



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“Efecto de la composición del asfalto
sobre las propiedades termomecánicas
de asfalto modificado con SBS”

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A :

Alejandra Régules Reyes



MÉXICO, D.F.

2008



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. Mayo Gines Martínez Kahn
Secretario: Prof. Rafael Herrera Nájera
Vocal: Prof. Ángel Enrique Chávez Castellanos
1^{er}. Suplente: Prof. Martha Imelda Moreno Bravo
2^{do}. Suplente: Prof. José Fernando Barragán Aroche

Lugar donde se realizó la tesis:

LABORATORIO 213 “UNIPOL”, CONJUNTO E, FACULTAD DE QUÍMICA,
UNAM

Asesor del Tema

Rafael Herrera Nájera

Asesor Técnico

Rodolfo Ruíz Trejo

Sustentante

Alejandra Régules Reyes

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo total en la elaboración de esta tesis al Dr. Rafael Herrera Nájera, al Profesor I.Q Rodolfo Ruiz Trejo por su apreciable asesoría.

A los miembros del Jurado por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo y sus valiosos comentarios.

Agradezco a mis maestros su dedicación en mi formación, a mis compañeros de mi generación agradezco su amistad (William, Paul, Edgar, Fernando) y de generaciones más recientes (Rafael, Ja.C.O. Fly). A mis padres Alejandro y Lidia.

Agradezco la amistad de mis compañeros de Laboratorio: Esteban, Luis, Eidi, Graciela, Paola, Isaac, Daniuska, Hugo.

Gracias al proyecto PAPPIT IN-103707 de la DGAPA de la UNAM por el apoyo otorgado en la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A mi papá poblano, Alejandro Isauro por su apoyo

A mi mamá oaxaqueña, Lidia por su apoyo

A mi hermana Claudia

A mis parientes oaxaqueños bajo el régimen del matriarcado de quienes aprendí la perseverancia y la dedicación en todo lo que haces.

ABREVIATURAS

AM	Asfalto modelo
AMM	Asfalto modelo modificado
ASTM	American Society for Testing and materials.
B	Bloque polibutadieno
MF	Microscopia de fluorescencia
PE	Penetración
PM	Polímero modificador
S	Bloque poliestireno
SE	Segregación
TA	Temperatura de ablandamiento
Tg	Temperatura de transición vítrea
TPE	Termoplástico elástomero
Tr	Temperatura ambiente
%w	por ciento en peso

RESUMEN

La presente tesis es parte de las investigaciones sobre asfalto modificado que se desarrollan en el Laboratorio de Polímetros L213 (Conjunto E, Edificio de Ingeniería Química, de la Facultad de Química), y fue realizada bajo la supervisión del Dr. Rafael Herrera Nájera y del I. Q. Rodolfo Ruiz Trejo.

Se observaron las propiedades termomecánicas de tres asfaltos modelo y sus respectivas mezclas con un elastómero termoplástico, para ver el efecto de la relación de asfaltenos-maltenos sobre dichas propiedades.

El asfalto empleado fue el AC20 de la refinería Salamanca, el cual se fraccionó en maltenos y asfaltenos para posteriormente elaborar dos asfaltos modelo, el AC10 y el AC30. Además con estos asfaltos modelo se preparó asfalto modificado con un polímero comercial llamado Solprene 411, que en este trabajo lo denominaremos P.

Para separar los maltenos se usó como diluyente heptano industrial. Se controlaron las condiciones de modificación del asfalto tales como: velocidad de agitación, ambiente inerte, tiempo de homogenización de la mezcla, temperatura. En la prueba de penetración se controló la temperatura de las muestras.

Se encontró que las propiedades térmicas y mecánicas, representadas por la Temperatura de ablandamiento (TA) y la Penetración (PE) de los asfaltos modelo investigados dependen de la cantidad de asfaltenos de dichos asfaltos, ya que estos últimos aumentan la rigidez de la mezcla.

Con respecto a las pruebas de segregación se encontró que a una alta concentración de polímero y alta cantidad de maltenos no hay segregación, debido a que hay una buena dispersión del polímero en el asfalto. En cambio se presenta la segregación cuando hay una baja cantidad de maltenos.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
Figura 1 Representación de los macrodominios en el asfalto modificado con un termoplástico	4
Figura 2 Estructuras isoméricas del polibutadieno.	9
Figura 3 Diagrama tricomponente del asfalto.....	11
Figura 4 Representación esquemática del asfalto de acuerdo con el modelo miscelar.....	13
Figura 5 Muestra de mezcla asfáltica convencional.....	15
Figura 6 Muestra de mezcla asfáltica modificada con polímeros.....	16
Figura 7 Esfuerzos de compresión y tensión en el asfalto modificado con.... polímero tipo estrella.	17
Figura 8 Modelo de la estructura del termoplástico.....	25
Figura 9 Modelo de la red física del termoplástico SBS.....	25
Figura 10 Modelo de la red física del termoplástico SBS cuando la temperatura de AM es menor que la Tg del PS pero mayor que la Tg del PB.....	26
Figura 11 Efecto de la concentración de P (10-50 % peso) y temperatura de la muestra sobre el índice de PE.	31
Figura 12 Equipo de filtración de insolubles denominado büchner-kitasato.....	35
Figura 13 Sistema de separación de heptano y maltenos.....	36
Figura 14 Proceso de modificación del asfalto.....	40
Figura 15 Equipo para la prueba de temperatura de ablandamiento.....	42
Figura 16 Medidas en mm de una aguja para la prueba de penetración	

Figura 17	Penetrómetro y muestra de AM.....	45
Figura 18	Esquema de un microscopio de fluorescencia.....	48
Figura 19	Microscopio de fluorescencia.....	49
Figura 20	Microscopio de fluorescencia acoplado a un sistema típico de imagen automatizada.....	49
Figura 21	muestra de AMM para la prueba de segregación.....	52
Figura 22	Muestras de AMM vistas por el microscopio.....	55
Figura 23	Tanque de modificación con sistema de recirculación.....	77

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1	Efecto de la concentración del polímero sobre la temperatura de ablandamiento.....	59
Gráfica 2	Efecto de la concentración de polímero sobre la PE.....	61
Gráficas 3.1 y 3.2	PE vs cantidad de asfaltenos de la prueba de segregación..	64
Gráficas 4.1 y 4.2	TA vs cantidad de asfaltenos de la prueba de segregación.	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Algunas de las características de los principales componentes del asfalto: asfaltenos y maltenos	14
Tabla 2 Características del polímero modificador.....	23
Tabla 3 Temperatura de transición vítrea del AMM con concentración en peso del 14% en polímero.....	27
Tabla 4 Propiedades mecánicas de algunos polímeros estirénicos.....	29
Tabla 5 Nomenclatura de las muestras de AM Y AMM.....	39
Tabla 6 Propiedades del asfalto.....	53
Tabla 7 Tabla comparativa de los tres tipos de asfalto: TA en función de la concentración de polímero en la mezcla.....	58
Tabla 8 Tabla comparativa de los tres tipos de asfalto: Penetración en función de la concentración de polímero en la mezcla.....	61
Tablas 9 (a) y (b) PE en función de la concentración de polímero en la mezcla.....	63
Tablas 10 (a) y (b) TA en función de la concentración de polímero en la mezcla.....	63

ÍNDICE

1.	Introducción	1
2.	Objetivos e Hipótesis	6
3.	Antecedentes	7
	3.1 Generalidades	7
	3.2 Composición del asfalto	11
	3.3 Naturaleza del asfalto	12
	3.4 Importancia del uso del asfalto modificado	15
	3.5 Modificación del asfalto	20
	3.6 Características del polímero modificador	23
4.	Desarrollo experimental	33
	4.1 Lista de materiales	33
	4.2 Preparación del asfalto modelo	34
	4.3 Modificación de asfalto con polímero SBS	38
	4.4 Pruebas de caracterización	41
5.	Presentación y Análisis de resultados	52
	5.1 Microscopia de fluorescencia	54
	5.2 Temperatura de ablandamiento	57
	5.3 Penetración	60
	5.4 Segregación	62
6.	Conclusiones	67
7.	Bibliografía	69
8.	Apéndices	71

I. INTRODUCCIÓN

Esta tesis trata sobre el efecto de la cantidad relativa de asfaltenos-maltenos, principales constituyentes del asfalto, sobre las propiedades termomecánicas típicas: temperatura de ablandamiento y penetración de asfaltos modelo modificados con un polímero SBS ramificado. En términos generales se procura investigar acerca de las propiedades de dichas mezclas relacionadas con la aplicación principal del asfalto modificado en la producción de: i) carpetas asfálticas; e ii) impermeabilizantes.

El uso del asfalto como carpeta asfáltica es susceptible a la oxidación y fotodegradación debido a la exposición de éste al medio ambiente y por cambios de temperatura. Este producto del petróleo tiene propiedades mecánicas relativamente pobres: es quebradizo a bajas temperaturas; a altas temperaturas se reblandece; fluye a temperaturas arriba de la temperatura ambiente y tiene baja recuperación elástica. Se agrieta cuando es sometido repetidamente a cargas pesadas. Tales cualidades son poco deseables porque se hace frecuente su reemplazo, lo que representa altos costos. Para mejorar el desempeño del asfalto se ha optado por mezclarlo con varios tipos de materiales, entre los que destacan los copolímeros de estireno-butadieno del tipo SBS. De esta manera se obtienen materiales compuestos que reciben el nombre genérico de *asfalto modificado* (AMM).

La composición del asfalto depende del lugar geográfico de extracción y del procesamiento de refinación. Con el objeto de simular asfaltos de diferente origen y estudiar su comportamiento termomecánico, se formulan asfaltos modelo (AM), a los cuales se les varía la relación asfaltenos-maltenos.

En este estudio, el asfalto empleado se obtuvo de la refinería Salamanca, por lo que tiene una determinada composición química y comportamiento termomecánico característico.

En general, los modificadores son aquellos ingredientes del AMM que entran en pequeña proporción, mientras que el asfalto constituye la parte mayoritaria de la mezcla. Dependiendo de la proporción de asfalto/polímero se puede tener una mezcla en la cual la fase continua es aquella que es rica en asfalto. Sin embargo, debido a que el polímero es capaz de absorber maltenos y, consecuentemente, incrementar su volumen hasta nueve veces, se pueden tener mezclas de AMM en las que la fase rica en polímero es la que constituye la fase continua. Es indispensable que dichas fases estén fuertemente unidas mediante sus interfases para que la mezcla tenga un buen desempeño.

Un asfalto modificado ideal es aquel que tiene una baja susceptibilidad térmica en toda la gama de temperaturas de trabajo y muy alta en la gama de temperaturas de aplicación, además de buena adherencia y alta resistencia al envejecimiento.

La modificación del asfalto con polímeros lineales como el SBR presenta altas viscosidades, aún a altas temperaturas, pero no tienen un buen módulo elástico ni muy buena recuperación elástica porque difícilmente tienen la

estructura tridimensional que se requiere. Polímeros entrecruzados o vulcanizados químicamente modifican la viscosidad y las propiedades elásticas y cohesivas, pero son difíciles de disolver. Los hules de desperdicio como agentes modificadores funcionan sólo como cargas, puesto que no cumplen con la adecuada morfología.

Los elastómeros termoplásticos (TPE) son aquellos polímeros que presentan un grado moderado de elasticidad y pueden ser formulados sin que se requiera la vulcanización para formar uniones físicas entre las moléculas de polímero. Convencionalmente los hules vulcanizados tienen una estructura polimérica en forma de malla termofija, en contraste los termoplásticos SBS pueden revertir la formación de la malla térmicamente; dicha propiedad hace que el material sea procesable mediante el calentamiento.

En general, los TPE tienen dos fases, usualmente una fase blanda de matriz elastomérica que contiene la segunda fase dispersa de un material más rígido, cuyas partículas proveen las uniones físicas. Esta morfología puede ser alcanzada por el uso de un copolímero en bloque.

Los copolímeros en bloque de estireno-butadieno del tipo SBS, como agentes modificadores, promueven la estructura en forma de red, donde los bloques finales de estireno funcionan como uniones y los bloques medios de polibutadieno proporcionan elasticidad. En éste sentido los termoplásticos de estireno butadieno radiales son los que cumplen este propósito, pero tiene una desventaja, su alto costo.

Los SBS son usados en mezclas de AMM, porque el bloque de polibutadieno tiene alta compatibilidad con los maltenos, lo cual facilita el aprovechamiento de su naturaleza termoplástica en aplicaciones tales como la pavimentación y la impermeabilización.

Para observar el efecto de la relación de los asfaltenos y maltenos del AMM con polímero sobre las propiedades termomecánicas, como la temperatura de ablandamiento y penetración, se realizan las pruebas correspondientes tanto en los asfaltos modelo como en los asfaltos modificados.

La apariencia del asfalto modificado y la constitución de sus fases son analizadas por medio de la técnica de microscopia de fluorescencia. Por otro lado la prueba de segregación proporciona información de la estabilidad en las propiedades en todo el composito, la cual es útil para asegurar las propiedades finales al momento de almacenar y aplicar el AMM.

A continuación vamos a detallar en forma esquemática la morfología de un asfalto modificado con el polímero SBS.

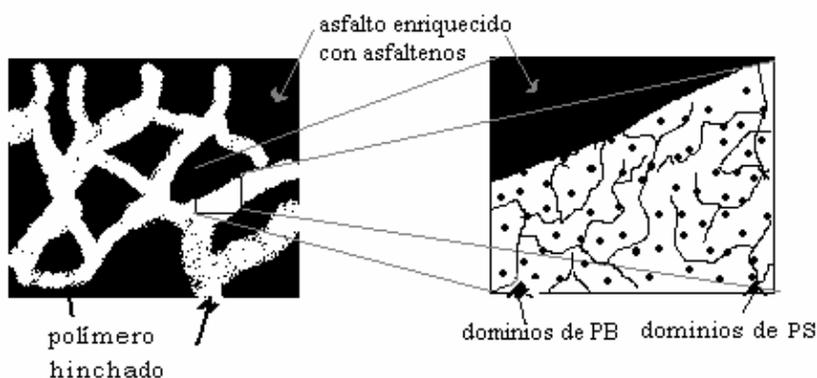


Figura 1 Representación de los macrodominios en el asfalto modificado con un termoplástico [1].

Las imágenes de AMM obtenidas mediante microscopía de fluorescencia permiten considerar que este tipo de material está compuesto de dos macrofases: una de polímero hinchado con algo de los constituyentes de más bajo peso molecular del asfalto (aceites, maltenos); y una fase bituminosa, enriquecida con asfaltenos que casi no tienen polímero. Dentro de la fase enriquecida con polímero hay dos microbases: una de PB hinchado; y otra de esencialmente dominios de PS puro, los cuales actúan como sitios de unión física para formar una malla.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

OBJETIVO PRINCIPAL

Observar el efecto de la relación asfaltenos-malenos sobre las propiedades termomecánicas de una serie de asfaltos modificados con un termoplástico tipo SBS y en concentraciones del 3% al 10% en peso.

Objetivos particulares.

- A partir de los principales constituyentes del AC20 obtener asfaltos modelo AC-10 y AC-30
- Modificar cada asfalto modelo con relación conocida de asfaltenos-malenos con polímero al 3, 5, 8, 10%
- Caracterizar cada asfalto modelo y sus respectivas modificaciones
- Observar la morfología del asfalto modelo modificado (AMM)
- Registrar y analizar los datos obtenidos

HIPÓTESIS

Las propiedades térmicas y mecánicas del asfalto modificado, representadas en este trabajo por las pruebas convencionales: penetración y temperatura de ablandamiento, dependen de la relación malenos-asfaltenos, así como de la estructura y la concentración del polímero modificante.

II. ANTECEDENTES

3.1 GENERALIDADES

Elastómero. Es un polímero flexible entre su T_g y su temperatura de licuefacción. Tiene propiedades elásticas, es decir cambia de forma y fluye rápidamente cuando se sujeta a fuerzas débiles y esto se logra por la alta movilidad de los enlaces de la estructura principal pasando de un estado contraído y enmarañado a un estado extendido cuando se le aplica una fuerza externa. Son resilientes y tienen la habilidad de absorber solventes para luego experimentar una expansión de su volumen. Se clasifican en termofijos y termoplásticos según el tipo de estructura que forman; los primeros tienen enlaces covalentes creados durante el proceso de vulcanización y los segundos forman una red a base de enlaces (puentes de hidrógeno o dipolo) más débiles que los enlaces de los termofijos [2].

Un elastómero termoplástico es un copolímero (usualmente un plástico y un hule). Como ya se menciona, en su estructura no tiene entrecruzamientos permanentes como los elastómeros termofijos por lo que son térmicamente reversibles, por esta propiedad, es fácilmente procesable por moldeo e inyección. Su estructura tiene dos fases, donde una fase es la matriz que está constituida por un hule que contiene a la segunda fase dispersada, de un material menos suave y que provee el soporte de dicha matriz [3].

Polímero en forma de estrella

Un polímero que presenta una morfología de estrella consiste en varias cadenas lineales unidas por medio de uno de sus extremos a un punto de unión.

La producción de polímeros de S y B en forma de tribloque, SBS, se lleva a cabo de dos formas 1) mediante la adición secuencial de S, luego B y finalmente S y 2) acoplamiento de dibloques SB lineales por medio de un agente capaz de reaccionar con más de un sitio activo. En este trabajo se utilizó un copolímero de estireno-butadieno tipo SBS con forma de estrella de cuatro ramas iguales, lo cual implica que se preparó mediante el acoplamiento de moléculas “vivas” del tipo SB con tetracloruro de silicio.

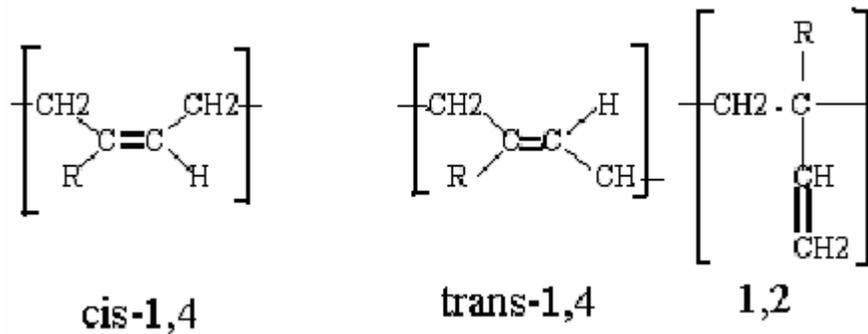
Microestructura del butadieno

Los dienos conjugados del butadieno, 1,3 ($\text{CH}_2=\text{C}(\text{R})-\text{CH}=\text{CH}_2$) pueden polimerizar en tres estructuras isoméricas; a la cantidad relativa de dichas estructuras se le conoce como microestructura del polímero.

El butadieno puede polimerizar por adición 1,4 la cual da como resultado enlaces cis o trans, también puede presentarse adición 1,2, que da como resultado un enlace vinilo.

Los iniciadores organolitados polimerizan butadieno con un bajo porcentaje de adiciones 1,2 (aproximadamente 10% w).

Figura 2 Estructuras isoméricas del polibutadieno



Peso molecular número promedio (Mn)

Este peso se obtiene cuando se hace un promedio en base al número de moléculas (N_i) de un tamaño particular (M_i).

$$w = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} M_i N_i}{\sum_{i=1}^{\infty} N_i}$$

$$M_n = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} M_i N_i}{\sum_{i=1}^{\infty} N_i} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} M_i N_i}{\sum_{i=1}^{\infty} N_i}$$

Peso molecular promedio en peso (Mw)

Este peso se basa en la masa de las especies presentes. Es el resultado de dividir la suma de la fracción peso de cada especie por su peso molecular entre la suma de dicha fracción peso de las especies.

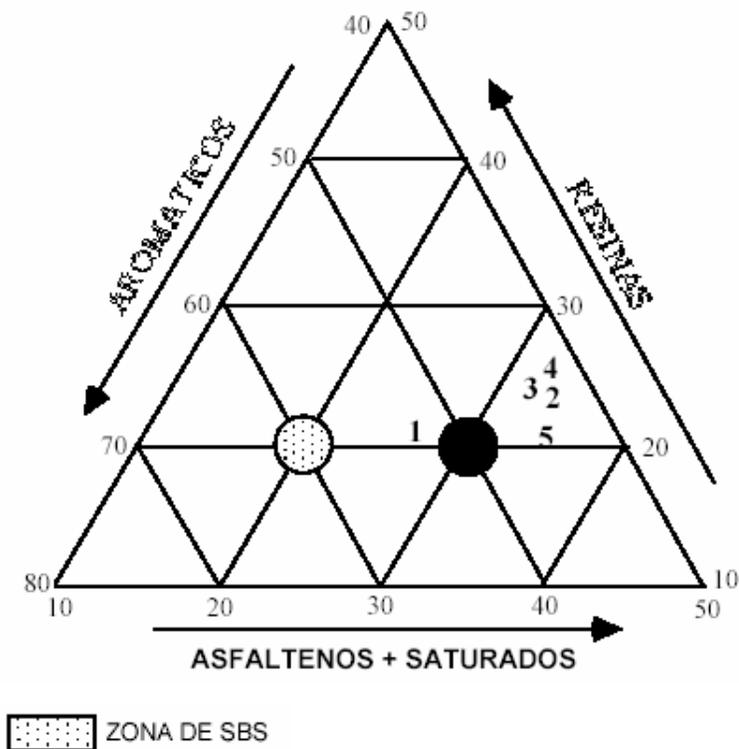
$$M_w = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} w_i M_i}{\sum_{i=1}^{\infty} w_i}$$

Polímero polidisperso

Se dice que un polímero es polidisperso cuando las cadenas que constituyen una muestra de él tienen una distribución ancha de longitudes de cadenas. Por ello es imposible caracterizar el polímero mediante un solo peso molecular y por este motivo se usan valores promedio para tener una idea de los tamaños de cadena. Para materiales polidispersos M_w es considerablemente mayor que M_n y su relación M_w/M_n es una medida de polidispersividad relativa.

3.2 COMPOSICIÓN DEL ASFALTO

El asfalto es un hidrocarburo cuyos componentes principales son los asfaltenos y maltenos. Los primeros son estructuras policíclicas aromáticas polares y aromáticos nafténicos; son sólidos muy polares a temperatura ambiente, tienen alto peso molecular; mientras que los maltenos son resinas aromáticas y aceites saturados de bajo peso molecular. En el presente trabajo se usó el asfalto proveniente de la refinería de Salamanca, con una composición de 20%w. En la Figura 3 se muestra un diagrama triangular en el cual se señala la composición promedio de los asfaltos mexicanos.



1. Salamanca; 2 Tula; 3 Cadereyta; 4 Ciudad Madero; 5 Salina Cruz

Figura 3. Diagrama tricomponente del asfalto. Se indica la composición de los diferentes asfaltos producidos en México y la zona en que se recomienda usar el SBS [4].

Un punto dentro del diagrama, corresponderá a la composición de un cierto asfalto. La diagonal de pendiente negativa que pasa por este punto, interceptará el eje de los aromáticos, dando la lectura correspondiente a la composición en peso de estos hidrocarburos. La diagonal de pendiente positiva, interceptará el eje horizontal inferior correspondiente a la aportación de asfaltenos más saturados. La línea horizontal que pasa por el punto interceptará el eje de las resinas, dando la lectura correspondiente. Por ejemplo el punto número 1 en el diagrama la diagonal de pendiente negativa indica 30% w en asfaltenos; mientras la diagonal de pendiente positiva, 50%w aromáticos; la línea horizontal, 20% w resinas.

3.3 NATURALEZA DEL ASFALTO

El asfalto no es un material isótropico continuo, ni homogéneo; para representarlo se utiliza comúnmente el modelo propuesto por Nellensteyn [5]. El cual es un sistema coloidal cuyos constituyentes forman un sistema dinámico, en donde están suspendidas miscelas de tamaños de varios miles de angstroms de asfaltenos dispersos en un medio aceitoso formado por aromáticos y parafinas saturadas (maltenos), como se muestra en la Figura 2. Debido a esta disposición y estructura el asfalto se comporta como un material viscoelástico: a temperaturas bajas y cuando está sometido a la acción de grandes esfuerzos; el asfalto es un sólido elástico a temperaturas altas y con la reducción de carga se vuelve más viscoso. El comportamiento reológico de los asfaltos depende de su composición química, la cual a su vez depende de su fuente de procedencia y de su refinación [4] La microestructura del asfalto depende de la relación de sus principales

constituyentes, de la distribución de tamaños de miscelas y por las interacciones físicas y químicas entre éstas. Dichas interacciones forman una especie de red tridimensional, la cual proporciona elasticidad al asfalto [4].

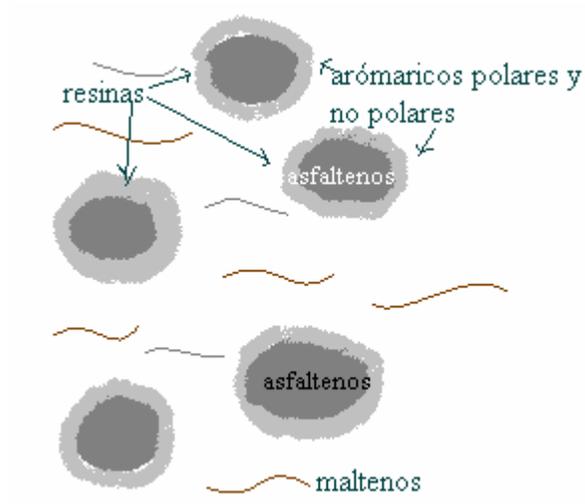


Figura 4 Representación esquemática del asfalto de acuerdo con el modelo miscelar.

En este modelo, los asfaltenos son las partículas negras y sólidas; los maltenos constituyen la fase continua, son solubles en n-heptano y tiene un color oscuro.

3.3.2 ALFALTENOS/MALTENOS; COMPORTAMIENTO DEL ASFALTO

Los asfaltenos son estructuras policíclicas, aromáticas y altamente polares, capaces de formar una especie de red de cadenas, las cuales proporcionan al asfalto propiedades tales como elasticidad, resistencia a la fractura y adhesión. Los maltenos son moléculas de bajo en peso molecular, tanto polares como no polares, y debido a que su proporción en peso es más alta que los asfaltenos (30-49%w) constituyen la fase continua de la mezcla, de tal modo que los asfaltenos están rodeados por aromáticos polares y resinas no polares de los maltenos, formando estos últimos una fase protectora a los asfaltenos; proporcionan propiedades como susceptibilidad al agua y sus características viscosas. En la Tabla 1 se resumen algunas de las características de los principales componentes del asfalto.

Tabla 1. Algunas de las características de los principales componentes del asfalto: asfaltenos y maltenos.

Componente	Características
asfaltenos	Insolubles en los aceites de los maltenos. Proporciona elasticidad, resistencia a la fractura y adhesión. Alto peso molecular (4000-7000 g/gmol)
maltenos	Mantienen a los asfaltenos en suspensión coloidal, las resinas evitan la coalescencia de los asfaltenos. La solubilidad del polímero modificador depende del contenido de aromáticos. Proporciona características viscosas Bajo peso molecular (500 – 4000 g/gmol)

3.4 IMPORTANCIA DEL USO DEL ASFALTO MODIFICADO

El empleo del asfalto sin modificar como carpeta asfáltica está cayendo en desuso porque, como ya se mencionó, es susceptible a la oxidación y a la fotodegradación debido a la exposición de éste al medio ambiente y principalmente por los cambios bruscos de temperatura. Para mejorar el desempeño del asfalto se le modifica mezclándolo con materiales naturales y sintéticos.

Los asfaltos modificados se aplican en aquellos casos en que las propiedades de las mezclas asfálticas tradicionales son insuficientes para prolongar la vida útil de la carpeta asfáltica, es decir, en los casos de temperaturas extremas, agentes atmosféricos, tipología del firme, como se muestra en la Figura 5. Si bien los polímeros modifican las propiedades térmicas y mecánicas de los asfaltos, estos deben mostrar ventajas en el servicio; Por éstas razones el asfalto tiene que ser modificado con polímeros para mejorar substancialmente propiedades tales como resistencia a la deformación, elasticidad, temperatura de ablandamiento, etc.

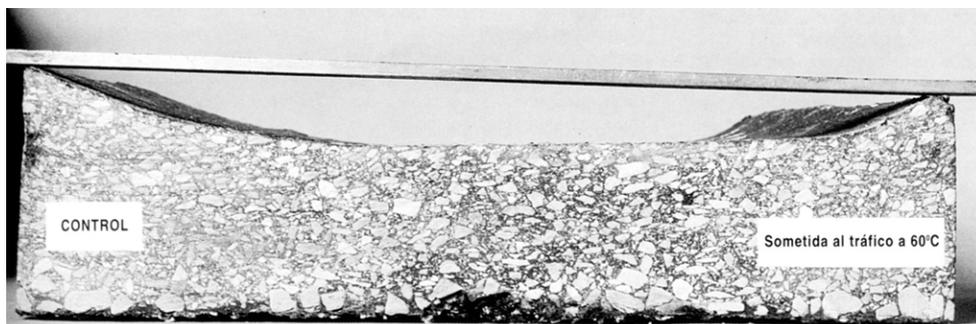


Figura 5 Muestra de mezcla asfáltica convencional [6]

Mezclas densas (**Figura 6**): Para las aplicaciones en las cuales se debe soportar el tráfico intenso la mezcla asfáltica debe ser resistente a la formación de rodadas. Al mismo tiempo, el material debe ser mezclado, extendido y compactado a temperaturas normales y no se debe volver frágil cuando la temperatura del pavimento descienda.

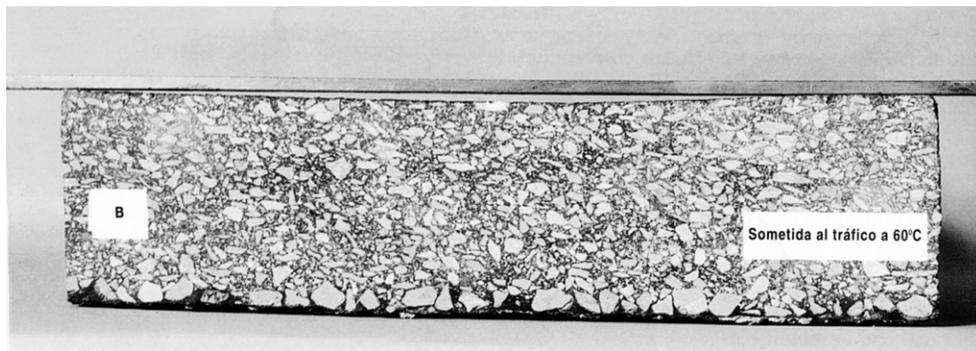


Figura 6. Muestra de mezcla asfáltica modificada con polímeros [6].

Como puede observarse existe una gran diferencia entre los resultados obtenidos sobre una muestra de mezcla asfáltica convencional y otra con una mezcla asfáltica modificada con polímeros, la mezcla modificada puede hacer frente a la impresión de huella con una marcada diferencia sobre la otra muestra. En otras aplicaciones, el objetivo puede ser generar una mezcla flexible con el fin de reducir la posibilidad de rotura por fatiga. En estos casos, se necesitarán asfaltos modificados con polímeros, preferentemente de naturaleza elástica como el SBS, para que la mezcla sea capaz de absorber las tensiones sin que se produzca la rotura, como se muestra en la **Figura 7**.

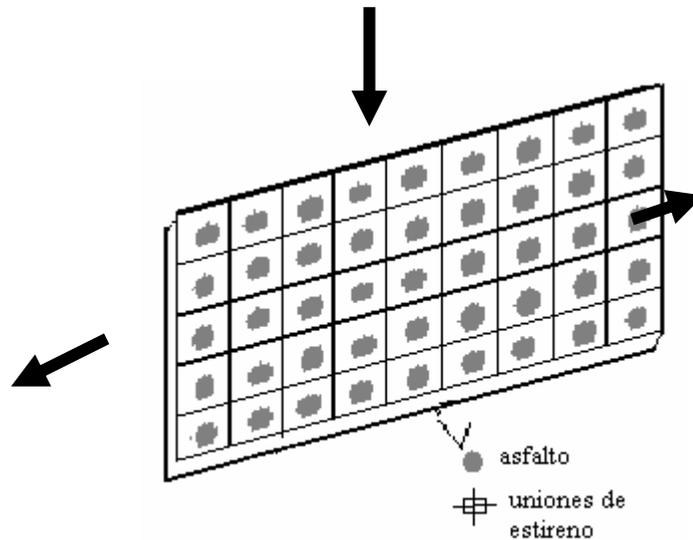


Figura 7. Esfuerzos de compresión y tensión en el asfalto modificado con polímero tipo estrella [7].

Ventajas y desventajas del uso de asfalto modificado con polímero SBS tipo estrella [4].

Ventajas

- Disminuye la susceptibilidad térmica, es decir aumenta la resistencia a temperaturas elevadas.
- Se obtienen mezclas más rígidas a altas temperaturas de servicio reduciendo la impresión de huellas.
- Se obtienen mezclas más flexibles a bajas temperaturas de servicio reduciendo la posibilidad de fractura.
- Disminuye la exudación del asfalto: por la mayor viscosidad de la mezcla, su menor tendencia a fluir y su mayor elasticidad.
- Mayor elasticidad: debido a los polímeros de cadenas largas.

- Mayor adherencia: debido a los polímeros de cadenas cortas.
- Mayor cohesión: el polímero refuerza la cohesión de la mezcla.
- Susceptibilidad térmica muy débil en un rango amplio de temperaturas de trabajo y muy fuerte en la gama de temperatura de aplicación.
- Mejor impermeabilización: al absorber mejor los esfuerzos tangenciales, evitando la propagación de las fisuras.
- Mayor resistencia al envejecimiento: mantiene las propiedades del ligante, pues el polímero tiende a formar una red y a concentraciones relativamente altas pasa a formar la fase continua. Para evitar la pérdida de volátiles y evitar la oxidación se regula adecuadamente el tiempo de mezclado. Una alternativa es trabajar con atmósfera inerte.
- Mejor manejabilidad y compactación: por la acción lubricante del polímero.
- Mayor durabilidad: los ensayos de envejecimiento acelerado en laboratorio demuestran su excelente resistencia al cambio de sus propiedades características.
- Mejora la vida útil de las mezclas: menos trabajos de conservación.
- Mayor resistencia al derrame de combustibles.
- Reduce el costo de mantenimiento.
- Permite la reducción de hasta el 20% de los espesores por su mayor resistencia mecánica.
- Mayor resistencia a la flexión en la cara inferior de las capas de mezclas asfálticas.
- Mayor seguridad en las autopistas.
- Reduce el ruido haciendo las autopistas más silenciosas.
- Permite un mejor sellado de las fisuras.
- Buenas condiciones de almacenamiento a temperaturas moderadas.

Desventajas

- Alto costo del polímero.
- Dificultades del mezclado: no se incorpora bien el polímero al sistema si no esta debidamente fraccionada y con una agitación de alto corte.
- Deben extremarse los cuidados en el momento de la elaboración de la mezcla, control de la temperatura y de la oxidación.
- Los agregados no deben estar húmedos ni sucios.
- La temperatura mínima de distribución es de 145 °C por su rápido endurecimiento

Evidentemente, la mayor desventaja es el alto costo inicial del asfalto modificado, sin embargo, un análisis del costo a largo plazo (es decir, la vida útil de la carpeta) permite concluir que el elevado costo inicial queda sobradamente compensado por la reducción del mantenimiento futuro y el alargamiento de la vida de servicio del pavimento [4].

3.5 MODIFICACIÓN DEL ASFALTO

Las características finales del asfalto modificado con polímero dependen de la naturaleza del asfalto empleado, de la cantidad y tipo de polímero, de la compatibilidad entre los constituyentes, del proceso de mezclado, de las cualidades térmicas de los materiales.

El polímero mejora considerablemente la elasticidad del asfalto y de esa característica se deriva otros beneficios de su uso. También hay un incremento en la viscosidad, lo que se traduce en la reducción de la penetración y en el incremento del punto de ablandamiento. La combinación de asfalto y de polímero se debe seleccionar teniendo en cuenta las características de desempeño del pavimento.

Al modificar debemos tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Características del asfalto. En este trabajo se estudiaron asfaltos modelo, los cuales fueron preparados con cantidades conocidas de maltenos y asfaltenos, a todos ellos se les determinaron sus propiedades físicas y térmicas antes de mezclarlos con polímero, con el objetivo de comparar el efecto del agente modificador sobre las propiedades de diferentes tipos de asfaltos frescos y modificados.
- Tipo de polímero (elastómero)
La cantidad, tamaño de partícula y solubilidad del polímero determinan su dispersión en el asfalto

- Compatibilidad

Asfalto y modificador deben coexistir como sistema que mezclados se comporte de acuerdo a lo planeado.

- Estabilidad en el almacenamiento

Un sistema donde ninguno de los componentes pierda su función durante el almacenamiento a temperatura elevada (180 °C).

Las partículas de polímero de tamaño relativamente grande, esferas de diámetro mayor de un cuarto de milímetro, son difíciles de incorporar en el asfalto, lo cual impide a la mezcla obtener los beneficios que el polímero aporta. Otro factor importante es la compatibilidad entre el polímero y el asfalto, si no hubiera compatibilidad, habría una separación de fases.

Otro aspecto que hay que considerar es el tiempo que la mezcla asfáltica debe permanecer sin separación de fases apreciable, debe ser el suficiente para que sea transportada y aplicada [8].

El proceso para modificar asfalto con polímeros elastoméricos (hule con Tg baja), usualmente del tipo estireno butadieno; se añade de forma dosificada el polímero a temperaturas entre 180 °C y 200 °C y con altos esfuerzos de corte (mayor de 500 rpm) para lograr la formación de una red o malla tridimensional en el interior del asfalto para así proporcionar al asfalto mejores propiedades termomecánicas. Dicha malla llena de asfalto absorbe gran parte de la energía de deformación cuando es sometido a esfuerzos externos [4]. La malla elastomérica proporciona un mayor intervalo de temperaturas de servicio así como amplía el

intervalo de esfuerzos al que se somete como carpeta asfáltica. Por ejemplo el AC5 (5% asfaltenos, asfalto muy blando a temperatura ambiente) cuando es modificado con SBS puede ser usado a mayores temperaturas de servicio.

Para que el proceso de mezclado sea adecuado se recomienda que el asfalto tenga suficientes aceites aromáticos para que el polímero se disuelva a las temperaturas de mezclado [8].

3.6 CARACTERÍSTICAS DEL POLÍMERO MODIFICADOR

El polímero empleado es un hule SBS, tiene forma de estrella de cuatro brazos, donde la parte butadiénica está en el centro y la parte estirénica en el exterior, la proporción tetra-acoplado es mayor del 80%, siendo el resto triacoplado y lineal.

Propiedad	valor
Densidad relativa	0.94
dureza	82 shore A
Total de estireno	30%
Mw	381,370
Mn	358,010
Polidispersidad, D	1.0653
Microestructura de los bloques de polibutadieno	
% cis	41%
% trans	49%
% vinilos	10%

Tabla 2 Características del polímero modificador

3.6.1 ESTRUCTURA Y PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLÍMERO SBS, TIPO ESTRELLA

Los cauchos termoplásticos deben su resistencia y elasticidad de la configuración de las moléculas en dos fases, donde la fase de naturaleza elástica es la matriz que contiene a la otra fase que es más dura que la anterior. Eso se alcanza por la aglomeración de los bloques finales de poliestireno en dominios separados, como se muestra en las Figuras 8 y 9, constituyendo la estructura ligada cruzada para una matriz tridimensional de polibutadieno. Los bloques finales de poliestireno actúan como cargas reforzantes por lo que le dan al polímero resistencia y dureza; y los bloques centrales los que le dan al material su excepcional elasticidad [2].

Como resultado de dichas propiedades se tienen las siguientes importantes áreas de aplicación: suelas de zapato, adhesivos, aditivos bituminosos y revestimiento de alambre. Las ventajas que ofrece como suela son: buena fricción y habilidad para ser moldeado por inyección. Por ser fácilmente procesable se puede coextruir con plásticos rígidos para proveer flexibilidad. En adhesivos debido a su alta solubilidad en muchos disolventes como el tolueno es fácil de aplicar a un substrato base solvente o como adhesivo fundido en caliente.

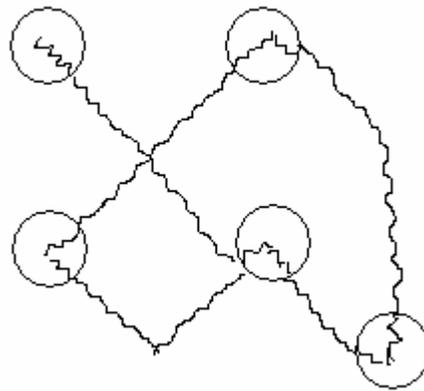


Figura 8 Modelo de la estructura del termoplástico. *BULL, A.L., VONK, W.C. Thermoplastic elastomer and bitumen blends for roof and road* [9].

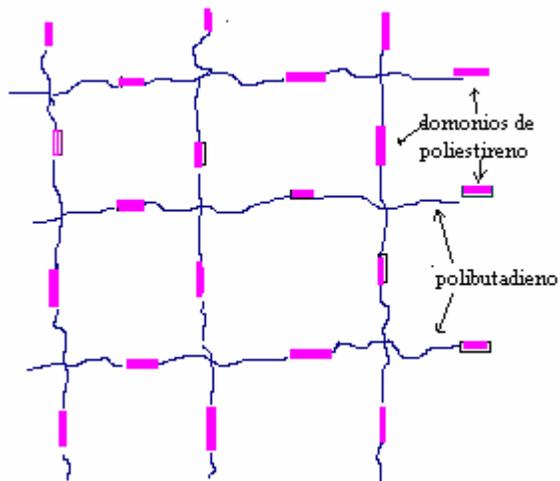


Figura 9 Modelo de la red física del termoplástico SBS [7].

3.6.2 Relación entre la Tg y las propiedades térmicas y mecánicas del polímero modificador.

Cuando el asfalto modificado con copolímeros en bloque de estireno y butadieno se enfría por debajo de la temperatura de transición vítrea del poliestireno pero por encima de la Tg del polibutadieno, la fase de bloques de poliestireno forman dominios vítreos que son rígidos y actúan como uniones físicas de los bloques de polibutadieno que son los que disipan los esfuerzos a la que es sometida la mezcla, como se ilustra en la Figura 10 Los copolímeros tipo SBS preparados por polimerización aniónica viviente tienen mayor resistencia a los esfuerzos de elongación que el polímero lineal látex SBR, pero tienen la misma baja resistencia al calor [9].

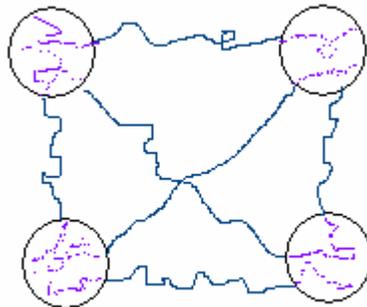


Figura 10 Modelo de la red física del termoplástico SBS cuando la temperatura de asfalto modificado es menor que la Tg del poliestireno pero mayor que la Tg del polibutadieno [8].

La Tg de los copolímeros de estireno y butadieno se puede estimar por la siguiente formula:

$$1/Tg = w_1/Tg_1 + w_2/ Tg_2$$

en la cual w_1 , w_2 , Tg_1 y Tg_2 son las concentraciones en peso, la Tg del polibutadieno y del poliestireno respectivamente que constituyen al copolímero, respectivamente.

Por otro lado, la Tg de los componentes asfálticos está relacionada con la composición de este material y, en particular, con la capacidad de solvatación de los maltenos sobre la fase elástomérica, misma que permite hinchar y disolver parcialmente al polímero en el asfalto, formando así la macrofase rica en polímero del asfalto modificado [1].

En casos en los cuales el asfalto está modificado con una cantidad relativamente alta de copolímero (>10% peso) y éste tiene un contenido de poliestireno alto (>30 % peso) puede ser posible detectar las temperaturas de transición tanto del copolímero: alrededor de -90°C del bloque de polibutadieno; 100 °C del bloque de poliestireno [1].

Tabla 3 Temperatura de transición vítrea del AMM con concentración en peso del 14% en polímero [1].

<i>AM</i>	<i>TA</i>	<i>PE</i>	<i>Tg mezcla</i>
1	48	118	-36
2	54	84	-46
3	53	77	-32
4	50	76	-56
5	53	73	-42

Por esta razón la temperatura para la preparación y aplicación del AM con polímero debe ser relativamente altas (mayor de 160 y 100° C, respectivamente), porque en esas condiciones el AMM es procesable, ya que por debajo de estas temperaturas la mezcla ofrece una resistencia al flujo en cada uno de los procesos mencionados. Durante el desarrollo de los procesos de preparación y aplicación del AMM se debe alcanzar la dispersión máxima posible del polímero en el asfalto, para obtener los beneficios de una buena modificación. Cuando la fase polimérica es la fase continua, se tiene un AMM con buenas propiedades mecánicas (flexibilidad y ductilidad). En cambio, cuando el asfalto es la fase continua el efecto modificador del polímero es menor.

Abajo de la temperatura de transición vítrea de los dominios de poliestireno las morfologías de las partículas ricas en polímero son estables, porque entonces esta parte del copolímero actúa como unión física. Por ello, a temperaturas mayores de los 100 ° C las uniones físicas son destruidas y la separación completa de fases ocurre lenta o rápidamente dependiendo de la composición del sistema.

3.6.3 Propiedades térmicas

El contenido de poliestireno determina la susceptibilidad térmica (capacidad de reblandecimiento) de copolímeros del tipo SBS. Los copolímeros con un alto contenido de estireno (30%) exhiben una baja susceptibilidad térmica porque se pone de manifiesto la alta Tg del bloque de poliestireno; en contraste SBS con bajo contenido de estireno el reblandecimiento ocurre a más bajas temperaturas. Esto delimita la temperatura de servicio superior, que es alrededor de a 65 °C en productos bajo tensión. La susceptibilidad térmica explica la deformación que se produce en un material cuando éste es sometido esfuerzos mecánicos,

especialmente cuando esto ocurre a elevadas temperaturas. Sin embargo, a bajas temperaturas, los SBS pueden presentar un buen desempeño, ya que la flexibilidad se conserva debido a la Tg de los bloques elastoméricos, esto es alrededor de -90 °C para el polibutadieno [10].

3.6.4 Comportamiento mecánico

Los copolímeros llamados genéricamente estirénicos (SBS, SIS, SB) cubren un amplio rango de dureza (vg: de 35 Shore A 55 Shore D), la cual se incrementa conforme el contenido de estireno aumenta. Los dominios de poliestireno contribuyen a la dureza no sólo por que permiten las uniones físicas si no por que actúan como agregados reforzantes, por lo que cuando se utilizan este tipo de copolímeros la necesidad de añadir refuerzos al asfalto es menor [10].

Tabla 4 Propiedades mecánicas de algunos polímeros estirénicos (Shell KratonTM polymers) [10].

<i>polímero</i>	<i>% estireno</i>	<i>Shore A</i>	<i>Esfuerzo MPa</i>	<i>Elongación %</i>
SBS lineal	31	71	31.7	880
SBS lineal	17	53	4.83	1100
SB) _n estrella	21	65	31.7	900
SB) _n estrella	30	75	27.6	820

Como se puede observar, los valores más altos de dureza son para los polímeros con el más alto contenido de estireno. Pero hay que destacar que los asfaltos modificados con SBS lineal con alto contenido de estireno en (40% w a 50%w) son más rígidos pero la TA es menor, esto se debe a que no se alcanza una dispersión homogénea del polímero en el proceso de mezclado [10].

Gabriel Hernández Z., et al [11] encontraron que el asfalto modificado con SBS lineal (20 a 30% de vinilos) y con un contenido medio de estireno (25% a 35%) tiene el mejor comportamiento entre rígido y flexible que se refleja en las propiedades termo-mecánicas.

La penetración es otro parámetro empírico que se utiliza comúnmente en la caracterización de muestras tanto de asfalto como de asfalto modificado.

Se ha comprobado (Gerard Kraus [1], Figura 11) que índice de penetración depende de la temperatura y, en el caso de AMM con un termopolímero, de la concentración de polímero.

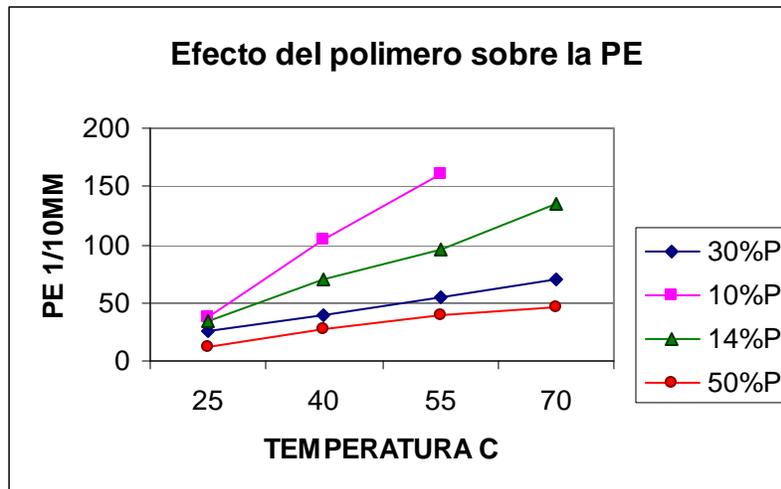


Figura 11 Efecto de la concentración de polímero (10-50 % peso) y temperatura de la muestra sobre el índice de penetración, datos tomados del artículo [1].

3.6.5 Otras propiedades

Los bloques elastoméricos son sensibles a la termooxidación porque son insaturados. La oxidación se traduce en aumentos del peso molecular promedio y de la viscosidad del asfalto; la degradación ocurre porque hay ruptura de cadena del polímero en los estados tempranos del proceso de oxidación. En el caso de que durante la modificación de asfalto se requiera emplear altas temperaturas durante largos periodos, se recomienda usar gas inerte (nitrógeno) [1].

El SBS tipo estrella es un polímero en bloque compuesto de bloques radiales de poliestireno de alto peso molecular (50,000 a 100,000 g/gmol) y un bloque central, polibutadieno, de peso molecular (10, 000 a 20,000 g/gmol). Como los maltenos tienen menor peso molecular que los asfaltenos es de esperar que forme dominios con el polibutadieno, además de que lo absorbe, efecto que se verá reflejado en las pruebas de microscopía y mediciones termo-mecánicas. Presenta una M_w : 381370, M_n : 358010, Poli-dispersividad D : 1.0653 Este último parámetro como ya se dijo indica una distribución estrecha de pesos moleculares masa, lo que indica que es posible caracterizarlo mediante un promedio de su peso molecular, además de que dicha distribución afecta indirectamente las propiedades mecánicas del polímero sólido [1].

Nidia I. Orduña en su tesis “Modificación de Asfalto con Polímeros Modelo” [8] encontró que los copolímeros con el más alto peso molecular tienen las más altas temperaturas de ablandamiento, por ejemplo un SBS tipo estrella con M_w de 327,000 g/gmol tiene mayor TA que su homólogo de 215,000 g/gmol.

Estudios anteriores con polímeros modelos SBR, SBS lineales y ramificados [8], demuestran que el polímero modificador que obtuvo las TA más altas y las medidas de PE más bajas en el AM AC-20 de la refinería de Salamanca fue el SBS tipo estrella.

Sin embargo la dispersión de un PM SBS lineal es mucho mejor y es más fácil de incorporar que uno ramificado, lo que representa mayor estabilidad en el almacenamiento (separación no apreciable de polímero del asfalto).

En los siguientes capítulos se presentan los resultados obtenidos al investigar el efecto de la concentración del SBS con ramificación tipo estrella sobre las propiedades termomecánicas de asfaltos modelo

IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Lista general de materiales

* Polímero modelo empleado: SBS, tiene forma de estrella de cuatro brazos, donde la parte butadiénica está en el centro y la parte estirénica en el exterior. El 30% es fase estirénica y el 70% butadiénica. Tiene un peso molecular promedio de 300,000. Para que se incorpore adecuadamente al asfalto debe estar finamente fraccionado.

* Asfalto de Salamanca AC20.

* Etilenglicol para baño maría.

* Heptano grado industrial.

* Nitrógeno.

* Aceite lubricante para baño maría.

4.2 PREPARACIÓN DEL ASFALTO MODELO

4.2.1 Obtención de asfaltenos y maltenos.

Primero para preparar el asfalto modelo a partir de un lote de asfalto AC20 se obtienen sus principales constituyentes maltenos y asfaltenos, según la norma ASTM D4124-36, de la siguiente manera: El método consiste en la disolución del asfalto en heptano. Una vez disuelto el asfalto, la parte soluble en heptano contiene a los maltenos, mientras que los sólidos insolubles constituyen los asfaltenos:

Se disuelve asfalto en un recipiente con la relación 1.13g de AC-20 por cada 10 ml de heptano. Se calienta a 82 °C por medio de una parrilla con mezclador, el recipiente debe tener un sistema de reflujo para no tener pérdidas de heptano, se mantiene el calentamiento por tres horas y luego la mezcla se deja enfriar por 24 h.

Como los asfaltenos son la fracción insoluble se recuperan de la siguiente manera: La mezcla anteriormente mencionada se filtra a vacío usando un sistema Büchner-Kitasato y papel filtro con peso conocido de filtrado rápido, enjuagando continuamente con heptano el papel para recuperar restos de maltenos.

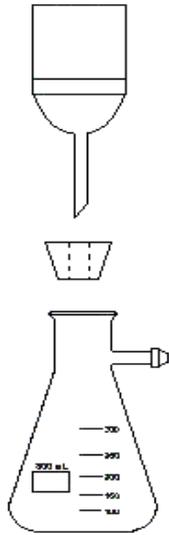


Fig. 12 Equipo de filtración de insolubles denominado **Büchner-Kitasato**.

La solución procedente del filtrado contiene a los maltenos. Se destila el disolvente a 82 °C y a presión atmosférica, obteniéndose como residuo los maltenos, la parte destilada es el heptano. Posteriormente se recolecta la solución de maltenos en charolas y se calienta en una estufa a 100 °C durante un periodo de 12 h. para eliminar el heptano.

Los asfaltenos se colocan en el horno a 110 °C por 24 h, para eliminar el disolvente.

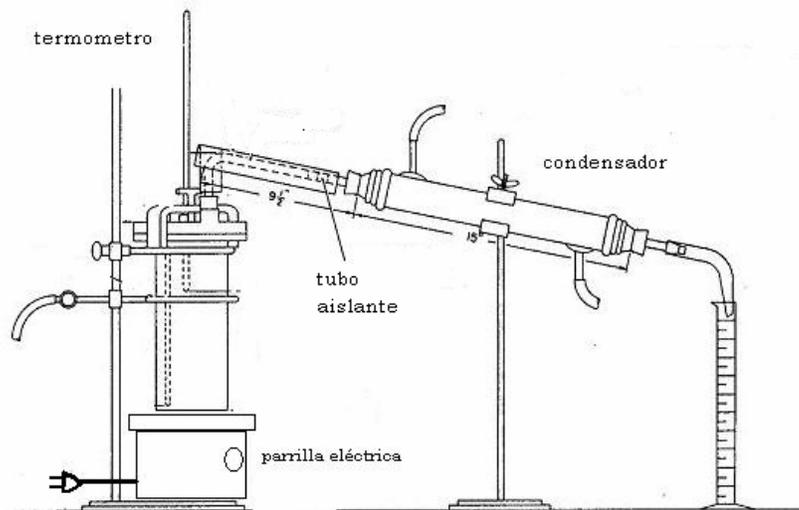


Figura 13 Sistema de separación de heptano y maltenos

4.2.2 Obtención de asfalto modelo. Reconstitución.

Los asfaltos modelos que se emplearán, AC10 y AC30, se obtendrán por la reconstitución sobre asfalto AC20.

Se calienta el AC20 hasta que se haga líquido, luego se agrega asfaltos o maltenos, según se requiera aumentar o disminuir la concentración de los primeros. Por ejemplo, el AC10 se obtiene agregando maltenos al AC20, según el siguiente balance de materia:

Base de cálculo, 100g de asfalto AC10

De una muestra de 100g de AC10, se requiere un asfalto modelo que sea 90% w/w en maltenos (X),

Balance total de maltenos

$$X = 90\%(\text{AC10}).$$

Balance total de masa $X + (\text{AC20})g = 100 \text{ g} (\text{AC10})$

Balance de maltenos $0.8 (\text{AC20})g + X = 0.9 (100) = 90g$

El AC30 se obtiene agregando asfaltenos al AC20.

De una muestra de 100g de AC10, se requiere un asfalto modelo que sea 30% w/w en asfaltenos (Y),

Balance total de asfaltenos $Y = 0.3 (\text{AC30})$

Balance total de masa $Y + (\text{AC20})g = 100g$

Balance de asfaltenos $0.2 (\text{AC20})g + Y = 0.3(100) = 30g$

4.3 PREPARACIÓN DEL ASFALTO MODIFICADO CON POLIMERO

EQUIPO:

propela tipo mariposa

termopar tipo J

controlador de temperatura

parrilla eléctrica

controlador de voltaje

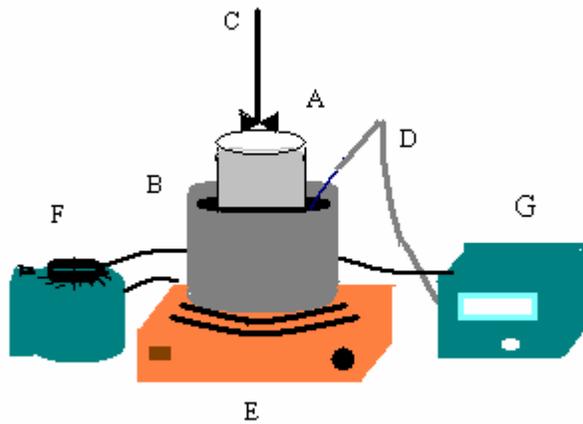
Se pesa el polímero a manera de obtener la concentración en peso deseado. Los valores de concentración fueron: 3%, 5%, 8% y 10%.

Se calienta el asfalto modelo en un baño de aceite. Una vez fundido el asfalto, se agita a 500 rpm a 180 °C por 10 min. Se va agregando lentamente el polímero el cual ha sido cortado finamente con anterioridad. El tiempo total de mezclado es de 4 h. a presión atmosférica con presencia de nitrógeno. Una vez concluido el tiempo de mezclado se procede a tomar muestras. Se vierte asfalto modificado en un recipiente de aluminio de 1 cm de profundidad, esta muestra se empleará para la prueba de penetración y microscopía de fluorescencia. Para la prueba de temperatura de ablandamiento, se llenan los dos moldes específicos para esta prueba, de tal forma que al verter el asfalto en cada anillo se evite la formación de huecos y sin exceso de asfalto en la superficie. En caso de existir exceso en la superficie es posible retirarlo con una espátula caliente.

Para explicar la nomenclatura que se utilizó para designar las muestras de asfalto y asfalto modificado se hace referencia a un asfalto modificado que tiene 3 % en peso del polímero SBS. Dicha muestra se preparó mezclando un asfalto con 10 % en peso de asfaltenos y la cantidad conveniente de polímero. A dicho asfalto se le denomina AC10 porque es un asfalto (A) que tiene 10 % en peso de asfaltenos (10); y al asfalto modificado correspondiente se denomina A10P3 porque se preparó a partir de A10 y porque tiene 3 % en peso de polímero (P3).

%P	AC10	AC20	AC30
0	AC10	AC20	AC30
3	A10P3	A20P3	A30P3
5	A10P5	A20P5	A30P5
8	A10P8	A20P8	A30P8
10	A10P10	A20P10	A30P10

Tabla 5 Nomenclatura de las muestras de AM Y AMM



A: mezcla asfáltica

B: baño maría con aceite lubricante

C: propela

D: termopar

E: parrilla eléctrica

F: controlador de voltaje

G: controlador de temperatura

Figura 14 Proceso de modificación del asfalto

4.4 PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN

4.4.1 Temperatura de ablandamiento, TA. Norma ASTM (DS36)

EQUIPO:

Dos anillos con las dimensiones mostradas en la **Figura 15** (b)

Plato de escurrimiento

Dos balines de acero de 9.5 mm de diámetro con una masa de 3.5 g

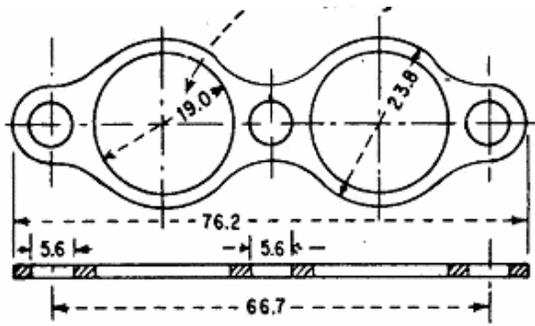
Guías para centrar los balines

Vaso de vidrio mayor de 85 mm de diámetro y mayor de 120 mm de altura

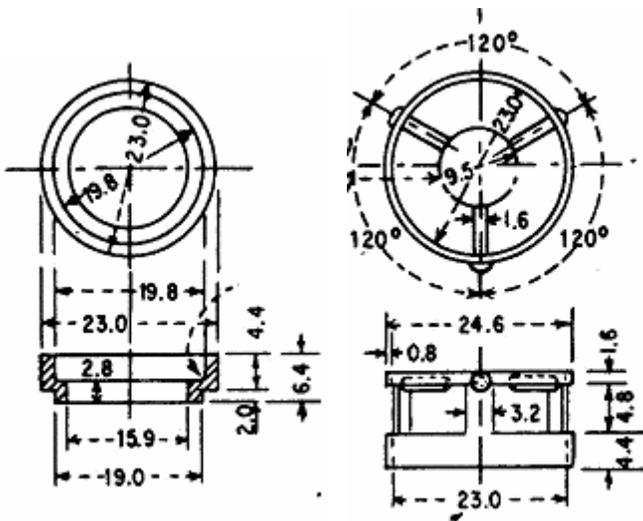
Parrilla de calentamiento con agitación magnética

Este método mide la temperatura a la cual ocurre el ablandamiento del material. Utilizando el método Ring and Ball (ASTM D36) se han reportado valores de TA en el rango de 30 a 200 ° C. Este método es de uso común para observar la tendencia del material a fluir a altas temperaturas. Valores altos de TA indican que el material es un sólido quebradizo, mientras que valores bajos de TA implican materiales blandos.

El método Ring and Ball consiste en colocar una esfera (balín) de peso estandarizado, sobre una muestra de asfalto de espesor conocido, 6.4 mm. Se sumerge el conjunto en un baño de aceite y se calienta con una rapidez de calentamiento controlada. La TA de la muestra será aquella temperatura a la cual el balín cae una distancia de 25 mm [13].

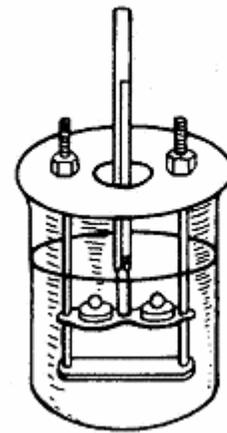


a) soporte de los anillos



b) anillo

c) guía para centrar el balín



d) Ensamble para dos anillos

Figura 15 Equipo para la prueba de temperatura de ablandamiento, cuyas dimensiones están en mm [13].

Procedimiento

1. La prueba se aplicó tanto a los asfaltos modelo sin modificar, como a los asfaltos modelos modificados.
2. Los anillos se colocaron en el plato junto con las guías y los balines.
3. El equipo armado se colocó en etilenglicol a temperatura ambiente
4. Se le calentó a una velocidad de 5 °C/ min utilizando una parrilla eléctrica con agitación muy lenta, 50 rpm.
5. Se colocaron dos anillos por prueba, se tomó el promedio como el valor de TA.

4.4.2 Penetración ASTM D-5

EQUIPO:

Penetrómetro

Aguja cuyas medidas se muestran en la **Figura 16**

Cronómetro

La penetración es la distancia en décimas de mm que una aguja de especificaciones estandarizadas penetra verticalmente en condiciones de tiempo, y temperatura conocidas.

Procedimiento

1. Las muestras se colocan en baño maría a 25 C para controlar la temperatura durante todo el tiempo en que se efectuó la prueba.
2. La aguja se inserta en el penetrómetro y se coloca una carga de 50 g en el mismo, totalizando 100g.
3. Se coloca la muestra en la base del penetrómetro. La muestra debe estar cubierta con agua del baño.
4. La aguja se coloca en la superficie de la muestra
5. Se ajusta el huso de tal manera que la lectura fuera de cero.
6. Se libera la aguja durante 5 s.
7. Se registra la lectura de penetración en décimas de milímetro.
8. Después de cada medición se devuelve la muestra al baño y se limpia la aguja con n-heptano. Se hacen un mínimo de 7 determinaciones para cada muestra.

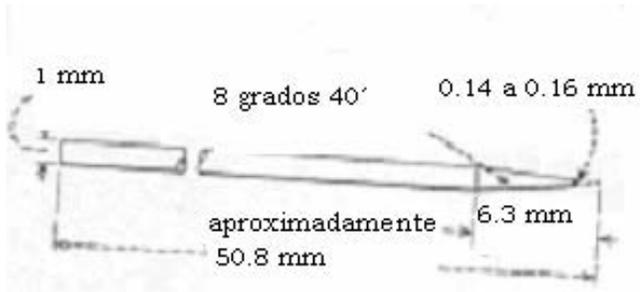


Figura 16 Medidas en milímetros de una aguja para la prueba de penetración [14].



Figura 17 Penetrómetro y muestra de AM

4.4.3 Microscopía de fluorescencia

Equipo: Microscopio de fluorescencia modelo Axiolab con platina giratoria de desplazamiento en cruz; lámpara incorporada con diafragma de campo luminoso con bombilla de halógenos (6V, 50 W)

Esta técnica permite observar la apariencia de la dispersión del polímero modificador, y por lo tanto, ayuda a estudiar la compatibilidad que puedan exhibir diferentes mezclas de polímero/asfalto. Durante la prueba de MF, la muestra de AM se irradia con luz ultravioleta, y debido a que la fase rica en polímero es capaz de fluorescer, mientras que los componentes del asfalto se observan oscuros, es posible observar directamente el contraste de ambos campos, y estimar así el grado de dispersión, tamaño y la morfología de la fase rica en polímero, ya sea que se encuentre disperso en el seno de la matriz de asfalto (cantidades relativamente pequeñas de polímero < 5% peso), o bien que constituya la fase continua de polímero, lo cual ocurre cuando la concentración de polímero es relativamente grande (>10 % peso). La fase rica en polímero emite luz visible de color amarillo verdoso mientras que la rica en asfaltenos prácticamente no emite fluorescencia y por lo tanto se ve oscura, en ello radica el éxito que se ha tenido en la caracterización de AM mediante MF.

El sistema óptico del microscopio de fluorescencia consiste de dos partes: el sistema de iluminación y el sistema de observación.

En el sistema de iluminación el espécimen es iluminado con una luz de longitud de onda corta como la azul (entre 400 y 500 nm) que ha sido seleccionada de la fuente de luz por medio de un filtro de excitación.

En el sistema de observación el objetivo es que el objeto fluorescente sea visto como una imagen brillante contra un fondo negro para ello se usa un filtro que deje pasar longitudes de onda más grandes que la usada para la excitación.

En la **Figura 18** se muestra el esquema de un microscopio de fluorescencia, en el que la luz que ha pasado a través de las lentes (filtros, para controlar su energía) incide sobre la muestra. En este esquema se muestran los tres elementos característicos del microscopio de fluorescencia:

1. Filtro de corte o filtro de excitación. Es el filtro que selecciona la luz de la longitud de onda incidente. En el esquema está seleccionando luz de longitud de onda entre 450 y 490 nm (azul).
2. Espejo de ranuras ordenadas o espejo dicromático. Se trata de un espejo que tiene la propiedad de reflejar la luz de ciertas longitudes de onda y de dejar pasar otras. En este caso refleja luz de longitud de onda menor de 510 nm (por ello refleja la luz incidente azul) y deja pasar la luz de longitud de onda superior a 510 nm, dejando pasar la luz amarilla emitida por la muestra.

3. Segundo filtro de corte o filtro de emisión. Es el filtro que selecciona la luz de longitud de onda fluorescente. En este caso deja pasar la luz de longitud de onda 520 a 560 nm.

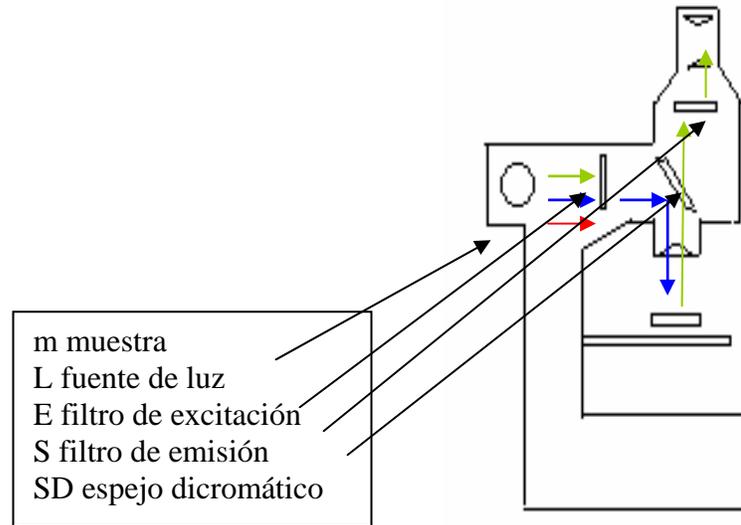


Figura 18 Esquema de un microscopio de fluorescencia



Figura 19 Microscopio de fluorescencia

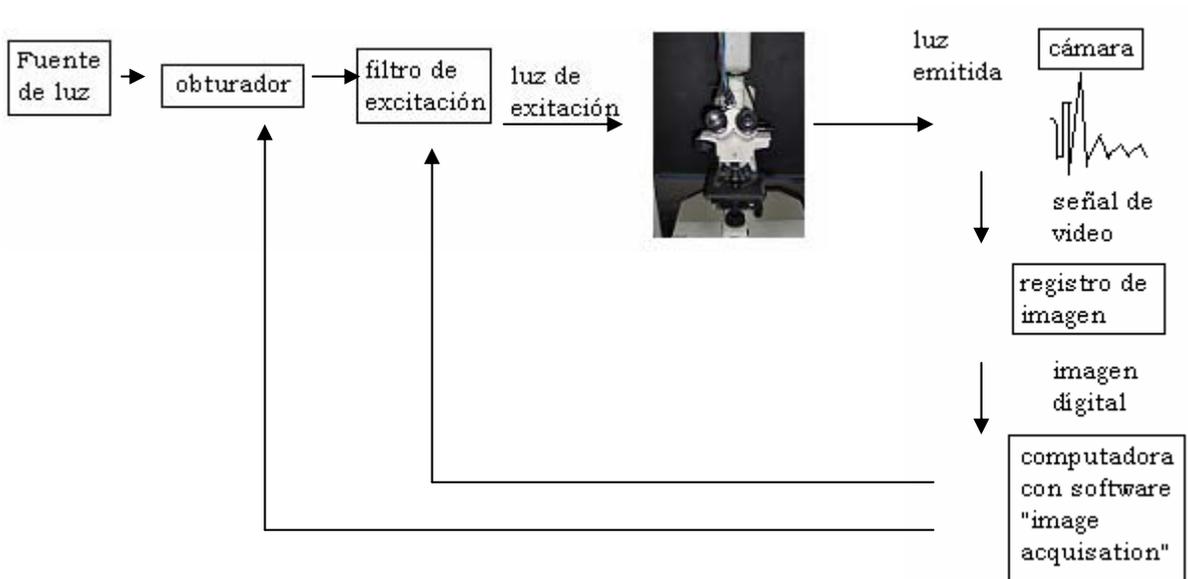


Figura 20 microscopio de fluorescencia acoplado a un sistema típico de imagen automatizada [15].

Cabe señalar que sólo se fotografió aquellas muestras cuyos bajos y altos porcentajes de polímero presentaron las propiedades que explican la compatibilidad de dicho PM con el asfalto.

Se procedió de la siguiente manera:

1. Las muestras se lavaron con agua destilada para quitar cualquier basura que hubiera en la superficie.
2. Se encendió la computadora
3. Se activó el programa KS3000
4. Se prendió la lámpara
5. Se accionaron los iconos Display y Galería de la barra superior
6. Se seleccionó Acquire y luego Input
7. Se usó el objetivo 20x para observar la muestra
8. Se enfocó la muestra activando Live y New luego se presionó OK para registrar la imagen.
9. Se guardó la imagen.
10. Se mejoraron todas las imágenes con un software que permitió un mejor contraste.

4.4.4 Segregación

Cuando el AMM se mantiene sin agitación y a temperatura elevada ($>150^{\circ}\text{C}$) durante un tiempo relativamente largo ($>24\text{ h}$) puede ocurrir la separación de la fase rica en polímero (polímero-hinchado con maltenos) y la fase rica en asfaltenos (asfaltenos-estabilizados con la parte de asfalto que no forma parte del polímero-hinchado); a ese proceso se le conoce como segregación, y es debido principalmente a la incompatibilidad termodinámica que existe entre una parte del asfalto y el polímero y a la diferencia de densidades de dichos componentes del AMM [12].

El polímero y una fracción importante de maltenos, que son los componentes del asfalto de menor peso molecular transitan hacia arriba. Cuando esto sucede, las propiedades como la TA y PE varían a lo largo del sistema. La prueba de segregación consiste en someter una muestra bajo condiciones de almacenamiento sin agitación y a una temperatura de 180°C , durante un tiempo determinado. Una vez transcurrido el tiempo especificado, la muestra se deja enfriar a temperatura ambiente. Se establece si se presenta el fenómeno de segregación a través de mediciones de TA y PE, tanto en la fracción superior como en la fracción inferior de la muestra. Si en dichos sistemas se varía la concentración de polímero y se someten a las correspondientes pruebas es posible conocer las concentraciones de hule en las que se presenta la separación entre el hule y el asfalto; esta información es valiosa para conservar las propiedades deseadas del sistema bajo condiciones de almacenamiento.

1. Se calentaron las muestras por medio de un baño de aceite hasta que fueran líquidas.
2. Se vertió el asfalto en tubos de aluminio (material que permite que se pueda desprender el asfalto del tubo) de 12 cm de largo hasta alcanzar 10 cm. de profundidad, debido a que una vez en el horno a 180 °C de temperatura, dicho asfalto se dilata hasta llegar el borde.
3. Se calentaron las muestras en un horno a 180 °C por 14 h. sin agitación.
4. Se enfriaron las muestras hasta 4 °C
5. Se desprende el tubo de aluminio del asfalto. Se corta la muestra en tres partes iguales, la parte de en medio se desecha.
6. La parte de arriba y la de abajo se colocaron por separado en recipientes para después ser calentados en baño de aceite hasta que fundieron, después se llenaron anillos con este asfalto, para la prueba de temperatura de ablandamiento. El residuo se queda en los recipientes para la prueba de penetración.



Figura 21 muestra de AMM disecionada para la prueba de segregación.

V. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El asfalto base que se utilizó fue el AC20 de la refinería de Salamanca, el cual tiene la siguiente relación de composición en peso de asfaltenos y maltenos: 20/80.

% en Peso de Asfaltenos (% en peso)	20
TA (°C)	47
PE (1/10 MM)	47.7
Viscosidad. Aparente. a 135 °C (cp)	6233
Viscosidad. Aparente a 160 °C (cp)	1918
Viscosidad. Aparente a 177 °C (cp)	1012

Tabla 6 Propiedades del asfalto

5.1 MICROSCOPIA DE FLUORESCENCIA

En las **Figuras 22** (a), (b)...(f) se presentan las imágenes de los asfaltos modelo que contienen 10, 20, 30%w de asfaltos modificados con 3% y 10% w. La región clara de estas imágenes corresponde a la fase rica en polímero, mientras la región oscura pertenece a la fase rica en asfalto. Aunque las fotos no tienen un alto contraste, se puede notar que todas las muestras son bifásicas y que las características de la macrofase rica en polímero dependen de la concentración del polímero en las muestras. Las muestras con baja concentración de polímero exhiben una mayor dispersión de la fase polimérica y el tamaño de las partículas de esta fase aumenta conforme disminuyen la cantidad de maltenos. En las muestras con alta concentración de polímero se observa que la fase rica en polímero es la fase continua, por lo que la fase rica en asfaltos se muestra como pequeñas inclusiones. Esto se debe a que a altas concentraciones de polímero se presenta la inversión de fases.



Figura 22 (a) A10P3

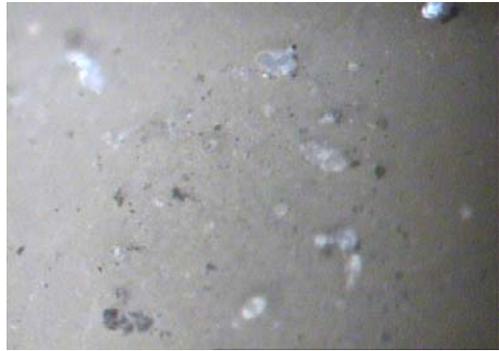


Figura 22 (b) A10P10

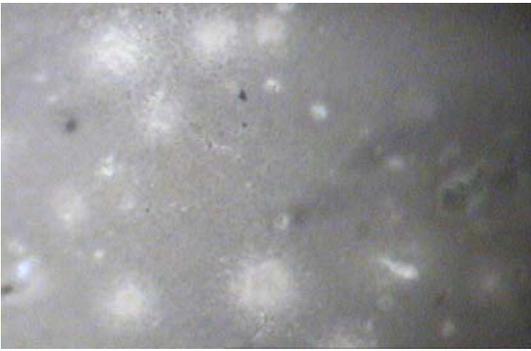


Figura 22 (c) A20P3

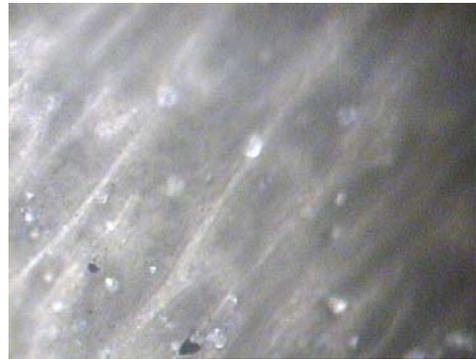


Figura 22 (d) A20P10



Figura 22 (e) A30P3

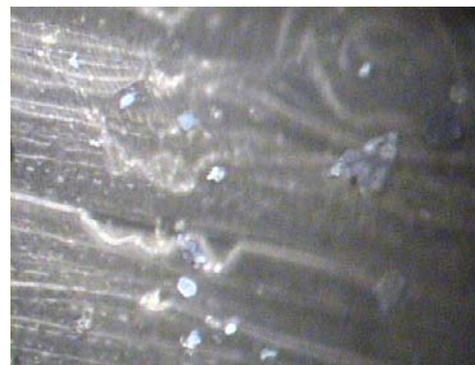


Figura 2 (f) A30P10

Figuras 22 Muestras de asfalto modelo modificado vistas por el microscopio
De lo anterior se tiene que:

Se tiene una dispersión total del polímero cuando hay gran cantidad de maltenos 90% w. Tanto 3% como en 10% w en P.

La red formada en todas las mezclas es una especie de malla estabilizada por uniones de poliestireno del polímero. Y su dispersión en el asfalto está determinada por la cantidad de maltenos.

En las tres mezclas de AMM al 3% w en polímero al escasear los maltenos la fase polimérica se va segregando hasta formar dominios predominantemente ricos en polímero.

En las mezclas AC20P10 y AC30P10 se observa que la red física que formó el polímero absorbido en su parte butadiénica ha sido extendido en la matriz del asfalto por los maltenos, luego de un rápido enfriamiento después de la modificación siguiendo así mismo el patrón de la propela al girar.

5.2 TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO

5.2 TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO

La presencia del polímero jugó un papel muy importante, ya que aumentó significativamente la TA en el AMM con respecto a la muestra de su respectivo asfalto modelo (misma cantidad de asfaltenos y sin polímero).

En las tres series de asfalto se notó que la TA aumentó conforme se incrementó la cantidad de polímero; en la **gráfica 1** se observa que el incremento es considerable de 3 a 5 % en polímero, a partir del 8 % el incremento es menor, por lo que las tres series llegan a comportarse en forma semejante a una concentración de polímero del 10%.

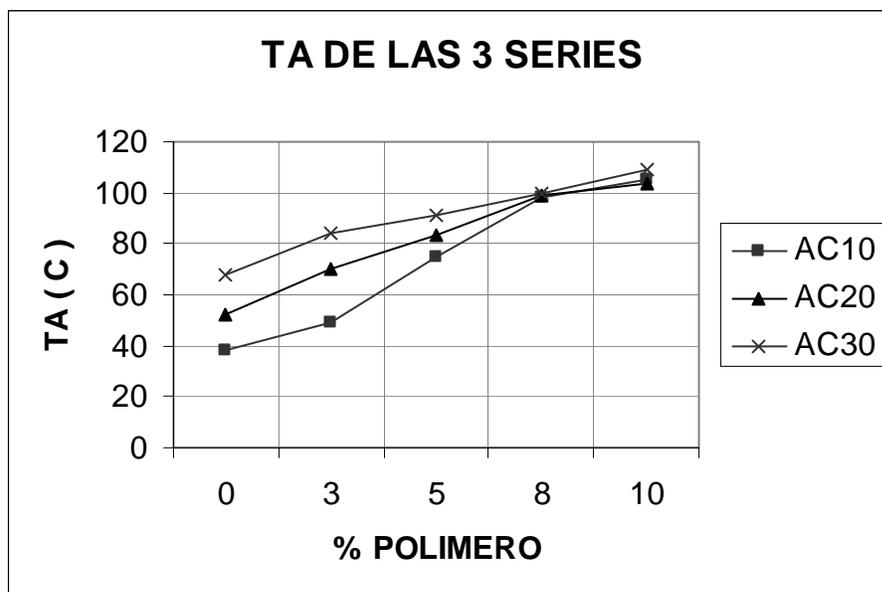
La TA aumenta con la concentración de polímero porque se va incrementando la fase elastomérica del AMM, hasta que se manifiesta una tendencia a la inversión de fases, en cuyo caso la fase rica en polímero es la fase continua, y la fase rica en asfalto constituye la fase dispersa. Por eso, mientras el cambio de la fase rica en polímero es considerable habrá cambios apreciables de la TA, luego llega a ser mínimo dicho cambio, porque a estas concentraciones de polímero, hay una cantidad suficiente de PS, cuya Tg 100 °C afecta la Tg del sistema.

Cabe mencionar que en asfaltos con un bajo contenido de maltenos (menor del 70%) la máxima concentración de polímero experimentada (10%) no fue suficiente para que la fase polimérica fuera la fase continua, por lo que se considera que, estrictamente hablando, en esos casos no ocurrió la inversión de fases, y por lo tanto la temperatura de ablandamiento sigue aumentando al incrementarse la concentración de polímero.

Comparando las tres series de asfalto se deduce que a mayor proporción de asfaltenos se incrementa la TA, siendo la serie del AC30 la que tiene las más altas temperaturas de ablandamiento.

Tabla 7 Tabla comparativa de los tres modelos de asfalto (TA °C vs % polímero agregado)

A411	AC10	AC20	AC30
P (% en peso)	TA (°C)	TA (°C)	TA (°C)
0	38	52	68
3	49	70.4	84
5	75	83	91.5
8	98	99	100
10	105	104	109



Gráfica 1 Efecto de la concentración del polímero sobre la temperatura de ablandamiento.

De lo anterior se concluye que:

La temperatura de ablandamiento de los asfaltos modelo sin modificar aumenta conforme se incrementa la cantidad de asfaltenos.

La presencia del polímero en el AMM hace que se tenga mayor TA que su respectivo asfalto modelo.

En todas y cada una de las series de asfalto modelo modificado se observó que conforme aumenta la concentración de polímero en la mezcla se incrementa la TA, esto es influenciado por la Tg del polímero que afecta dicha temperatura.

5.3 PENETRACION

En la tabla 8 al comparar la PE entre los asfaltos modelo se infiere que la PE disminuye conforme aumentan los asfaltenos.

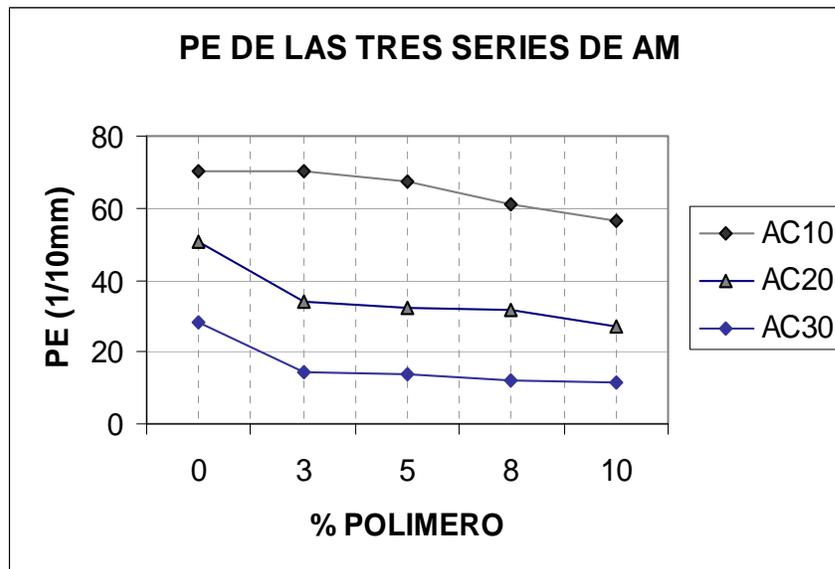
Si comparamos por ejemplo la serie de AM con 3% contra la de sus respectivos asfaltos modelos, se observa que el polímero afecta la PE haciendo que disminuya de forma notable; en el caso del AC10P3 no disminuyó debido a que el polímero fue por completo disuelto sin que hubiera posibilidad de formar redes por su baja concentración, y su efecto quedó enmascarado por la alta concentración de maltenos.

Para cada serie se puede notar que al aumentar la concentración del polímero la PE va disminuyendo.

Al comparar las tres series de asfalto modificado, se aprecia que a mayor concentración de asfaltenos la PE disminuye, debido a que la alta proporción de asfaltenos aumenta la rigidez del asfalto siendo los resultados de la serie del AC30 con las más bajas medidas de PE.

Tabla 8 Tabla comparativa de los tres modelos de asfalto (Penetración vs %P).

%P	PE		
	AC10	AC20	AC30
0	70.4	50.7	28.1
3	70.1	34	14.6
5	67.4	32.4	14.1
8	60.8	31.4	11.8
10	56.6	26.8	11.3



Gráfica 2 Efecto de la concentración de polímero sobre la PE

De lo anterior se tiene:

La PE de los asfaltos modelo disminuye conforme aumentan los asfaltenos.

La PE es menor en los AMM que su respectivo AM.

En cada serie se puede notar que al aumentar la concentración del polímero la PE va disminuyendo.

5.4 SEGREGACIÓN

En la **Gráfica 3.1** se observa que los valores de PE correspondientes a las partes A y C de las mezclas con 3% w en polímero difieren entre si y son diferentes en las tres mezclas. En cambio en las mezclas con 10% w de polímero **Gráfica 3.2** se observó que no hubo diferencia en la PE de las partes A y C de una misma mezcla, pero si se comparan los valores de PE de las diferentes mezclas se observa que si hay diferencia entre ellas.

Cabe aclarar que la mezcla A30P10 no se pudo someter a la prueba de segregación realizar porque su alta viscosidad no permitió que se preparara la probeta.

Por lo que toca a la TA, en las muestras con 3% w de polímero se observa que los valores correspondientes de TA para A y C difieren entre si, excepto para A10P3, pero si se comparan los valores entre las mezclas, encontramos que son

diferentes entre si. En cambio las mezclas con 10% w de polímero **Gráfica 4.2** no hay diferencia entre estos valores, pero si hay diferencia entre A y C.

PE 3% P		
3% P AM	PE (1/MM)	
	A	C
A10P3	70	56
A20P3	50	16
A30P3	37	7

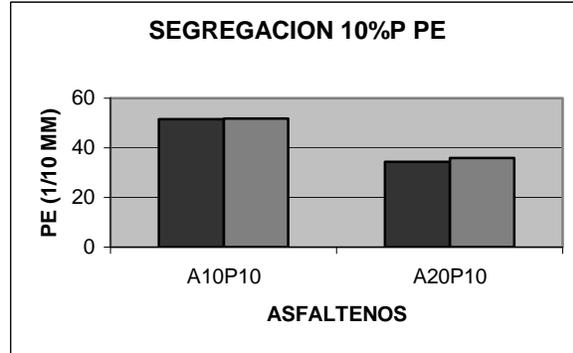
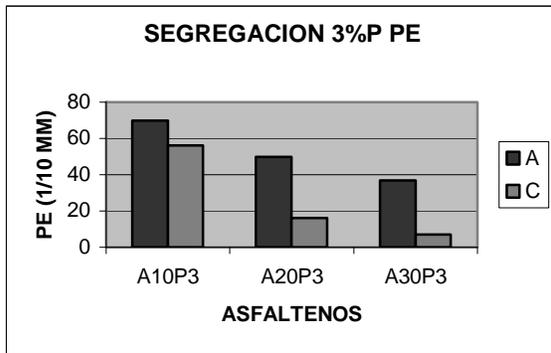
TA segregación 14 h		
AM 3% P	TA (°C)	
	A	C
A10P3	55	55
A20P3	90	68
A30P3	121	89

PE 10% P		
10% P AM	PE (1/MM)	
	A	C
A10P10	51,5	51,7
A20P10	34,4	36

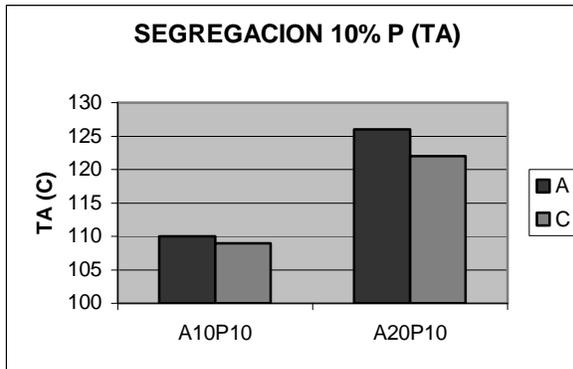
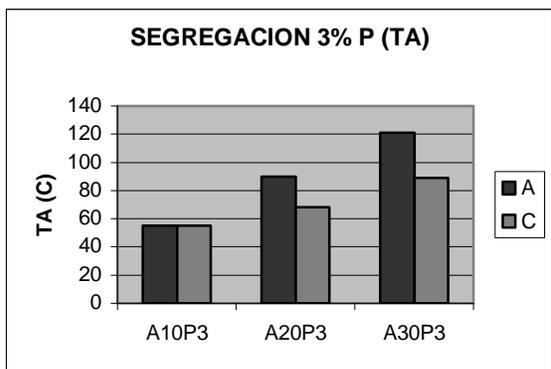
TA segregación 14 h		
AM 10% P	TA (°C)	
	A	C
A10P10	110	109
A20P10	126	122
A30P10	*	*

Tablas 9 (a) y (b) PE en función de la concentración de polímero en la mezcla

Tablas 10 (a) y (b) TA en función de la concentración de polímero en la mezcla



Gráficas 3.1 y 3.2 PE vs cantidad de asfaltenos de la prueba de segregación



Gráficas 4.1 y 4.2 TA vs cantidad de asfaltenos de la prueba de segregación

De lo anterior se tiene:

Estos resultados pueden explicarse considerando que las propiedades termomecánicas del AM están determinadas por la interacción entre el polímero y los principales constituyentes del asfalto. En particular los maltenos hinchan al bloque de PB, incrementando su volumen hasta nueve veces. Dado que los tres AM utilizados difieren entre sí en la cantidad relativa de maltenos, es de esperarse que la interacción del polímero con cada uno de estos asfaltos sea diferente, lo cual

se refleja en TA y PE de las diferentes mezclas. En general si se pone atención tanto en las gráficas al 3% y 10% w las tendencias de todos los valores de TA y PE respectivamente son las mismas que antes de la prueba de segregación, es decir, la TA va aumentando con la cantidad de polímero mientras que la PE va disminuyendo. En las gráficas de TA y PE con 3% w, los valores de la muestra antes de segregar y la parte A de la muestra segregada son prácticamente iguales, lo que significa que para esa baja concentración de polímero no hay segregación de la fase rica en polímero de la mezcla.

Para explicar los resultados de TA es conveniente enfatizar que el balín de la prueba de TA, que representa la fuerza que se ejerce sobre la muestra de AMM a una temperatura dada, debe atravesar la muestra de AMM que esta constituida por la macrofase rica en polímero y la macrofase rica en asfalto. Cuando se tienen cantidades relativamente altas de maltenos y relativamente bajas de polímero como son las mezclas de 3% en peso de polímero, se tiene que el polímero está dispersado por completo por los maltenos y no logra formar una red polimérica con suficientes uniones y esto se refleja en que la TA después de la segregación, tanto la parte A como la C sean iguales, aun cuando la parte A tenga mayor proporción de P.

En las gráficas 3.1 y 4.1 se muestra que conforme disminuye la cantidad de maltenos, hasta llegar a AC30, ocurre la segregación de las fases porque la cantidad de maltenos no es suficiente para mantener disperso al Polímero.

En términos generales, puede decirse que a bajas concentraciones de polímero (3% w) no hay una segregación considerable de las fases (una fase rica en polímero y la otra rica en asfalto) que constituyen al asfalto modificado. En contraste en las muestras de AMM con alta concentración de polímero (10% w) la segregación de las fases se da porque no se tiene la cantidad suficiente de maltenos para mantener dispersa a la fase rica en polímero.

VI. CONCLUSIONES

Las propiedades térmicas y mecánicas, representadas por la Temperatura de Ablandamiento, TA, y la Penetración, PE, de los asfaltos modelo investigados dependen de la cantidad de asfaltenos de dichos asfaltos. Concretamente, la TA aumenta y la PE disminuye.

En la microscopia de fluorescencia se observó que las muestras con baja concentración de polímero (3%) exhiben una mayor dispersión de la fase rica en polímero, y que el tamaño de las partículas de esta fase aumenta conforme aumenta la cantidad de asfaltenos. En cambio, en las muestras con alta concentración de polímero se observa que la fase rica en polímero es la fase continua, lo cual indica que ocurrió la inversión de fases.

Independientemente de la concentración de polímero (3 y 10 % en peso) las tendencias de la prueba de segregación son las mismas que las observadas en las muestras antes de ser sometidas a la prueba de segregación: la TA aumenta con la cantidad de polímero, mientras que la PE disminuye. A una baja concentración de polímero (3 % w) y baja concentración de maltenos (70 % w) las pruebas de segregación muestran que hay separación del polímero y el asfalto; en cambio a alta concentración de polímero (10 % w) y alta cantidad de maltenos (90% w) no hay separación apreciable, debido a que hay una buena dispersión del polímero en el asfalto y además son más estables en el proceso de almacenamiento en caliente que los asfaltos con baja concentración de maltenos (70 % w).

RECOMENDACIÓN

Para vigilar preparación de asfalto modificado con TPE, se recomienda [5] poner especial cuidado en las siguientes etapas del proceso:

- Evaluar el asfalto modelo (información sobre sus constituyentes y caracterización)
- El proceso de homogenización debe ser de forma dosificada y a una temperatura de aproximadamente 180 °C
- Durante el mezclado usar una agitación de alto corte (superior a 500 rpm) y el tiempo suficiente para formar una red.
- La realización de pruebas de microscopia y de segregación, para tener información de las características de la fase rica en polímero así como de su estabilidad térmica a bajas y altas temperaturas.

BIBLIOGRAFIA

1. Kraus, Gerard, "Modification of Asphalt by Block Polymers of Butadiene and Styrene", Rubber Chemistry and Tecnology, Vol. 55 No. 4, pp 1389-1402, U.S.A, Septiembre 1982
2. Allcock, Harry R., et al. "Contemporary Polymer Chemistry", Pearson Prentice Hall, 3era edición, 524-526, 669-679 , 2003
3. Concise Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Edit. Jhon Wiley, páginas 296-297, U.S.A, 1990.
4. Rodríguez T. Rogelio et al. "Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule", publicación técnica No. 160 SCT, Qro. México 2001.
5. Pfeiffer, Johan Philipe. The properties of Asphaltic Bitumen, Elsevier Publishing Company, NY, 1950.
6. www.monografias.com/trabajos/mafu
7. Torres Taboada, Experiencia en aplicación de asfalto modificado con polímero tipo SBS en carpetas de concreto, 1er congreso nacional del asfalto, tomo 1, México, 1999.

8. Orduña, Nidia I. Modificación de Asfaltos con Copolímeros Modelo, tesis de licenciatura 2003, Biblioteca de la Facultad de Química, U.N.A.M.
9. Fried, Joel R., "Polymer Science and Technology", Prentice Hall, 2da. edición, pp 377-378, U.S.A, 2003.
10. "Engineering Polymers", edited by Dyson, R.W., 1era. Edición pp. 53-63, N.Y. U.S.A, 1990
11. Hernández Gabriel, Medina Eva M, et al "Modificación Termomecánica y Reológica de asfalto modificado con SBS de diferente microestructura", revista Asfáltica, número 1, pp. 13-16, México, 2004.
12. Jian-Shiuh Chen, Jin Chih Liao, et al. "Asphalt Modified by SBS triblock copolymer: Morphology and Model", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 14, Issu 3, pp 224-229, may 2002.
13. Annual Book of American Standard testing Materials, "Standard test Method for Viscosity ASTM D36, Softening point of bitumen (ring and ball apparatus)" vol 4.04, págs. 9-12, 1991.
14. Annual Book of American Standard testing Materials "Standard test Method for Penetration of Bituminous Materials ASTM D5", vol 4.04, págs. 9-12, U.S.A, 1991.
15. Fluorescence Imaging Spectroscopy and microscopy, Editado por Xue Feng Wang and Bryan Herman, a Wiley publication, U.S.A, 1996.

APÉNDICES

Tablas de valores de penetración, PE promedio, valor máximo y mínimo para todas las muestras de asfalto

Valores de PE (1/10 mm) para las muestras con 10 %w

A	AC10	AC10P3	AC10P5	AC10P8	AC10P10
	71	70	68	60	60
	70,5	68	69	61	58
	70,5	67	71	62	59
	70	64	66	61	53
	70	75	65	60	57
	70	70	64	62	55
	70,5	75	69	60	56
	70,5	72	75	60	55
PE promedio	70,4	70,1	68,4	60,8	56,6
PE max	71,0	75,0	75,0	62,0	60,0
PE min	70,0	64,0	64,0	60,0	53,0

Valores de PE (1/10 mm) para las muestras con 20 %w

A	DATOS DE PE PARA AM AC20				
	AC20	AC20P3	AC20P5	AC20P8	AC20P10
	45	31	35	30	26
	51	35	31,5	30,5	26
	49	35	31	32	25,5
	50	35	32,5	33	27
	51	33	31	29	27
	55	34	30	33	26
	54	35	32	32	27,5
	51	34	35	32	29
	50		34		
	57		32		
			29		
PE promedio	51,3	34,0	32,1	31,4	26,8
PE max	57,0	35,0	35,0	33,0	29,0
PE min	45,0	31,0	29,0	29,0	25,5

Valores de PE (1/10 mm) para las muestras con 30 %w

A	AC30	AC30P3	AC30P5	AC30P8	AC30P10
	29	15	14	11	10
	28	12	12	12	10
	26	17	13	13	12
	27	16	14	12	12
	28	13	14	11	11
	30	15	15	11,5	12
	26	14	17	12	12
	31				11
PE promedio	28,1	14,6	14,1	11,8	11,3
max	31	17	17	13	12
min	26	12	12	11	10

Desviación estándar y penetración promedio de las muestras de AMM para la pruebas de segregación a 25 °C

PE		
AMM	(1/10mm)	σ
A10P3-A	69	2.9
A10P3-C	56	4.6
A20P3-A	50	2.6
A20P3-C	16	2.6
A30P3-A	37	3.8
A30P3-C	7	2.0
A10P10-A	51.5	2.5
A10P10-C	51.7	2.6
A20P10-A	34.4	5.4
A20P10-C	36.0	3.1

Desviación estándar y penetración promedio de las muestras para la prueba de penetración a 25 °C

AM	PE (1/10 mm)	
	prom.	σ
AC10	70.4	0.4
A10P3	70.1	3.8
A10P5	67.4	2.5
A10P8	60.8	0.9
A10P10	56.6	2.3
AC20	50.7	0.5
A20P3	34	1.4
A20P5	32.4	1.7
A20P8	31.4	1.5
A20P10	26.8	1.1
A30P0	28.1	1.8
A30P3	14.6	1.7
A30P5	14.1	1.6
A30P8	11.8	0.7
A30P10	11.3	0.9

Proceso actual de la elaboración de asfalto modificado con SBS

1. Evaluación y adecuación del asfalto.
2. Transferencia del asfalto al tanque de modificación, dicho asfalto debe ser suficientemente fluido.
3. Una vez terminada la transferencia y el asfalto se mantenga a una temperatura tal que sea fluido, se inicia la agitación, la cual debe ser mayor de 300 rpm.
4. Se calienta el asfalto a una temperatura controlada de 180 °C.
5. Se dosifica el polímero hasta la concentración indicada para esta etapa en un periodo tal que permita la total incorporación al sistema, 30 min, Si la etapa de dispersión dura 4 h.
6. Se agita el asfalto de manera constante y con un alto corte (se recomienda que sea mayor a 500 rpm a 180 °C en presencia de nitrógeno por lo menos 4 h.

Almacenamiento: se debe mantener la mezcla en recirculación.



Figura 23 Tanque de modificación con sistema de recirculación y tanque de alimentación de agentes estabilizadores.