



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**EFECTO DE LA RELACIÓN
ASFALTENOS/MALTENOS
SOBRE LAS PROPIEDADES DE
ASFALTO
MODIFICADO CON SBS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA**

**PRESENTA:
MIRIAM GONZAGA PÉREZ**



MÉXICO, D. F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado:

Presidente	Prof. Maria del Rayo Salinas Vázquez.
Vocal	Prof. Rafael Herrera Nájera.
Secretario	Prof. Rodolfo Ruiz Trejo.
1 ^{er} Suplente	Prof. Paola González Aguirre.
2 ^o Suplente	Prof. Paula Ximena Reynaldos.

Sitio donde se realizó el tema: Laboratorio 213, Polímeros, Conjunto E, Facultad de Química.

Asesor del Tema:

Dr. Rafael Herrera Nájera.

Supervisor Técnico:

I. Q. Rodolfo Ruiz Trejo.

Sustentante:

Miriam Gonzaga Pérez.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial a mi asesor Dr. Rafael Herrera Najera por darme la oportunidad de ser parte de su equipo y por la confianza que deposito en mí, sus enseñanzas han sido invaluable en mi vida.

Al maestro Rodolfo Ruiz Trejo por ser la columna vertebral en la parte técnica de este proyecto pero sobre todo por su amistad y consejos.

Al pueblo trabajador de México porque sin ustedes no existirían instituciones como la UNAM.

A la Facultad de Química que siempre considerare como mi segunda casa.

A todos los profesores de la Facultad de Química, gracias por sus conocimientos y por fomentar en mí la ética profesional junto con el deseo de trabajar para ser de mi país un mejor lugar para vivir.

A todo el laboratorio 213 del Edificio E de la Facultad de Química.

DEDICATORIAS

A mi mama por apoyarme en todos mis proyectos y depositar toda su confianza en mi, pero sobre todo por ser un ejemplo de lucha en todo momento. Gracias.

A mi padre por infundir en mi el deseo de superarme día a día

A mi hermana Rosario por su gran apoyo y cariño durante estos últimos años, tu sabes que sin tu ayuda tal no lo hubiera logrado. Gracias hermanita.

A mi hermana Elena y a mi sobrino Alberto, quien vino alegrar mis días con su cariño.

A mis amigos de primer semestre: Talina, Angélica, Josefina, Noemí, Carlos, Hugo, Israel y Rubén, gracias por hacer más agradable mi estancia en la Facultad.

A mis amigos los ingenieros Jazmín, Javier y Jorge.

A los chicos que me brindaron siempre su apoyo y me echaron porras para continuar adelante: Rosa, Mary, Elsa, Roselia y Luis, siempre los recordare con gran cariño.

A mi gran amigo Cristian que siempre me ha brindado su apoyo en los momentos más difíciles tu sabes que tienes un lugar muy especial en mi vida.

**La ciencia no solo es compatible con la espiritualidad,
es una fuente profunda de espiritualidad.**

Carl Seagan

INDICE DE CONTENIDO

- I. Resumen.

- II. Introducción.

- III. Marco Teórico.
 - 3.1 Asfalto.
 - 3.2 Importancia del asfalto en el mundo.
 - 3.3 Asfalto modificado.
 - 3.4 Asfalto modificado con polímeros.
 - 3.5 Asfalto modificado con SBR`s
- IV. Técnicas de caracterización.
 - 4.1 Temperatura de ablandamiento.
 - 4.2 Penetración.
 - 4.3 Índice de penetración.
 - 4.4 Viscosidad Brookfield.
 - 4.5 Microscopía de fluorescencia.
- V. Características del polímero.

- VI. Objetivo principal e hipótesis.

- VII. Desarrollo experimental.

VIII. Presentación de Resultados.

IX. Resultados y Discusión.

X. Conclusiones.

XI. Bibliografía.

XII. Anexo 1.

XIII. Anexo 2.

XIV. Anexo3.

Palabras clave :asfalto, asfalto modificado, asfalto modificado con polímero asfaltenos, maltenos, polímero SBS, temperatura de ablandamiento, penetración, microscopía de fluorescencia, viscosidad.

INDICE DE FIGURAS

1. Vista preliminar de la Refinaría de Salamanca.
2. Modelo micelar del asfalto.
3. Polímero en bloque SBS.
4. Representación de la temperatura de ablandamiento.
5. Representación de la prueba de Penetración.
6. Representación de los dominios de PS (círculos), inmersos del PB (rayas).
7. Temperatura de ablandamiento de los asfaltos en función de los asfaltenos
8. Datos de la temperatura de ablandamiento.
9. Datos de la temperatura de ablandamiento
10. Datos de la prueba de Penetración.
11. Datos de la prueba de Penetración.
12. Datos de la prueba de Penetración.
13. Datos de viscosidad a 135°C
14. Datos de viscosidad a 135°C
15. Datos de viscosidad a 135°C

16. Datos de viscosidad a 160°C
17. Datos de viscosidad a 160°C
18. Datos de viscosidad a 160°C
19. Viscosidad para los asfaltos a 177°C
20. Viscosidad para los asfaltos modificados a 177°C
21. Viscosidad para los asfaltos modificados a 177°C
22. Curvas del índice de penetración a 25°C, 100 g a 5s
23. Fotografía de la muestra M70C3.
24. Fotografía de la muestra M70C8
25. Fotografía de la muestra M75C3
26. Fotografía de la muestra M75C8
27. Fotografía de la muestra M80C3
28. Fotografía de la muestra M80C8
29. Fotografía de la muestra M85C3
30. Fotografía de la muestra M85C8

I.INDICE DE TABLAS

1. Características del polímero utilizado.
2. Claves para las muestras de asfalto.
3. Resultados de la prueba de penetración a 25°C, 100 g, 5 s, para los diferentes sistemas con su promedio.
4. Datos de penetración.
5. Datos de penetración para los asfaltos reconstituido y modificados.
6. Datos de viscosidad a una temperatura de 135°C.
7. Datos de viscosidad a una temperatura de 160°C
8. Datos de viscosidad a una temperatura de 177°C
9. Datos del índice de penetración.

I. RESUMEN

El siguiente trabajo se lleva a cabo como parte de la investigación realizada en el laboratorio 213 edificio E de Ingeniería Química referida a la modificación de asfaltos con polímeros con el objetivo de mejorar sus propiedades termomecánicas.

En esta tesis se estudió el efecto de la relación maltenos/asfaltenos en un asfalto modificado con un polímero lineal. Los asfaltenos y los maltenos se obtuvieron de la separación del asfalto AC-20 de Salamanca el cual tienen una proporción de 20% asfaltenos y 80% maltenos .

Como primer paso se separaron los maltenos y asfaltenos, posteriormente se prepararon muestras de asfalto, variando la proporción de maltenos y asfaltenos en cada muestra, a su vez estas fueron modificadas con un polímero tribloque SBS (estireno-butadieno-estireno) a dos diferentes concentraciones tres y ocho por ciento en peso.

La caracterización de cada una de las muestras se llevó a cabo con los siguientes parámetros: penetración, temperatura de ablandamiento, viscosidad y microscopía de fluorescencia que son utilizados ampliamente a nivel industrial.

Los resultados muestran que la variación de la relación maltenos/asfaltenos en asfaltos, cambia de forma significativa las propiedades térmicas y mecánicas, aún sin estar modificado con polímeros.

Las muestras con mayor porcentaje de asfaltenos presentan un incremento significativo en su temperatura de ablandamiento . Al ser modificados con el polímero SBS a dos diferentes concentraciones 3% y 8% en peso, esta propiedad aumenta de forma considerable en todas las muestras, con respecto a aquellas muestras que no fueron modificadas.

El efecto contrario sucede con la prueba de penetración los valores disminuyen al aumentar la cantidad de asfaltenos en las muestras de asfalto, debido a que los asfaltenos incrementan la dureza de asfalto. Para las muestras modificadas a 3% y 8% en peso de polímero la penetración disminuye con respecto a los asfaltos sin modificación, debido a que el polímero contribuye con sus propiedades elásticas, de esta forma la consistencia del asfalto se vuelve más blanda. Para el caso de la microscopía, las fotografías muestran que para todos los asfaltos, el polímero es la fase dispersa y el asfalto es la fase continua. En

cuanto a la viscosidad, los valores que presentan las muestras de asfalto modificados a una concentración de 8% en peso de polímero, se reportan valores altos en comparación a las muestras modificadas con 3% de polímero, estos a su vez presentan un incremento significativo con respecto a los asfaltos sin modificación.

Los asfaltenos junto con el polímero de estireno-butadieno incrementan los valores de viscosidad, conforme se incrementa el porcentaje de asfaltenos y la cantidad de polímero en las muestras.

El efecto de la relación de maltenos/asfaltenos en el asfalto es la de incrementar o disminuir según sea el caso dureza y cohesión proporcionada por un aumento en los asfaltenos mientras los maltenos proveen ductibilidad y viscoelásticidad

Por otra parte, los polímeros SBS mejoran su resistencia a la deformación, reducen su sensibilidad térmica y aumentan su tiempo de vida.

II.INTRODUCCIÓN

El asfalto es una mezcla de compuestos obtenidos de la destilación primaria del petróleo, formado principalmente por compuestos que contienen carbono e hidrógeno y otros elementos como: el azufre, nitrógeno, oxígeno y con menos de 1% de fierro, níquel, vanadio, calcio, titanio, magnesio, sodio, cobalto, cobre y zinc.

Es considerado como un sistema micelar, donde los componentes de alto peso molecular varían en un rango de 1000 a 2500 g/mol (Nadkarni et al, 1984) se encuentran como la fase dispersa y los de bajo peso molecular (debajo de 1000 g/mol) conforman la fase continua.

En cuanto a su solubilidad en n-heptano, se distinguen en el asfalto dos componentes principales: asfaltenos y maltenos.

Los asfaltenos constituyen la fracción insoluble y los maltenos constituidos por componentes aromáticos polares y aromáticos nafténicos o cicloalcanos, son solubles en dicho disolvente.

Para poder explicar el comportamiento mecánico del asfalto, se ha propuesto un modelo en el cual el asfalto forma redes tridimensionales que son las responsables de las propiedades mecánicas, si la red es muy rígida, el asfalto será susceptible de deformarse permanentemente, en tanto si la red es muy flexible, el asfalto podrá fluir y será difícil que mantenga su forma (Kraus et al, 1980).

El asfalto es un material barato en comparación a otros materiales, por lo tanto su campo de aplicación es amplio. Tiene diferentes aplicaciones, sin embargo su uso más importante es en la pavimentación de carreteras; debido a las condiciones de trabajo a que es sometido, presenta tres tipos de deterioro; acanalamiento, fractura térmica y fractura por fatiga. Este tipo de deterioros son causados por: los esfuerzos mecánicos, térmicos y químicos.

Debido a lo anterior, se ha buscado mejorar las propiedades del asfalto agregando diferentes materiales: como hule y sílice entre otros, pero al paso de los años con el desarrollo de materiales como los polímeros se han llevado a cabo investigaciones donde se ha modificado al asfalto con materiales tales como: polipropileno atáctico, etileno – propileno - dieno, polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS) y copolímeros de estireno – butadieno (SB) (Stasha et al, 2003).

Entre los agentes modificadores que se usan más frecuentemente se encuentran los copolímeros de estireno y butadieno (Isacsson, et al, 2001) a concentraciones entre 2 – 12% en peso, debido a que se pueden incorporar con relativa facilidad al asfalto formando una red polimérica continua en el seno del asfalto, modificando su viscosidad, mejorando su resistencia mecánica en un rango amplio de temperatura entre - 45°C a 100°C. Otro factor importante es conocer la cantidad relativa de asfaltenos /maltenos en el asfalto porque pequeños cambios en dicha relación tiene un gran efecto sobre las propiedades termomecánicas.

Con el propósito de señalar la importancia de esta relación se llevó a cabo este trabajo, donde se cambia la relación asfaltenos/maltesos en el Asfalto AC-20 de Salamanca, Guanajuato en las diferentes muestras de asfalto. Además se estudiará el efecto del cambio de la relación de asfaltenos/maltesos en un asfalto que ha sido modificado con un copolímero de bloques secuenciales de estireno- butadieno, las características obtenidas de estos asfaltos, se reflejarán en sus propiedades térmicas y mecánicas, las cuales pueden determinarse con las pruebas industriales tradicionales del asfalto como son: puntos de ablandamiento, penetración, microscopia y viscosidad.

III.MARCO TEORICO

3.1 ASFALTO

El asfalto es definido por la American Society for Testing and Material (ASTM), como un material café oscuro a negro que tienen como constituyentes predominantes bitúmenes o hidrocarburos de alto peso molecular, obtenidos como residuos pesados en la refinación primaria del petróleo, pero que también existen en forma natural en depósitos geológicos como asfaltos en roca o arena.

Su peso molecular varía de 1000 a 500,000 g/mol (Dickie et al, 1967). La composición química genérica del asfalto es la siguiente:

- 80 - 85% de carbono.
- 10% de hidrógeno.
- 2 - 8% de oxígeno.
- 1 - 7% de sulfuros.

El asfalto se encuentra conformado por compuestos aromáticos, alifáticos (principalmente nafténicos y alcanos) y trazas de metales como el vanadio, níquel, hierro, calcio, titanio, magnesio sodio, cobalto y zinc.

Los compuestos alifáticos son principalmente saturados (alcanos) y nafténicos (cicloalcanos) los primeros se encuentran formados por cadenas de enlaces de carbonos simples C-C que originan enlaces no polares o unen átomos que difieren muy poco en electronegatividad, uniones C-H que forman enlaces débilmente polares. Mientras los nafténicos sus átomos de carbono forman anillos.

Los compuestos aromáticos son principalmente heteroatómicos, es decir presentan heteroátomos como oxígeno, nitrógeno y azufre.

Desde hace 30 años la separación fraccionada del asfalto₂ se basa en la solubilidad en n-heptano. Las fracciones que se obtienen son las siguientes:

- ❖ Asfaltenos
- ❖ Maltenos

Los asfaltenos precipitan en forma de sólidos cuando al asfalto se le agrega n-heptano, son de color negro de alto peso molecular, con el calor se hinchan y se aglutinan. Están constituidos por compuestos aromáticos y nafténicos.

Los maltenos a su vez son solubles en n-heptano de color café oscuro, se conforman de compuestos polares y no polares; la fracción polar contiene compuestos aromáticos con heteroátomos de O, N y S con comportamiento ácido, básico y anfotérico y entre todas determinan en gran medida propiedades importantes como: viscosidad, adherencia, susceptibilidad al agua y resistencia mecánica.

Por su parte, los compuestos no polares, actúan como una matriz en la que se encuentra embebida la red de compuestos polares; a bajas temperaturas, esta matriz se cristaliza y hace rígido al asfalto. Si la red es suficientemente fuerte, el asfalto será elástico y menos susceptible a la deformación permanente; pero si la red no es muy fuerte cederá ante esfuerzos mecánicos y se agrietará.



Figura 1. Vista preliminar de la Refinería de Salamanca

El asfalto es un material viscoelástico dependiendo de la temperatura, a 0 °C es un sólido duro y quebradizo, a 100 °C llega a ser un líquido viscoso; ligero dúctil y maleable

desde el punto de vista mecánico, es decir al someterse a grandes esfuerzos se comporta como un sólido elástico y al reducir la carga las propiedades viscosas se hacen evidentes. Tiene una temperatura de ablandamiento de entre 30-45 °C.

Para explicar el comportamiento del asfalto se han desarrollado dos modelos que describen su constitución.

❖ *Modelo Continuo*

En el modelo continuo se considera esencialmente dos fases del asfalto: la fase polar y la fase no polar. Los componentes del asfalto en este modelo se encuentran influenciadas por el número de grupos, el peso molecular de los grupos y el número de anillos de benceno presentes.

❖ *Modelo Micelar*

En el siguiente modelo el asfalto se describe como un sistema micelar multidisperso; los asfaltenos se encuentran rodeados de hidrocarburos y dispersados en aceites (Zanzotto et al, 1996 en Stastna et al, 2003).

El modelo micelar fue descrito por primera vez por Nellensteyn en 1924 y fue adaptado para describir la estructura del asfalto en el cual existen dos fases; una discontinua formada por los asfaltenos y una continua que los rodea llamada fase malténica (Stastna et al, 2003). Las resinas actúan como una especie de capa protectora de los asfaltenos y son intermediarias entre los aceites y los insolubles asfaltenos.

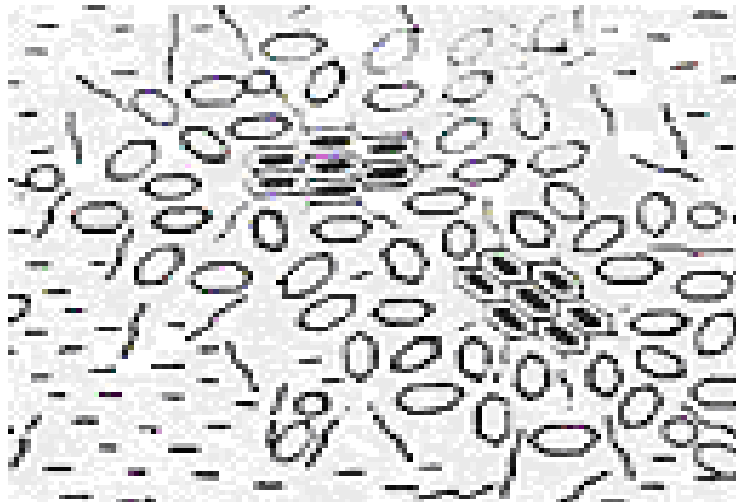


Figura 2. Modelo micelar del asfalto.

3.2 IMPORTANCIA DEL ASFALTO EN EL MUNDO

El asfalto es un material usado extensamente en una gran variedad de usos, aparte de la pavimentación de carreteras, se usa además como impermeabilizante, recubrimiento, relleno y sellador debido a sus propiedades viscoelásticas, poder aglomerante y bajo costo. También es un buen aislante térmico, dieléctrico y acústico.

Pero sin duda su mayor uso se da en la pavimentación, a partir del invento del automóvil se necesitaron buenos caminos para mayor seguridad y comodidad. El transporte carretero comercial creó la dependencia "camión-camino" exigiendo amplias carreteras para más y mejores vehículos. Como consecuencia el consumo de asfaltos aptos para uso vial (cementos asfálticos) en los últimos años ha aumentado a 90 000 000 toneladas por año en todo el mundo (Takamura et al, 1995).

Las estadísticas muestran que el 96% de las carreteras del mundo son pavimentadas con asfalto mientras que para el 6% restante se utiliza en cemento Pórtland.

En la pavimentación de carreteras, el asfalto es sometido a diferentes condiciones de trabajo y a diferentes esfuerzos como son mecánicos y térmicos principalmente. Presentando tres tipos de deterioro.

➤Acanalamiento, es la formación de ondas sobre la carpeta asfáltica, se debe a un esfuerzo ejercido por el tráfico y conlleva una deformación permanente en la superficie, esta falla es más significativa a temperaturas de servicio altas sobre todo en carreteras donde la temperatura suele ser extrema, como en los desiertos, debido a la reducción en la viscosidad del asfalto.

➤Fractura térmica, tiene su origen en los esfuerzos inducidos térmicamente, este efecto es más severo a temperaturas bajas de servicio, por ejemplo en zonas frías, porque se excede la capacidad de asfalto para disipar energía térmica. Provocando grietas, mejor conocidas como baches.

➤Fractura por fatiga, es atribuida a los esfuerzos inducidos por el tráfico, se da principalmente en carreteras donde circulan vehículos pesados; inicia en la parte baja de la carpeta asfáltica y se extiende sobre la superficie, este tipo de fractura suele provocar baches más grandes que las fracturas térmicas.

3.3 ASFALTO MODIFICADO

El asfalto modificado consiste en una mezcla de dos componentes principales: el agente modificador y el asfalto, la selección del agente modificador se basa principalmente en las características del asfalto precursor y en el uso final que se les dará al asfalto (Gorbaty et al, 1994).

Una vez seleccionado el agente modificador, existen diferentes factores que influyen en el comportamiento termomecánico del asfalto modificado: la naturaleza química del asfalto (aquí se toma en cuenta la zona de extracción del petróleo ó si proviene de un depósito geológico), características del agente modificador como son composición global, distribución monómerica, morfología, pesos moleculares y condiciones de

producción del asfalto modificado; composición de la mezcla, tiempo, temperatura y velocidad de corte de mezclado.

De todos estos factores dependerá el grado de miscibilidad que se obtenga entre los segmentos del polímero y las fracciones del asfalto que a su vez se reflejarán en el comportamiento termomecánico del asfalto modificado.

Al no tomar en cuenta los criterios anteriores podría dar como resultado la obtención de un asfalto modificado pobre en relación a sus propiedades, por ejemplo, una temperatura de ablandamiento baja, asfalto quebradizo como consecuencia directa un tiempo de vida corto.

Como se menciona anteriormente se ha buscado mejorar por medio de agentes modificadores el comportamiento de termomecánico del asfalto, entre los principales agentes modificadores podemos mencionar los siguientes junto con sus beneficios:

 Aditivos poliméricos.

Beneficios; proveen un refuerzo para las altas temperaturas, disminuyen la susceptibilidad térmica y permiten el uso de asfaltos blandos reforzados para altas temperaturas, entre los cuales tenemos; termoplásticos, elastómeros entre otros.

 Aditivos de fibra.

Beneficios, mejoran la tenacidad y resistencia a fractura.

 Resinas.

Disminuyen el envejecimiento del asfalto.

 Azufre

Aumenta su resistencia a la deformación e incrementa su viscosidad.

Para concluir con lo anterior podemos mencionar los requisitos para que un agente modificador sea efectivo se necesita que sea:

- Fácilmente aplicable
- Resistente a la degradación sobre todo a altas temperaturas
- Mejora en la resistencia a fluir (viscosidad)
- De un costo bajo
- Mantener sus propiedades durante el almacenamiento
- Asegurar la viscosidad de aplicación que se requiere.

3.4 ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMEROS

En los últimos años los agentes modificadores más utilizados son los polímeros por sus propiedades y beneficios que proporcionan al asfalto. Para poder entender lo anterior primero definamos que es un polímero.

Un polímero se puede definir como un conjunto de moléculas, llamadas monómeros que se mantienen juntos por medio de enlaces covalentes dando lugar a cadenas muy largas. Los polímeros pueden clasificarse conforme a sus propiedades físicas y de acuerdo a su uso en cuatro categorías: termoplásticos, elastómeros, fibras y resinas de termofraguado o mejor conocidas como recubrimientos (Lu, X. 1995).

Los polímeros termoplásticos, son duros a temperatura ambiente, pero cuando se calientan se vuelven blandos y viscosos. Debido a que los termoplásticos tienen muy poco o nada de enlaces cruzados, cuando el material se calienta es posible que las cadenas se deslicen unas sobre otra.

La estructura de estos polímeros es determinada por uso final que se les da, estos a diferencia de los elastómeros, sí al estirarlos se sobrepasa la tensión de fluencia, no volverán a su longitud original al terminar de estirarlos, sufren deformaciones pseudoplásticas.

Dentro de este grupo estos tenemos a:

- **EVA:** etileno-acetato de vinilo.
- **EMA:** Etileno-acrilato de metilo
- **PE:** (polietileno) tiene buena resistencia a la tracción y buena resistencia térmica, como también buen comportamiento a bajas temperaturas.
- **PP:** (Polipropileno) y **Poliestireno:** no son que casi no son usados pero se han realizado modificaciones con este material.

Los elastómeros son polímeros amorfos que tienen la cualidad de estirarse y encogerse recuperando su forma original. Estos polímeros deben tener formas irregulares a fin de impedir la formación de cristales. Cuando estos polímeros son estirados, las cadenas que se encuentran enrolladas al azar se extienden y se orientan en el sentido de la fuerza aplicada. Las fuerzas de van der Waals son demasiados débiles y escasas para mantener esta orientación y tan pronto como se libera la fuerza aplicada el elastómero regresa a su estado enrollado. También conocidos como hules son polímeros de cadena larga.

Por ejemplo:

- **Polímeros naturales:** caucho natural, celulosa, glucosa, sacarosa, ceras y arcillas, son ejemplos de polímeros orgánicos e inorgánicos naturales
- **SBS:**(estireno-butadieno-estireno) o caucho termoplástico. Este es el más utilizado de los polímeros para la modificación de los asfaltos, mantiene sus propiedades durante la vida útil de la mezcla asfáltica.
- **SBR:** Cauchos sintéticos del 25% de Estireno y 75% de butadieno; para mejorar su adhesividad se le incorpora ácido acrílico
- **EPDM:** (polipropileno atáctico) es muy flexible y resistente al [calor](#) y a los agentes químicos.

Las fibras son hilos delgados que se producen al pasar el polímero fundido a través de orificios pequeños en una matriz. Las fibras se enfrían y se estiran. El estiramiento orienta a las regiones de cristales en el sentido del eje de la fibra, lo cual incrementa en

grado considerable la resistencia la tensión de la fibra. Un ejemplo de fibra es el nylon utilizado ampliamente en la industria.

El uso de asfaltos modificados con polímero ha crecido significativamente durante los últimos diez años.

El National Center for Asphalt Technology (NCAT) ha publicado una lista de razones para usar asfalto modificado (King et al, 1999) a continuación algunas de los más importantes:

1. Aumento en su tolerancia a los esfuerzos, disminuyendo así las cargas asociadas a las grietas térmicas.
2. El incremento en su resistencia a la fatiga, particularmente en un ambiente de grandes esfuerzos.
3. El mejoramiento de la unión entre asfalto-agregado, reduciendo las probabilidades de segregación durante el almacenamiento.
4. Evitar un asfalto quebradizo, causado por la abrasión.
5. Minimizar la segregación durante la construcción.
6. Rejuvenecer al asfalto.
7. Incrementar la durabilidad, reduciendo los costos.
8. Aumentar su resistencia a la oxidación.
9. Reemplazar al cemento Pórtland, reduciendo costos.

El mayor problema de en la modificación de asfaltos se presenta en la incompatibilidad de la mayoría de los polímeros comerciales con el asfalto, la mezcla de cualquier polímero en un sistema como el asfalto puede presentar dos problemas extremos:

El primero corresponde a una mezcla en la que no se logra la modificación, esto se debe a muchos motivos entre ellos la baja aromaticidad que puede ser causada por la oxidación del asfalto, provocando que las propiedades del asfalto sean las mismas y no exista una mejora en las mismas.

El segundo caso que se puede presentar es cuando el contenido del polímero es muy alto en la mezcla y las características del asfalto modificado serán únicamente las del elastómero.

Cualquiera de los dos casos pueden presentarse en el momento de la modificación del asfalto, por lo tanto el porcentaje de concentración de los polímeros suele ser factor importante para la mejora de las propiedades de un asfalto modificado.

Sin duda unos de los factores más importantes para lograr una modificación exitosa son las condiciones de mezclado, estudios han revelado que a una temperatura elevada y una agitación apropiado arriba de las 800 rpm (Goodrich et al, 1994) aumentan el cambio en el equilibrio dinámico y mejora la homogeneidad del sistema. Cabe señalar que nos es recomendable modificar un asfalto que se encuentre oxidado porque su contenido de asfaltenos es alto, pues puede existir segregación y por lo tanto las propiedades que exhiba serán pobres y su tiempo de vida corto.

3.5 ASFALTO MODIFICADO CON SBR's

Los modificadores más utilizados en el caso de los asfaltos utilizados para pavimentación y la impermeabilización de superficies, son los copolímeros de estireno (S) y butadieno (B). producidos tanto en emulsión como en solución porque se han encontrado que son relativamente compatibles con el asfalto y mejoran sus propiedades en un rango amplio de temperatura (Stastna et al, 2003).

Las mezclas de asfalto y copolímeros de estireno butadieno en pequeñas cantidades de menos del 10% en peso, tanto aleatorios como en bloque da como resultado, un incremento de la viscosidad. Los polímeros SBR en bloque son los más estudiados debido a que incrementan la elongación, el intervalo de la temperatura de servicio y reducen el acanalamiento en el pavimento y la temperatura de fractura.

El cambio en las propiedades del asfalto pueden medirse mediante las pruebas industriales tradicionales como son la penetración, temperatura de ablandamiento, viscosidad y microscopía. A continuación daremos una breve explicación de cada una de estas pruebas.

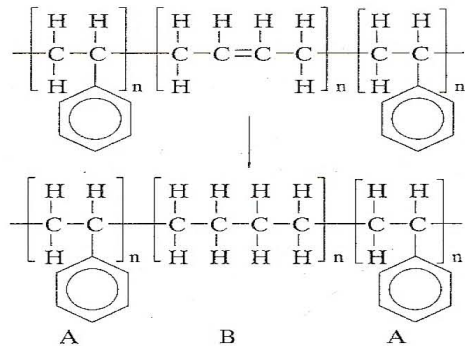


Figura 3. Polímero en bloque SBS.

IV. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

4.1 *Temperatura de ablandamiento ASTM D36.*

Los asfaltos son materiales que no tienen un punto de fusión real (Pfeiffer et al, 1950), solo se hacen más suaves y fluyen más fácilmente con el aumento de temperatura. Para tener una idea más clara de la resistencia del asfalto al calentamiento, se aplica una prueba conocida como Temperatura de Ablandamiento, TA, la cual indica la temperatura en la que el material empieza a fluir a elevadas temperaturas; a medida que la temperatura de ablandamiento aumenta, el asfalto cambia a un estado líquido, más blando y menos viscoso. Cualquier determinación del punto de ablandamiento o temperatura de ablandamiento, es limitada por las condiciones experimentales. Existen dos métodos para determinar la temperatura de ablandamiento:

- Punto de ablandamiento acorde a Kramer y Sarnow.
- Punto de ablandamiento acorde al método de Ring and Ball.

Punto de ablandamiento acorde a Kramer y Sarnow.

En este método, un anillo es llenado de asfalto y sujetado a un tubo, sobre el asfalto son depositados 5 gramos de mercurio, el tubo es sumergido en un baño de agua o glicerina y es calentado de manera uniforme hasta que las gotas de mercurio pasa a través del asfalto y alcanza el fondo del baño, la temperatura en que se encuentra el baño cuando el mercurio toca fondo es registrada como la temperatura de ablandamiento.

Punto de ablandamiento acorde al método de Ring and Ball.

Dicha técnica consiste en llenar con asfalto o asfalto modificado, según sea el caso, en estado líquido, un anillo de latón (5/8 de pulgada de diámetro); una vez que la muestra endurece se deja durante 5 minutos a 25°C para alcanzar el equilibrio, se coloca un balón de

acero encima de la muestra (3/8 de diámetro) y el sistema completo se sumerge en un baño de etilén glicol, mediante el cual se incrementa la temperatura de manera controlada.

El valor de temperatura de ablandamiento se reporta como la temperatura a la cual el balón atraviesa la muestra (la muestra fluye debido al peso del balón) y recorre una distancia vertical descendente de 25 mm. También dependiendo del tipo de asfalto se puede utilizar como baño al agua destilada (con un intervalo de 30-80 °C) para evitar burbujas en la superficie, glicerina (80-157 °C) la cual tiene un punto de inflamación de 160°C

En 1916, se estandariza la determinación por el método de Ring and Ball por la ASTM y es designada D 36.

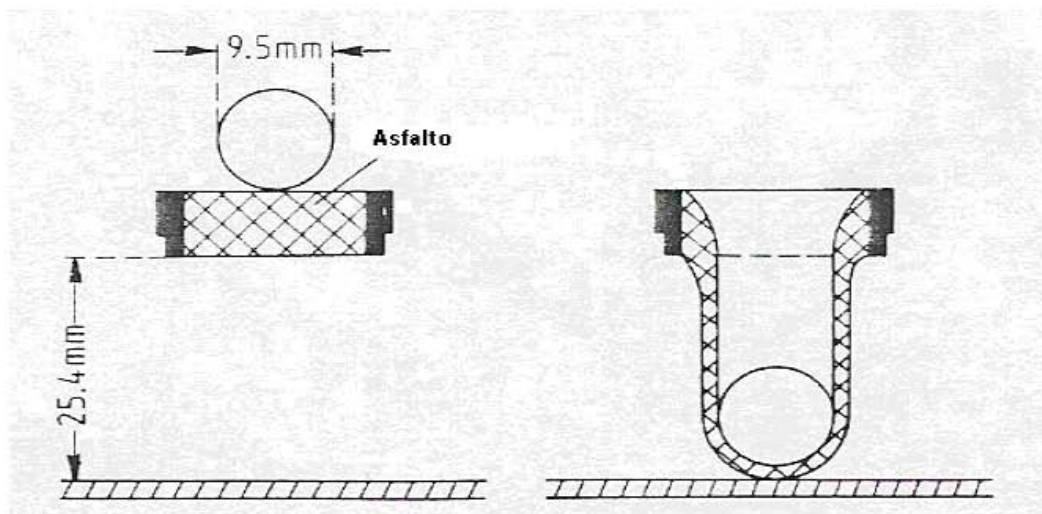


Figura 4. Representación de la temperatura de ablandamiento.

4.2 Penetración, PE (ASTM D5)

Este parámetro es una medida de la dureza de los materiales asfálticos; es la distancia (en décimas de milímetro) que penetra una aguja de acero con dimensiones de 50 mm de largo y de 1.00 a 2.00 mm de diámetro con un peso de 3 gramos, colocada en posición perpendicular a la muestra, sobre la cual se ejerce una fuerza constante, bajo condiciones de temperatura y tiempo de carga bien definidas y controlada. Valores grandes de penetración por arriba de 30 dmm nos dice que es un asfalto de consistencia suave.

El método consiste en colocar la muestra una charola de aluminio de 200 gramos a una temperatura de 25°C utilizando el Penetrómetro, la aguja debe tocar la superficie de la muestra para después dejarla caer durante un tiempo de 5 segundos; la distancia de penetración que será reportada es aquella que la aguja logro atravesar durante ese tiempo.

El método de la penetración fue publicado por primera vez en 1889 mejorado posteriormente por Richardson y años después estandarizado por la ASTM designado como D5.

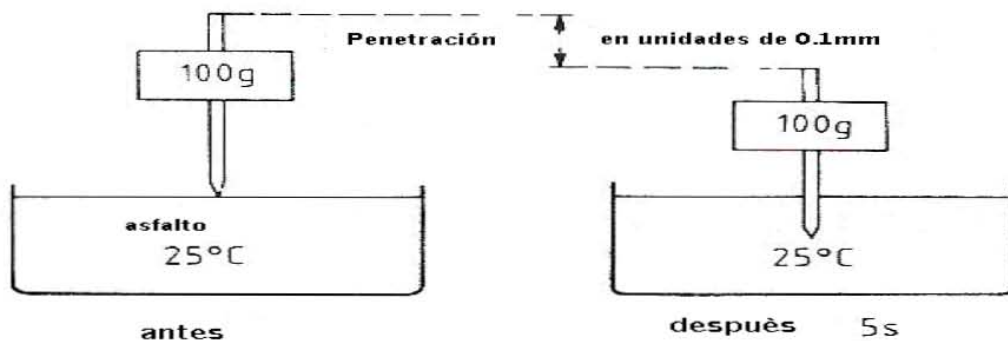


Figura 5. Representación de la prueba de Penetración.

Las dimensiones de la aguja, las condiciones de tiempo, temperatura y de carga fueron establecidas. La profundidad de la penetración es reportada en décimas de milímetro.

4.3 Índice de Penetración

Pfeiffer y Doornal desarrollaron el índice de penetración para asfaltos el cual consiste en expresar el cambio en el comportamiento de la consistencia del asfalto con relación a la temperatura, usando el prueba de penetración en conjunto con la prueba del punto de ablandamiento, ambos son ampliamente utilizados en la industria.

Al graficar el logaritmo de la penetración en función de la temperatura, log penetración vs temperatura se obtienen una línea recta. Donde A es la constante de la penetración y K es la ordenada al origen y representa la constante de susceptibilidad.

Se ha establecido que el índice de penetración PI y la susceptibilidad de la penetración ala temperatura PTS pueden ser usadas para caracterizar a los asfaltos.

$$PI = \left(\frac{30}{1 + 90 \times PTS} \right) - 10$$
$$PTS = \frac{\log 800 - \log PE, 25^\circ C. 100g, 5s.}{TA - 25(^\circ C)}$$

PE, 25°C, 100g, 5s = índice de penetración

TA (°C) = Temperatura de ablandamiento de añillo y balón.

Según el valor de índice de la penetración, se clasifican los asfaltos en las siguientes categorías:

- Para un asfalto con $IP < -2$ es considerado un asfalto tipo resina. Altamente viscosas
- Para un asfalto con un $-2 < IP > 2$ el asfalto tendrá un comportamiento tipo sol con alta aromaticidad, como consecuencia tendrá altas condiciones viscosas. Este tipo de asfaltos son utilizados generalmente para fines viales.

- Para un asfalto con $IP > 2$ tendrá un comportamiento tipo gel con una gran elasticidad.

4.4 *Viscosidad Brookfield, VB (ASTM D4402)*

La viscosidad es una de las propiedades más importantes de un fluido se define como resistencia que ofrece un fluido a fluir. La ley de Newton para la viscosidad establece, que para una rapidez de deformación dada, el esfuerzo cortante es proporcional a la viscosidad.

Este método permite determinar la viscosidad aparente del asfalto, este es comúnmente utilizado para referirse a la viscosidad de los fluidos que depende del esfuerzo que se le aplica consecuentemente esta propiedad depende de los parámetros experimentales bajo las que se llevo a cabo, tales como el modelo del viscosímetro, el tipo de husillo y la velocidad empleada Por lo tanto a lugar de hablar de un coeficiente de viscosidad, se habla de viscosidad aparente.

4.5 *Microscopía de fluorescencia*

La microscopía de fluorescencia es usada extensamente en la biología y la ciencia forense pero recientemente es usada en los laboratorios industriales (Dekker, et al 1998) el principio de esta técnica se basa en las moléculas fluorescentes que absorben la luz de una determinada longitud de onda y emiten luz de otra longitud de onda más larga. Si un componente de este tipo es iluminado por una longitud de onda absorbente y visualizada a través de un filtro que solo permite pasar la luz de longitud de onda igual a la luz emitida, el componente aparece brillante sobre un fondo oscuro.

El sistema óptico del microscopio fluorescente, no ilumina toda la muestra a la vez, sino que en cada momento sólo ilumina un pequeño punto a una cierta profundidad.

La sensibilidad y las ventajas de la microscopía de fluorescencia dependen de la naturaleza del material estudiado. El asfalto es un material difícil de analizar debido a su textura variable, oscura y opaca, no exhibe características fluorescentes, sin embargo, los

aditivos que se le agregan para la mejora de sus propiedades, como son los polímeros, estos materiales a su vez se degradan por efecto de la temperatura, al degradarse estos polímeros exhiben características fluorescentes y se hace visible en estados de cambio de color como de amarillo a un color ámbar o de rojo a café.

Con este método se obtienen información como es la dispersión del polímero en el asfalto, la distribución del tamaño de partícula y la proporción en el que se hincha el polímero aprovechando que este tipo de materiales se comporta de manera diferente al ser excitados con una radiación de longitud de onda conocida y pueden ser evaluadas por medio del análisis de imagen consecuentemente produce imágenes con campos UV bien definidos correspondientes a cada uno de los componentes.

En esta técnica podemos observar dos casos; el primero será cuando el polímero sea la fase continua formando una matriz polimérica y el asfalto suele ser la fase dispersa, el caso contrario consiste cuando la matriz del asfalto será la fase continua y las que se encuentren dispersas serán las partículas de polímero.

V. CARACTERÍSTICAS DEL POLÍMERO SBS.

Para el siguiente trabajo se utilizó un polímero sintetizado en el laboratorio 213 del Posgrado de Ingeniería Química del Edificio “E” de la Facultad de Química

El polímero utilizado para la experimentación se presenta en forma de tribloque estireno – butadieno – estireno tienen una morfología de dos fases, mostrando dominios de poliestireno (PS) inmersos en una matriz de poli butadieno (PB).

En la tabla 1 se exhiben las características más importantes de polímetro utilizado para llevar a cabo el siguiente trabajo.

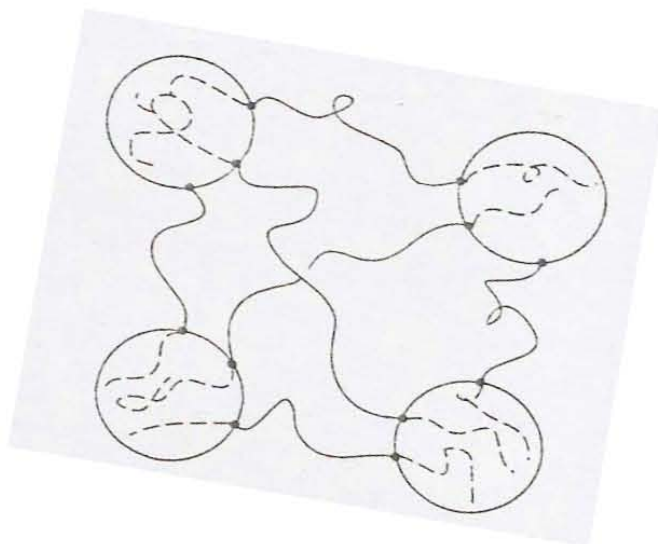


Figura 6. Representación de los dominios de PS (círculos), inmersos del PB (rayas).

Cuando los copolímeros se ordenan de la siguiente forma $M_1M_1M_2M_2$ se dicen que están en bloque como en este caso de los SBR's. Existen diferentes arreglos de copolímeros como son en estrella o lineales como es nuestro polímero que utilizamos.

Tabla 1. Características del polímero utilizado.

	SBS
Estructura	Lineal
M_w	112,000 g/mol
M_n	106,000 g/mol
Polidispersidad	1.06
% Estirenos bloque	17.50
% Total estireno	25.00
% cis (olibutadeino	53.46
% trans	39.04
% vinilos	9.0

El peso molecular numeral, (M_n) , se obtienen de cualquier medida que proporcione el número de moléculas, grupos funcionales o partículas, que se hallan en el peso determinado de una muestra. El peso molecular numeral se obtienen como cualquier otro valor numérico, dividiendo la suma de los valores de los pesos moleculares individuales por el número de moléculas.

$$M_n = \frac{W}{\sum_i N_i} = \sum \frac{M_i N_i}{N_i}$$

- La mayoría de las propiedades termodinámicas están relacionadas con el número o tipo de grupos funcionales. Los valores de M_n son independientes del tamaño molecular, los valores se determina por los métodos queque siguen la ley de Raoult que dependen de las propiedades coligativas.

El peso molecular promedio másico M_w se determina a partir de experimentos en las que cada molécula o cadena del polímero contribuye a la medida final de acuerdo con su tamaño y se expresa de la siguiente forma:

$$M_w = \frac{\sum_i^{\infty} M_i^2 N_i}{\sum_i^{\infty} N_i}$$

Se determina mediante métodos de dispersión de luz y ultracentrifugación debido a que las propiedades de la masa se asocian con grandes deformaciones, como la viscosidad.

Otra de las propiedades importantes cuando se habla de un polímero es la polidispersidad, se dice que un polímero es polidisperso cuando constan de moléculas de distintos pesos moleculares, cadenas con números distintos de unidades de repetición para poder cuantificar esto se ha establecido la siguiente expresión tomando en cuenta el peso molecular numeral y el peso molecular promedio:

$$\frac{M_w}{M_n} = \text{polidispersidad}$$

VI.OBJETIVO PRINCIPAL E HIPÓTESIS

Objetivo Principal

El objetivo principal del presente trabajo consiste en investigar el efecto de la relación de asfaltenos/maltenos en el asfalto modificado con SBS utilizando como criterios de evaluación a los siguientes parámetros: temperatura de ablandamiento, penetración, viscosidad aparente completando con microscopía de fluorescencia.

Objetivos particulares

- ✓ Separación del asfalto en sus dos componentes principales; asfaltenos y maltenos.
- ✓ Preparación de las muestras de los asfaltos reconstituidos y modificados.
- ✓ Caracterización de las muestras de los asfaltos reconstituidos y modificados.

Hipótesis

La siguiente hipótesis fue el punto de partida para alcanzar el objetivo propuesto para poder realizar el presente trabajo considerando lo siguiente:

El cambio de la relación de asfaltenos/maltenos afecta las propiedades térmicas y mecánicas de los asfaltos modificados con SBS.

VII.DESARROLLO EXPERIMENTAL

➤ *Fraccionamiento del asfalto Corbett, separación del asfalto: en asfaltenos y maltenos (ASTM D4124).*

El procedimiento que se siguió para separar el asfalto en sus principales dos componentes: asfaltenos y maltenos, fue el recomendado por la ASTM D4124. De acuerdo a este procedimiento, en un reactor con una capacidad de 8 litros se agrega el disolvente (n-heptano) y el asfalto y se calienta a una temperatura de 180 °C durante cuatro horas con un agitación continua.

Transcurrido ese tiempo se lleva a cabo una separación de fases (asfaltenos y maltenos) los asfaltenos caen al fondo del reactor mientras los maltenos quedan inmersos en el disolvente. Inmediatamente se filtran en caliente para obtener la fracción insoluble (asfaltenos), y los maltenos disueltos en el n-heptano se vuelven a filtrar para evitar que acarree trazas de asfaltenos. Los maltenos junto con el disolvente son introducidos a una estufa para evaporar los residuos de n-heptano, durante diez horas y obtener finalmente a los maltenos.

Los asfaltenos se les coloca en charolas y se introducen al estufa para evaporar el disolvente durante doce horas.

Este procedimiento permitió alcanzar rendimientos del 98% en la separación de maltenos y asfaltenos.

Para poder llevar a cabo el presente trabajo se definen a continuación los siguientes conceptos:

➤ Asfalto modelo.

Este trabajo se le nombra asfalto modelo, aquel asfalto que tiene un porcentaje de asfaltenos o maltenos diferente al asfalto del que proviene, el AC-20 de Salamanca.

Debido a que la separación de asfaltenos y maltenos resulta costosa y laboriosa, el asfalto modelo se elaboro con un porcentaje de asfaltenos o maltenos según fuera el caso tomando como base el asfalto AC-20 de Salamanca.

Se prepararon muestras de 120 gramos. Para ello se considero primeramente la composición deseada y mediante un balance de masa se calculó la cantidad del asfalto AC-20, para cada una de las muestras. Los pasos que se siguieron fueron los siguientes:

i. En una lata de 200 ml de aluminio se agregaron las cantidad requeridas de AC-20. En el caso de los maltenos, la muestra se podía agregar junto al asfalto.

ii. En un baño de aceite previamente calentado se colocaba la lata, cuando el asfalto se encontraba caliente y podía fluir se introducía una propela y se agitaba a 800 rpm a la par se introducía un tubo con nitrógeno para evitar la oxidación del asfalto y se cerraba la lata. La propela utilizada para la agitación fue tipo turbina Rushton, (Myers et al 1996).

Se mezclo la muestra durante cuatro horas con las condiciones anteriores formando una mezcla homogénea.

➤ Preparación del asfalto modelo modificado.

Esta operación considera a los diferentes tipos de asfalto (modelo o el AC-20) y por lo tanto se identificara a las muestras por la clave correspondiente al tipo de asfalto modelo.

El procedimiento para preparar el asfalto modelo modificado a dos concentraciones de polímero es similar al de los asfaltos modelo con diferencia de que esta vez se le agrega el polímero, el procedimiento a seguir fue el siguiente:

○ Se pesaron 120 gramos de asfalto reconstituido en latas de 200 ml y se calentaron a 180 °C para tenerlo en fase líquida, esto se hace con ayuda de un baño de aceite, se introducía un tubo con nitrógeno y se cerraba la lata con la finalidad de lograr una

atmósfera inerte, al llegar a la temperatura deseada se empezaba a agitar a 800 rpm y se esperaban 10 minutos para estabilizar el sistema y se le agregaba el polímero de forma lenta y gradual para evitar aglomeraciones durante aproximadamente 20 minutos, una vez agregado se esperan cuatro horas. Una vez terminada la modificación se prepararon las muestras para los diferentes pruebas de caracterización.

Una vez terminadas las muestras de los asfaltos, modelo y los asfaltos modificados con polímero, se prosiguió a realizar las pruebas de caracterización como a continuación se describe:

- Temperatura de Ablandamiento ASTM D36

La prueba se hizo conforme a la técnica descrita por la ASTM D36, el asfalto caliente es vaciado en el anillo, se deja enfriar a temperatura ambiente, cuando el asfalto se enfría y se encuentra en estado sólido se coloca el anillo en el aparato Ring and Ball, este a su vez es introducido en un vaso de precipitados de 500 ml con glicerina junto con un termómetro de mercurio. El vaso es colocado en una parrilla, con una agitación leve, cuando la temperatura aumenta el asfalto se ablanda como consecuencia el anillo atraviesa el asfalto y toca el fondo del aparato, se registra la temperatura en la que se encuentre el sistema, a esta temperatura se le conoce como el punto de ablandamiento.

- Penetración ASTM D5

La prueba de penetración se realiza en charolas de aluminio con 20 gramos de muestra, para tener la muestra a 25 °C, es necesaria mantenerla en un baño maría a esa temperatura, cuando se va a realizar la prueba se saca la muestra del baño se quita el exceso de agua de la superficie y se coloca en el penetrómetro. Se baja la aguja a la superficie de la muestra, y activa el cronometro y se deja caer la pesa de 100 gramos durante 5 segundos, la aguja penetra la superficie y el aparato mide la distancia que penetra la aguja en dmm .

Este procedimiento se lleva a cabo durante 10 veces, para obtener un promedio de las lecturas, teniendo cuidado de que la temperatura de la muestra sea siempre de 25 °C.

- Viscosidad ASTM D4402

Las mediciones de viscosidad del asfalto y del asfalto modificado a las diferentes temperaturas fueron realizadas con un viscosímetro Brookfield,, modelo Rv equipado con cámara de control de temperatura. Las mediciones a fueron realizadas tres temperaturas a 135, 160 y 177 ° C con 15 gramos de la muestra (de asfalto o asfalto modificado) cantidad necesaria para llevar a cabo la prueba de viscosidad, los husillos utilizados fueron SC4-27 y para los asfaltos con mayor cantidad de asfaltenos se utilizo el RV-7.

El procedimiento a seguir fue el siguiente:

- El cartucho con la muestra, se introdujo en la termo celda y programa la cámara de control de temperatura a 135 °C.
- Se enciende el Viscosímetro.
- Se enciende la computadora y se selecciona el programa Rheocall,
- El programa automáticamente calibra el viscosímetro.
- Una vez calibrado el viscosímetro, se coloco el husillo y se introduce a la muestra.
- Se pone en marcha el programa la muestra tarda 30 minutos en estabilizarse.
- Una vez transcurrido ese tiempo se toma el primer dato de viscosidad a 0 rpm al transcurrir 2 minutos con 30 segundos, se toma el segundo dato a 10 rpm, así sucesivamente hasta llegar a un 250rpm.
- Una vez que se terminaron las lecturas se selecciono la siguiente temperatura. La muestra se vuelve a dejar estabilizar durante 30 minutos y el procedimiento anterior se vuelve a repetir.

- Microscopía de Fluorescencia

La muestra utilizada fue la misma que se utilizo para a prueba de penetración, las charolas son de aluminio con 20 gramos de muestra. se limpia la superficie dela muestra con sumo cuidado. Se enciende le microscopio y se coloca la muestra en la base se busca una zona de la muestra que sea representativa y se toma la fotografía. El tiempo de

exposición de la muestra con la lámpara no debe exceder los 15 segundos. El procedimiento se repite para todas las muestras.

VIII.PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para el presente trabajo el asfalto del que se partió fue el Ac-20 de Salamanca que contiene 20 % de asfaltenos y 80 % de maltenos, el polímero utilizado fue un estireno – butadieno – estireno cuyas características moleculares se muestran en la tabla 2.

Se estudiaron asfaltos modificados a dos concentraciones de polímero: 3 y 8% en peso. Las muestras de asfalto y asfalto modificado se identifican con una clave que tienen primero una M de muestra y posteriormente un número de dos dígitos que indica el porcentaje en peso de maltenos utilizado antes de modificarlo; luego la muestra de asfalto modificado tiene una letra C para indicar la concentración de polímero y finalmente el número que indica el % en peso de polímero de estireno-butadieno.

Tabla 2. Claves para las muestras de asfalto.

CLAVE	% ASFALTENOS	% POLÍMERO
M70	30	0
M70C3	30	3
M70C8	30	8
M75	25	0
M75C3	25	3
M75C8	25	8
M80	20	0
M80C3	20	3
M80C8	20	8
M85	15	0
M85C3	15	3
M85C8	15	8
M90	10	0
M90C3	10	3
M90C8	10	8

Así por ejemplo, la muestra M70 corresponde a un asfalto no modificado que contiene 70% en peso de maltenos, mientras que la M70C3 corresponde a un asfalto modificado con 3% en peso de polímero.

Las concentraciones de 3% y 8% de polímero fueron elegidas, tomando en cuenta lo que se ha reportado en la literatura, el intervalo de modificación para asfaltos es entre 3 – 12% en peso de polímero. Se quería estudiar el efecto de la relación de asfaltos/maltesos en una concentración baja de polímero y en una concentración alta de polímero que es el 8% en peso no se eligió la modificación a 12% en peso debido a que los asfaltos resultantes serían extremadamente duros y pruebas como la viscosidad y temperatura de ablandamiento no se hubieran podido llevar a cabo.

En cuanto al porcentaje de asfaltos se escogieron, tomando en cuenta la composición de los tres diferentes tipos asfaltos de mundo; por ejemplo el Asfaltito tienen un porcentaje de asfaltos muy grande de alrededor de 25 %, entre los asfaltitos más importantes encontramos el asfalto de Bermudas y el de Venezuela.

Entre los asfaltos reconstituidos con porcentajes de aproximadamente 15% y 20% de asfaltos se encuentra el asfalto tipo Lake que se refina en Trinidad. Entre los asfaltos con menor porcentaje de asfaltos se encuentra el asfalto tipo Rock proveniente de Kentucky en Estados Unidos y el de Seyssel, en Francia.

De esta forma se escogieron la proporción de asfaltos y maltesos, para conocer el efecto de la relación asfaltos/maltesos sobre un asfalto que ha sido modificado con un polímero SBS el cual se ha estudiado ampliamente.

IX.RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Temperatura de Ablandamiento(ASTM D36)

Esta prueba nos proporciona una idea del comportamiento térmico de los asfaltos modificados pues a medida que la temperatura aumenta el asfalto cambia de un estado sólido a un estado más blando y menos viscoso. La técnica utilizada fue como se explico en la sección anterior, conforme a la norma ASTM D36.

La temperatura se encuentra expresada en grados Celsius.

En la figura 7 se observan que la TA se incrementa al aumentar la cantidad de asfaltos en los asfaltos reconstituidos, aunque la tendencia no es lineal, se observa claramente que la relación es directamente proporcional.

Las muestras con 10% y 15% de asfaltos presentan valores bajos de temperatura de ablandamiento, entre 50-60 °C esto se debe a la gran cantidad de maltenos que contienen, estos maltenos a su vez hacen que los asfaltos tengan una consistencia muy blanda.

La TA se incrementa de manera considerable para los asfaltos a partir de la muestra con M80 que tiene 20% de asfaltos. Cuando tenemos los asfaltos con 25% y 30% de asfaltos los valores de la TA son altos en relación a las otras muestras debido a su gran concentración de asfaltos, son extremadamente duros casi sólidos a temperatura ambiente.

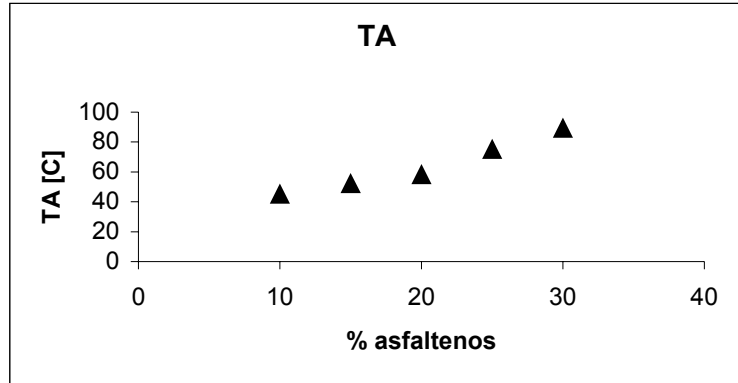


Figura 7. Temperatura de ablandamiento de los asfaltos en función de los asfaltenos

En la figura 8, se comparan los valores de la TA de los asfaltos sin modificar y 3% en peso de polímero SBS. Comparando los valores de la temperatura de ablandamiento para los asfaltos sin modificar y los modificados con 3% en peso de polímero, se observa que los valores de la TA siguen con la tendencia de incrementarse conforme aumenta la cantidad de asfaltenos en las muestras.

Los valores más altos de TA lo presentan las muestras M70 y M70C3 debido a su gran cantidad de asfaltenos, el valor más alto entre ambas muestras fue la del asfalto M70C3, debido a que el polímero mejora la resistencia a la deformación térmica, aunque no de forma significativa.

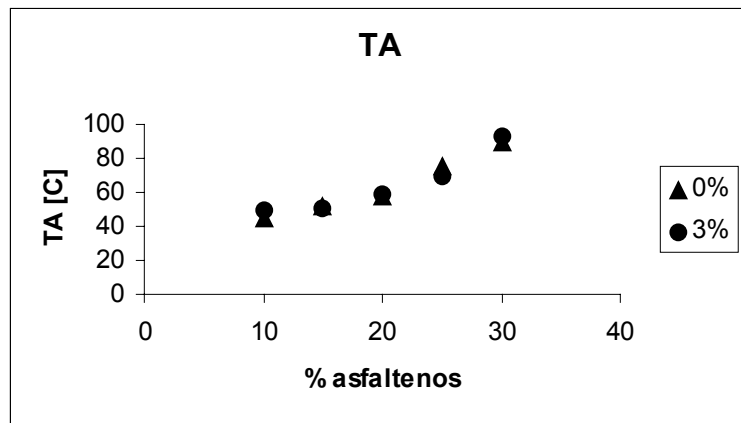


Figura 8. Datos de la temperatura de ablandamiento

Ahora comparemos las muestras M90 y M90C3 que son el caso extremo, pues únicamente tienen 10% de asfaltenos, presentan los valores más pequeños de TA. Ambos son asfaltos muy blandos y con una gran facilidad a fluir. Se observa que también en este caso la muestra con mayor TA es la modificada con 3% de polímero.

La TA para las muestras M85 y M85C3, tiene un valor similar, el polímero no mejora de manera notoria su comportamiento térmico, lo mismo sucede con las muestras M80 y M80C3.

La muestra M75C3 no mejora su comportamiento térmico con respecto a la muestra M85, esto se puede deber a diferentes factores, por una mala compatibilidad con el polímero o que existió segregación en la muestra.

En la gráfica 8 se puede observar que los valores de TA para cada una de las muestras con mismo porcentaje de asfaltenos y con 3% de polímero son muy similares y difieren por pocos grados Celsius, con esto podemos concluir que la influencia del polímero en la temperatura de ablandamiento del asfalto esta concentración no es significativa.

En la figura 9 se observa el comportamiento de los asfaltos modificados a 8% en peso de polímero contra aquellos que fueron modificados a 3% en peso, el incremento de la TA fue significativo en todas las muestras, el resultado del aumento de la concentración del polímero fue un incremento en su resistencia a la deformación térmica.

Para la muestra M90C8, el aumento fue considerable, a pesar de ser un asfalto muy blando su temperatura de ablandamiento fue alta, en comparación a la muestra M90C3, la muestra con mayor cantidad de asfaltenos y con 8% de polímero presentó el valor más alto de TA, cabe señalar que este asfalto era extremadamente duro y sólido a temperatura ambiente, su resistencia a la fractura térmica es alta en comparación a los otros asfaltos.

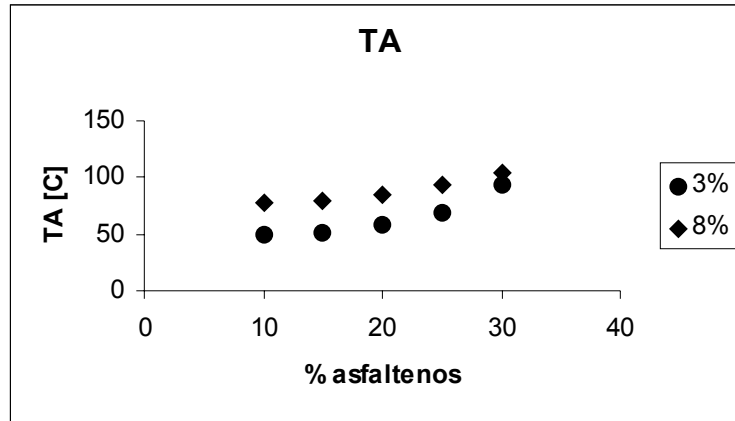


Figura 9. Datos de la temperatura de ablandamiento.

La muestra M85C8, presentan el mismo comportamiento que las anteriores muestras, existe un incremento en la TA con respecto a la muestra M85C3 lo mismo sucede con la muestra M80C3 y M80C8.

De lo anterior podemos concluir lo siguiente, la variación e incremento de la concentración de asfaltenos en cada muestra trae como resultado un aumento en la temperatura de ablandamiento; si a esto le agregamos 3% en peso de un polímero de estireno-butadieno, dicha temperatura se incrementara con respecto a aquellos que no están modificados y a su vez esta incremento será más significativo si la concentración del polímero es de 8% en peso.

Penetración (ASTM D5)

Esta prueba proporciona información del comportamiento mecánico de las muestras, a cada una de las muestras de asfalto se le aplico la prueba (a 25 ° C, con 100 gramos y 5 segundos) diez veces y se reporta un valor promedio.

En la figura 10 se muestran los datos de la prueba de penetración de los asfaltos sin modificar se observa una tendencia casi lineal en los datos reportados, al aumentar la concentración de los asfaltenos la penetración se incrementa, debido a que los asfaltenos proveen dureza al asfalto.

Como es de esperarse la mayor penetración la presenta la muestra M90 (10% de asfaltenos) con solo 58 dmm de penetración, este asfalto es de consistencia muy blanda, y tiende a deformarse con facilidad debido a su gran cantidad de maltenos, carece de firmeza al tacto.

En el caso de las muestras M85 el valor de la penetración es muy bajo en comparación a la muestra M80, esto se puede deber a errores experimentales en la prueba de penetración o que ambas muestras tienen un comportamiento mecánico similar.

Las muestra M75 que tiene 25% de asfaltenos, muestra un valor de PE pequeño en comparación a los asfaltos anteriores de tan solo 19 dmm, finalmente la muestra M70 con 30% de asfaltos reporta el valor más de PE, es un asfalto muy duro al tacto a temperatura ambiente con gran resistencia a la deformación.

En la grafica 11 se comparan los datos de penetración para las muestras con 0% y 3% de peso de polímero de estireno-butadieno. Se observa que las muestras M90 y M90C3, presentan mayor penetración con respecto a los otros asfaltos, debido a su gran concentración de maltenos y que ambas muestras presentan reportan valores muy similares. Sin embargo comparando ambos valores, el valor más alto de PE la presenta la muestra M90C3 con respecto a la muestra M90, esto se debe a que el polímero provee de propiedades elásticas volviendo más suave y dúctil.

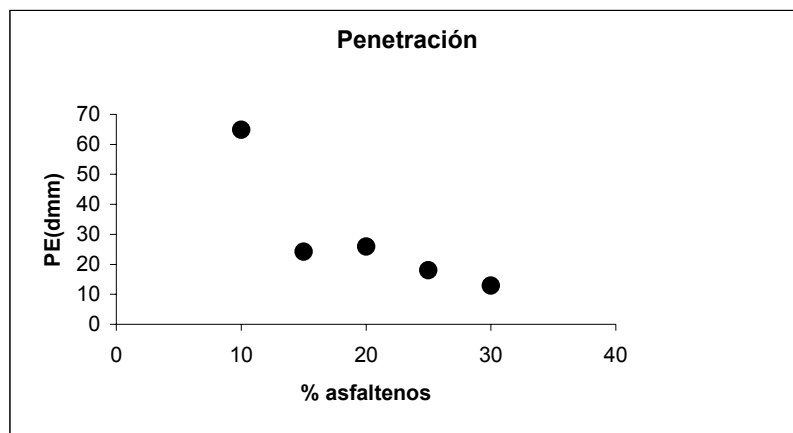


Figura 10. Datos de la prueba de Penetración.

Las muestras M70 y M70C3 tienen los valores más pequeños de PE debido a su gran cantidades de asfaltenos, comparando ambas muestras el valor mas alto la presentan la muestra M70, tienen mayor dureza y resistencia a la fractura por fatiga con respecto muestra M70C3. La influencia del polímero a 3% en peso no es muy marcada en las muestras M70 y M70C3 pues se observa que ambas muestras presentan valores de PE muy similares.

La influencia del polímero es más muy notoria en el caso de la muestra M80 y M80C3 que en los otros asfaltos, presentando esta ultima un valor más alto de PE.

De la anterior grafica podemos concluir lo siguiente, que los valores más altos de PE los reportan los muestras que tienen una menor cantidad de asfaltenos aun modificadas con 3% de polímero y que el porcentaje de asfaltenos en los asfaltos modelos trae como consecuencia que el asfalto sea duro y la influencia del polímero en la asfalto es proporcionarle una mayor suavidad y ductibilidad.

Comparando ambas concentraciones (3% y 8% en peso), en la figura 12, observamos que nuevamente que los valores más altos de PE los reportan aquellos asfaltos que presentan menor cantidad de asfaltenos aun aquellos que fueron modificados con una concentración alta de polímero de 8% ambas M90C3 y M90C8 muestras presentan valores muy similares.

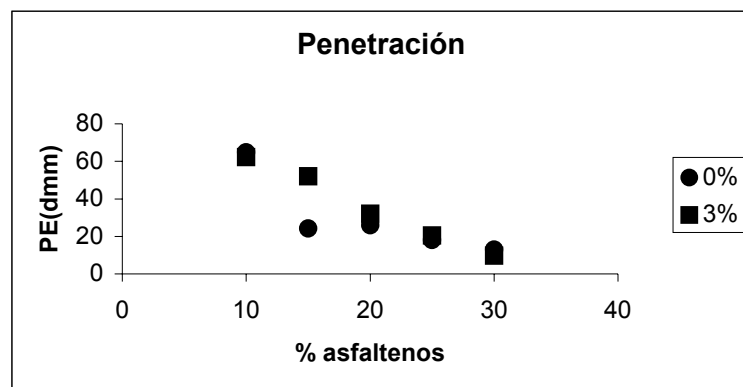


Figura 11. Datos de la prueba de Penetración.

La influencia de los asfaltenos es mayor que la del polímero en las muestras modificadas aun en una concentración grande como la de 8% en peso.

En el caso de las muestras con 25% y 20% de asfaltenos los valores de PE se encuentran muy cercanos.

Con la muestra M85C3 y M85C8 los valores de PE fueron muy distintos entre si, y en este caso se puede ver claramente la influencia del polímero en ambas muestras a una concentración de 3% la PE es menor y a una concentración del 8% la PE disminuye de manera considerable.

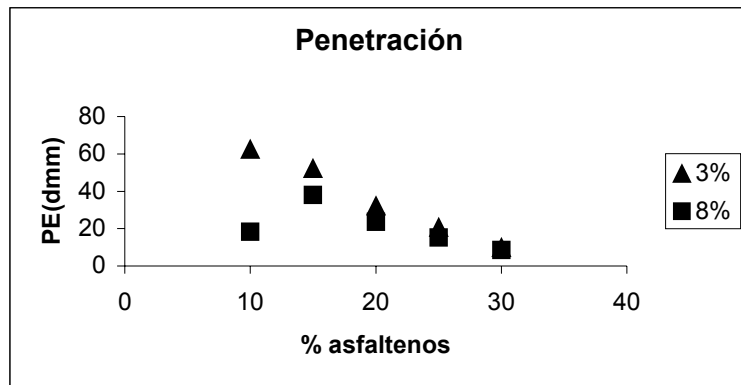


Figura 12. Datos de la prueba de Penetración.

El mismo comportamiento se observa en las M90C3 y M90C8, la cual al aumentar la cantidad de polímero la PE disminuye de forma significativa.

De lo anterior podemos concluir lo siguiente la adición del polímero de estireno-butadieno a una concentración de 3% no afecta de manera considerable a los asfaltos modificados en cuanto a los valores de PE, cuando se le agrega el polímero a una concentración de 8% en peso la influencia del polímero se ve reflejada en una disminución de la PE, es decir cuando a los asfaltos se les modifica a una concentración alta de polímero el resultado es un asfalto con menor penetración pero sin la fragilidad que puede presentar los asfaltos que cuentan con una cantidad alta de asfaltenos pero que a su vez esto provoca que sean quebradizos.

Viscosidad (ASTM D4402)

La prueba fue realizada en el laboratorio con un viscosímetro Brookfield a tres diferentes temperaturas:, 135 °C, 160 °C y 177°C.

Temperatura 135°C.

En la figura 13 se muestran los datos de viscosidad para los asfaltos sin modificación. Los valores de viscosidad a 135 °C son muy altas, debido a que a esta temperatura los asfaltos, se encuentran semisólidos sobre todo en las muestras con gran cantidad de asfaltenos como la M70. Se puede observar que los asfaltos con 10%, 15% y 20% de asfaltenos respectivamente reportan valores de viscosidad muy parecidos entre si casi se puede observar una tendencia lineal para las tres muestras.

Los valores de viscosidad de las muestras M75 y M70 se reportan altos con respecto a las otras muestras.

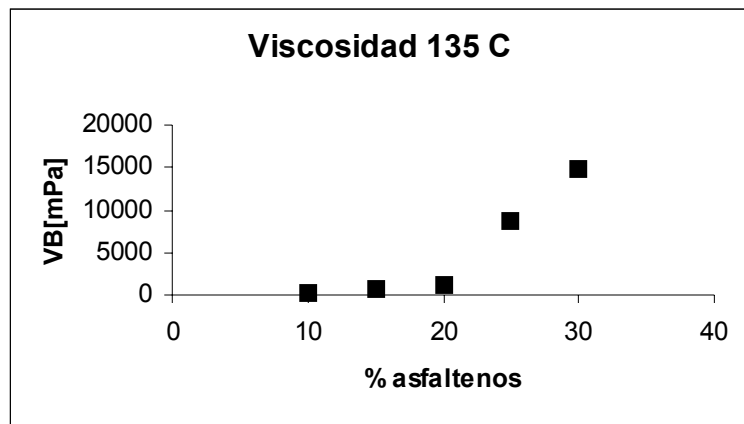


Figura 13 Datos de viscosidad a 135°C.

Analizamos las muestras cuando le agregamos 3% de polímero con respecto aquellos asfaltos sin modificar. Figura 14.

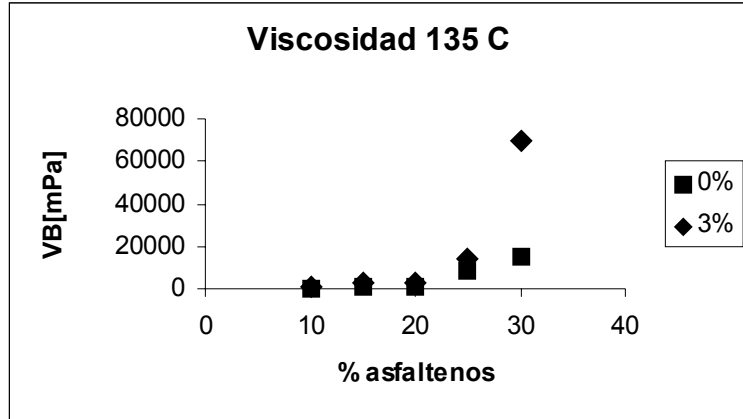


Figura 14. Datos de viscosidad a 135°C.

Se puede observar que la viscosidad aumenta significativamente al agregar el polímero estireno-butadieno a una concentración de 3% respecto a los asfaltos sin modificar, los valores más altos la presentan las muestras con 30% de asfaltenos, comparando ambas muestras el valor más alto lo presenta la muestra M70C3 debido a su gran concentración de asfaltenos y las propiedades del polímero que incrementa su viscosidad.

Con respecto a las otras muestras existe un ligero aumento en la viscosidad con respecto a aquellas muestras que han sido modificadas únicamente con un 3% en peso de polímero.

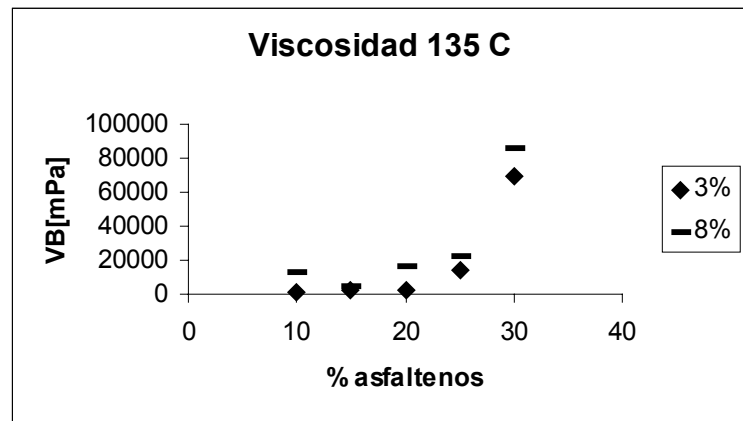


Figura 15. Datos de viscosidad a 135°C.

En la figura 15 se compara los datos obtenidos de viscosidad cuando tenemos un 3% y 8% en peso de polímero. Los valores más bajos lo presenta la muestra M90 y M90C3, ambos asfaltos tienen gran facilidad a fluir, debido a su gran cantidad de maltenos, la viscosidad más alta la presenta la muestra con 8% de polímero.

En general para la prueba de viscosidad en los asfaltos modificados a una temperatura de 135°C, la viscosidad se incrementa al aumentar la cantidad de asfaltos y la concentración de polímero.

Temperatura 160°C.

Analizamos nuestras asfaltos sin modificar a 160 °C, en la figura 16 se observa que los valores de viscosidad disminuyeron en forma drástica con respecto a la otra temperatura de prueba 135 °C. Esto se debe al que el asfalto es un material sensible a temperatura por la tanto al incrementarse la temperatura disminuye la viscosidad.

El valor más alto de viscosidad la presenta la muestra M70.y el mínimo de M90 que es la muestra con menor cantidad de asfaltos.

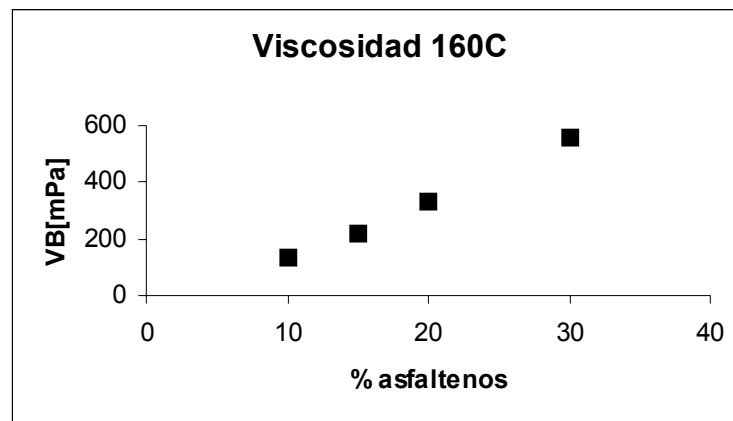


Figura 16. Datos de viscosidad a 160°C.

Comparando nuevamente los valores de viscosidad de los asfaltos sin modificar y los modificados a 3% de polímero a 160 °C se observa un incremento de la viscosidad, como los datos de viscosidad aumentan significativamente se puede ver en la figura que pareciera que los asfalto sin modificar tienen una tendencia casi lineal. Las muestra M70C3

presentan el valor más alto de viscosidad de todas las muestras, el valor más bajo la presenta la muestra con mayor cantidad de asfaltenos M90C3.

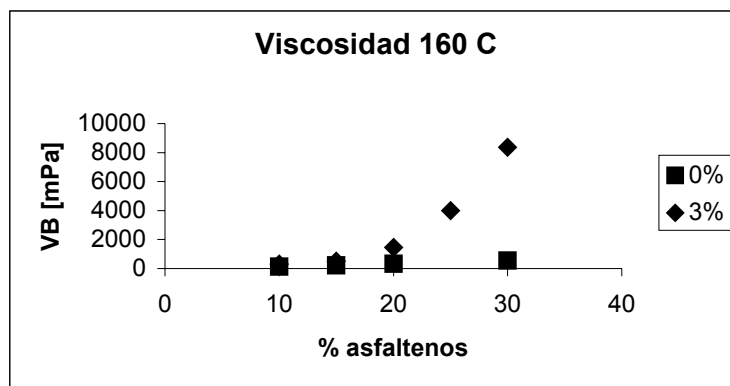


Figura 17. Datos de viscosidad a 160°C.

A continuación comparemos las asfaltos modificados a 3% y a 8% (Figura 18) el comportamiento es similar a los otros casos la viscosidad se incrementa conforme aumenta la cantidad de asfaltenos en las muestras, la influencia del polímero es la de aumentar de manera significativa la viscosidad en todas las muestras sin importar el porcentaje de asfaltenos presente en cada una de las muestras.

Los valores de viscosidad disminuyeron con respecto a la otra temperatura de 135 °C, como era de esperarse, como sabemos la viscosidad de un fluido en este caso el asfalto disminuye conforme aumenta la temperatura.

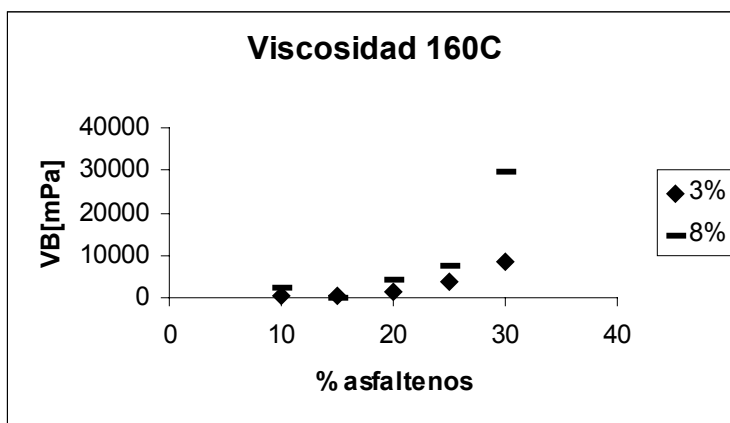


Figura 18. Datos de viscosidad a 160°C.

Temperatura 177°C.

Los valores de viscosidad a esta temperatura disminuyeron en forma drástica con respecto a las otras temperaturas. El comportamiento sigue siendo el mismo la muestra M70 sigue siendo la de mayor viscosidad y la muestra M90 la de menor las otras muestras se mantienen en punto intermedios (figura 19) de ambas muestras, la viscosidad disminuyen conforme se incrementa la cantidad de maltenos.

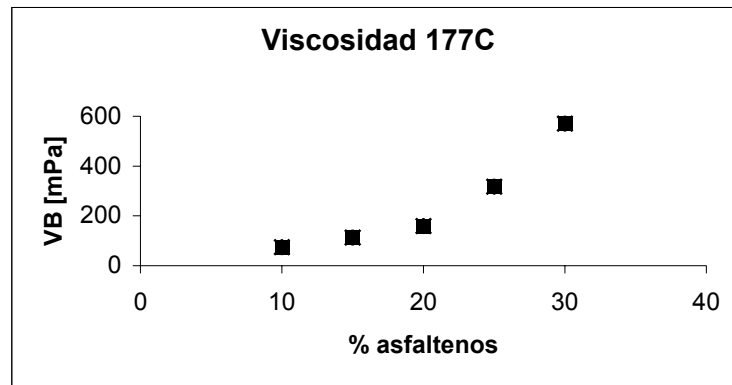


Figura 19. Viscosidad para los asfaltos a 177°C.

Cuando se realizó la prueba a esta temperatura, figura 20, la muestra que tuvo un incremento significativo de viscosidad fue la M70C3 con respecto a la M70 que no fue modificada, este mismo incremento la presentó la muestra M75C3 con relación al M75, como se puede observar en la figura.

Las muestras M90C3, M85C3 y M80C3 presentaron un ligero aumento con respecto a los asfaltos que no fueron modificados.

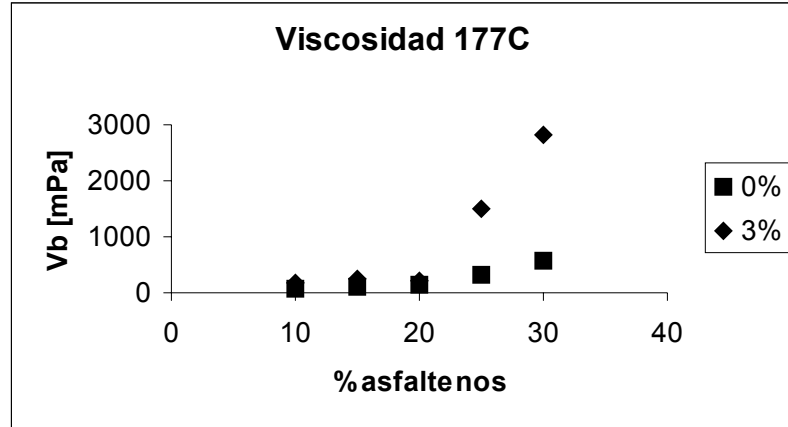


Figura 20. Viscosidad para los asfaltos modificados a 177°C.

Figura 21 se muestran los datos de viscosidad para las muestras modificadas con 3% y 8% de polímero, en este caso, podemos observar un incremento notable de la viscosidad en la muestra M70C8. Se puede observar que el valor de viscosidad es tan grande que no se compara con la muestra M70C3 que esta modificada con 3% de polímero.

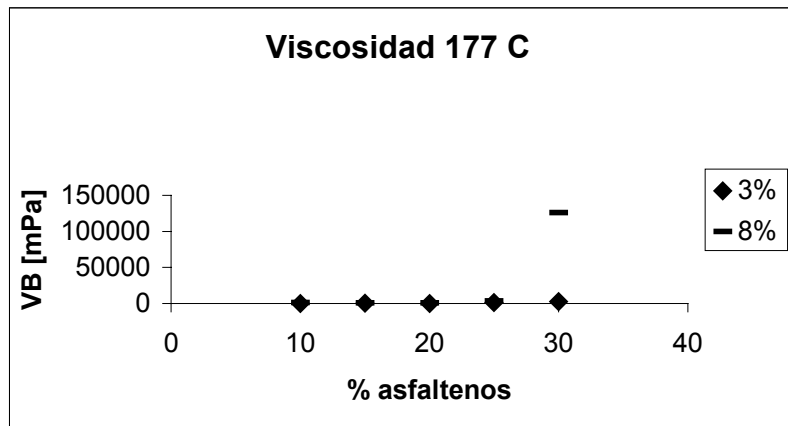


Figura 21. Viscosidad para los asfaltos modificados a 177°C.

Las otras muestras presentan un incremento con respecto aquellos que fueron modificadas a 3% de polímero.

De lo anterior podemos concluir lo siguiente: el asfalto es un material que es susceptible a la temperatura, conforme aumenta la cantidad de asfaltenos se incremento la viscosidad. Cuando se le agrega polímero el incremento en la viscosidad en muy marcada para las muestras M70C3 y M70C8.

Con los resultados obtenidos de las pruebas de penetración, temperatura de ablandamiento y viscosidad se hacen las siguientes observaciones:

- El aumento del porcentaje de asfaltenos, incrementa la temperatura de ablandamiento, debido que los asfaltenos son partículas de alto peso molecular que tienden a agruparse y proveen al asfalto de dureza y cohesión a alta temperatura.

- Al aumentar la concentración de los asfaltenos decrece la penetración en todas las muestras esto es consecuencia de los agregados formados por los asfaltenos que proveen resistencia y adhesión al asfalto.

- Los valores de penetración más pequeños los reportan los asfaltos con menor cantidad de asfaltenos debido a las resinas que conforman a los maltenos aumentan la elasticidad y los aceites saturados aumentan la fluidez hacen que el asfalto se vuelve más blando.

- La viscosidad del asfalto disminuye conforme aumenta la temperatura, debido a que el asfalto es un material sensible a la temperatura.

- El efecto de los asfaltenos es significativo en el caso de la viscosidad, al aumentar la cantidad de asfaltenos se incrementa la viscosidad.

- La viscosidad disminuye conforme aumenta la cantidad de maltenos en las muestras sobre todo en la muestra con 10% de asfaltenos.

- La influencia del polímero en todos los tipos de asfalto es la de aumentar la temperatura de ablandamiento, al mejorar la temperatura de ablandamiento se demuestra que el polímero tribloque de estireno-butadieno-estireno incrementa la resistencia del asfalto a fracturas térmicas, sobre todo a una concentración del 8% en peso del polímero.

- En la prueba de penetración, el efecto es inverso a la de la temperatura de ablandamiento, la PE disminuye conforme aumenta la concentración de polímero.

- El efecto de la adición del polímero sobre la viscosidad fue un incremento significativo para aquellas muestras con un alto contenido de asfaltenos y un 8% en peso de polímero.

Índice de Penetración

El índice de penetración clasifica a los asfaltos en tres diferentes tipos de asfalto: tipo sol, resina y gel en este caso presentamos en la figura 22, las curvas de índice de penetración para los asfaltos con 0, 3 y 8% de polímero en función de la cantidad de asfaltenos.

Podemos observar se observa que los asfaltos modificados a 0 y 3% en polímero muestras con 10, 15 y 20% de asfaltenos presentan valores en un rango de $-2 < IP > 2$, por lo tanto utilizando la clasificación mencionada, este asfaltos se comportan como asfaltos tipo resina, debido a su gran contenido de maltenos. Para los asfaltos con 25 y 30% de asfaltenos su comportamiento se compara a un coloide tipo sol (un sistema de donde la fase dispersa es un sólido y la continua un líquido).

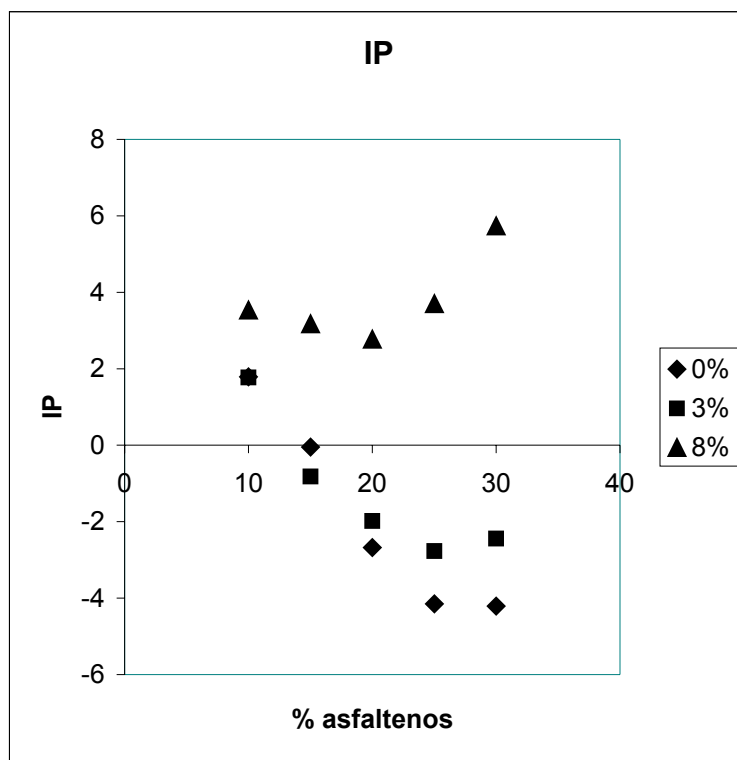


Figura 22. Curvas del índice de penetración a 25°C, 100 g a 5 s.

Para los asfaltos con 8% de polímero, el comportamiento de todos los tipos de asfaltos, son de tipo gel, es decir la fase dispersa se encuentra en un estado líquido y la fase continua es sólida, esto explica que estos asfaltos sean duros y con mayor resistencia a fluir.

Para el caso del InPE se puede observar lo siguiente:

- Para los asfaltos modificados con 8% de polímero reportan valores arriba de 2, por lo que los clasificamos como asfaltos tipo gel.
- En el caso de las muestras con 3% de polímero, las muestras con bajo contenido de asfaltos se ubican en un rango de $-2 < IP > 2$, con lo que presentan un comportamiento tipo resina, mientras las muestras con 25% y 30% de asfaltos, presentan un comportamiento coloidal tipo sol.
- Las muestras sin modificar presentan un comportamiento similar a los asfaltos con 3% de polímero, las muestras con alto contenido de asfaltos presentan valores de índice de penetración debajo de -2, por lo que se les clasifica como tipo sol. Mientras los asfaltos con bajo contenido se le clasifica como tipo resina.
- Es decir, que en el caso del índice de penetración el efecto del polímero es notorio cuando se lleva a cabo una modificación a 8% de polímero de estireno-butadieno.

Microscopia de fluorescencia.

A continuación presentamos la prueba de microscopia de fluorescencia con lo que podemos observar la integración del polímero con el asfalto. Por lo que únicamente se analizaran aquellas muestras que fueron modificadas a 3% y 8%.

Empezamos por analizar la fotografía de la figura 23 de la muestra M70C3 se observan claramente dos fases, la fase dispersa son las partículas redondas y blancas de polímero y la fase continua es el asfalto. No existe formación de redes del polímero debido a la baja concentración de este en la muestra.

Para la muestra M70C8 (figura 24), el polímero forma delgadas láminas dentro del matriz del asfalto se encuentran perfectamente ordenadas que no es posible distinguir la fase dispersa de la continua.



Figura 23. Fotografía de la muestra M70C3.



Figura 24. Fotografía de la muestra M70C8.

La muestra M75C3 (figura 25), tienen un comportamiento similar a la muestra M70C3 el polímero no forma redes y se encuentra como la fase dispersa. Lo mismo sucede con la muestra M75C8 (figura 26) donde el polímero forma láminas dentro del asfalto.



Figura 25. Fotografía de la muestra M75C3.



Figura 26. Fotografía de la muestra M75C8.

La fotografía de la muestra M80C3 (figura 27) tiene el mismo comportamiento que las muestras anteriores. La figura 28 de la muestra M80C8, aunque esta un poco oscura, se observa que el polímero forma laminas muy delgadas inmersas en el asfalto.



Figura 27. Fotografía de la muestra M80C3.



Figura 28. Fotografía de la muestra M80C8.

Las fotografías de la muestra M85C3 (figura 29) y M85C8 (figura 30), muestran el mismo comportamiento que las muestras que analizamos anteriormente, para una concentración de 3% de polímero, este se encuentra disperso en forma de partículas redondas y para una concentración de 8% forma laminillas..



Figura 29. Fotografía de la muestra M85C3.



Fotografía 30. Fotografía de la muestra M85C8.

De las anteriores fotografías se puede decir que:

- Para todos los tipos de asfalto a una concentración de 3% de peso el polímero actúa como la fase dispersa y el asfalto como la fase continua o dispersante.
- Para las muestras con 8% en peso el polímero logró formar láminas dentro del asfalto, gracias a la unión de sus partículas.

Para todas las muestras, a las diferentes concentraciones de asfaltenos el comportamiento del polímero a 3% y 8% en peso es el mismo, por lo tanto para estas muestras se deduce que la cantidad de asfaltenos no es un factor importante en la distribución del polímero.

X.CONCLUSIONES

✓ El cambio en la composición del asfalto en el rango investigado da como resultado variaciones significativas en sus propiedades. Esto comprueba que la hipótesis de trabajo resulto correcta.

✓ Los asfaltos con mayor porcentaje de asfaltenos son duros y presentan mayor resistencia a fluir.

✓ El asfalto modificado a una concentración de 3% en peso de SBS,(estireno-butadieno-estireno) aumenta la resistencia mecánica y térmica, en comparación a los asfaltos sin modificación.

✓ El asfalto modificado a 8% en peso de polímero, incrementa de forma significativa sus propiedades termomecánicas, como dureza y viscosidad, con respecto a los asfaltos modificados a 3% en peso de polímero y aquellos sin modificar.

✓ En la microscopía de fluorescencia, se observa que en los asfaltos modificados con un 8% de polímero se comporta como la fase dispersa.

XI.BIBLIOGRAFÍA

1. Abushihada, A; Al Farkh, Y. *A mathematical model relating softening point to penetration applicable to wide range of road asphalts*. American Chemical Society [20] 363 – 366 (1979).
2. Bird, R; Stewart,W; Linghtfoot,E .*Fenómenos de Transporte*. [2] Editorial Reverté México 6 –10 (1996).
3. Boenig, H. *Structure an Propierties of Polymers*. Thieme Publishes France 18-20 (1973)
4. Dekker, M. *Microscopic and Spectroscopic Imagin of Chemical State*. Practical Spectroscopic [16], 22-31 (1998).
5. Dickie, J; Feh Fu Yen. *Macrostructures of the asphaltic fractions by varios instrument methods*. Petroleum Chem [32] 1847 – 1857 (1980).
6. Fried, A. *Polymer Science and Tecnology*. 2ª ediciòn Editorial Prentice Hall USA (2003)
7. Jimenez, Boris. *Estudio de un proceso de fermentación sumergida para la producción de levadura Rhodotorula mimuta antagonista del hongo Calletotrichum Glocosparioides causante de la enfermedad antracnosis en mango*. Facultad de Química 17 – 25 (2002).
8. Goodrich. *Polymer and asphalts reaction process and polymer – liked – asphalts product*. United States Paten [19] 1 - 24 (2002).
9. Gorbaty. *New polymer modified funtionalized asphalt compositions and methods of preparation*. United States Patent [12]1 - 14 (1994).
10. Guion, W; Yang Zhang. *Vulcanization characteristics of asphalts SBS blends in the presence sulfur*. Polymer Testing [10] 989 – 996 (2002).
11. Guion, W; Yang Zhang. *Rheological characterization of storage stable SBS modified asphalts*. Polymer Testing, [12] 295 – 302 (2002).
12. King, G. Additives in Asphalt Assoc. Asphalt Paving Technology [75] 32-69 (1975).

13. Kirk – Othmer. *Encyclopedia of chemical technology*. Vol 3 Editorial VCH 169 – 176 (1998).
14. Kraus, G; Rollman, A. *Morphology and mechanical behavior modified with butadiene –styrene block polymers*. Research and Development Report 1–23 (1980).
15. Longman, B. *Petroleum Organic Chemical*. Vol 4 Longman Group USA 32 –33 (1979).
16. Lu, Y; Isacsson, P. *Modification of road bitumens with thermoplastic*. Polymer Testing [28] 77 – 85 (1999).
17. Lu, Y; Wrigt, P. *Numerical approach of visco-elasplastic analysisi for asphalt mixtures*. Computer Structres [32] 139 – 14 (1998).
18. Mcketta. *Encyclopedia of chemical processing and design*. Vol 3 VCH USA 421 – 432 (1994).
19. Mohseen. S; Beatty, C. *Rheological properties caracterización of scrap plastic modified asphalt*. ANTEC [32] 2457 -2461 (1999).
20. McMurry, J. *Química Orgánica*. 5ª edición Addison Wesley 1364 – 1273 (1998).
21. Nadkarni, V; Shenoy, A. *Thermomechanical behavior of modified asphalts*. American Chemical Society [25] 478 – 482 (1985).
22. Pfeiffer, J. *Propierties of Asphaltic Bitumen*. Elsevier Publishing Company (1950)
23. Seymour, R; Carraher, C. *Química de los Polímeros*. 3ª edición Editorial Reverte, México 1 – 7 (1995).
24. Stasha, J; Zanzotte, L. *Viscosity fuction in polymer modified asphalts*. Journal of Colloid and Interface Science [207] 201 – 207 (2002).
25. Streeter. *Mecánica de los fluidos*. 6ª edidicón Editorial McGraw Hill 22-25 (1980).
26. Takamura . *Aplications for Asphalt Modification*. Editorial Wiley –VCH USA301 –326 (2002).
27. The American Society for Testing and Materials. *Standard test method for softening point of bitumen (Ring and Ball Apparatus)*. ASTM D36, 1986.

28. The American Society for Testing and Materials *Standard test method for softening point of bituminous materials* ASTM D5, 1986.
29. The American Society for Testing and Materials *Standard test method for viscosity determinations of unfilled asphalts using the Brookfield Thermosel Apparatus*. ASTM D4402, 1987.
30. The American Society for Testing and Materials. *Standard test method for n-heptane insolubles*. ASTM 3279-90, 1990.
31. Ullmann's. *Encyclopedia of industrial chemistry*. Vol 3 Editorial VCH 421 - 432 (1998).
32. Vargas, A. Estudio de la modificación de asfalto con mezclas de copolímeros de estireno-butadieno. Facultad de Química 12-27 (2003).

XII.ANEXO 1

Prueba de Penetración

Tabla 3. Resultados de la prueba de penetración a 25°C, 100 g, 5 s, para los diferentes sistemas con su promedio.

M70	M70C3	M70C8	M75	M75C3	M75C8
12	9	8	21	20	15
13	9	9	22	20	14
12	11	8	20	23	13
14	10	10	18	24	16
13	9	7	17	21	17
13	10	6	20	20	18
14	8	12	19	18	15
12	10	9	17	19	16
12	10	10	19	19	14
14	11	7	18	21	14
12.9	9.7	8.6	18	20.5	15.2

Tabla 4. Datos de penetración.

M80	M80C3	M80C8	M85	M85C3	M85C8
25	31	23	22	54	38
27	30	20	27	50	29
25	34	26	25	49	41
27	33	27	22	48	40
25	35	19	23	55	37
28	30	24	25	50	37
24	32	21	24	55	38
29	34	24	26	53	40
23	30	25	27	52	41

26	31	27	21	54	39
25.9	32	23.6	24.2	52	38

Tabla 5. Datos de penetración para los asfaltos reconstituido y modificados

M90	M90C3	M90C8
67	60	20
66	63	18
64	64	21
65	63	17
63	62	18
64	59	19
68	63	19
64	62	17
62	64	18
66	63	17
64.9	62.3	18.4

XIII.ANEXO 2

Datos de viscosidad para los asfaltos reconstituidos y modificados. Los valores de viscosidad se encuentran expresados en mPa.

Tabla 6. Datos de viscosidad a una temperatura de 135°C

% asfaltenos	0%	3%	8%
10	137	884.408	13088.739
15	715	2521.48	5005.5
20	1256.055	2384.71	16206.5417
25	8592.68	14183.59	22520
30	14750	69938.8	85540.357

Tabla 7. Datos de viscosidad a una temperatura de 160°C.

% asfaltenos	0%	3%	8%
10	137.6	319.67	2137.36
15	215.063	511.45	167.3
20	335.155	1452.43	4082.6
25	13055	3993	7683.62
30	555.729	8372.5217	29846

Tabla 8. Datos de viscosidad a una temperatura de 177°C

% asfaltenos	0%	3%	8%
10	74	192.31	1488
15	113.5	244.95	675.06
20	159.05	201.03	775.95
25	317.88	1504	3680.93
30	570	2804	12642.69

XIV. ANEXO 3

Índice de Penetración

Datos de índice de penetración para cada una de las muestras se obtuvieron tomando el promedio de cada una de ellas, utilizando la siguiente formula.

$$PTS = \frac{\log 800 - \log PE, 25^{\circ} C. 100g, 5s.}{TA - 25(^{\circ}C)}$$

Tabla 9. Datos del índice de penetración.

% asfaltenos	0% polímero SBS	3% polímero SBS	8% polímero SBS
30	1.797	1.7781	3.5332
25	-0.055	-0.8245	3.17
20	-2.688	-1.9807	2.773
15	-4.1547	-2.7782	3.7023
10	-4.2141	-2.4387	5.7364