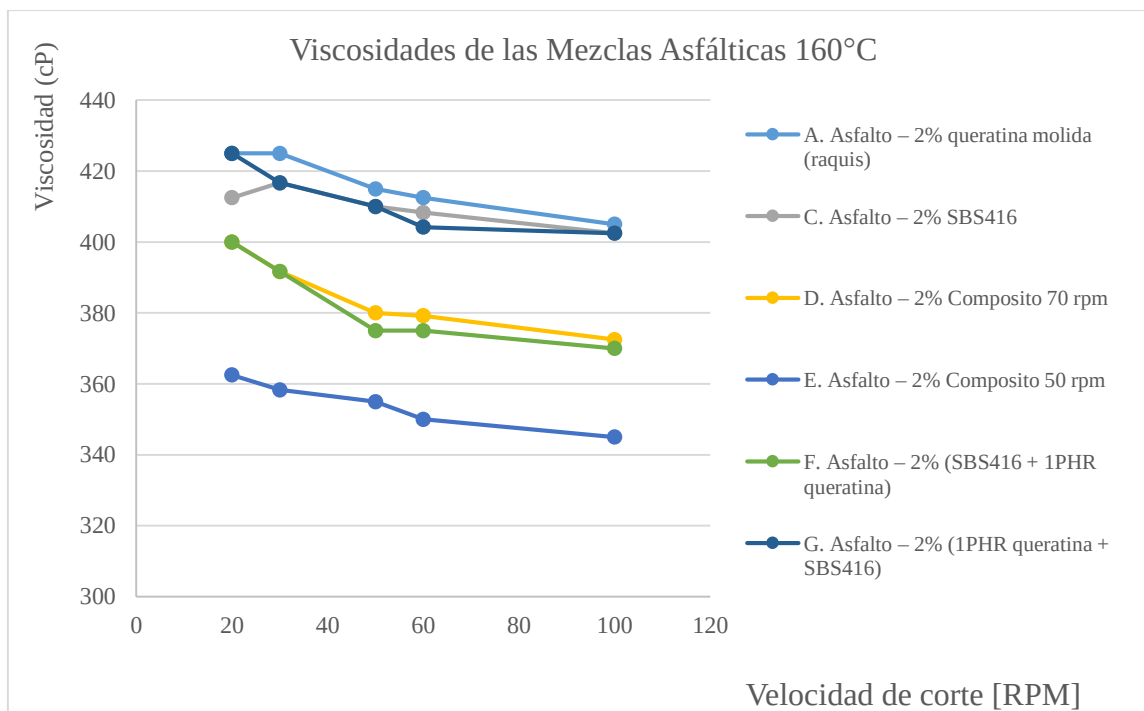


Figura 3.4. Viscosidad dinámica de mezclas asfálticas a 160°C.

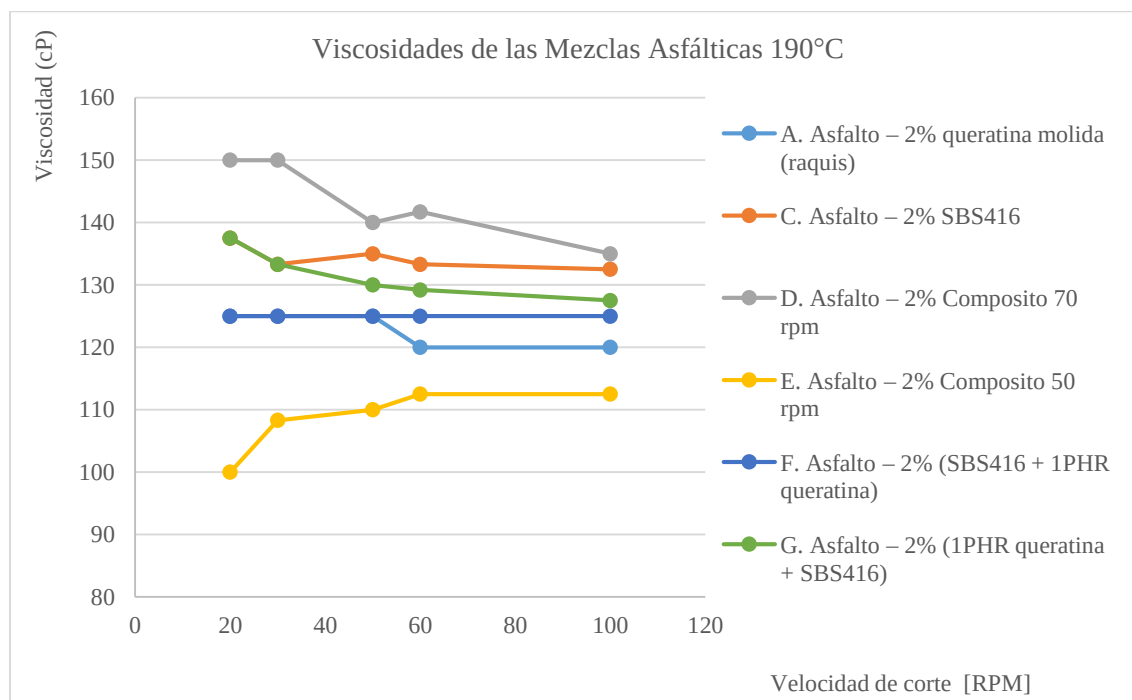


Figura 3.5. Viscosidad dinámica de mezclas asfálticas a 190°C.

Tabla 3.3. Viscosidades a diferentes temperaturas de mezclas asfálticas.

Mezcla asfáltica	RPM	Viscosidades [Cp]		
		135°C	160°C	190°C
A. Asfalto – queratina molida (raquis)	20.0	1625	425.0	125.0
	30.0	1600	425.0	125.0
	50.0	1570	415.0	125.0
	60.0	1562	412.5	120.0
	100	1533	405.0	120.0
B. Asfalto – queratina (pluma de pollo completa, barbas + raquis)	20.0	3813	1563	700.0
	30.0	3325	1317	625.0
	50.0	2700	1170	525.0
	60.0	2621	1021	500.0
	100	2330	875	450.0
C. Asfalto – 2% SBS416	20.0	1513	412.5	137.5
	30.0	1508	416.7	133.3
	50.0	1495	410.0	135.0
	60.0	1450	408.3	133.3
	100	1460	402.5	132.5
D. Asfalto – 2% Composito 70 rpm	20.0	1350	400.0	150.0
	30.0	1342	391.7	150.0
	50.0	1295	380.0	140.0
	60.0	1292	379.2	141.7
	100	1290	372.5	135.0
E. Asfalto – 2% Composito 50 rpm	20.0	1275	362.5	100.0
	30.0	1258	358.3	108.3
	50.0	1230	355.0	110.0
	60.0	1229	350.0	112.5
	100	1202	345.0	112.5
F. Asfalto – 2%(SBS416 + 1PHR queratina)	20.0	1350	400.0	125.0
	30.0	1350	391.7	125.0
	50.0	1330	375.0	125.0
	60.0	1300	375.0	125.0
	100	1275	370.0	125.0
G. Asfalto – 2%(1PHR queratina + SBS416)	20.0	1525	425.0	137.5
	30.0	1517	416.7	133.3
	50.0	1465	410.0	130.0
	60.0	1462	404.2	129.2
	100	1430	402.5	127.5

A simple vista, en las figuras 3.3 a la 3.5 se puede apreciar que al aumentar la velocidad de corte, el comportamiento de la mezcla presenta un efecto newtoniano, el cual se hace más notorio a medida que aumenta la temperatura. Pero, recordando el concepto establecido por Newton para un fluido newtoniano, la viscosidad de cada muestra asfáltica modificada va a depender únicamente de la temperatura y no de otros factores (en este caso, la velocidad de corte), de tal forma que la relación lineal existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad genere una pendiente constante y por consiguiente mantenga su viscosidad, lo que explicaría el comportamiento semi-lineal que se puede apreciar en las figuras antes mencionadas.

Este comportamiento reológico es un punto a considerar sumamente importante al hablar de una mezcla asfáltica destinada a la pavimentación; debido a que la viscosidad depende exclusivamente de los gradientes de temperatura, este tipo de fluidos presentan la característica de conservar su estado físico frente a esfuerzos que se apliquen sobre ellos.

Aplicando la ecuación 3.1 y con las viscosidades de la tabla 3.3 se calculó el índice de modificación para cada muestra modificada, ver tabla 3.4, tomando como blanco las viscosidades del asfalto AC-20 de la tabla 2.1.

Tabla 3.4. Índice de modificación, para las viscosidades de las muestras asfálticas.

Índice de modificación			
Asfalto modificado	Im [%]		
	135°C	160°C	190°C
A. Asfalto – queratina molida (raquis)	288.1	237.1	208.3
B. Asfalto – queratina (barbas + raquis)	495.4	668.6	875.0
C. Asfalto – 2% SBS416	274.3	234.3	225.0
D. Asfalto – 2% Composito 70 rpm	237.6	217.4	233.3
E. Asfalto – 2% Composito 50 rpm	225.7	202.9	183.3
F. Asfalto – 2%(SBS416 + 1PHR queratina)	244.0	214.3	208.3
G. Asfalto – 2%(1PHR queratina + SBS416)	268.8	234.3	216.7

Nuevamente la mezcla B muestra propiedades superiores a las demás, con una viscosidad de 2700 CP (2.7 Pa.s), recordando que la viscosidad máxima permitida para asfaltos modificados es de 4 Pa.s. No obstante, un valor de viscosidad muy elevado a altas temperaturas,

representa un asfalto difícil de procesar. Por tal motivo, los datos pertenecientes a esta mezcla asfáltica fueron descartados de las figuras 3.3 a la 3.5.

De los resultados generales obtenidos a partir de esta caracterización y referente a las otras mezclas, todas duplicaron los parámetros correspondientes al asfalto sin modificar dentro de un rango de mayor aceptación; de nueva cuenta se observa que las muestras A y C tienen propiedades semejantes y a comparación de la caracterización por ring and ball, la adición de un agente modificante es más significativa en la viscosidad de las mezclas que en el punto de ablandamiento.

De la tabla 3.3 se observa que en todas las muestras examinadas, la viscosidad disminuye al subir la temperatura, esto se debe al hecho de que todos los fluidos sufren expansión volumétrica cuando experimentan un aumento de temperatura, ya que el volumen y la densidad son propiedades inversamente proporcionales, es decir, cuando el volumen del fluido aumenta, su densidad se reduce simultáneamente. Esta reducción de densidad implica que existan menos moléculas por unidad de volumen que puedan transferir impulso desde una capa de fluido hacia el resto de las capas. Como resultado, se afecta la velocidad de las distintas capas, por lo que la viscosidad del fluido disminuye (Águeda Casado y otros 2012).

Otra particularidad es que al aumentar la temperatura las viscosidades de las mezclas son más parecidas entre sí, que cuando la medición se efectúa a 135°C, lo que indica que la adición de SBS-416 y queratina como modificador presenta un efecto significativo al aumentar la temperatura, también se relaciona con la cantidad de moléculas contenidas por unidad de volumen. Zapién S. y otros (2016) describen un efecto semejante, y aunque este descenso de viscosidad se pudiera interpretar de forma negativa, es exactamente lo contrario, efectivamente, para prevenir deformaciones permanentes en los asfaltos es necesario que presenten altas viscosidades a las temperaturas de servicio, pero en otros procesos como el transporte, bombeo y mezclado es necesario que sea manejable (menores índices de viscosidad).

3.5. Separación de fases

La diferencia de las T_{RB} superior e inferior para cada muestra analizada, después de ser sometida a condiciones extremas de envejecimiento (163°C x48hr), se muestra en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Diferencia de temperaturas ring and ball superior e inferior.

Mezcla asfáltica	T _{RBsup} [°C]	T _{RBinf} [°C]	Dif. [°C]
A. Asfalto – queratina molida (raquis)	60.25	59.60	0.65
B. Asfalto – queratina (barbas + raquis)	77.50	58.50	19.0
C. Asfalto – 2% SBS416	60.25	62.50	2.25
D. Asfalto – 2% Composito 70 rpm	58.75	62.00	3.25
E. Asfalto – 2% Composito 50 rpm	66.25	60.75	5.50
F. Asfalto – 2%(SBS416 + 1PHR queratina)	68.50	58.50	10.0
G. Asfalto – 2%(1PHR queratina + SBS416)	60.25	62.50	2.25

Resumiendo, se tiene que mientras mayor sea la diferencia entre las temperaturas es menor la compatibilidad del asfalto y el aditivo, considerando lo referente al método ASTM D5892:

- $3\Delta^{\circ}\text{C} \leq \text{compatible}$
- $3\Delta^{\circ}\text{C} \geq \text{Inestable}$

Cabe señalar que sólo tres de las siete muestras se pueden calificar como estables:

- Mezcla A. Asfalto–queratina molida (raquis),
- Mezcla C. Asfalto–2% SBS416 y
- Mezcla G. Asfalto–2% (1PHR queratina + SBS416).

Ya que la mezcla de asfalto modificado con polímero (mezcla C) es solamente de referencia, el avance significativo recae en las dos restantes, donde en la primera (mezcla A), la diferencia de resultados es mínima (0.65°C) lo que indica buena estabilidad al ser almacenado a altas temperaturas, lo que ocurre de forma semejante en la mezcla modificada por adición de queratina y hule (mezcla G) con diferencia de 2.25°C. Realizado este análisis es posible descartar la aplicación de la pluma completa de pollo como modificador de mezclas asfálticas, pues a pesar de que en los análisis anteriores había presentado buenos resultados, este análisis confirma su inestabilidad.

El tamaño de partícula no es el único factor que explica la poca compatibilidad entre el asfalto y los aditivos, hablando específicamente de la queratina. Ya que como se mencionó antes, los estudios realizados por Belarmino D. y otros (2012) demuestran que al calentar la proteína queratina se forman enlaces cruzados que fortalecen su estructura. En las proteínas

estos enlaces cruzados suelen ser del tipo disulfuro (S–S) que son enlaces covalentes formados mediante la oxidación del grupo sulfhidrilo (-SH); estos enlaces son esenciales para mantener estable la estructura plegada de la queratina. Los cambios drásticos en la atmosfera oxidante que demanda esta caracterización así como el periodo de exposición pueden ser agentes que afectan directamente la formación de este tipo de enlaces, explicando de esta forma la rigidez y la pobre elasticidad de las muestras sometidas a este proceso.

3.6. Penetración e índice de penetración

Si se espera que la modificación de asfalto cause un incremento en la consistencia del material, una regla básica es que necesariamente debe ocurrir un descenso en sus valores de penetración, porque a medida que el asfalto fortalece su consistencia, se reduce la posibilidad de que objetos ajenos incidan en él.

Las mediciones obtenidas para la penetración de las muestras asfálticas se muestran en la tabla 3.6, donde la penetración se reporta en decimas de milímetro (dmm). Comparando las muestras A asfalto – queratina molida (raquis) y B asfalto – queratina (barbas + raquis), se reitera que el tamaño y homogeneidad de partícula, si afectan las propiedades fisicoquímicas del asfalto, aunque para esta caracterización el efecto no es muy significativo, el hecho de que la profundidad en las penetraciones para ambas muestras sea similar, hace de la mezcla A una mejor opción pues su alta compatibilidad con el asfalto compensa el comportamiento ligeramente inferior comparado con la mezcla B.

Por otro lado para los asfaltos modificados con composito se puede tomar como referencia la mezcla C asfalto – 2% SBS416 con una unidad de penetración de 39.6 dmm, por lo que se infiere que también el efecto de la velocidad de mezclado en la preparación del composito y la forma de adición de los componentes modificadores por separado, son factores que afectan la resistencia que el asfalto opone al incidir una fuerza sobre él. La muestra G asfalto – 2%(1PHR queratina + SBS416) registró los mejores resultados de este grupo con 36.5 dmm unidades de penetración, incluso su desempeño fue superior que el asfalto modificado donde se empleó sólo polímero (mezcla C).

Tabla 3.6. Unidades de penetración de las mezclas asfálticas.

Mezcla asfáltica		Penetraciones	
A.	Asfalto – queratina molida (raquis)	32.1	32.4 dmm
		32.6	
		32.6	
B.	Asfalto – queratina (barbas + raquis)	28.0	28.0 dmm
		28.0	
		28.0	
C.	Asfalto – 2% SBS416	39.3	39.6 dmm
		39.8	
		39.8	
D.	Asfalto – 2% Composito 70 rpm	39.6	39.8 dmm
		39.6	
		40.2	
E.	Asfalto – 2% Composito 50 rpm	41.6	41.6 dmm
		41.7	
		41.6	
F.	Asfalto – 2%(SBS416 + 1PHR queratina)	40.9	41.1 dmm
		41.2	
		41.2	
G.	Asfalto – 2%(1PHR queratina + SBS416)	36.4	36.5 dmm
		36.9	
		36.4	

A partir de la ecuación 2.1, que se muestra en la sección 2.3.4, se calculó el índice de penetración (I_p) para las muestras de asfalto, tomando en cuenta las temperaturas de reblandecimiento expuestas en la tabla 3.1 y las unidades de penetración de la tabla 3.6. Los valores de I_p correspondientes a cada mezcla asfáltica se muestran en la tabla 3.7.

Considerando que para el Asfalto AC–20 virgen, se tiene una penetración de 44 dmm a 25°C, según la tabla 3.6 todas las modificaciones manifestaron un descenso en la incidencia de penetración teniendo como promedio general 37 dmm penetraciones. A partir de la tabla 3.7 y los límites establecidos por el método se pueden clasificar las mezclas asfálticas como:

- $I_p > +1$ son cementos asfálticos con poca susceptibilidad a la temperatura
- $I_p < -1$ 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

Tabla 3.7. Índice de penetración de las muestras asfálticas a 25°C.

Mezclas asfálticas	TRB [°C]	P [mm]	Ip
A. Asfalto – queratina molida (raquis)	63.25	3.24	0.643063
B. Asfalto – queratina (barbas + raquis)	64.50	2.80	0.558033
C. Asfalto – 2% SBS416	63.00	3.96	1.045894
D. Asfalto – 2% Composito 70 rpm	60.00	3.98	0.489387
E. Asfalto – 2% Composito 50 rpm	60.00	4.16	0.59111
F. Asfalto – 2%(SBS416 + 1PHR queratina)	54.25	4.11	-0.63147
G. Asfalto – 2%(1PHR queratina + SBS416)	60.00	3.65	0.295886

La clasificación asignada para las mezclas de asfalto a partir de su índice de penetración se observa en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Clasificación de las muestras asfálticas según su índice de penetración.

Mezclas asfálticas	Clasificación
C. Asfalto – 2% SBS416	Poco susceptible
A. Asfalto – queratina molida (raquis)	Intermedio
B. Asfalto – queratina (barbas + raquis)	
D. Asfalto – 2% Composito 70 rpm	
E. Asfalto – 2% Composito 50 rpm	
F. Asfalto – 2%(SBS416 + 1PHR queratina)	
G. Asfalto – 2%(1PHR queratina + SBS416)	

3.7. Microscopia fluorescente

De acuerdo con los resultados de las caracterizaciones presentados hasta ahora, se tiene suficiente sustento para afirmar que la mejor modificación es la correspondiente a la mezcla A Asfalto–queratina molida (raquis), seguida por la G Asfalto–2% (1PHR queratina + SBS416). Para corroborar esta supuesto, por medio de este análisis se visualizan las micrografías de las diferentes dispersiones aditivo–asfalto, figuras 3.6, 3.7 y 3.8.

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. En el primer

bloque se pueden apreciar tres micrografías que corresponden a las mezclas que se analizaron primero, la mezcla A Asfalto–queratina (raquis), la B Asfalto–queratina (barbas + raquis) y C Asfalto–SBS416.

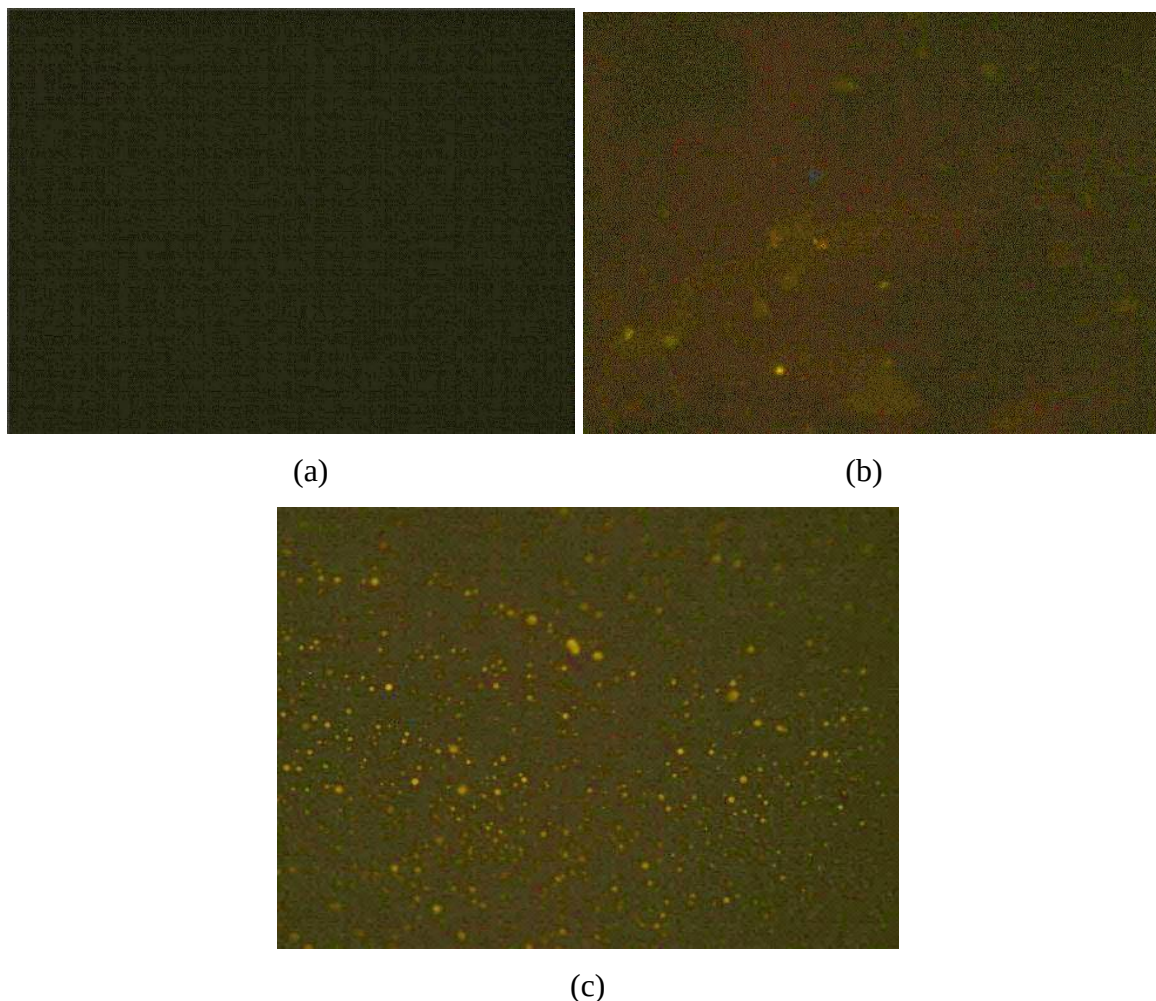


Figura 3.6. Micrografía fluorescente de (a) Asfalto–queratina molida (raquis), (b) Asfalto–queratina (barbas + raquis) y (c) Asfalto–2% SBS416.

Las figuras 3.6 (a) y 3.6 (b), son una comparación de las mezclas que contenían sólo queratina; en la primera (Asfalto + 2% queratina, raquis) se vislumbra una mezcla homogénea y muy bien dispersa, lo que confirma el hecho aumentar el área superficial de esta para obtener una mejor dispersión. La mezcla B Asfalto–queratina (barbas + raquis) luce parcialmente homogénea, pues se puede apreciar algunas zonas fluorescentes en la parte inferior de la micrografía.

En el inciso 3.6 (c) asfalto–2% SBS416, existen más regiones fluorescentes lo que sugiere una posible reducción en el tamaño de partícula de copolímero o en su defecto concederle un mayor tiempo de mezclado si se quiere mejorar la dispersión. También como lo menciona Salazar Cruz (2008), la razón por la que se presentan más regiones fluorescentes es debido a la presencia de anillos bencénicos de estireno y también a la combinación de las dobles ligaduras del butadieno, en este caso también existen electrones apareados que al excitarse con la luz ultravioleta brincan a otros niveles de energía generando una nube de electrones que emiten luz fluorescente.

Las mezclas modificadas con composito se aprecian en la figura 3.7.

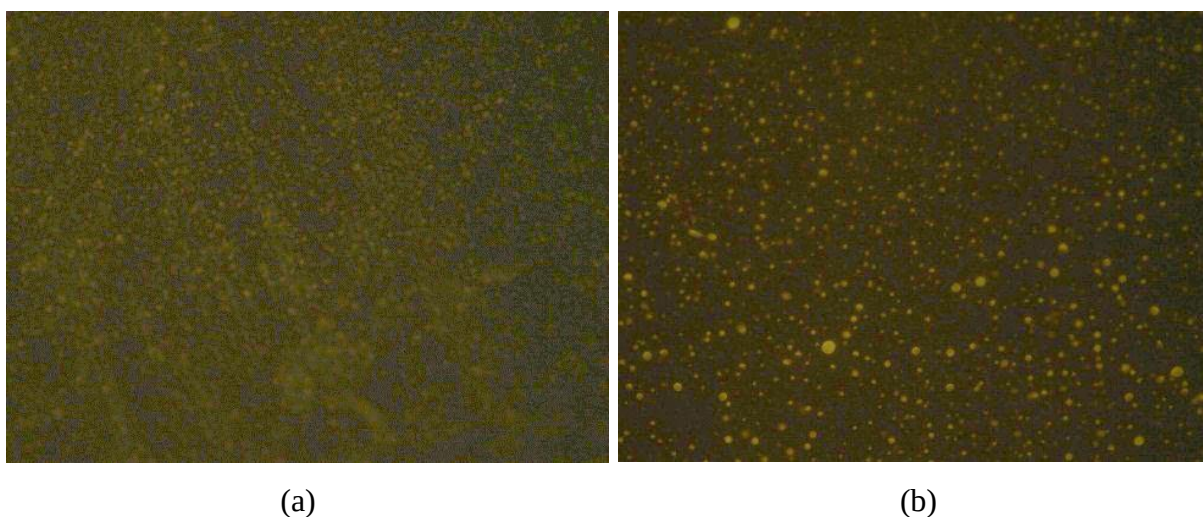
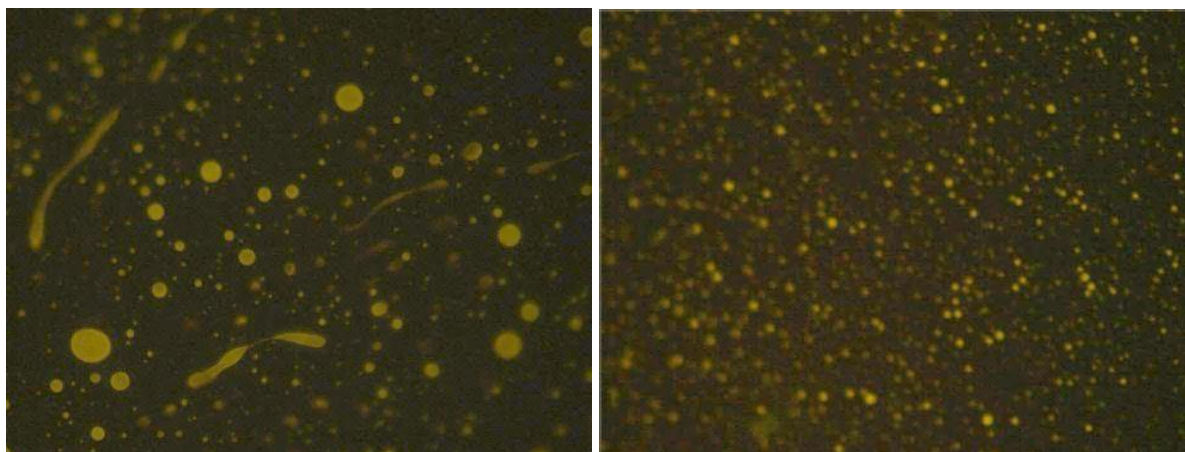


Figura 3.7. Micrografía fluorescente de (a) Asfalto–composito 70rpm, (b) Asfalto–composito.

En ambas micrografías se observa una mayor cantidad de zonas fluorescentes, pero en la figura 3.7 (a) la fluorescencia esta dispersa como un color verdoso por toda la mezcla, mientras que en el 3.7 (b) existen aglomeraciones más grandes que también están distribuidas en la mezcla asfáltica. Con este ultimo analisis se constata que la velocidad de mezclado a la que se prepara el composito es un factor ligado a la mejora de las propiedades inherentes del asfalto, pues en cada caracterización la mezcla D asfalto–composito 70rpm presento mejores características.

Las mezclas asfálticas modificadas adicionando los modificadores por separado y no como un compuesto se comparan en la figura 3.8, donde (a) es la mezcla Asfalto–2% (SBS414 + 1PHR queratina) y (b) el Asfalto modificado con 2% (1PHR queratina + SBS416).



(a)

(b)

Figura 3.8. Microscopía fluorescente, (a) Asfalto–2%(SBS414 + 1PHR desecho de pollo) y (b) Asfalto–2%(1PHR desecho de pollo + SBS416).

Esta ultima micrografía compara las mezclas asfálticas modificadas al añadir los elementos por separado y no como un compuesto. A pesar que son los mismos aditivos queratina y SBS416, la adición por separado de estos afecta directamente su dispersión en el asfalto, tambien de manera muy notoria se observa que el orden de adición es otro parámetro importante, ya que las características de la mezcla F asfalto–2% (SBS416 + 1PHR queratina) para cada analisis siempre fueron inferiores en contraste con la mezcla G asfalto–2%(1PHR queratina + SBS416)

4. Conclusiones

Los resultados de las mezclas asfálticas preparadas confirman que la inclusión de un aditivo natural en la modificación de asfaltos es viable, y que factores como velocidad de preparación del composito o el proceso de adición de los agentes modificantes, afectan significativamente las propiedades fisicoquímicas del asfalto.

Después de determinar las propiedades fisicoquímicas de cada muestra analizada, se descartó la mezcla B asfalto–queratina (barbas + raquis), no obstante que al principio manifestó un comportamiento mecánico aceptable, en cuanto al punto de ablandamiento, penetración e inclusive viscosidad; sin embargo, su alta densidad se vio reflejada directamente en su compatibilidad y dispersión en el asfalto, lo que vuelve más complejo su procesamiento.

Con respecto a las mezclas A, D, E, F y G, se comprobó que las propiedades estudiadas tienen un comportamiento similar. Donde el uso de queratina uniformemente molida (caso de la mezcla A) como material modificante, manifestó mejores resultados incluso sobre las muestras de asfalto donde se empleó como aditivo un composito.

Al contrastar los resultados de la mezcla A (asfalto + 2% queratina molida, raquis) y C (asfalto + 2% SBS), la primera, presentó características superiores a la segunda, reconocida esta última por ser el polímero más empleado por la industria en la modificación de asfaltos (Zapién Castillo, S.f.).

El impacto al utilizar 2 % de un material de desecho, para este estudio: la queratina, resulta trascendente, porque se comprobó que otorga al asfalto un comportamiento mecánico aceptable y con características tales que permiten inferir un desempeño satisfactorio a largo plazo, reduciendo grietas, deformaciones y desmenuzamiento en elementos estructurales como son los pavimentos.

La sustitución del 2% de un material sintético por uno de desecho genera una serie de impactos: ambientales, al reducir los costos de producción disminuyendo potenciales daños de carácter energético; tecnológicos, al incursionar en una línea poco investigada que promete un campo de aplicación muy amplio en la industria petroquímica y de la construcción; económicos, por la disminución en costo que implica el uso de un material que no requiere de tratamiento

previo a su aplicación como aditivo en la modificación de asfaltos, contra uno que acarrea tras de sí procesos químicos sumamente complejos y costosos; por último, sociales, al vislumbrarse un nicho de oportunidad en el campo de los denominados “waste materials”, como fuente de ingreso adicional para los productores de esta materia prima que puede ser aprovechada.

Bibliografía

- (ILCE), I. L. (1998). La Ciencia desde México. México, DF.: ISBN.
- Acevedo, S. B., Méndez, B., Rojas, A., Layrisse, I., & Rivas, H. (1985). Asphaltenes and resins from the Orinoco Basin. *Fuel* 64, 1741 - 1747.
- Águeda Casado , E., Gómez Morales , T., & Navarro, J. M. (2012). Sistemas de transmisión de fuerzas y trenes de rodaje. España: Paraninfo.
- Angulo Rodríguez, R. A., & Duarte Ayala, J. L. (2005). Tesis: Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de ciencias fisicoquímicas.
- Arabani, M., & Seyed, A. T. (2017). Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt mixture. *Construction and Building materials* 149, 350 - 358.
- Barone , J. R., Schmidt, W. F., & Liebner C., F. E. (2005). Compounding and molding of polyethylene composites reinforced with keratin feather fiber. *Composites Science and Technology* Vol. 65, 683 - 692.
- Belarmino, D. D., Ladchumananandasivam, R., Belarmino, L. D., Pimentel, J. R., G. da Rocha, B., Galvão, A. O., & B. de Andrade, S. M. (2012). Physical and morphological structure of chicken feathers (keratin biofiber) in natural, chemically and thermally modified forms. *Materials sciences and applications* 3, 887- 893.
- Blazquez, L. B., & Beivá García, J. F. (2000). Manual de carreteras, volumen II. Ortiz e Hijos, Contrastista de obras, S.A.
- Carey, F. A., & Giuliano, R. M. (2006). Química Orgánica. México: McGraw Hill.
- Cervantes, E. J., Velasco Santos, C., Martínez Hernández, A. L., Rivera Armenta, J. L., Mendoza Martínez, A. M., & Castaño, V. M. (2014). Composites from chicken feathers quill and recycled polypropylene. *Journal of composite materials* 49, 275 - 283.
- 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.
- Delgado, J. G. (2006). Asfaltenos, composición, agregación y precipitación. Mérida, Venezuela: Laboratorios Firp.
- 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*, 415 - 420.
- Estadística, G. I. (2000 - 2012). Vehículos de Motor registrados en circulación. México, DF.
- Fernández Bisso, R. (2011). Interpretaciones de Especificaciones de Calidad de Cementos Asfálticos. Lima, Perú.

- Figuerola Infante, A. s., Fonseca Santillana, E. B., & Reyes Lizcano , F. A. (2009). Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. Bogotá, Colombia.
- Fred W. Billmeyer, J. (1975). Ciencia de los polímeros. Barcelona: Reverté.
- Herrera Lozano, J. E., & Limón Limón, R. A. (1995). Modificadores de Asfalto. México, DF.: Asociación mexicana de ingeniería de vías terrestres AC.
- Juárez, D., Balart, R., Ferrándiz, S., & García, D. (2013). Estudio y análisis de los polímeros derivados del butadieno. 3 Ciencias.
- Martínez Hernández , A. L., Velasco Santos , C., de Icaza, M., & Castaño, V. M. (2007). Dynamical - mechanical and thermal analysis of polymeric composites reinforced with keratin biofibers from chicken feathers. Composites (Part B), 405 - 410.
- Reynoso, E. A. (2011). Tesis: El uso de plumas de pollo para aumentar la tenacidad del yeso. Madrid, España.
- Rye, C., Wise, R., Jurukovski, V., Desaix, J., Choi, J., & Avissar, Y. (2013). Biology. Houston, Texas: Rice.
- S., B., & Giray, I. (2008). Analysis of styrene - butadiene - styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods. Journal of hazardous Materials 150, 424 - 432.
- Salazar Cruz, B. A. (2008). Tesis de doctorado, Modificación de asfalto con polímero SBS y arcillas pilareadas evaluando su efecto térmico y reológico. Cd. Madero, Tamaulipas.
- Sharma, S., & Arun , G. (2016). Sustainable management of keratin waste biomass, applications and future perspectives. Brazilian archives of technology 59.
- The Asphalt Institute. (s.f.). Manual del asfalto. Bilbao, España: URMO S.A.
- Villareal Luicio, D. S., Rivera Armenta, J. L., Rivas Orta, V., Diaz Zavala, N. P., Páramo García, U., Gallardo Rivas, N. V., & Chávez Cinco, M. Y. (2017). Manufacturing of composites from chicken feathers and polyvinyl chloride (PVC). En V. K. Thakur, M. Thakur, & M. Kessler, Handbook of composites from renewable materials vol. 2 (págs. 159 - 174). Hoboken, EUA: Wiley.
- Virginie, M., Jerome, L., Francoise, D., Jean, P., & Laurence, L. (2008). Infrared microscopy investigation of oxidation and phase evolution in bitumen modified with polymers. Fuel 87, 1270 - 1280.
- Zapién Castillo, S. (S.f.). Tesis de maestría, Obtención de mezclas de asfalto modificado con SEBS y nanoarcilla. Cd. Madero, Tamaulipas.
- Zapién, S., Rivera, J. L., Chávez, M. Y., & Salazar, B. A. (2016). Physical and rheological properties of asphalt modified with SEBS/montmorillonite nanocomposite. Construction and Building Materials 106, 349 - 356.

Anexo A. Tipos de asfaltos y sus principales aplicaciones

Tipo de Construcción	Betunes asfálticos				Curado Rápido (RC)										Curado medio (MC)										Curado lento (SC)										Emulsiones asfálticas					Emulsiones Inversas	Emulsiones cationicas																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	40/50	60/70	85/100	120/150	200/300	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	RS1	RS2	MS2	SS1	SS1b																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Mezcla en instalación mezcladora aplicada en caliente	x	x	x	x																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			</

Figura A.1. Principales empleos de los diversos tipos de productos asfálticos. Fuente: (The Asphalt Institute, s.f.) adaptación propia.

Anexo B. Datos técnicos del SBS–416

Propiedades físico-químicas del Solprene 416 (SBS), elaborado por Dynasol elastómeros. Este hule con propiedades de caucho vulcanizado se utiliza como modificador elastomérico para asfalto y plásticos, así como ingrediente en formulaciones de suelas y como base para adhesivos sensibles a la presión. Fuente: www.dynasolelastomers.com (2004)

Propiedades del polímero	Valor típico	Método de ensayo
Viscosidad en tolueno 5,23%, cSt	11.0	NM-300-11
Materia volátil, % máx	0.75	ASTM D-5668
Estireno bloque,% mín	28.0	NM-202-07
Estireno total (sobre polímero), %	30.0	ASTM D-5775
Gravedad específica	0.94	DIN-53479
Índice de fluidez, g/10' (200 °C, 5 kg)	<0.5	ASTM D-1238
Dureza, °Shore A	78.0	ASTM D-2240
Carga de rotura, MPa	17.0	ASTM D-412
Módulo 300%, MPa	2.70	ASTM D-412
Alargamiento, %	800	ASTM D-412