



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ESTUDIO DE ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO TIPO SBS Y  
MICRO-ESFERA DE ÓXIDO DE SILICIO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**ELIOT URIEL OLIVOS PERALTA**



**MÉXICO, D.F.**

**2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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:** Profesor: Celestino Montiel Maldonado

**VOCAL:** Profesor: Rafael Herrera Nájera

**SECRETARIO:** Profesor: Rodolfo Ruíz Trejo

**1er. SUPLENTE:** Profesor: José Fernando Barragán Aroche

**2º SUPLENTE:** Profesor: Néstor Noé López Castillo

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**CONJUNTO E, LABORATORIO 213**

### **ASESOR DEL TEMA:**

**Dr. Rafael Herrera Nájera**

---

**Firma**

### **SUPERVISOR TÉCNICO:**

**M. en I. Esteban Alberto González García**

---

**Firma**

### **SUSTENTANTE:**

**Eliot Uriel Olivos Peralta**

---

**Firma**

## Contenido

Contenido	i
Índice de figuras	iii
Índice de tablas	vii
Nomenclatura	ix
Resumen	x
1.- Introducción	1
2.- Objetivos	3
2.1.- Objetivo general	3
2.2.- Objetivos particulares	3
3.- Antecedentes	5
3.1.- Asfalto	5
3.1.1.- Definición	5
3.1.2.- Composición	5
3.1.3.- Propiedades	7
3.1.4.- Usos	7
3.1.5.- Problemática del asfalto	8
3.2.- Asfalto modificado	9
3.3.- Polímeros utilizados para modificación de asfalto	10
3.4.- Polímero SBS	11
3.5.- Asfalto modificado con polímero SBS	12
3.6.- Micro-esfera de óxido de silicio	14
3.7.- Pruebas de caracterización	16
3.7.1.- Microscopía de fluorescencia	17
3.7.2.- Punto de ablandamiento	18
3.7.3.- Consistencia de penetración	18
3.7.3.1.- Índice de penetración	19
3.7.4.- Densidad	21
3.7.5.- Reometría a flujo cortante simple (viscosidad)	22
3.7.5.1.- Ley de Newton de la viscosidad	22
3.7.5.2.- Fluidos No-Newtonianos	24
4.- Metodología de trabajo experimental	25

4.1.- Materiales y equipo	26
4.2.- Preparación de la mezcla asfáltica	27
4.3.- Microscopía de fluorescencia	29
4.4.- Determinación del punto de ablandamiento	31
4.5.- Determinación de la penetración	32
4.6.- Determinación de la densidad	33
4.7.- Reometría (a flujo cortante simple)	34
4.8.- Materiales sintetizados	35
5.- Análisis y resultados	40
5.1.- Resultados de microscopía de fluorescencia	40
5.1.1.- Conclusión parcial	45
5.2.- Resultados de punto de ablandamiento	46
5.2.1.- Conclusión parcial	55
5.3.- Resultados de penetración	55
5.3.1.- Conclusión parcial	64
5.3.2.- Índice de penetración	64
5.3.2.1.- Conclusión parcial	72
5.4.- Resultados de densidad	73
5.4.1.- Conclusión parcial	75
5.5.- Análisis de viscosidad (reometría a flujo cortante simple)	76
5.5.1.- Conclusión parcial	83
5.6.- Análisis de resultados	84
5.6.1.- Análisis de la mezcla de asfalto con polímero SBS	84
5.6.2.- Análisis de la mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio	86
5.6.3.- Análisis de la mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio y polímero SBS	88
6.- Conclusiones	90
7.- Sugerencias para trabajos posteriores en la línea de investigación	94
8.- Anexos	96
9.- Referencias bibliográficas	104

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Separación del asfalto en 4 fracciones.	7
<b>Figura 2.</b> Estructura química del copolímero SBS.	11
<b>Figura 3.</b> Estructura de red cristalina atómica del SiO <sub>2</sub> .	15
<b>Figura 4.</b> Aguja para prueba de penetración.	19
<b>Figura 5.</b> Formación del perfil de velocidad en estado estacionario para un fluido contenido entre dos láminas.	23
<b>Figura 6.</b> Resumen de modelos no-newtonianos en estado estacionario (con fines comparativos también se indica el modelo newtoniano).	25
<b>Figura 7. a)</b> Recipiente de modificación a base de Aluminio e <b>b)</b> Impulsor.	28
<b>Figura 8.</b> Microscopio de fluorescencia.	30
<b>Figura 9. a)</b> Sistema para determinación del punto de ablandamiento <b>b)</b> Soporte, anillo y bola.	31
<b>Figura 10.</b> Sistema para determinación de la penetración.	32
<b>Figura 11. a)</b> Picnómetro y <b>b)</b> probeta, ambos de 100 ml.	34
<b>Figura 12.</b> AR-G2 reómetro de deformación controlada TA instruments.	35
<b>Figura 13.</b> Micrografías de los materiales hechos en el lote 1, <b>a)</b> A-SBS-6%-500 rpm, <b>b)</b> A-SBS-6%-1000 rpm y <b>c)</b> A-SBS-6%-1500 rpm.	41
<b>Figura 14.</b> Micrografías de los materiales hechos en el lote 3, <b>a)</b> A-MS200S-4%-3.25 h, <b>b)</b> A-MS200S-4%-3.5 h, <b>c)</b> A-MS200S-4%-4 h, <b>d)</b> A-MS200S-10%-3.25 h, <b>e)</b> A-MS200S-10%-3.5 h y <b>f)</b> A-MS200S-10%-4 h.	41-42
<b>Figura 15.</b> Micrografías de los materiales hechos en el lote 5, <b>a)</b> A-MS200S-4%-SBS-2.5%-3.25 h, <b>b)</b> A-MS200S-4%-SBS-2.5%-3.5 h, <b>c)</b> A-MS200S-4%-SBS-2.5%-4 h, <b>d)</b> A-MS200S-4%-SBS-5%-3.25 h, <b>e)</b> A-MS200S-4%-SBS-5%-3.5 h y <b>f)</b> A-MS200S-4%-SBS-5%-4 h.	43
<b>Figura 16.</b> Micrografías de los materiales hechos en el lote 6, <b>a)</b> A-MS200S-10%-SBS-2.5%-3.25 h, <b>b)</b> A-MS200S-10%-SBS-2.5%-3.5 h, <b>c)</b> A-MS200S-10%-SBS-2.5%-4 h, <b>d)</b> A-MS200S-10%-SBS-5%-3.25 h, <b>e)</b> A-MS200S-10%-SBS-5%-3.5 h y <b>f)</b> A-MS200S-10%-SBS-5%-4 h.	44

<b>Figura 17.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 1.	47
<b>Figura 18.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 2.	48
<b>Figura 19.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 3.	50
<b>Figura 20.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 4.	51
<b>Figura 21.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 5.	52
<b>Figura 22.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 6.	54
<b>Figura 23.</b> Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 1.	56
<b>Figura 24.</b> Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 2.	57
<b>Figura 25.</b> Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 3.	59
<b>Figura 26.</b> Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 4.	60
<b>Figura 27.</b> Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 5.	61
<b>Figura 28.</b> Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 6.	63
<b>Figura 29.</b> Comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 1.	65
<b>Figura 30.</b> Comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 2.	66
<b>Figura 31.</b> Comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 3.	67
<b>Figura 32.</b> Comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 4.	69
<b>Figura 33.</b> Comportamiento del índice de penetración de los materiales	70

hechos en el lote 5.

<b>Figura 34.</b> Comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 6.	71
<b>Figura 35.</b> Comportamiento de la densidad de los materiales hechos en el lote 2.	73
<b>Figura 36.</b> Comportamiento de la densidad de los materiales hechos en el lote 4.	75
<b>Figura 37.</b> Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 1.	76
<b>Figura 38.</b> Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 2.	77
<b>Figura 39.</b> Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 3 para una concentración de <b>a)</b> 4% w/w y <b>b)</b> 10% w/w de micro-esfera de óxido de silicio.	78
<b>Figura 40.</b> Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 4.	79
<b>Figura 41.</b> Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 5 para una concentración de <b>a)</b> 2.5% w/w y <b>b)</b> 5% w/w de polímero SBS.	80-81
<b>Figura 42.</b> Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 6 para una concentración de <b>a)</b> 2.5% w/w y <b>b)</b> 5% w/w de polímero SBS.	82
<b>Figura 43.</b> Micrografías para mezclas de <b>a)</b> Asfalto + polímero SBS <b>b)</b> Asfalto + micro-esfera de óxido de silicio y <b>c)</b> Asfalto + micro-esfera de óxido de silicio + polímero SBS.	91
<b>Figura 44.</b> Comparación del punto de ablandamiento para diferentes tipos de mezclas.	92
<b>Figura 45.</b> Comparación de la penetración para diferentes tipos de mezclas.	92
<b>Figura 46.</b> Comparación de la densidad para diferentes tipos de mezclas.	93
<b>Figura 47.</b> Comparación de la viscosidad para diferentes tipos de mezclas.	94



<b>Figura 48.</b> Anexo de micrografías del material A-SBS-6%-500 rpm, lote 1.	96
<b>Figura 49.</b> Anexo de micrografías del material A-SBS-6%-1000 rpm, lote 1.	96
<b>Figura 50.</b> Anexo de micrografías del material A-SBS-6%-1500 rpm, lote 1.	96
<b>Figura 51.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-3.25 h, lote 3.	96
<b>Figura 52.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-3.5 h, lote 3.	97
<b>Figura 53.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-4 h, lote 3.	97
<b>Figura 54.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-3.25 h, lote 3.	97
<b>Figura 55.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-3.5 h, lote 3.	97
<b>Figura 56.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-4 h, lote 3.	98
<b>Figura 57.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-2.5%-3.25 h, lote 5.	98
<b>Figura 58.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-2.5%-3.5 h, lote 5.	98
<b>Figura 59.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-2.5%-4 h, lote 5.	98
<b>Figura 60.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-5%-3.25 h, lote 5.	99
<b>Figura 61.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-5%-3.5 h, lote 5.	99
<b>Figura 62.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-5%-4 h, lote 5.	99
<b>Figura 63.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-2.5%-3.25 h, lote 6.	99
<b>Figura 64.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-	100

2.5%-3.5 h, lote 6.

<b>Figura 65.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-2.5%-4 h, lote 6.	100
<b>Figura 66.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-5%-3.25 h, lote 6.	100
<b>Figura 67.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-5%-3.5 h, lote 6.	100
<b>Figura 68.</b> Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-5%-4 h, lote 6.	101
<b>Figura 69.</b> Hoja técnica del SBS.	102
<b>Figura 70.</b> Hoja técnica del Microsil 200S.	103

### Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Composición química genérica del asfalto.	6
<b>Tabla 2.</b> Niveles de concentración de SBS encontrados en la práctica.	13
<b>Tabla 3.</b> Composición química del Microsil 200S.	15
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de los cementos asfálticos en función del IP.	21
<b>Tabla 5.</b> Condiciones de mezclado.	29
<b>Tabla 6.</b> Materiales hechos y nomenclatura.	36
<b>Tabla 7.</b> Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 1.	36
<b>Tabla 8.</b> Composición de los materiales para el lote 1.	36
<b>Tabla 9.</b> Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 2.	37
<b>Tabla 10.</b> Composición de los materiales para el lote 2.	37
<b>Tabla 11.</b> Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 3.	37
<b>Tabla 12.</b> Composición de los materiales para el lote 3.	37
<b>Tabla 13.</b> Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 4.	38

<b>Tabla 14.</b> Composición de los materiales para el lote 4.	38
<b>Tabla 15.</b> Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 5.	38
<b>Tabla 16.</b> Composición de los materiales para el lote 5.	39
<b>Tabla 17.</b> Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 6.	39
<b>Tabla 18.</b> Composición de los materiales para el lote 6.	39
<b>Tabla 19.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 1.	46
<b>Tabla 20.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 2.	48
<b>Tabla 21.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 3.	49
<b>Tabla 22.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 4.	51
<b>Tabla 23.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 5.	52
<b>Tabla 24.</b> Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 6.	53
<b>Tabla 25.</b> Penetración de los materiales hechos en el lote 1.	56
<b>Tabla 26.</b> Penetración de los materiales hechos en el lote 2.	57
<b>Tabla 27.</b> Penetración de los materiales hechos en el lote 3.	58
<b>Tabla 28.</b> Penetración de los materiales hechos en el lote 4.	60
<b>Tabla 29.</b> Penetración de los materiales hechos en el lote 5.	61
<b>Tabla 30.</b> Penetración de los materiales hechos en el lote 6.	62
<b>Tabla 31.</b> Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 1.	64
<b>Tabla 32.</b> Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 2.	66
<b>Tabla 33.</b> Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 3.	67
<b>Tabla 34.</b> Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 4.	68
<b>Tabla 35.</b> Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 5.	70
<b>Tabla 36.</b> Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 6.	71

<b>Tabla 37.</b> Densidad de los materiales hechos en el lote 2.	73
<b>Tabla 38.</b> Densidad de los materiales hechos en el lote 4.	74
<b>Tabla 39.</b> Lista de precios de los componentes.	101

### Nomenclatura

<b>T</b>	<b>Temperatura</b>
<b>t</b>	<b>Tiempo</b>
<b>°</b>	<b>Grados</b>
<b>mm</b>	<b>Milímetro</b>
<b>g</b>	<b>Gramo</b>
<b><math>\rho</math></b>	<b>Densidad</b>
<b>m</b>	<b>Masa</b>
<b>V</b>	<b>Volumen</b>
<b><math>\tau</math></b>	<b>Esfuerzo cortante</b>
<b><math>\eta</math></b>	<b>Función viscosidad no newtoniana</b>
<b><math>\mu</math></b>	<b>Función viscosidad newtoniana</b>
<b><math>\nu</math></b>	<b>Viscosidad cinemática</b>
<b>cm</b>	<b>Centímetro</b>
<b>mL</b>	<b>Mililitro</b>
<b>s</b>	<b>Segundo</b>
<b>min</b>	<b>Minuto</b>
<b>h</b>	<b>Hora</b>
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Micrómetro</b>
<b><math>\gamma</math></b>	<b>Deformación en corte</b>
<b><math>\delta</math></b>	<b>Ángulo de fase</b>
<b><math>( G^* )</math></b>	<b>Módulo complejo</b>
<b><math>G'</math></b>	<b>Módulo de almacenamiento en corte</b>
<b><math>G''</math></b>	<b>Módulo de pérdida en corte</b>

## Resumen

El asfalto es un material que se usa como aglutinante en mezclas asfálticas, entre otras razones porque tiene un comportamiento viscoelástico: a temperaturas altas ( $T > 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) fluye y a temperaturas bajas ( $T < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se comporta como un sólido quebradizo. Si bien es cierto que las características viscoelásticas del asfalto resultan ser de gran utilidad en procesos como la pavimentación, también debe notarse que el intervalo de temperatura para esta y otras aplicaciones es relativamente estrecho. Por esta razón, el asfalto se mezcla con polímeros, a fin de obtener mezclas que tienen una mayor resistencia termo-mecánica en un rango de temperatura más amplio que el asfalto puro.

En el presente trabajo se estudió el efecto de las condiciones de mezclado sobre la morfología y las propiedades termo-mecánicas de mezclas producidas combinando asfalto AC 20 (PEMEX-Salamanca) con un polímero que presenta arquitectura de estrella de cuatro ramas, del tipo poli(estireno-b-butadieno-b-estireno-b) SBS (Solprene 416) y/o micro-esfera de óxido de silicio. Se prepararon y caracterizaron tres tipos de mezclas: asfalto/polímero, asfalto/micro-esfera y asfalto/polímero/micro-esfera.

Las mezclas fueron producidas variando la velocidad de agitación, el tiempo de mezclado, la concentración de polímero y la cantidad de micro-esfera, manteniendo constante la temperatura de mezclado ( $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Los asfaltos modificados fueron caracterizados por microscopía de fluorescencia, temperatura de ablandamiento (ASTM D 36), prueba de penetración (ASTM D 5), pruebas reológicas a flujo cortante simple, y a las mezclas de asfalto/micro-esfera se les determinó además la densidad a una temperatura de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Los resultados indicaron que las mezclas de asfalto/polímero y asfalto/micro-esfera exhibieron mayor temperatura de ablandamiento y prácticamente la misma penetración, en relación con la muestra de asfalto solo. Para el caso de la mezcla de asfalto/polímero/micro-esfera se obtuvo una temperatura de ablandamiento más alta y una penetración mayor que la exhibida por el asfalto

base. Por otro lado se tiene que el efecto de la micro-esfera fue disminuir la densidad de la mezcla. Además se identificaron mezclas bifásicas para los tres tipos de materiales; lo anterior en relación a la microscopía de fluorescencia. Al mismo tiempo se observó un incremento en la viscosidad de las mezclas al añadir polímero, micro-esfera o ambas, en comparación con el asfalto solo. Finalmente se observa que la variable que resultó más significativa en el presente trabajo fue la velocidad de agitación; afectando considerablemente la distribución del polímero en el asfalto.

## 1.- Introducción

Por su bajo costo y sus propiedades termo-mecánicas, el asfalto es ampliamente utilizado en la construcción de carreteras y en la producción de recubrimientos a prueba de agua [1]. No obstante, el asfalto presenta ciertos problemas con respecto a su desempeño como buen ligante, el cual está restringido a un intervalo de temperaturas relativamente corto que va de 0 a 50 °C; a temperaturas más altas el material toma una forma viscosa, lo cual da como resultado el acanalamiento en la carpeta asfáltica. Por otro lado, a temperaturas menores al intervalo antes mencionado, el asfalto se vuelve un material rígido, dando a la carpeta asfáltica la misma propiedad y haciéndola quebradiza. Debido a estos problemas se ha trabajado en la modificación de las propiedades termo-mecánicas del asfalto por medio de la adición de diversos materiales como polímeros, azufre, hule de llanta, etc.

En el laboratorio 213 de la Facultad de Química, lugar donde se realizó el presente trabajo, se hace investigación en esta línea; donde se ha estudiado como temas anteriores la adición de diversos materiales al asfalto entre los cuales destacan: polímeros SB y SBS (en arquitectura de estrella), azufre, hule de llanta e hidrogenación al polímero modificador del asfalto. En el presente trabajo se estudia el efecto de añadir polímero tipo SBS en arquitectura de estrella y micro-esfera de óxido de silicio al asfalto, lo anterior en conjunto con una serie de variables como lo son la velocidad de agitación, el tiempo de mezclado y las concentraciones de polímero y micro-esfera respectivamente. Las condiciones de modificación antes mencionadas se escogen para elucidar el efecto que tienen las mismas dentro de la morfología y las propiedades termo-mecánicas de las mezclas realizadas.

Los materiales obtenidos son caracterizados por medio de microscopia de fluorescencia para poder identificar la morfología de las mezclas. Al mismo tiempo se hace un estudio de las propiedades termo-mecánicas con ayuda del punto de ablandamiento y la penetración de las combinaciones de asfalto con polímero SBS y micro-esfera de óxido de silicio. Así mismo se hace un estudio del efecto que tiene la micro-esfera sobre la densidad del asfalto y de la

posibilidad de que la última actúe como un relleno que reduzca el peso de las mezclas asfálticas. Finalmente se hace un estudio reológico de los materiales sintetizados, lo anterior se lleva a cabo por reometría a flujo cortante simple en la cual se varía la velocidad de deformación en corte, lo cual nos permite observar cómo es que se comporta la viscosidad del asfalto al añadir polímero, micro-esfera o ambos. La función viscosidad, así como el estudio a profundidad de las propiedades reológicas de las mezclas realizadas son consideradas para ser medidas en trabajos posteriores.



## **2.- Objetivos**

### **2.1.- Objetivo general**

Estudiar el efecto de las condiciones de mezclado, del polímero estireno-butadieno-estireno (SBS), de la micro-esfera de óxido de silicio y la combinación polímero-micro-esfera por medio del análisis reológico, termomecánico y la morfología de las partículas de ambos compuestos en el asfalto.

### **2.2.- Objetivos particulares**

Para la consecución del objetivo general se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Revisión bibliográfica para llevar a cabo el presente proyecto.
- Haciendo un análisis de sensibilidad del sistema con respecto a los estudios propuestos se establecieron tres tipos de mezclas: Asfalto con polímero, asfalto con micro-esfera y asfalto con polímero más micro-esfera, para realizar los materiales a considerar en el presente trabajo.
- Preparación de las mezclas de asfalto con polímero SBS variando la velocidad de agitación del sistema.
- Preparación de las mezclas de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio variando velocidad de agitación, concentración de micro-esfera y tiempo de mezclado del sistema.
- Preparación de las mezclas de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio y polímero SBS, variando concentración de micro-esfera, concentración de polímero y tiempo de mezclado del sistema.
- Caracterización de los asfaltos modificados mediante microscopía de fluorescencia.
- Caracterización de los asfaltos modificados por medio de su punto de ablandamiento.
- Caracterización de los asfaltos modificados dada su resistencia a la penetración.

- Caracterización de los asfaltos modificados mediante reometría a flujo cortante simple.
- Análisis de resultados.

### **3.- Antecedentes**

#### **3.1.- Asfalto**

El asfalto puede ser considerado como una mezcla compleja de gran variedad de moléculas que difieren en tamaño, forma y composición química dentro de las cuales se incluyen: parafinas, compuestos aromáticos, compuestos heterocíclicos, grupos funcionales tales como oxígeno, nitrógeno, azufre y en menor proporción metales como níquel, vanadio, hierro entre otros [2].

##### **3.1.1.- Definición**

Según la American Society for Testing and Materials (ASTM), el asfalto se define como un material aglomerante sólido o semisólido que varía de color entre negro a pardo oscuro y que se licúa gradualmente al calentarse, cuyos constituyentes son betunes que se dan en la naturaleza en forma sólida o semisólida o se obtienen de la destilación del petróleo; o combinaciones de éstos entre sí o con el petróleo o productos derivados de éstas combinaciones [3].

##### **3.1.2.- Composición**

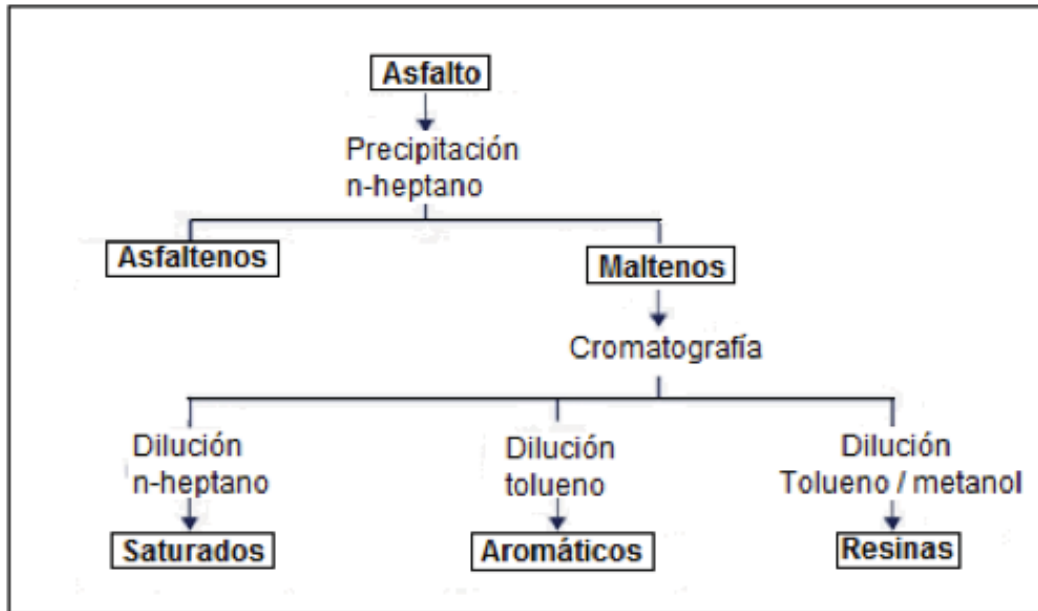
Determinar la composición del asfalto presenta siempre un desafío debido a la complejidad y a los altos pesos moleculares de sus componentes. El principio detrás de los estudios de composición es evaluar asfaltos en términos de composición y funcionamiento [4]. El asfalto puede obtenerse como el residuo en la refinación del petróleo crudo, y también puede encontrarse en la naturaleza. Varía su composición dependiendo de su origen y el método utilizado para la refinación de dicho petróleo crudo [5].

El asfalto tiene un peso molecular promedio entre 600 – 1500 g/mol, formado principalmente por C, H, O, S, adicionado de trazas de metales como V, Ni, Fe, Ca, Ti, Mg, Na, Co y Zn; esta composición varía de 5 – 20% w/w [6, 7].

**Tabla 1.** Composición química genérica del asfalto.

Carbono	80-85%
Hidrógeno	10%
Oxígeno	2-8%
Azufre	1-7%

Además se sabe que es un material heterogéneo comprendido de dos fases: asfaltenos, los cuales son polares y con pesos moleculares promedio entre 1000-100000 g/mol que comprenden entre 5-25% del asfalto y maltenos. Los asfaltenos son materiales insolubles en disolventes orgánicos como el n-heptano, mientras que los maltenos no. Es posible separar los maltenos dentro de tres grupos funcionales, llamados: saturados (200-5000 g/mol, 5-20%), aromáticos (200-5000 g/mol, de 40-65%) y resinas (1500 g/mol, 15-30%), en conjunto con los asfaltenos comúnmente denominados como (SARA) [5]. Esta separación recibe el nombre de “método SARA” y es una técnica de absorción basada en el método de Corbetta y Swarbrick que está estandarizada bajo la norma ASTM D-4124 [8, 9]; consiste en la separación del asfalto en asfaltenos y maltenos por precipitación de los primeros con n-heptano, la norma establece el uso de este solvente, no obstante, otros solventes como el n-hexano o n-heptano suelen emplearse. Posteriormente los maltenos (parte soluble del asfalto), se separan a través de una columna de alúmina (o sílica de gel) con solventes de polaridad creciente.



**Figura 1.** Separación del asfalto en 4 fracciones [10].

### 3.1.3.- Propiedades

El asfalto es un material de particular interés porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, tiende a fluir por aplicación de calor ( $T > 50^{\circ}\text{C}$ ), por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación [11].

### 3.1.4.- Usos

El asfalto es un material utilizado extensamente para diversas aplicaciones debido a su bajo costo, sus propiedades termo-mecánicas, su poder aglomerante y su comportamiento visco-elástico. Entre las aplicaciones que se dan al asfalto se encuentran: la pavimentación de carreteras, la impermeabilización, se usa como recubrimiento, como relleno y como sellador; además de ser un buen aislante térmico, dieléctrico y acústico. Cabe destacar

que su mayor uso se da en la pavimentación, a partir de la invención del automóvil se necesitaron buenos caminos para mayor seguridad y comodidad, las estadísticas muestran que el 94% de las carreteras del mundo son pavimentadas con asfalto mientras que el 6% restante se utiliza en cemento Pórtland, teniendo un consumo anual de asfalto de 90 000 000 Ton/año [1].

Algunos otros usos que se le dan al asfalto son la impermeabilización de cubiertas, relleno para terrenos de juego, pistas de tenis, aplicaciones agrícolas, pavimentos industriales, aceras, protección de tuberías y cementeras [11].

### **3.1.5.- Problemática del asfalto**

En la pavimentación de carreteras, el asfalto es sometido a diferentes condiciones de trabajo y a diversos esfuerzos como lo son los 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 el clima suele ser extremo, como en los desiertos, debido a la reducción en 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 del asfalto para disipar energía térmica. Provocando grietas, mejor conocidas como baches.
- Fractura por fatiga: Es atribuida a los esfuerzos inducidos por el tráfico y 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 [1].

### 3.2.- Asfalto modificado

Con el propósito de mejorar las propiedades termo-mecánicas del asfalto, se le combina con diversos materiales, entre los que se destacan los polímeros de estireno y butadieno en bloque, porque dichos materiales son parcialmente compatibles con el asfalto y se comportan como termoplásticos, es decir, que se deforman a temperaturas altas ( $T > 100^{\circ}\text{C}$ ) y conservan su forma a bajas temperaturas ( $\sim -30^{\circ}\text{C}$ ). El proceso de producción de asfalto modificado comúnmente empleado es el “mezclado en caliente”, que consiste básicamente en incorporar cierta cantidad de polímero en el asfalto en condiciones de alta temperatura, ( $T \approx 180^{\circ}\text{C}$ ), velocidad de agitación elevada ( $> 500$  rpm) y tiempos de mezclado relativamente largos ( $t > 3$  horas). Las propiedades del asfalto modificado están determinadas por la composición y características de los materiales que lo constituyen (asfalto: asfaltenos y maltenos (resinas, saturados y aromáticos); polímero: cantidad relativa de estireno y butadieno, distribución de los monómeros y peso molecular), así como de las condiciones de producción, aplicación y uso. Generalmente los maltenos son de bajo peso molecular y son los que interactúan directamente con el polímero, en particular la parte de aceites aromáticos ya que los polímeros sintéticos o naturales los absorben, dependiendo también de la naturaleza química del polímero. Los maltenos interactúan hinchando al polibutadieno (cerca de nueve veces su volumen inicial), mientras que el bloque de poliestireno permanece prácticamente sin hinchamiento, creando así la denominada fase rica en polímero del asfalto. Cuando se mezclan cauchos termoplásticos de alto peso molecular, similar al de los asfaltenos, o incluso más altos, hay una competencia por la fase malténica soluble, y en ésta situación puede darse una separación de fases. Esta separación es un indicador de la incompatibilidad del asfalto con el polímero. Sin embargo, la compatibilidad se puede aumentar con la adición de aceites aromáticos, pero también un alto contenido de aromáticos en la mezcla disolverá el bloque de poliestireno y destruirá en consecuencia los beneficios del copolímero SBS [5].

En cuanto a las condiciones de producción, éstas se traducen en costos de producción relativamente altos, lo cual justifica el desarrollo de trabajos de investigación orientados a determinar el efecto que pueden tener las condiciones de mezclado sobre las propiedades del asfalto modificado, tales como la morfología de su fase rica en polímero, sus propiedades termomecánicas y su comportamiento reológico (viscosidad y viscoelasticidad lineal del asfalto modificado) [12].

### **3.3.- Polímeros utilizados para modificación de asfalto**

Existen esencialmente 4 clases de polímeros genéricos que son utilizados para mejorar el desempeño del asfalto, los cuales son:

- termoplásticos
- cauchos
- termoestables
- copolímeros en bloque termoplásticos

Los polímeros en bloque termoplásticos (por lo regular poliestireno) generalmente tienen un bloque intermedio elástico, como el butadieno o isopreno o alguna forma hidrogenada de éstos [5].

En la actualidad el polímero más ocupado para la modificación de asfaltos es el copolímero elastomérico conocido como SBS, seguido por otros polímeros como los copolímeros estireno-butadieno, polietileno acetato de vinilo y polietileno [5]. Cabe destacar que para que los asfaltos modificados con polímeros consigan las propiedades óptimas, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base, el tipo de polímero, la concentración de los anteriores, la elaboración y las condiciones de almacenamiento. Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de ésta, el polímero sólo actúa como un filler, y por debajo de ésta, sólo aumentan la viscosidad, sin mejorar la elasticidad o la resistencia [13]. En otras palabras, la compatibilidad del polímero con el asfalto dependerá de la química de cada uno, siendo esta

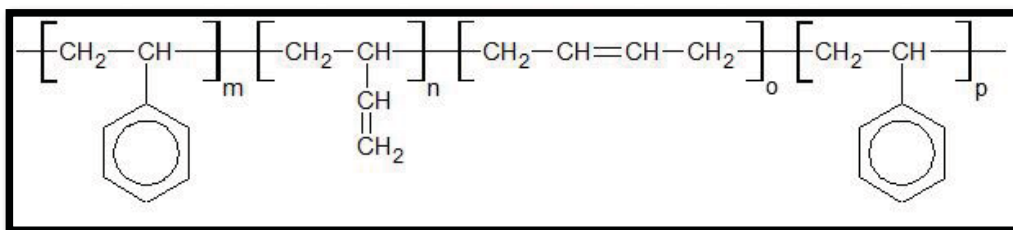


última muy importante para crear un asfalto estable con propiedades físicas adecuadas.

### 3.4.- Polímero SBS

Partiendo de la definición de polímero: Macromolécula que se forma por combinación de muchas moléculas pequeñas (monómeros) [14], se sabe que el SBS es un copolímero (constituido por más de un tipo de unidad repetitiva) de estireno y butadieno con una distribución de monómeros en bloque (un segmento largo formado por un monómero es seguido de un segmento hecho con el otro monómero). El SBS es conocido como un elastómero (polímero con propiedades elásticas) termoplástico obtenido mediante la copolimerización aniónica de estireno y butadieno. Los elastómeros termoplásticos son los aditivos más utilizados para la modificación del asfalto, se caracterizan por su ablandamiento al calentarse y por su endurecimiento al enfriarse sin cambios en sus propiedades [15]. Los SBS son poli(estireno-b-butadieno-b-estireno), en donde los bloques de poliestireno están unidos al bloque central de butadieno [12].

Es importante mencionar que el SBS es un polímero rígido gracias a las redes tridimensionales que se pueden formar con el mismo. Los bloques terminales de poliestireno dan a la mezcla la resistencia, mientras que el bloque intermedio de polibutadieno da al material su excepcional elasticidad; lo anterior debido a que la baja temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) del polibutadieno permite que el material se mantenga flexible a bajas temperaturas [5].



**Figura 2.** Estructura química del copolímero SBS [5].

Un polímero comercial ampliamente utilizado en la producción de asfalto para carreteras e impermeabilizantes es el Solprene 416, que es del tipo SBS. Es conveniente enfatizar que el Solprene 416 es un copolímero ramificado tipo estrella, que tiene cuatro bloques de ramas de dibloque poli(estireno-b-butadieno-b) unidos a un núcleo de silicio a través del bloque de polibutadieno [12].

### **3.5.- Asfalto modificado con polímero SBS**

La modificación de asfalto con polímero SBS ha sido ampliamente investigada y éstos asfaltos modificados son de uso común en varios países [16]. El asfalto mezclado con polímero tiene mejores propiedades mecánicas y más durabilidad que aquél que no está modificado [5]. Es por eso que se requiere una buena mezcla del asfalto modificado en la cual el polímero sea totalmente incorporado al asfalto y éste aumente la resistencia del primero al acanalamiento, abrasión y agentes térmicos o ambientales. La compatibilidad entre asfalto y polímero es importante dado que las mezclas modificadas deben ser estables al ser almacenadas y transportadas; lo anterior para garantizar mejores propiedades termo-mecánicas que el asfalto convencional y para evitar la separación de los componentes. Dado lo anterior se deben tener cuidados especiales al realizar un mezclado de asfalto con polímero en caliente y así evitar alguno de los siguientes casos:

- Mezcla heterogénea: Ocurre cuando el asfalto y el polímero son incompatibles. Los componentes de la mezcla se separan y el conjunto presenta las mismas características que el ligante original.
- Mezcla totalmente homogénea: Incluso molecularmente es el caso menos frecuente de compatibilidad perfecta. En este caso, el ligante es extremadamente estable, pero la modificación de sus propiedades de uso es muy débil respecto al asfalto original y sólo aumenta su viscosidad. Este no es el resultado deseado.
- Mezcla microheterogénea: Constituida por dos fases finamente entrelazadas. Esta es la compatibilidad deseada, que permite realmente

modificar el ligante. En un sistema de estas características, el polímero compatible se hincha luego de absorber una parte de las fracciones aceitosas ligeras del asfalto para formar una fase polimérica diferente de la fase asfáltica residual, constituida por las fracciones deseadas del ligante, los aceites restantes, las resinas y los asfaltenos [17].

Por otro lado debe tomarse en cuenta que las propiedades resultantes del ligante SBS modificado dependen fuertemente de las propiedades del polímero SBS, tales como grado de ramificación, la relación butadieno/estireno, así como la masa molecular efectiva (longitud de la cadena) [16].

La concentración de SBS en el asfalto también es crítica, con tres grupos efectivos mostrados en la Tabla 2:

**Tabla 2.** Niveles de concentración de SBS encontrados en la práctica [16].

<b>Concentración de SBS</b>	<b>Uso</b>
Menor a 3%	Asfalto domina las propiedades, beneficio por la modificación limitado (beneficios similares al uso de SBR)
3-8%	Formación de una red distinta. Tanto el asfalto como el SBS influyen en las propiedades. Rango usual para modificación de asfalto.
Mayor a 8%	SBS domina las propiedades. Niveles típicos para sellador de grietas.

Si bien es cierto que el rendimiento del asfalto modificado con SBS mejora con el incremento en la concentración de polímero, no es ésta la única razón que debe tomarse en cuenta; también debe considerarse la morfología del polímero SBS. Un asfalto modificado con SBS sin control de su morfología involucra los siguientes problemas:

- La segregación del material en el tanque de almacenamiento de una planta de asfalto, lo que da como resultado la obstrucción del suministro de aglutinante al tanque de medición.
- Mezclas de asfalto con variación en su rendimiento. En algunos, las mezclas no tienen el rendimiento deseado para ser utilizadas en pavimentación [18].

Se ha evidenciado que el copolímero SBS resulta en un buen componente para modificación del asfalto, mejorando sus propiedades termo-mecánicas, no obstante, deben tenerse ciertos cuidados a la hora de su producción, que podrían derivar en una mezcla inadecuada para su posterior aplicación.

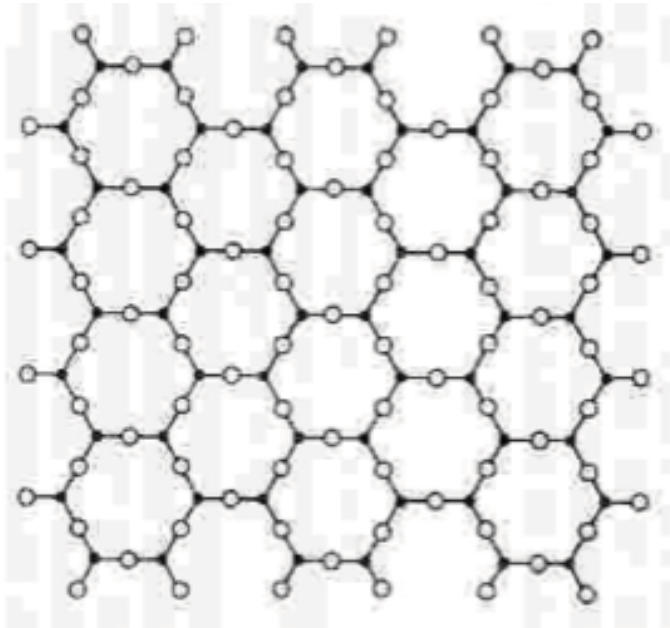
### **3.6.- Micro-esfera de óxido de silicio**

El uso de polímeros sintéticos para modificar el rendimiento del asfalto convencional se remonta a principios de 1970 [5]. Dado lo anterior, en la actualidad se ha buscado innovar en materia de modificación de asfaltos para encontrar compuestos ya sea orgánicos o inorgánicos que puedan diversificar las propiedades del asfalto puro. Se tienen trabajos con algunos componentes como azufre, hule de llanta, amidoaminas o arcilla de montmorillonita para la modificación del asfalto en combinación con polímeros como lo es el SBS. Si bien es importante aumentar las propiedades termo-mecánicas del asfalto, también es conveniente mejorar el comportamiento de otras propiedades como la viscosidad o la densidad para diversificar sus aplicaciones.

En materia de modificación de asfalto se ha empezado a innovar mediante el uso de cargas funcionales de compuestos inorgánicos como lo son óxidos de silicio, aluminio, potasio, sodio, etc.

El óxido de silicio (IV) o dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es un compuesto de silicio y oxígeno, llamado comúnmente sílice. La sustancia pura se conoce en 22 formas diferentes o fases distintas: el cuarzo alfa, el cuarzo beta, las dos formas de cristobalita, las dos formas de la tridimita, la sílice fundida o “vidrio

de cuarzo” y la forma vítrea a alta presión que recibe el nombre de coesita, etc. [19, 20]. La estructura del óxido de silicio amorfo está compuesta de unidades tetraedrales entradas en átomos de silicio [21]. El óxido de silicio (IV) se usa comúnmente para hacer vidrio, cerámicas y cemento. También es un desecante, es decir, quita la humedad del lugar en que se encuentra. En la Figura 3 se muestra la estructura de red cristalina atómica que forma el SiO<sub>2</sub>.



**Figura 3.** Estructura de red cristalina atómica del SiO<sub>2</sub>.

Un compuesto comercial ampliamente utilizado en la modificación de asfalto para la producción de pavimentos, membranas asfálticas, emulsiones asfálticas y sellos asfálticos es el Microsil 200S, el cual es una carga funcional hecha a base de de óxidos que en su mayoría es sílice (óxido de silicio). Cabe mencionar que éste compuesto en combinación con asfalto, mejora las propiedades termo-mecánicas del mismo, además de abaratar el costo de la mezcla asfáltica. En la Tabla 3 se muestra la composición química del Microsil 200S [22].

**Tabla 3.** Composición química del Microsil 200S [22].

Compuesto	% w/w	Compuesto	% w/w
Óxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	79.92	Óxido de Magnesio (MgO)	0.24

Óxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	11.6	Óxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> )	0.14
Óxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)	4.68	Óxido de Zirconio (ZrO <sub>2</sub> )	0.06
Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)	1.51	Óxido de Estroncio (SrO)	0.01
Óxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.16	Óxido de Plomo (Pb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	≤ 0.02
Óxido de Calcio (CaO)	0.64		

El uso de la micro-esfera “Microsil 200S” se da en las siguientes aplicaciones:

- Mármol y piedra cultivada
- Productos base resina poliéster
- Concreto polimérico
- Morteros cementosos
- Productos base cemento
- Productos base yeso
- Agente reductor de agua
- Pinturas texturizadas
- Pinturas elastoméricas
- Resanadores automotrices
- Pulimentos y ceras
- Selladores
- Productos asfálticos

Presentando las siguientes ventajas:

- Muy baja densidad
- Resistente al fuego
- Más cargas por metro cúbico
- Blanco
- Inerte
- pH neutro
- Reduce transmisión de calor
- Fluye libremente
- Buena resistencia a la compresión
- Reduce demanda de aglutinantes

### 3.7.- Pruebas de caracterización

Las pruebas de caracterización son utilizadas para determinar el comportamiento de la sustancia o material que se está estudiando. Para el caso de las mezclas asfálticas se tienen varias pruebas que permiten saber las propiedades y la morfología de las mismas. Es importante señalar que éstas pruebas permiten conocer de manera práctica si los materiales sintetizados cumplen con las características deseadas.

### **3.7.1.- Microscopía de fluorescencia**

El principio de la microscopía de fluorescencia 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 es visualizada a través de un filtro que sólo permita el paso de la luz con una 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 cierta profundidad.

La sensibilidad y las ventajas de ésta técnica dependen de la naturaleza del material estudiado. El asfalto es un material difícil de analizar debido a su textura variable, oscura y opaca, además de no exhibir características fluorescentes; sin embargo, los aditivos que se le agregan para mejorar sus propiedades, como lo son los polímeros, son materiales que exhiben características fluorescentes que se hacen visibles en estados de cambio de color como de amarillo a ámbar, o de rojo a café [1]. Las mezclas de asfalto-polímero son sometidas a un haz de luz (comúnmente ultravioleta), la cual excita a los electrones contenidos en las moléculas de los polímeros mediante la absorción de un fotón, desde su estado electrónico fundamental, a uno excitado, lo cual se refleja en la emisión de luz.

Por medio de la microscopía de fluorescencia se obtiene información como la dispersión del polímero en el asfalto, la distribución del tamaño de partícula y la proporción en la que se hincha el polímero; lo anterior se consigue aprovechando que los aditivos agregados al asfalto presentan fluorescencia, y al ser excitados con una radiación de longitud de onda conocida, producen micrografías con campos UV bien definidos, correspondientes a cada uno de los componentes [1].

Debido a las diferentes capacidades que tienen los componentes del asfalto para absorber y emitir energía, las micrografías obtenidas muestran dos fases. Una fase luminosa rica en polímero, y otra oscura, perteneciente a la fase rica en malteno (o en asfalto, según el caso) [1, 23].

### **3.7.2.- Punto de ablandamiento**

El asfalto, al igual que los asfaltos modificados, son materiales visco-elásticos sin puntos de fusión perfectamente definidos; éstos materiales se hacen más suaves y pegajosos conforme la temperatura aumenta. Es por eso que sus puntos de ablandamiento deben ser determinados por un método arbitrario y claramente definido siempre y cuando los resultados puedan ser reproducibles.

El punto de ablandamiento es útil en la clasificación de los asfaltos y las MAM's, como un elemento para el establecimiento de la uniformidad de los mismos. Por otro lado, es indicativo de la tendencia del material a fluir a temperaturas elevadas encontradas en servicio [24].

El punto de ablandamiento es determinado para el caso de los asfaltos por el método "Aparato de bola y anillo", dicho experimento consiste en 2 discos horizontales de asfalto o MAM's, moldeados en anillos de latón, dichos discos con asfalto se calientan a una velocidad controlada en un baño de líquido, mientras que cada uno sostiene una bola de acero. El punto de ablandamiento se presenta como la medida de las temperaturas a las que los dos discos se ablandan lo suficiente como para permitir que cada bola, envuelta en el asfalto, caiga una altura de 25 mm (1 pulgada) [24].

### **3.7.3.- Consistencia de penetración**

La prueba de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un betún asfáltico [6]. La consistencia de penetración de un material bituminoso como lo son el asfalto o las MAM's, es expresada como la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente una muestra del material bajo condiciones específicas de carga, temperatura y tiempo [25]. La

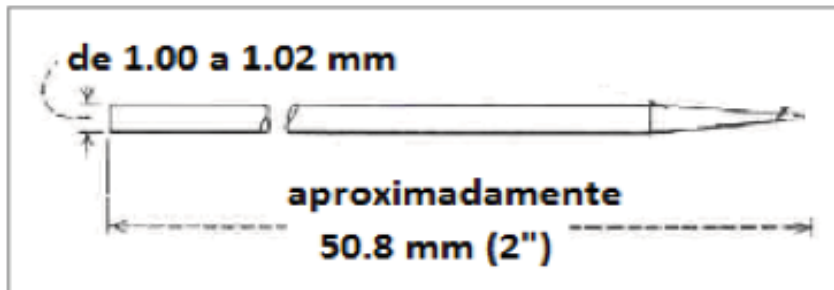


medida de la penetración se hace a 25 °C, la aguja está cargada con 100 gramos y la carga se aplica durante 5 segundos.

Para esta prueba la muestra en cuestión se funde y se enfría bajo condiciones controladas. La penetración se mide con un penetrómetro por medio del cual se aplica una aguja estándar a la muestra bajo condiciones específicas [25].

Especificaciones del equipo:

- Los valores de penetración se reportan en (1/10 mm)
- El peso del huso es de  $47.5 \pm 0.05$  g
- El peso del huso mas la aguja es de  $50 \pm 0.05$  g
- Se tiene un peso de  $100 \pm 0.05$  g
- La aguja es de acero inoxidable resistente a la temperatura con 50 mm de largo y un diámetro de 1 mm



**Figura 4.** Aguja para prueba de penetración [25].

### 3.7.3.1.- Índice de penetración

A partir de la penetración a 25 °C y del punto de ablandamiento por el método de anillo y bola, Pfeiffer y Van Doormal determinaron el denominado “índice de penetración (IP)”, el cual proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad térmica y de la desviación del comportamiento newtoniano del ligante [6].

Si se representa al logaritmo de la penetración en función de la temperatura T a la cual se lleva a cabo el ensayo, se obtiene una función lineal, lo cual sugiere que la pendiente de la recta puede ser usada como índice de la

susceptibilidad. Su determinación requirió ensayos de penetración hechos a diferentes temperaturas. Al extrapolar dicha recta hasta la temperatura del punto de ablandamiento, la penetración correspondiente para cualquier tipo de betún resulta ser del orden de 800; de aquí que el IP pueda calcularse con un solo valor de penetración y el punto de ablandamiento. Logrando la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\log\left(\frac{800}{PEN_{25}}\right)}{TA - 25}$$

$$IP = \frac{20 - (500 * A)}{1 + (50 * A)}$$

Donde:

**IP:** Índice de penetración

**A:** Susceptibilidad térmica, es la pendiente de la curva obtenida al graficar los valores de la penetración en escala semi-logarítmica contra las distintas temperaturas de ensayo

**log(800):** Es la penetración máxima para el asfalto a la temperatura de ablandamiento (TA)

**PEN<sub>25</sub>:** Valor de la prueba de penetración realizada a la temperatura estándar, es decir, 25 °C

**TA:** Temperatura de ablandamiento, temperatura a la cual el asfalto es un líquido viscoso

**25:** Temperatura estándar a la que esta sometida la prueba de penetración

El índice de penetración es el parámetro adimensional que nos permite comparar la susceptibilidad térmica de las diferentes mezclas asfálticas a una

determinada temperatura de desempeño. Éste índice nos da una idea del efecto combinado de las distintas condiciones de desempeño, relacionando las pruebas de temperatura de ablandamiento y de penetración [6, 26].

En función del IP, se pueden clasificar los cementos asfálticos de forma general en tres grupos [6, 26]:

**Tabla 4.** Clasificación de los cementos asfálticos en función del IP.

<b>Valor de IP</b>	<b>Características del asfalto</b>
IP > +1	Mezclas con poca susceptibilidad a la temperatura, presentando cierta elasticidad.
IP < -1	Mezclas asfálticas con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricas en resinas y con un comportamiento parcialmente viscoso.
IP entre +1 y -1	Características intermedias entre las dos anteriores; pertenecen a este grupo la mayoría de las mezclas asfálticas que se utilizan en la construcción de carreteras.

### 3.7.4.- Densidad

La densidad es una propiedad intensiva ampliamente utilizada en la caracterización física de diversos tipos de sustancias que pueden ser orgánicas e inorgánicas. Este método de caracterización es importante debido a que sirve para hacer un análisis cuantitativo de lo que se está estudiando.

La densidad,  $\rho$ , de una sustancia se define como su masa por unidad de volumen:

$$\rho = \frac{m}{V},$$

donde  $m$  es la masa de una muestra de la sustancia y  $V$  su volumen. La densidad es una propiedad característica de cualquier sustancia pura [27].

Para el caso de los asfaltos modificados con aditivos inorgánicos como lo es la micro-esfera de óxido de silicio, es importante caracterizar la densidad en función de la concentración de micro-esfera que contiene la mezcla.

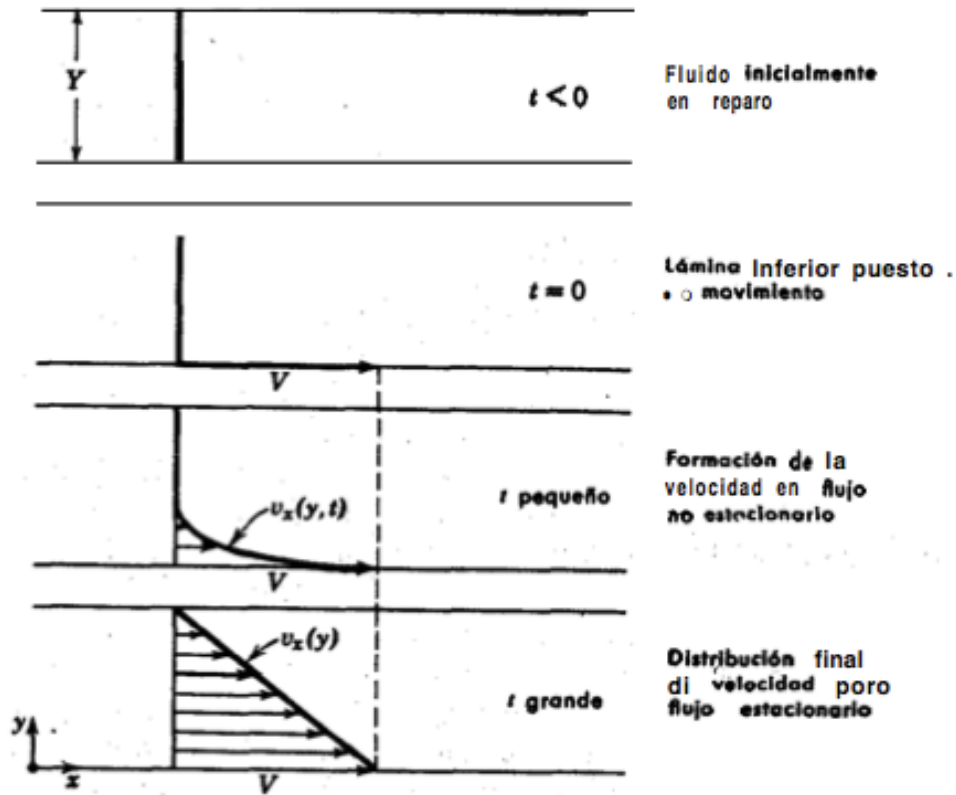
### **3.7.5.- Reometría a flujo cortante simple (viscosidad)**

La propiedad física que caracteriza la resistencia al flujo de los fluidos sencillos es la *viscosidad*, la cual varía con la temperatura. La ley que rige los fluidos de tipo newtoniano es la “Ley de Newton de la viscosidad” [28].

#### **3.7.5.1.- Ley de Newton de la viscosidad**

Considerando un fluido (líquido o gas) contenido entre dos láminas planas y paralelas, de área  $A$ , separadas entre sí por una distancia muy pequeña  $Y$  (Figura 5). Suponiendo que el sistema está inicialmente en reposo, pero que al cabo del tiempo  $t=0$ , la lámina inferior se pone en movimiento en la dirección del eje  $x$ , con una velocidad constante  $V$ . A medida que transcurre el tiempo el fluido gana cantidad de movimiento y finalmente se establece el perfil de velocidad en régimen estacionario. Una vez alcanzado dicho estado estacionario de movimiento, es preciso aplicar una fuerza constante  $F$  para conservar el movimiento de la lámina inferior. Esta fuerza viene dada por la siguiente expresión (*suponiendo que el flujo es laminar*):

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{Y} \quad (1)$$



**Figura 5.** Formación del perfil de velocidad en estado estacionario para un fluido contenido entre dos láminas [28].

Es decir, que la fuerza por unidad de área es proporcional a la disminución de la velocidad con la distancia  $Y$ . La constante de proporcionalidad  $\mu$  se denomina *viscosidad* del fluido.

El esfuerzo cortante que se ejerce en la dirección  $x$  sobre la superficie de un fluido, situada a una distancia constante  $y$ , por el fluido existente en la región donde  $y$  es menor, se designa por  $\tau_{xy}$ , y el componente  $x$  del vector de velocidad del fluido, por  $v_x$ . De acuerdo con éstos símbolos, la ecuación (1) queda como:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (2)$$

donde  $\tau_{xy} = \text{dina/cm}^2$  y  $\mu = \text{g/cm} \cdot \text{s} = \text{poise (P)}$

Es decir, que la fuerza de cizalla por unidad de área es proporcional al gradiente negativo de la velocidad local. Ésta es la *ley de Newton de la viscosidad*, y los fluidos que la cumplen se denominan *fluidos newtonianos* [28].

Cabe destacar que la representación de la viscosidad de un fluido dividida por su densidad se denomina *viscosidad cinemática*:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

donde  $\nu = \text{cm}^2/\text{s}$ .

### 3.7.5.2.- Fluidos No-Newtonianos

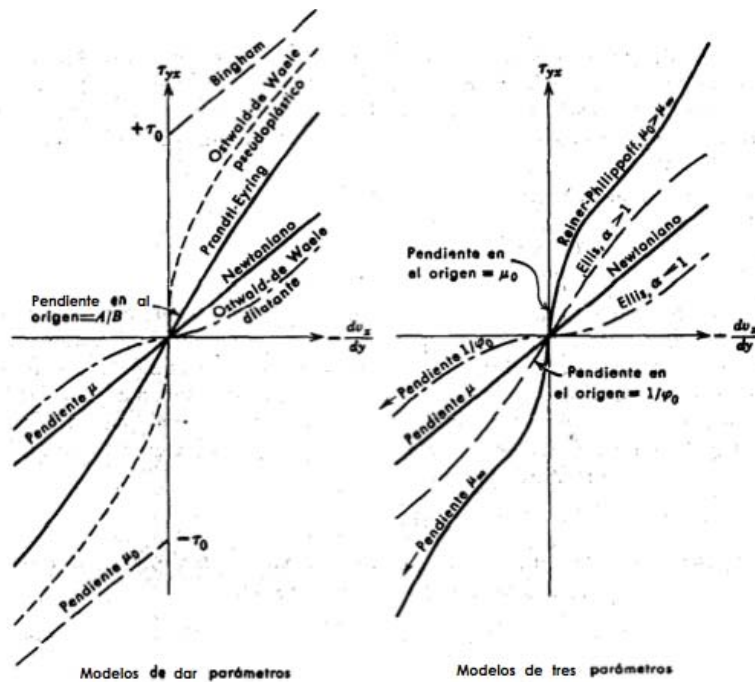
De acuerdo con la ley de la viscosidad de Newton (2), al representar gráficamente  $\tau_{xy}$  frente a  $-(dv_x/dy)$  para un fluido determinado, debe de obtenerse una línea recta que pasa por el origen de coordenadas, y cuya pendiente es la viscosidad del fluido a una cierta temperatura y presión. Sin embargo, existen algunos materiales industrialmente importantes que no se comportan de acuerdo con la ecuación (2); se conoce a éstas sustancias con el nombre de fluidos *no-newtonianos*. El tema del flujo no-newtoniano constituye parte de una ciencia más amplia denominada *reología*, es decir, “*la ciencia del flujo y la deformación*”, que estudia las propiedades mecánicas de los gases, líquidos, plásticos, sustancias asfálticas y materiales cristalinos.

El comportamiento reológico en estado estacionario de la mayor parte de los fluidos puede establecerse mediante una forma generalizada de la ecuación (2):

$$\tau_{yx} = -\eta \frac{dv_x}{dy}$$

en la que  $\eta$  puede expresarse a su vez en función de  $dv_x/dy$  o  $\tau_{xy}$  de indistintamente.

En las regiones en las que  $\eta$  disminuye al aumentar el gradiente de velocidad ( $-dv_x/dy$ ), el comportamiento se denomina *pseudoplástico* o *adelgazante*; y *dilatante* en las que  $\eta$  aumenta con dicho gradiente. Si  $\eta$  resulta independiente del gradiente de velocidad, el fluido se comporta como newtoniano, y entonces  $\eta = \mu$  [28].



**Figura 6.** Resumen de modelos no-newtonianos en estado estacionario (con fines comparativos también se indica el modelo newtoniano) [28].

#### 4.- Metodología de trabajo experimental

Las actividades experimentales realizadas en este trabajo son:

1. Preparación de la mezcla asfáltica.
2. Microscopía de fluorescencia.
3. Determinación del punto de ablandamiento.
4. Determinación de la penetrabilidad.
5. Determinación de la densidad.
6. Reometría (a flujo cortante simple)

Las cuales serán descritas más adelante con mayor detalle.

#### 4.1.- Materiales y equipo

Los equipos ocupados en este trabajo fueron:

- Microscopio Carl-Zeiss KS 300 (New York, USA) equipado con una lámpara con longitudes de onda de 390-450 nm con un lente de 20X.
- AR-G2 reómetro de deformación controlada TA instruments (New Castle, USA).
- Agitador marca: Caframo modelo: BDC6015
- Termopar j
- Parrilla eléctrica de calentamiento con agitación marca: Barnstead-Thermolyne modelo: SP131325
- Autotransformador variable de staco energy products Co modelo: 3PN1010B
- Controlador de temperatura marca: Eutech Instruments Pte Ltd modelo: 68900-11
- Balanza analítica marca: Mettler Toledo modelo: AG254
- Penetrómetro Universal Humboldt

Los materiales ocupados son:

- Asfalto AC 20 de Salamanca, Guanajuato; provisto por PEMEX.
- Copolímero SBS (416 Dynasol elastómeros).
- Micro-esfera de Óxido de Silicio (nombre comercial: MicrosilMS200S).
- Antiespumante (Colloid 589DD, COLLOIDSINDUSTRIAL S.A. de C.V.)
- Dispersante (Colloid HDP80, COLLOIDSINDUSTRIAL S.A. de C.V.)
- Heptano QP, Química Barsa S R L
- Aceite lubricante para motores a gasolina y diesel monogrado API SF/CC SAE40.
- Recipientes cilíndricos a base de Aluminio con un diámetro de 6 cm y una altura de 10 cm.
- Turbina plana de Rushton.



- Vasos de precipitado
- Vidrios de reloj
- Espátula
- Tapas a base de Aluminio con un diámetro de 6.7 cm y una altura de 8.1 cm.
- Soporte para punto de Ablandamiento (columpio)
- Anillo de latón para punto de Ablandamiento (2)
- Balínes
- Sujetador de anillo y balín
- Termómetro marca: Brannan (-10 - 260 °C)
- Cronómetro
- Agitador magnético
- Aguja para penetración calibrada según norma ASTM D 5-86
- Charola de Aluminio con diámetro de 5.6 cm y una altura de 1.5 cm.
- Pignómetro de 100 ml de acero inoxidable.

#### **4.2.- Preparación de la mezcla asfáltica**

En un recipiente a base de Aluminio se pesa cierta cantidad de asfalto, dicho asfalto puede variar en peso según sea el caso entre 60 y 120 gramos, lo anterior con la finalidad de que no se derrame el contenido del recipiente al llevar a cabo la modificación a causa de la agitación; por otro lado, con dicha cantidad de asfalto se asegura que se tenga el necesario para poder realizar las pruebas requeridas de caracterización de los materiales sintetizados.

Una vez pesado el asfalto en el recipiente, se calcula la cantidad de polímero, micro-esfera y/o coloides que se requiera añadir a la mezcla para la creación del nuevo material; cabe mencionar que el polímero es agregado a la mezcla una vez alcanzada la temperatura de 180 °C. En todos los casos manejados en este trabajo a velocidades de giro menores o iguales a 500 rpm se fija la misma al inicio de la modificación; para el caso de velocidades de giro mayores a 500 rpm se espera a alcanzar la temperatura de 180 °C, se añade el polímero y

después se aumentan las revoluciones hasta lograr velocidades de hasta 1500 rpm sin que las fuerzas inerciales arrojen al material fuera del recipiente.

El tiempo de mezclado es contado una vez adicionado el polímero (SBS) al recipiente si es que se debe agregar el mismo, o una vez lograda la temperatura de 180 °C si es que la mezcla no contiene al anterior; es necesario mantener el sistema agitándose 3 horas si la modificación no conlleva micro-esfera. Si además de la modificación con polímero se piensa añadir micro-esfera de óxido de silicio, entonces después de las 3 horas de agitación se adiciona la misma según la concentración que se desee estudiar en la mezcla y se toma el tiempo nuevamente; este puede variar entre 15 y 90 minutos de agitación después de haber añadido la micro-esfera.

Como ya se especificó en los materiales, el recipiente en el cual se realizan las modificaciones está hecho de Aluminio, el cual posee una forma cilíndrica con dimensiones descritas anteriormente. Por otro lado, la agitación se lleva a cabo con un impulsor conocido como turbina plana de Rushton, el cual tiene un diámetro de 5 cm y posee 6 ejes. El recipiente y el impulsor utilizados para llevar a cabo las modificaciones se muestran en la Figura 7.



**Figura 7. a) Recipiente de modificación a base de Aluminio e b) Impulsor.**

El conjunto de condiciones de mezclado que se ocuparon son resumidas en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Condiciones de mezclado.

<b>Variable</b>	<b>Especificaciones</b>
Agitación (velocidad de giro)	100 - 1500 rpm
Tiempo de agitación	1 - 4.5 horas
Materiales para modificación	Polímero SBS y micro-esfera de Óxido de Silicio
Arquitectura del polímero	Estrella
Coloides	589DD y HDP80
Temperatura	180 °C
Cantidad de polímero en la mezcla	2.5 - 6% w/w
Cantidad de micro-esfera de Óxido de Silicio en la mezcla	2 - 10% w/w
Cantidad de coloide 589DD en la mezcla	1% w/w
Cantidad de coloide HDP80 en la mezcla	0.57% w/w

Una vez obtenida la mezcla se toman 10 muestras, 6 de 2 g, 2 de 5 g 1 de 20 g y otra más de 30 g; lo anterior con la finalidad de poder llevar a cabo las pruebas de caracterización.

#### **4.3.- Microscopía de fluorescencia**

El presente experimento de caracterización tiene como objetivo el estudio de la morfología de los materiales obtenidos a partir de la modificación de asfalto; al mismo tiempo se puede conocer la dispersión del polímero y la micro-esfera dentro de la mezcla asfáltica, y así saber qué tan eficiente es el proceso de mezclado dependiendo del tiempo y la velocidad de giro que se empleen. La realización de esta prueba es factible dado que tanto el polímero tipo SBS como la micro-esfera de Óxido de Silicio presentan fluorescencia y es posible

distinguirlos dentro de la mezcla asfáltica. Cabe destacar que en las mezclas que contengan tanto polímero como micro-esfera, se observará sólo el primero dado su mayor tamaño y superior fluorescencia. En la Figura 8 se muestra el microscopio de fluorescencia empleado para la obtención de las micrografías tomadas de las muestras en el presente trabajo.



**Figura 8.** Microscopio de fluorescencia.

La realización de este experimento consiste en tomar la muestra de 20 g aproximadamente y someterla a un haz de luz ultravioleta, en este caso emitida por una lámpara HB 50 AC. Hecho esto se procede a realizar la búsqueda de una imagen clara que permita distinguir el polímero y/o la micro-esfera en el asfalto, lo anterior se conseguirá enfocando correctamente, es decir, teniendo el acercamiento adecuado. Una vez enfocada la imagen, ésta puede visualizarse en una computadora con ayuda del software Oxiovision Real 4.6. Dicho programa permite obtener una micrografía la cual es tomada con una cámara axcio lcl.

Las micrografías obtenidas fueron tomadas con un lente de 20X. Por cada muestra de 20 g se logran 2 o 3 fotografías las cuales son representativas de lo observado en la mezcla asfáltica.

#### 4.4.- Determinación del punto de ablandamiento

El presente experimento de caracterización tiene como objetivo el estudio de las propiedades termo-mecánicas de los materiales obtenidos a partir de la modificación de asfalto. La realización de ésta prueba es factible dado que los materiales obtenidos son bitúmenes modificados los cuales pueden ser evaluados de acorde a la norma ASTM D 36 para la determinación del punto de ablandamiento por medio del aparato de anillo y bola. Cabe destacar que no se pretende una homogenización de los puntos de ablandamiento, sino una comparación según el material y la concentración del mismo en las mezclas de asfalto modificado. En la Figura 9 se muestra el sistema empleado para determinar los puntos de ablandamiento de los materiales obtenidos en el presente trabajo; el cual incluye un anillo, una bola, un termómetro, un vaso de precipitado y el columpio.



**Figura 9. a)** Sistema para determinación del punto de ablandamiento **b)** Soporte, anillo y bola.

La realización de éste experimento consiste en tomar una de las muestras de 5 g aproximadamente; dicha muestra es colocada en el anillo de latón de modo que quede al ras del mismo. Una vez llenado el anillo con el asfalto modificado, se coloca en el columpio tal como se muestra en la Figura 9; sobre éste anillo se colocan la bola y un sujetador, al tiempo en que el termómetro se introduce

en el columpio. Hecho esto se llena un vaso de precipitado de 1 litro con agua aproximadamente hasta la mitad (500 ml) para luego introducir el columpio y con ello tener listo el sistema. Ahora se coloca el sistema a calentamiento y agitación constantes; según la norma ASTM D 36 para el punto de ablandamiento por medio del aparato de anillo y bola, el calentamiento debe ser de 5 °C/min. Finalmente se registra la temperatura a la cual la bola llega hasta la parte inferior del columpio (25 mm aproximadamente); dicho experimento se realiza por duplicado.

#### **4.5.- Determinación de la penetración**

La presente prueba de caracterización tiene como objetivo el estudio de las propiedades termo-mecánicas de los materiales obtenidos a partir de la modificación de asfalto. La realización de ésta prueba es factible dado que los materiales obtenidos son bitúmenes modificados los cuales pueden ser evaluados de acorde a la norma ASTM D 5 para la determinación de la penetración de materiales bituminosos. Cabe destacar que no se pretende una homogenización de la penetrabilidad, sino una comparación según el material y la concentración del mismo en las mezclas de asfalto modificado. En la Figura 10 se muestra el sistema empleado para determinar la penetración de los materiales obtenidos en el presente trabajo; el cual incluye un penetrómetro, una aguja de penetración y un soporte.



**Figura 10.** Sistema para determinación de la penetración.

La realización de éste experimento consiste en tomar la muestra de 30 g aproximadamente; dicha muestra es colocada en una charola de Aluminio con diámetro de 5.6 cm y una altura de 1.5 cm de tal modo que quede al ras de la misma, lo anterior se hace al término de la modificación, para luego dejar solidificar la muestra por 3 horas. Una vez solidificada la muestra, se procede a atemperarla a 25 °C, pues así lo marca la norma ASTM D 5 para la determinación de la penetración de materiales bituminosos. Una vez atemperada la muestra, se coloca bajo la aguja de penetración, previamente montada en el penetrómetro, y se coloca éste último en ceros. Ya con la muestra bajo la aguja, se acerca esta última hasta el ras de la primera sin que la penetre; justo en éste momento se tiene listo el sistema para la determinación de la penetración. Una vez listo el sistema, se acciona el penetrómetro por 5 segundos, es muy importante cuidar el tiempo de penetración con ayuda de un cronómetro. Finalmente se registra la distancia que penetró la aguja a la muestra; dicho experimento se realiza 10 veces para así lograr tener un promedio aproximado de la penetrabilidad en la totalidad de nuestro material.

#### **4.6.- Determinación de la densidad**

La presente prueba de caracterización tiene como objetivo el estudio del comportamiento de la densidad de los materiales obtenidos a partir de la modificación de asfalto. La realización de ésta prueba es factible dado que se hicieron modificaciones del asfalto con micro-esfera de óxido de silicio a distintas concentraciones y a diferentes velocidades de giro o agitación. Cabe destacar que lo que se pretende es observar si el comportamiento de la densidad del asfalto modificado con micro-esfera disminuye y si la última puede actuar como un filler para abaratar el precio de las mezclas; lo anterior podría lograrse dado que la micro-esfera de óxido de silicio tiene una densidad menor que la del asfalto. En la Figura 11 se muestran la probeta y el picnómetro utilizados en el presente trabajo para la obtención de la densidad de los materiales obtenidos modificando al asfalto con micro-esfera de óxido de silicio.



**Figura 11. a) Picnómetro y b) probeta, ambos de 100 ml.**

La realización de éste experimento se lleva a cabo al último, lo anterior es así dado que se requiere de una gran cantidad de asfalto para medir ésta propiedad. Lo primero que se hace es pesar el picnómetro. Después de eso se reúnen todas las muestras en el recipiente de modificación Figura 7, y se calienta el mismo hasta lograr asfalto líquido; conseguido esto se llena el picnómetro con el material hasta una altura de  $\frac{3}{4}$ . El paso siguiente es enfriar el material hasta que solidifique; cuando se ha llevado a cabo la solidificación, se pesa el picnómetro con el asfalto. Lo que sigue es hacer una diferencia para obtener el peso del asfalto. Ahora se requiere llenar la probeta con 100 ml de agua; hecho esto se vacía el agua en el cuarto de picnómetro restante y se registra la cantidad de agua que queda en la probeta. Por último se divide el peso del asfalto entre la cantidad de agua restante en la probeta y con ello se obtiene la densidad. Cabe destacar que lo anterior es posible dado que tanto la probeta como el picnómetro son de 100 ml, es decir, el volumen de agua que queda en la probeta es el mismo que el volumen de asfalto contenido en el picnómetro.

#### **4.7.- Reometría (a flujo cortante simple)**

Las pruebas reométricas fueron efectuadas en un reómetro AR-G2 TA Instruments. Dicho reómetro puede ser observado en la Figura 12.





**Figura 12.** AR-G2 reómetro de deformación controlada TA instruments.

El reómetro mostrado en la Figura 12 es de deformación controlada, el cual suministra una deformación conocida a la muestra y mide el esfuerzo que se produce, tomando en cuenta la geometría del sistema y la separación de los platos paralelos; con lo anterior es posible dar una medida de las propiedades físicas del asfalto.

Para la realización de éste experimento se toma una de las muestras de 2 g y se coloca en el reómetro, una vez puesta, se calienta hasta 180°C para que el asfalto se ablande; al lograr la temperatura antes mencionada se define una separación entre placas de 1000  $\mu\text{m}$  y se varían las velocidades de deformación en corte dentro del reómetro de 0.1 a 100  $\text{s}^{-1}$ . Cabe destacar que ésta prueba es realizada a flujo cortante simple y es repetida entre 2 y 3 veces.

#### **4.8.- Materiales sintetizados**

Dentro del presente trabajo se realizaron 3 tipos de modificaciones, las cuales se muestran en la Tabla 6 junto con la nomenclatura con la cual se referirá a cada una de las mismas. Cabe destacar que la nomenclatura no incluye los porcentajes de cada material, sólo destaca la forma en la cual se nombrará a cada componente de la mezcla; los porcentajes mencionados anteriormente se incluirán más adelante.

**Tabla 6.** Materiales hechos y nomenclatura.

Material	Nomenclatura
Asfalto modificado con SBS	A-SBS
Asfalto modificado con micro-esfera de Óxido de Silicio	A-MS200S
Asfalto modificado con SBS y micro-esfera de Óxido de Silicio	A-SBS-MS200S

Cabe mencionar que dentro de la nomenclatura no se incluye símbolo alguno para los coloides 589DD y HDP80; el primero actúa como antiespumante para la micro-esfera de óxido silicio y el segundo lo hace como dispersante del polímero SBS. No obstante, se detalla su concentración en las tablas de composición de materiales por lote; dicha concentración se mantiene constante para todos los materiales, es decir, siempre se adiciona 1% w/w de coloide 589DD y 0.57% w/w de coloide HDP80.

Por otro lado, cabe destacar que los materiales fueron obtenidos a diferentes condiciones de operación y concentraciones, las cuales se explican más adelante. La diferencia entre condiciones de operación y concentraciones se presenta en 6 lotes distintos que se describen en las Tablas 7-18.

**Tabla 7.** Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 1.

Muestra	$t_{\text{mezclado}}$ (h)	r.p.m.	$T_{\text{mezclado}}$ (°C)
a	3	500	180
b	3	1000	180
c	3	1500	180

**Tabla 8.** Composición de los materiales para el lote 1.

Muestra	Asfalto		SBS	
	% (w/w)	g	% (w/w)	g
a	94.00	71.9082	6.00	4.5899
b	94.00	76.2674	6.00	4.8681

c	94.00	68.3084	6.00	4.3601
---	-------	---------	------	--------

**Tabla 9.** Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 2.

Muestra	t <sub>mezclado</sub> (h)	r.p.m.	T <sub>mezclado</sub> (°C)
a	1	100	180
b	1	300	180
c	1	500	180
d	1	700	180

**Tabla 10.** Composición de los materiales para el lote 2.

Muestra	Asfalto		MS200S		589DD	
	% (w/w)	g	% (w/w)	g	% (w/w)	g
a	89.00	87.266	10.00	9.8052	1.00	0.9805
b	89.00	79.6708	10.00	8.9518	1.00	0.8952
c	89.00	77.9894	10.00	8.7629	1.00	0.8763
d	89.00	64.1266	10.00	7.2052	1.00	0.7205

**Tabla 11.** Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 3.

Muestra	t <sub>mezclado</sub> (h)	r.p.m.	T <sub>mezclado</sub> (°C)
a	3.25	500	180
b	3.5	500	180
c	4	500	180
d	3.25	500	180
e	3.5	500	180
f	4	500	180

**Tabla 12.** Composición de los materiales para el lote 3.

Muestra	Asfalto		MS200S		589DD	
	% (w/w)	g	% (w/w)	g	% (w/w)	g
a	95.00	64.2656	4.00	2.7059	1.00	0.6765
b	95.00	59.3108	4.00	2.4973	1.00	0.6243

c	95.00	74.2493	4.00	3.1263	1.00	0.7816
d	89.00	71.7038	10.00	8.0566	1.00	0.8057
e	89.00	74.3192	10.00	8.3505	1.00	0.8350
f	89.00	64.7886	10.00	7.2796	1.00	0.7280

**Tabla 13.** Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 4.

Muestra	$t_{\text{mezclado}} \text{ (h)}$	r.p.m.	$T_{\text{mezclado}} \text{ (}^\circ\text{C)}$
a	4.5	500	180
b	4.5	500	180
c	4.5	500	180
d	4.5	500	180
e	4.5	500	180

**Tabla 14.** Composición de los materiales para el lote 4.

Muestra	Asfalto		MS200S		589DD		SBS		HDP80	
	% (w/w)	g	% (w/w)	g	% (w/w)	g	% (w/w)	g	% (w/w)	g
a	93.93	64.27	2.00	1.368	1.00	0.684	2.50	1.711	0.57	0.390
b	91.93	62.31	4.00	2.711	1.00	0.678	2.50	1.694	0.57	0.386
c	89.93	65.25	6.00	4.353	1.00	0.726	2.50	1.814	0.57	0.414
d	87.93	64.71	8.00	5.887	1.00	0.736	2.50	1.840	0.57	0.419
e	85.93	63.32	10.00	7.369	1.00	0.737	2.50	1.842	0.57	0.420

**Tabla 15.** Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 5.

Muestra	$t_{\text{mezclado}} \text{ (h)}$	r.p.m.	$T_{\text{mezclado}} \text{ (}^\circ\text{C)}$
a	3.25	500	180
b	3.5	500	180
c	4	500	180
d	3.25	500	180
e	3.5	500	180
f	4	500	180

**Tabla 16.** Composición de los materiales para el lote 5.

Muestra	Asfalto		MS200S		589DD		SBS		HDP80	
	% (w/w)	g	% (w/w)	g	% (w/w)	g	% (w/w)	g	% (w/w)	g
a	91.93	67.672	4.00	2.945	1.00	0.7361	2.50	1.8403	0.57	0.4196
b	91.93	72.872	4.00	3.171	1.00	0.7927	2.50	1.9817	0.57	0.4518
c	91.93	90.644	4.00	3.944	1.00	0.9860	2.50	2.4650	0.57	0.5620
d	89.43	57.668	4.00	2.579	1.00	0.6448	5.00	3.2242	0.57	0.3676
e	89.43	68.690	4.00	3.072	1.00	0.7681	5.00	3.8405	0.57	0.4378
f	89.43	66.373	4.00	2.969	1.00	0.7422	5.00	3.7109	0.57	0.4230

**Tabla 17.** Condiciones de operación para la realización de los materiales del lote 6.

Muestra	t <sub>mezclado</sub> (h)	r.p.m.	T <sub>mezclado</sub> (°C)
a	3.25	500	180
b	3.5	500	180
c	4	500	180
d	3.25	500	180
e	3.5	500	180
f	4	500	180

**Tabla 18.** Composición de los materiales para el lote 6.

Muestra	Asfalto		MS200S		589DD		SBS		HDP80	
	% (w/w)	g	% (w/w)	g	% (w/w)	g	% (w/w)	g	% (w/w)	g
a	85.93	156.9	10.00	18.26	1.00	1.83	2.50	4.56	0.57	1.04
b	85.93	110.06	10.00	12.81	1.00	1.28	2.50	3.20	0.57	0.73
c	85.93	136.21	10.00	15.85	1.00	1.59	2.50	3.96	0.57	0.90
d	83.43	105.69	10.00	12.67	1.00	1.27	5.00	6.33	0.57	0.72
e	83.43	116.52	10.00	13.97	1.00	1.40	5.00	6.98	0.57	0.80
f	83.43	115.83	10.00	13.88	1.00	1.39	5.00	6.94	0.57	0.79

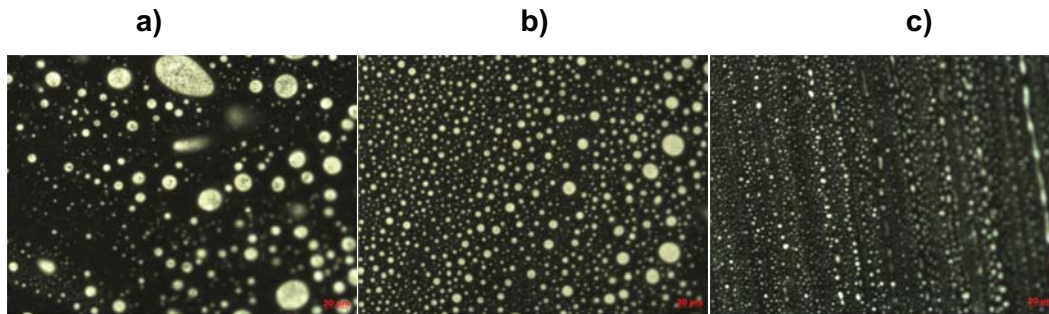
## **5.- Análisis y resultados**

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos en los análisis de microscopía de fluorescencia, punto de ablandamiento, penetración, densidad, así como los análisis de viscosidad de los distintos materiales. Los análisis se mostrarán en un inicio de manera separada, es decir, primero se mostrarán los resultados de microscopía de fluorescencia en el apartado 5.1, posteriormente los de punto de ablandamiento en el apartado 5.2, luego se presentarán los resultados de penetración en el apartado 5.3, continuando con los resultados de densidad en el apartado 5.4 y por último los resultados de viscosidad (reometría a flujo cortante simple) en el apartado 5.5; las comparaciones entre los diferentes resultados se harán en el apartado 5.6.

Cabe mencionar que las microscopías de fluorescencia, así como las pruebas de densidad, no fueron realizadas a todas las mezclas, lo anterior debido a que se analizan diversas propiedades en cada material y para algunas de ellas no es necesario contar con todos los estudios.

### **5.1.- Resultados de microscopía de fluorescencia**

En el presente apartado se muestran las fotos obtenidas con el microscopio de fluorescencia, cabe destacar que sólo se presentarán fotografías para los lotes 1, 3, 5 y 6, dado que el otro par de lotes no requería del presente análisis. Así mismo se debe mencionar que sólo se presentará 1 fotografía por material; las demás podrán ser encontradas en los anexos de éste trabajo. En la Figura 13 se muestran los resultados de microscopía de fluorescencia para los materiales del lote 1.

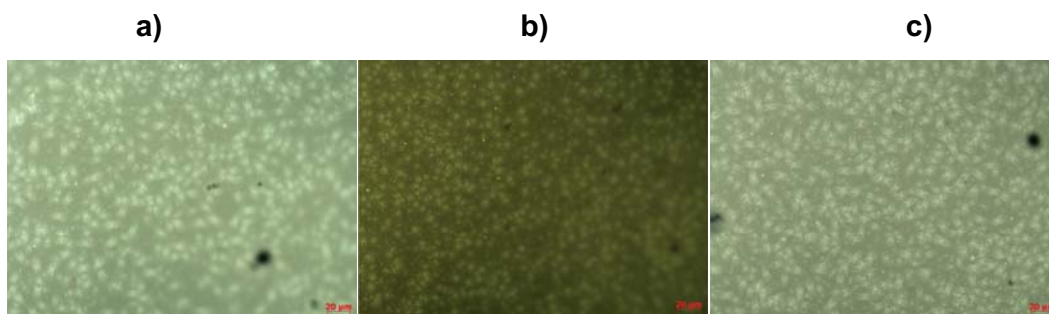


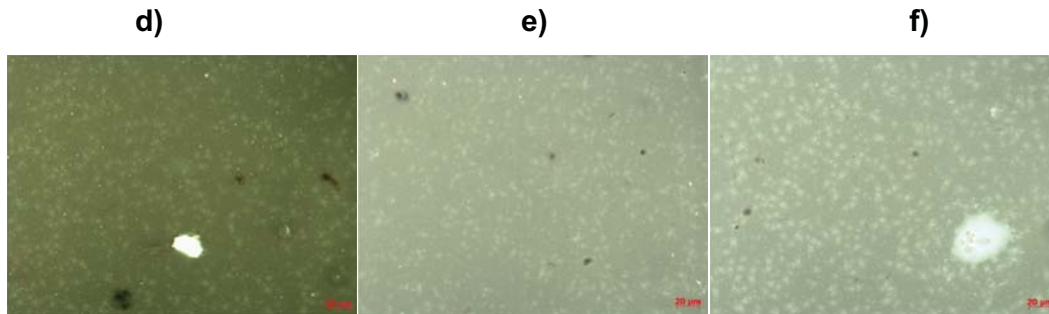
**Figura 13.** Micrografías de los materiales hechos en el lote 1, **a)** A-SBS-6%-500 rpm, **b)** A-SBS-6%-1000 rpm y **c)** A-SBS-6%-1500 rpm.

En lo que respecta a las micrografías tomadas a los materiales del lote 1, puede observarse un sistema compuesto por 2 fases, la primera de ellas corresponde al SBS (color claro) y la segunda es la fase rica en asfalto que no hinchó al polímero (color negro). Por otro lado puede verse que la forma que adopta el polímero dentro del asfalto tiende a ser redonda, con partículas entre esféricas y ovaladas para las tres velocidades de agitación.

Otro aspecto importante dentro del presente lote es cómo se modifica el tamaño de partícula al cambiar la velocidad de agitación; claramente puede observarse que las partículas decrecen en tamaño al aumentar la velocidad de giro. Lo anterior puede explicarse debido a que las partículas agitadas a una velocidad mayor, son sometidas a esfuerzos más grandes, lo que se traduce en un menor tamaño y una mejor distribución del polímero en la mezcla.

A continuación se muestran las fotos de los materiales hechos en el lote 3; las micrografías de dichos materiales pueden ser observadas en la Figura 14.





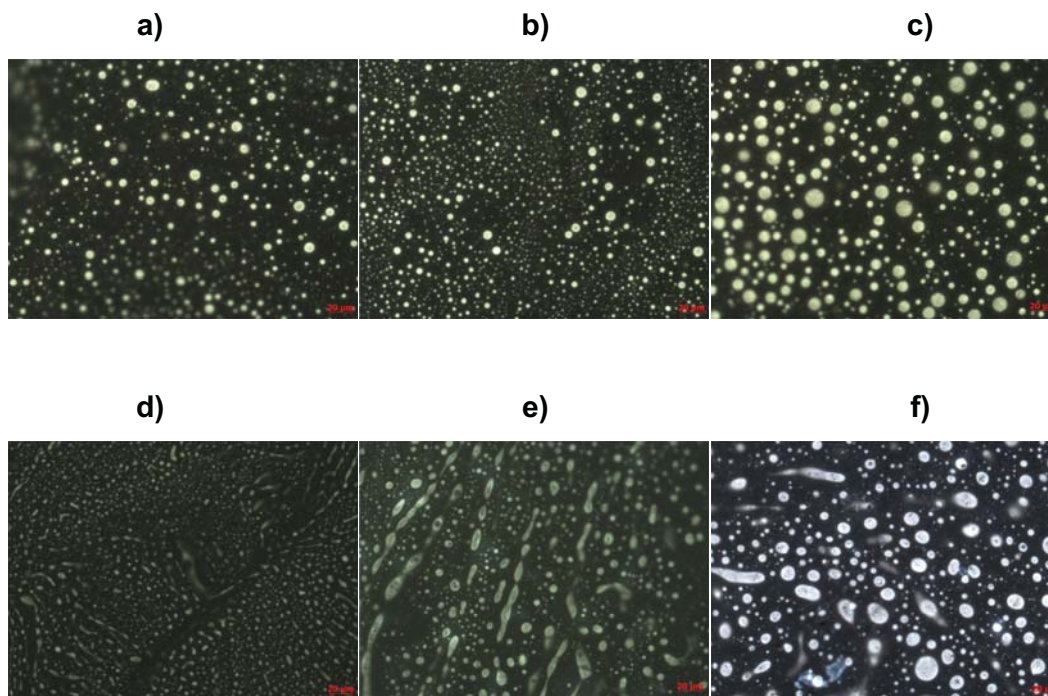
**Figura 14.** Micrografías de los materiales hechos en el lote 3, **a)** A-MS200S-4%-3.25 h, **b)** A-MS200S-4%-3.5 h, **c)** A-MS200S-4%-4 h, **d)** A-MS200S-10%-3.25 h, **e)** A-MS200S-10%-3.5 h y **f)** A-MS200S-10%-4 h.

En lo que respecta a las micrografías tomadas a los materiales del lote 3, puede observarse un sistema compuesto por 2 fases, la primera de ellas corresponde a la micro-esfera de óxido de silicio (color claro) y la segunda es la fase rica en asfalto (color grisáceo o más oscuro). Por otro lado puede observarse que la forma que adopta la micro-esfera de óxido de silicio dentro del asfalto tiende a ser irregular, con partículas que se asemejan a una h para los 6 materiales, los cuales contemplan dos concentraciones de micro-esfera distintas y tres tiempos de modificación.

Otro aspecto importante dentro del presente lote es observar cómo se modifica la distribución de las partículas al cambiar el tiempo de mezclado; claramente puede observarse que las partículas se acomodan de mejor manera al aumentar el tiempo de agitación. Lo anterior puede explicarse debido a que las partículas agitadas durante un mayor tiempo, son sometidas a un esfuerzo más prolongado, lo que deriva en una mejor distribución de la micro-esfera de óxido de silicio. Finalmente puede verse que el mejor acomodo de la micro-esfera al aumentar el tiempo de agitación se presenta en ambas concentraciones de la misma.

Ahora se muestran las fotos de los materiales hechos en el lote 5; las micrografías correspondientes a dichos materiales pueden ser observadas en la Figura 15.





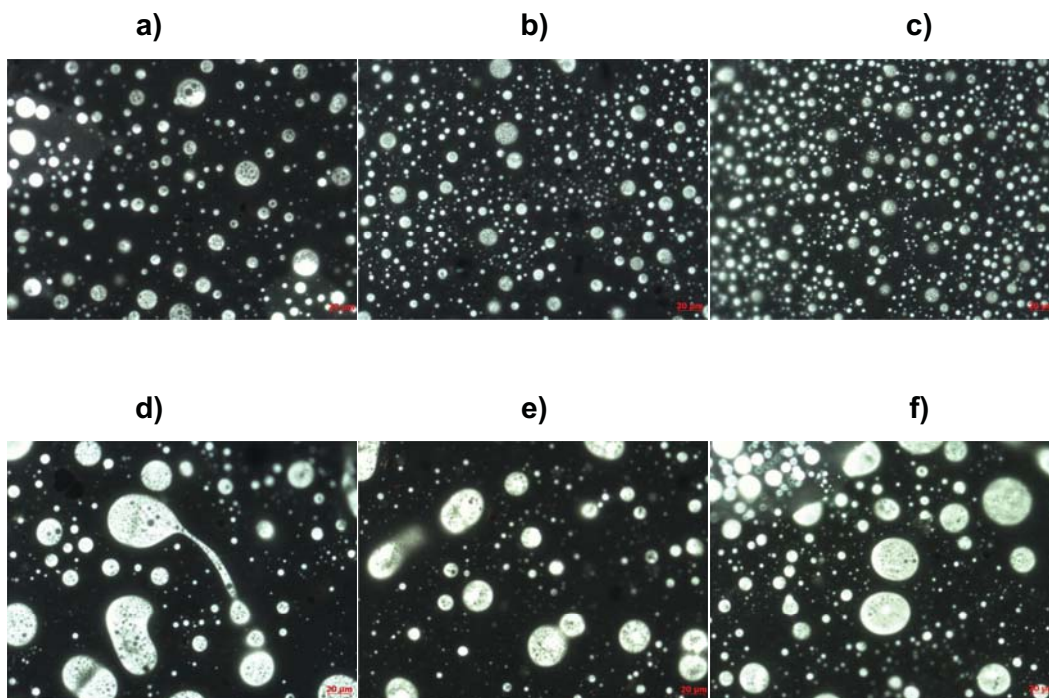
**Figura 15.** Micrografías de los materiales hechos en el lote 5, **a)** A-MS200S-4%-SBS-2.5%-3.25 h, **b)** A-MS200S-4%-SBS-2.5%-3.5 h, **c)** A-MS200S-4%-SBS-2.5%-4 h, **d)** A-MS200S-4%-SBS-5%-3.25 h, **e)** A-MS200S-4%-SBS-5%-3.5 h y **f)** A-MS200S-4%-SBS-5%-4 h.

En relación a las micrografías tomadas a los materiales del lote 5, puede observarse un sistema compuesto por dos fases, la primera de ellas corresponde al SBS (color claro) y la segunda es la fase rica en asfalto que no hinchó al polímero (color negro). Cabe destacar que aunque los materiales contienen micro-esfera de óxido de silicio, ésta no puede ser visualizada debido a su menor fluorescencia en comparación con la del polímero SBS. Por otro lado puede observarse que la forma que adopta el polímero dentro del asfalto tiende a ser redonda, con partículas entre esféricas y ovaladas para SBS a una concentración del 2.5% w/w; mientras que para un aumento del SBS al 5% w/w, se presenta una forma irregular del mismo dentro de la mezcla.

Otro aspecto importante dentro de éste lote es observar cómo se modifican tanto la distribución de las partículas como la morfología de las mismas al cambiar el tiempo de mezclado; claramente puede observarse que para una concentración del 2.5% w/w de SBS, mejora la distribución del polímero en la

mezcla al aumentar el tiempo de agitación. Por otro lado, para una concentración del 5% w/w de SBS, cambia la morfología de la mezcla al aumentar el tiempo de modificación, haciendo más regular la forma que adopta el polímero dentro del asfalto con una tendencia a constituir partículas redondas. Finalmente puede verse que la mejor distribución del polímero para el caso del SBS al 2.5% w/w, o la forma cada vez más regular del mismo para el caso del SBS al 5% w/w, mejoran conforme aumenta el tiempo de agitación.

Por último se muestran las fotos de los materiales hechos en el lote 6; las micrografías correspondientes a dichos materiales pueden ser observadas en la Figura 16.



**Figura 16.** Micrografías de los materiales hechos en el lote 6, **a)** A-MS200S-10%-SBS-2.5%-3.25 h, **b)** A-MS200S-10%-SBS-2.5%-3.5 h, **c)** A-MS200S-10%-SBS-2.5%-4 h, **d)** A-MS200S-10%-SBS-5%-3.25 h, **e)** A-MS200S-10%-SBS-5%-3.5 h y **f)** A-MS200S-10%-SBS-5%-4 h.

Finalmente se observan las micrografías tomadas a los materiales del lote 6, es importante mencionar que la única variación con respecto al lote anterior es la concentración de micro-esfera de óxido de silicio que en éste caso es del 10%

w/w. En éstas fotos puede observarse un sistema compuesto por dos fases, la primera de ellas corresponde al SBS (color claro) y la segunda es la fase rica en asfalto que no hinchó al polímero (color negro). Cabe destacar que aunque los materiales contienen micro-esfera de óxido de silicio, ésta no puede ser visualizada debido a su menor fluorescencia en comparación con la del polímero SBS. Por otro lado, al igual que en el lote 5, puede observarse que la forma que adopta el polímero dentro del asfalto tiende a ser redonda, con partículas entre esféricas y ovaladas para SBS a una concentración del 2.5% w/w; mientras que para un aumento del SBS al 5% w/w, se presenta una forma irregular del mismo dentro de la mezcla.

Otro aspecto importante dentro de éste lote es observar cómo se modifican tanto la distribución de las partículas como la morfología de las mismas al cambiar el tiempo de mezclado; claramente puede observarse que para una concentración del 2.5% w/w de SBS, mejora la distribución del polímero en la mezcla y se tienen partículas del mismo cada vez más pequeñas al aumentar el tiempo de agitación. Por otro lado, para una concentración del 5% w/w de SBS, cambia la morfología de la mezcla al aumentar el tiempo de modificación, haciendo más regular la forma que adopta el polímero dentro del asfalto con una tendencia a constituir partículas redondas. Finalmente puede verse, al igual que en el lote 5, que la mejor distribución del polímero para el caso del SBS al 2.5% w/w, o la forma cada vez más regular del mismo para el caso del SBS al 5% w/w, mejoran conforme aumenta el tiempo de agitación.

#### **5.1.1.- Conclusión parcial**

Con relación a la microscopía de fluorescencia, se analizaron las micrografías obtenidas para cada lote y se pudo llegar a ciertos criterios con respecto a la distribución de los materiales dentro de la matriz asfáltica:

- A mayor velocidad de agitación, la dispersión de las partículas, ya sea de SBS o de micro-esfera en la matriz de asfalto, aumenta considerablemente. Por otro lado, el tamaño de las partículas de polímero disminuye al tener esfuerzos mayores.

- A mayor tiempo de mezclado, la dispersión de las partículas, ya sea de SBS o de micro-esfera en la matriz de asfalto, es un tanto mayor.

Por otro lado, puede observarse que para todos los materiales se tiene una composición bifásica, manteniendo siempre un color claro (brillante) para el polímero o la micro-esfera, y un color oscuro para la parte asfáltica. Los tres tipos de mezclas presentan formas distintas, tales como:

- Mezcla asfalto/polímero: formas regulares con tendencia redonda.
- Mezcla asfalto/micro-esfera: formas irregulares parecidas a arañas.
- Mezcla asfalto/polímero/micro-esfera: formas irregulares con tendencia a formar óvalos.

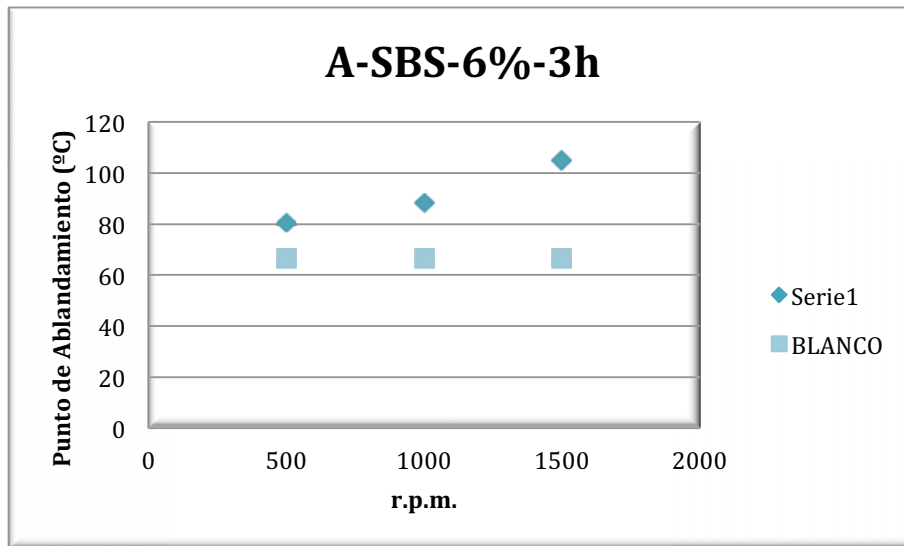
Lo anterior debido al tipo y cantidad de material que se añade al asfalto; o por la velocidad de giro que se utiliza en el mezclado.

## 5.2.- Resultados de punto de ablandamiento

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de punto de ablandamiento para los materiales sintetizados en éste trabajo. En la Tabla 19, así como en la Figura 17, se muestran tanto los valores como el comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 1.

**Tabla 19.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 1.

Punto de Ablandamiento			
Muestra	1 (°C)	2 (°C)	Promedio (°C)
a	81.0	80.0	80.50
b	88.5	88.0	88.25
c	105.0	105.0	105.00



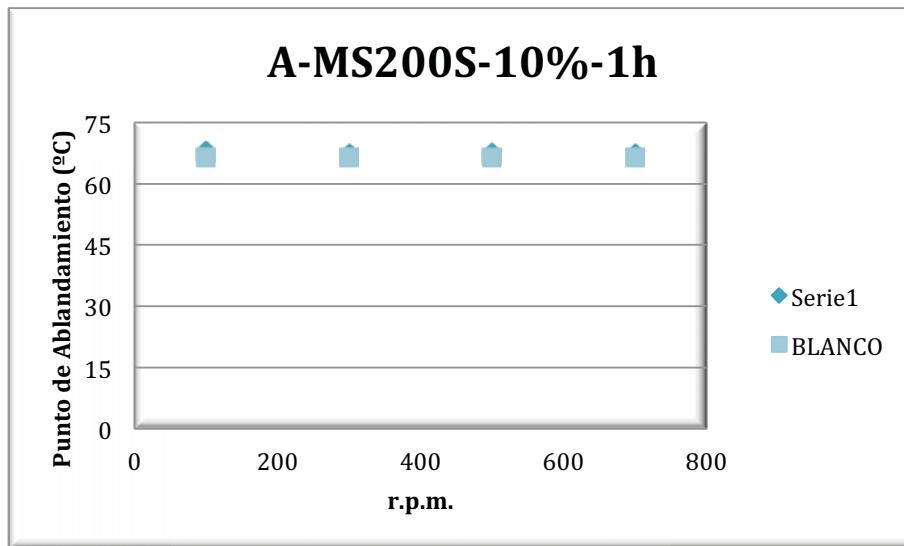
**Figura 17.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 1.

En lo que respecta al comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales sintetizados en el lote 1, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con polímero SBS al 6% w/w, se tiene un aumento gradual de la temperatura a la cual se ablanda el material conforme se incrementa la velocidad de agitación. Lo anterior es importante dado que nos permite observar cómo es que actúa la velocidad de giro en éste tipo de mezclas, siendo un factor importante a la hora de buscar una mayor resistencia al ablandamiento por parte de los materiales sintetizados. Cabe destacar que los puntos de ablandamiento de los materiales sintetizados en el lote 1 están representados por la serie 1 de la Figura 17; la otra serie corresponde al blanco, que en el caso del presente trabajo es asfalto puro agitado durante 4.5 horas a una velocidad de giro de 500 r.p.m. Si bien es cierto que el blanco no justifica la mejora para los tres materiales debido a no tener pruebas para 1000 y 1500 r.p.m. así como un tiempo de agitación distinto; también es cierto que aún comparando el punto de ablandamiento a 500 r.p.m. de la serie 1 con el blanco, se ha obtenido un incremento de la temperatura a la cual se ablanda la mezcla asfáltica de casi 10°C cuando se agrega polímero SBS al 6% w/w. Finalmente se ha podido constatar que tanto añadiendo polímero SBS, así como aumentando la velocidad de giro a la mezcla, se mejora la propiedad termo-mecánica del asfalto que en éste caso es el punto de ablandamiento.

A continuación se muestran la Tabla 20, así como la Figura 18, en las cuales se pueden observar tanto los valores como el comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 2.

**Tabla 20.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 2.

Punto de Ablandamiento			
Muestra	1 (°C)	2 (°C)	Promedio (°C)
a	68.0	68.0	68.00
b	67.0	68.0	67.50
c	68.0	67.5	67.75
d	67.5	67.5	67.50



**Figura 18.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 2.

En lo que respecta al comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales sintetizados en el lote 2, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio al 10% w/w, prácticamente no se ve afectada la temperatura a la cual se ablanda el material sintetizado conforme se incrementa la velocidad de agitación. Lo anterior es notorio dado que nos permite observar cómo es que actúa la velocidad de giro en éste tipo de mezclas. Cabe destacar que los puntos de ablandamiento de

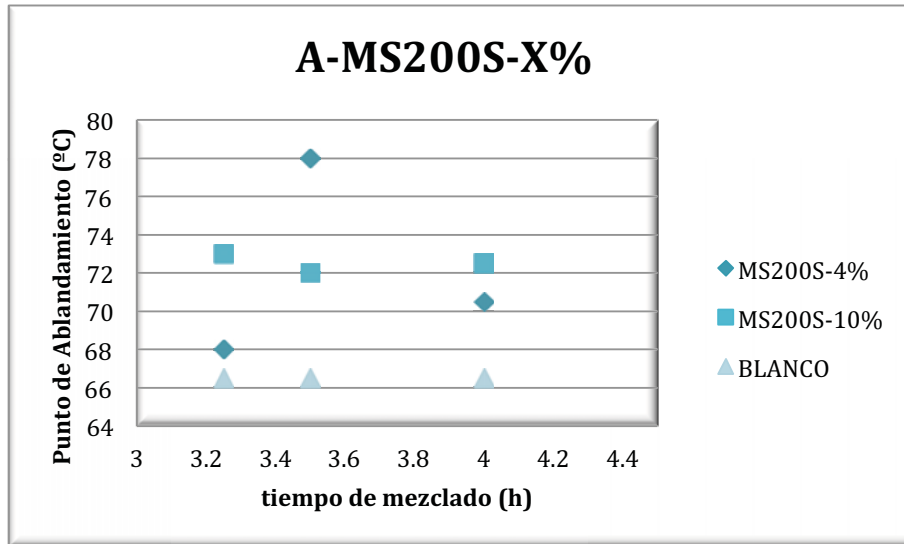
los materiales sintetizados en el lote 2 están representados por la serie 1 de la Figura 18; la otra serie corresponde al blanco. Si bien es cierto que el blanco no justifica la temperatura de ablandamiento para los 4 materiales debido a no tener pruebas para 100, 300 y 700 r.p.m. así como un tiempo de agitación diferente; también es cierto que aún comparando solamente el punto de ablandamiento a 500 r.p.m. de la serie 1 con el blanco, se ha obtenido casi la misma temperatura de ablandamiento al agregar micro-esfera de óxido de silicio al 10% w/w a la mezcla. Finalmente se ha podido constatar que añadir micro-esfera de óxido de silicio en grandes proporciones a una mezcla con asfalto y agitar por períodos cortos, no mejora significativamente el punto de ablandamiento.

Toca el turno de mostrar la Tabla 21, así como la Figura 19, en las cuales se pueden observar tanto los valores como el comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 3.

**Tabla 21.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 3.

<b>Punto de Ablandamiento</b>			
<b>Muestra</b>	<b>1 (°C)</b>	<b>2 (°C)</b>	<b>Promedio (°C)</b>
<b>a</b>	67.0	69.0	68.0
<b>b</b>	78.0	78.0	78.0
<b>c</b>	71.0	70.0	70.5
<b>d</b>	73.0	73.0	73.0
<b>e</b>	72.0	72.0	72.0
<b>f</b>	73.0	72.0	72.5





**Figura 19.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 3.

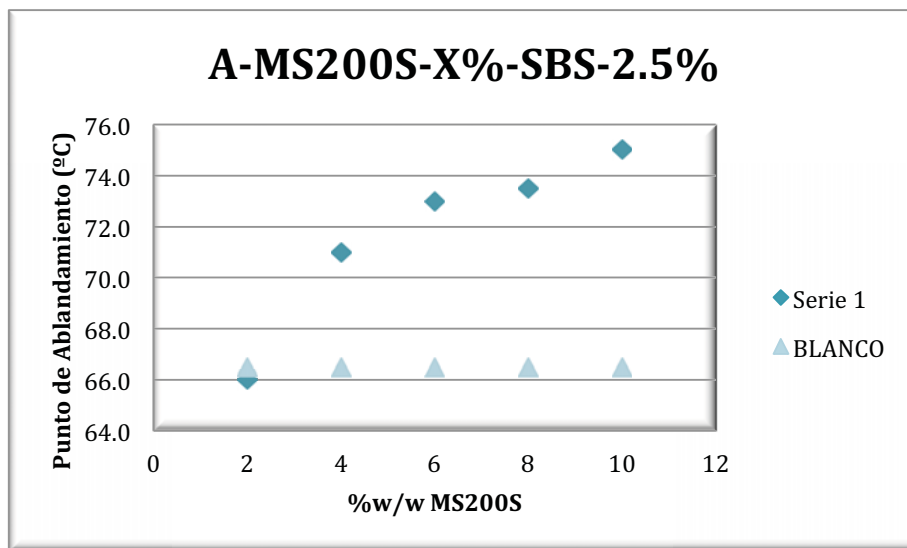
En lo que respecta al comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales sintetizados en el lote 3, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio a dos concentraciones, se tiene un comportamiento similar de la temperatura a la cual se ablandan los materiales conforme se incrementa el tiempo de agitación. Es conveniente señalar que para una concentración del 4% w/w de micro-esfera y 3.5 horas de mezclado, se presenta un pico en el punto de ablandamiento, lo cual nos obliga a repetir dicho experimento, pero dado el cambio de asfalto con el cual se trabajó, es poco probable dicha repetición, lo que nos obliga a darle prioridad a los resultados con micro-esfera de óxido de silicio al 10% w/w. Lo anterior resulta interesante dado que nos permite observar cómo es que actúa el tiempo de mezclado en éstas mezclas. Cabe destacar que los puntos de ablandamiento de los materiales sintetizados en el lote 3 para una concentración del 10% w/w de micro-esfera, están representados por la serie MS200S-10% de la Figura 19; la otra serie corresponde al blanco. Finalmente se ha podido constatar que aumentar el tiempo de mezclado de 3.25 a 4 horas no cambia significativamente los resultados que se tienen del punto de ablandamiento; lo cual representa un ahorro de energía sustancial.



Ahora se muestran la Tabla 22, así como la Figura 20, en las cuales se pueden observar tanto los valores como el comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 4.

**Tabla 22.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 4.

Punto de Ablandamiento			
Muestra	1 (°C)	2 (°C)	Promedio (°C)
a	65.0	67.0	66.0
b	70.0	72.0	71.0
c	72.0	74.0	73.0
d	73.0	74.0	73.5
e	74.0	76.0	75.0



**Figura 20.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 4.

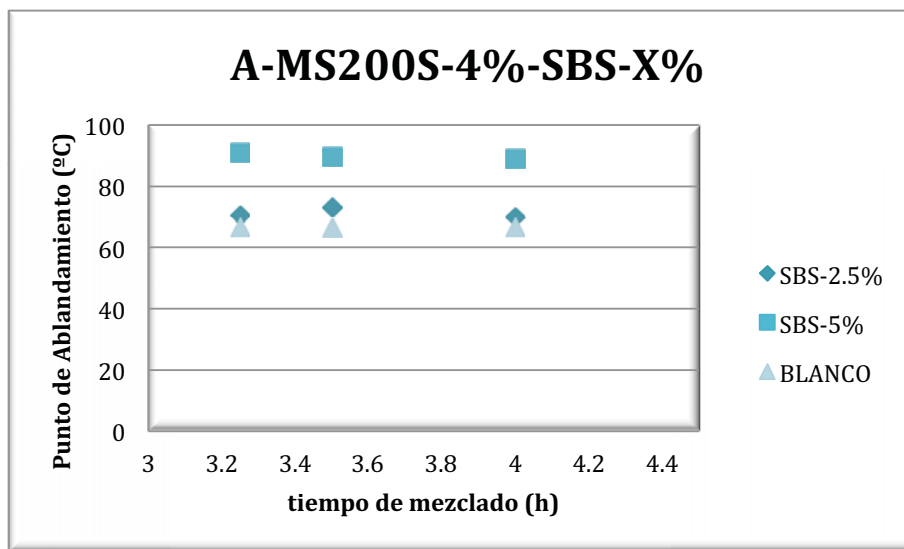
En lo que respecta al comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales sintetizados en el lote 4, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con polímero SBS y micro-esfera de óxido de silicio a diferentes concentraciones del último, se tiene un aumento gradual de la temperatura a la cual se ablanda el material sintetizado conforme se incrementa la cantidad de micro-esfera. Es conveniente señalar que la concentración de polímero SBS se mantiene constante en la mezcla, con un

2.5% w/w. Cabe destacar que los puntos de ablandamiento de los materiales sintetizados en el lote 4 están representados por la serie 1 de la Figura 20; la otra serie corresponde al blanco. Finalmente se ha podido constatar que añadir micro-esfera de óxido de silicio a una mezcla de asfalto con polímero SBS, mejora significativamente el punto de ablandamiento.

Aquí se muestran la Tabla 23, así como la Figura 21, en las cuales se pueden observar tanto los valores como el comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 5.

**Tabla 23.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 5.

Punto de Ablandamiento			
Muestra	1 (°C)	2 (°C)	Promedio (°C)
a	70.0	71.0	70.5
b	73.0	73.0	73.0
c	70.0	70.0	70.0
d	90.5	91.5	91.0
e	89.0	90.0	89.5
f	89.0	89.0	89.0



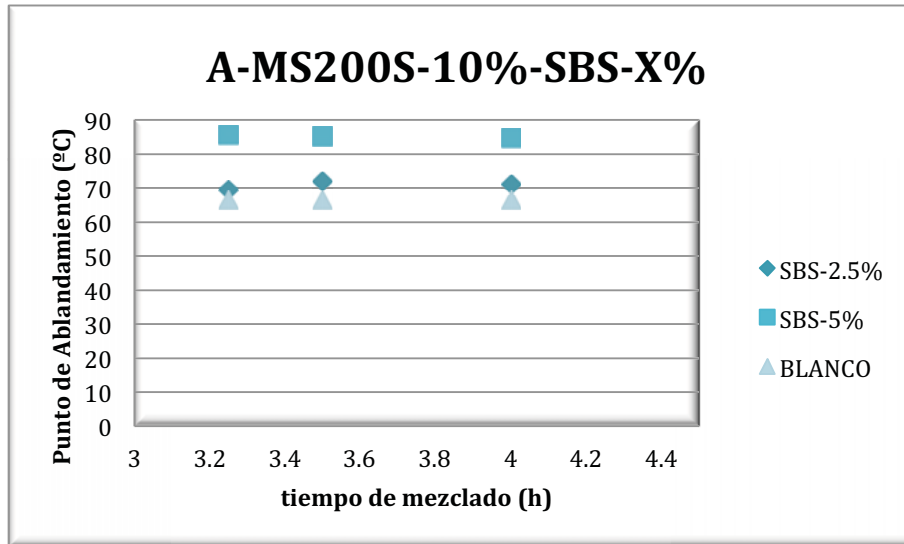
**Figura 21.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 5.

En lo que respecta al comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales sintetizados en el lote 5, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio y polímero SBS a dos concentraciones del último, se tiene un comportamiento similar de la temperatura a la cual se ablandan los materiales conforme se incrementa el tiempo de agitación. Lo anterior resulta importante dado que nos permite observar cómo es que actúa el tiempo de mezclado en éste tipo de mezclas. Por otro lado, se puede denotar que la concentración de SBS si afecta de manera sustancial la temperatura a la cual se ablandan los materiales; incrementándose la resistencia al ablandamiento conforme mayor es la cantidad de polímero. Cabe destacar que los puntos de ablandamiento de los materiales sintetizados en el lote 5 para una concentración del 2.5% w/w de polímero están representados por la serie SBS-2.5% de la Figura 21, los de una concentración del 5% w/w de SBS están representados por la serie SBS-5% y la última serie corresponde al blanco. Finalmente se ha podido constatar que aumentar el tiempo de mezclado de 3.25 a 4 horas no cambia significativamente los resultados que se tienen del punto de ablandamiento; no así el cambio de concentración de SBS, que conforme se ve aumentado, también lo hace la resistencia al ablandamiento.

Por último se muestran la Tabla 24, así como la Figura 22, en las cuales se pueden observar tanto los valores como el comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 6.

**Tabla 24.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 6.

<b>Punto de Ablandamiento</b>			
<b>Muestra</b>	<b>1 (°C)</b>	<b>2 (°C)</b>	<b>Promedio (°C)</b>
<b>a</b>	69.5	69.5	69.50
<b>b</b>	72.0	72.0	72.00
<b>c</b>	71.0	71.0	71.00
<b>d</b>	86.0	85.0	85.50
<b>e</b>	85.0	85.5	85.25
<b>f</b>	85.0.	84.5	84.75



**Figura 22.** Puntos de ablandamiento de los materiales hechos en el lote 6.

En lo que corresponde al comportamiento del punto de ablandamiento de los materiales sintetizados en el lote 6, puede observarse, al igual que en el lote 5, que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio y polímero SBS a dos concentraciones del último, se tiene un comportamiento similar de la temperatura a la cual se ablandan los materiales conforme se incrementa el tiempo de agitación. Es importante señalar que la única diferencia entre el lote 5 y el 6 es una concentración del 4% w/w de micro-esfera para el primero y un porcentaje del 10% w/w del óxido de silicio para el segundo. Lo anterior resulta ser de interés dado que nos permite corroborar cómo es que actúa el tiempo de mezclado al incrementar la concentración de SBS. Por otro lado, se puede ver que la concentración de SBS si afecta de manera sustancial la temperatura a la cual se ablandan los materiales; incrementándose la resistencia al ablandamiento conforme mayor es la cantidad de polímero. Cabe destacar que los puntos de ablandamiento de los materiales sintetizados en el lote 6 para una concentración del 2.5% w/w de polímero están representados por la serie SBS-2.5% de la Figura 22, los de una concentración del 5% w/w de SBS están representados por la serie SBS-5% y la última serie corresponde al blanco. Finalmente se ha corroborado que aumentar el tiempo de mezclado de 3.25 a 4 horas no cambia significativamente los resultados que se tienen del punto de

ablandamiento; no así el cambio de concentración de SBS, que conforme se ve aumentado, también lo hace la resistencia al ablandamiento.

### **5.2.1.- Conclusión parcial**

Con relación a la temperatura de ablandamiento y analizando las variables para cada lote, se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

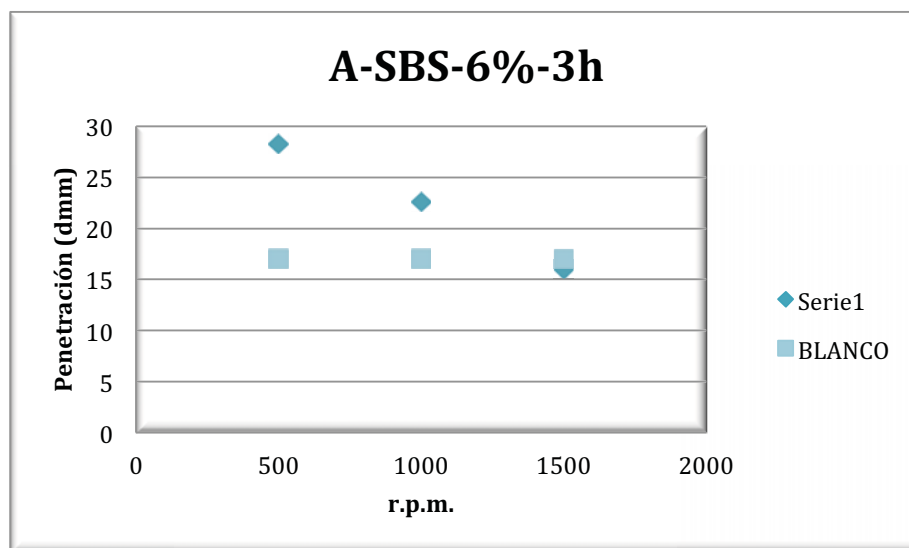
- A mayor cantidad de polímero en las mezclas, manteniendo la velocidad y el periodo de agitación constantes, aumenta la temperatura de ablandamiento.
- A mayor cantidad de micro-esfera en las mezclas, manteniendo la velocidad y el periodo de agitación constantes, aumenta la temperatura de ablandamiento. Cabe destacar que existe un mayor aumento en la temperatura de ablandamiento al agregar SBS en comparación con la adición de micro-esfera.
- A mayor velocidad de agitación, manteniendo la concentración de SBS y el periodo de agitación constantes, aumenta la temperatura de ablandamiento.
- A mayor velocidad de agitación, manteniendo la concentración de micro-esfera y el periodo de agitación constantes, no aumenta la temperatura de ablandamiento.
- A mayor tiempo de mezclado, manteniendo la concentración de SBS y/o micro-esfera y la velocidad de agitación constantes, no aumenta la temperatura de ablandamiento.

### **5.3.- Resultados de penetración**

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de penetración para los materiales sintetizados en éste trabajo. En la Tabla 25, así como en la Figura 23, se muestran tanto los valores como el comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 1.

**Tabla 25.** Penetración de los materiales hechos en el lote 1.

Penetración (décimas de mm)											
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
a	31.5	28	26.5	28	27.5	29.5	26.5	29	29	27.5	28.3 ±2.06
b	22	22.5	22	22.5	27	21.5	22.5	22	21.5	22.5	22.6 ±2.29
c	15.5	16	14.5	15	15	17.5	17.5	17.5	16.5	15.5	16.05 ±1.17



**Figura 23.** Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 1.

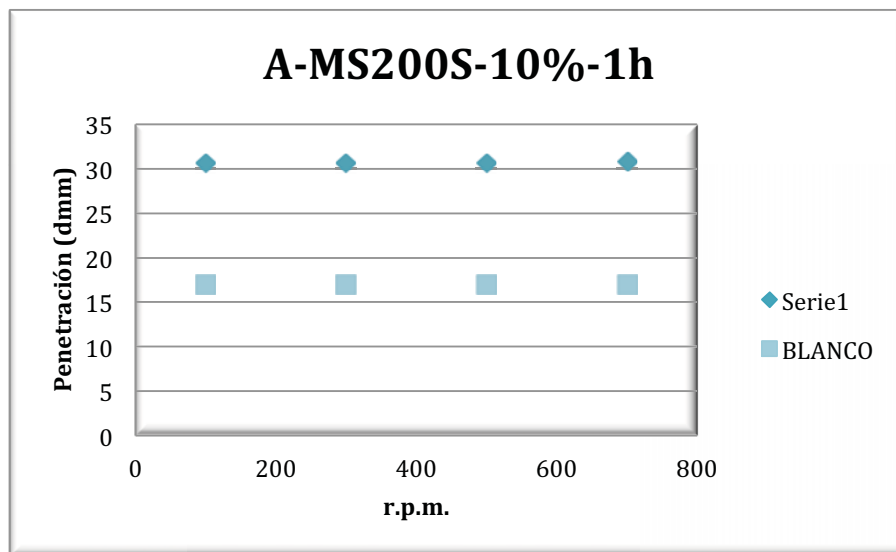
En lo que respecta al comportamiento de la penetración de los materiales sintetizados en el lote 1, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con polímero SBS al 6% w/w, se tiene una disminución gradual de la penetrabilidad de los materiales conforme se incrementa la velocidad de agitación. Lo anterior resulta interesante dado que nos permite observar cómo es que actúa la velocidad de giro en éstas mezclas, siendo un factor importante a la hora de buscar una mayor resistencia a la penetración por parte de los materiales sintetizados. Cabe destacar que la penetrabilidad de los materiales sintetizados en el lote 1 está representada por la serie 1 de la Figura 23; la otra serie corresponde al blanco. Si bien es cierto que el blanco no justifica los 3 materiales dado que no se tienen pruebas a 1000 y 1500 r.p.m. para asfalto sin modificación, ni un tiempo de agitación igual; también es cierto que al tener una velocidad de agitación de 1500 r.p.m. en la serie 1, se alcanza y se mejora la

penetrabilidad de los materiales sintetizados con respecto a la del blanco. Finalmente se ha podido constatar que añadiendo polímero SBS y aumentando la velocidad de giro a la mezcla, se aminora la penetrabilidad del asfalto.

A continuación se muestra la Tabla 26, así como la Figura 24, donde se observan tanto los valores como el comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 2.

**Tabla 26.** Penetración de los materiales hechos en el lote 2.

Penetración (décimas de mm)											
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
a	30	29	31	31	30	31	30	32	31	31	30.6 ±0.64
b	30	31	31	30	31	29	31	32	29	32	30.6 ±1.04
c	30	31	29	29	31	30	32	29	33	32	30.6 ±1.84
d	32	29	31	30	31	31	31	31	31	31	30.8 ±0.56



**Figura 24.** Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 2.

En lo que respecta al comportamiento de la penetración de los materiales sintetizados en el lote 2, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio al 10% w/w, se tiene un

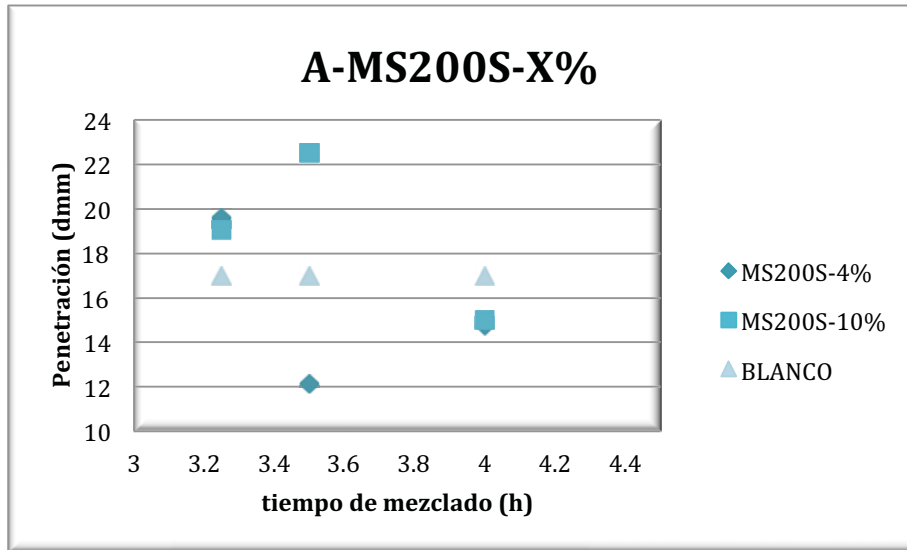
comportamiento homogéneo de la penetrabilidad de los materiales conforme se incrementa la velocidad de agitación. Cabe denotar que la penetrabilidad de los materiales sintetizados en el lote 2 está representada por la serie 1 de la Figura 24; la otra serie corresponde al blanco. Si bien es cierto que el blanco no justifica los 4 materiales dado que no se tienen pruebas a 100, 300 y 700 r.p.m., así como un tiempo de agitación igual; también es cierto que al tener cualquier velocidad de agitación en la serie 1, no se alcanza ni se mejora la penetrabilidad de los materiales sintetizados con respecto a la del blanco. Finalmente se ha podido constatar que añadiendo micro-esfera de óxido de silicio y aumentando la velocidad de giro a la mezcla, no mejora la penetrabilidad del asfalto para éste tipo de mezclas.

Aquí se muestra la Tabla 27, así como la Figura 25, donde se observan tanto los valores como el comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 3.

**Tabla 27.** Penetración de los materiales hechos en el lote 3.

Penetración (décimas de mm)											
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
a	18	20	18	20	21	19.5	19.5	18.5	21.5	20	19.60 ±1.24
b	14	13	12	12.5	12.5	12	11.5	11.5	11.5	11	12.15 ±0.70
c	14	14	13.5	15	15	16	15	14.5	15	15.5	14.75 ±0.51
d	19	19	18.5	18.5	20	19	19	19	19	19.5	19.05 ±0.17
e	20	20	20	21	21	24	24	22.5	25.5	27	22.50 ±2.70
f	14.5	14.5	19	14	14.5	14	14.5	15	15	15	15.00 ±1.90





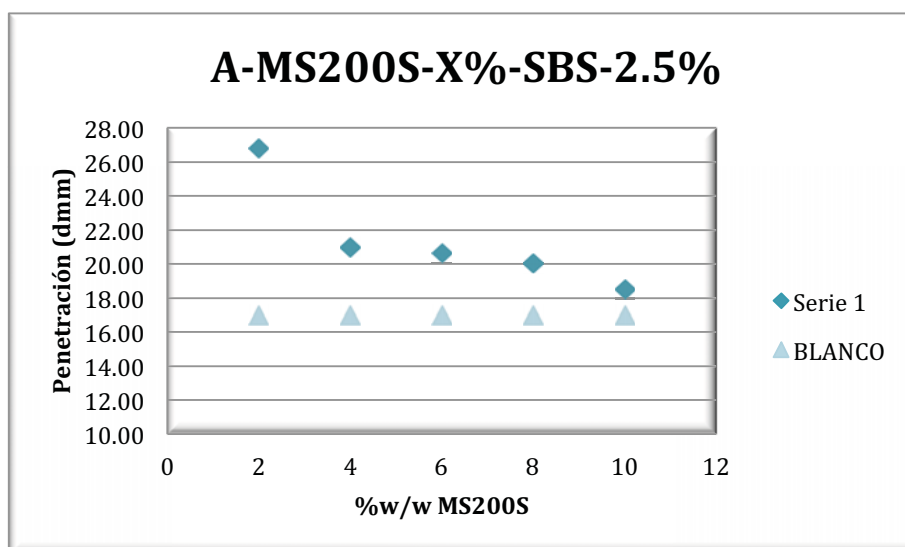
**Figura 25.** Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 3.

En lo que respecta al comportamiento de la penetración de los materiales sintetizados en el lote 3, puede observarse que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio a dos concentraciones, se tiene un comportamiento con una ligera caída de la penetrabilidad en los materiales conforme se incrementa el tiempo de mezclado. Cabe mencionar que la penetrabilidad de los materiales sintetizados en el lote 3 sufrió inconsistencias cuando se tenía un tiempo de 3.3 horas, lo anterior no fue posible repetirlo dado que no se cuenta con el mismo tipo de asfalto; sin embargo, puede observarse que para ambas concentraciones de micro-esfera, al pasar de 3.25 a 4 horas, se presenta una mejoría en la resistencia a la penetración por parte de los materiales, haciéndolos más resistentes que el blanco, el cual es asfalto agitado durante 4.5 horas a una velocidad de giro de 500 r.p.m.

Ahora se muestra la Tabla 28, así como la Figura 26, donde se observan tanto los valores como el comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 4.

**Tabla 28.** Penetración de los materiales hechos en el lote 4.

Penetración (décimas de mm)											
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
a	26	26	28	26	28	28	26	26	26	28	26.80 ±0.96
b	20	22	21.5	21	21	21	20	19.5	22	22	21.00 ±0.75
c	20.5	21	20	20.5	20.5	22.5	20.5	20	20	21	20.65 ±0.50
d	20	21	20.5	19	20.5	21.5	20.5	19.5	18	20	20.05 ±0.92
e	18.5	17	17	19	19	18	18.5	19	20	19	18.50 ±0.80



**Figura 26.** Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 4.

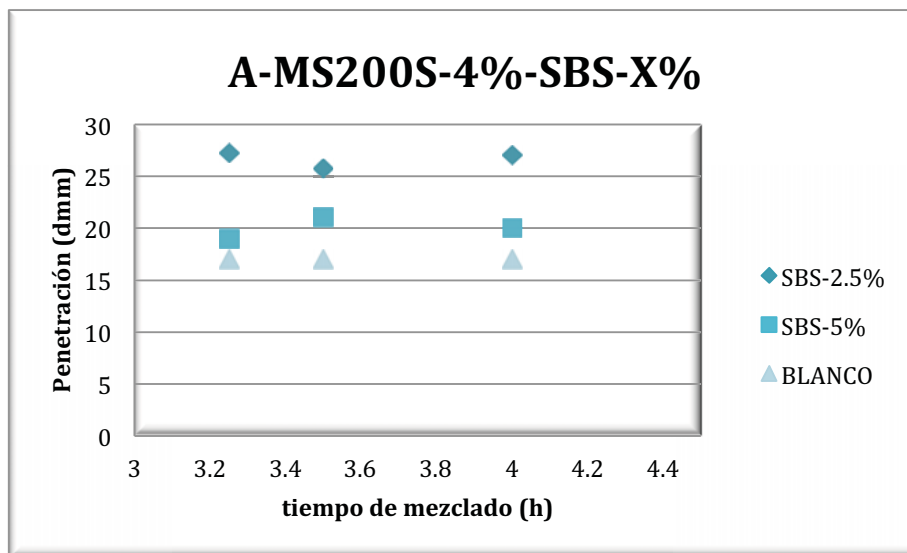
En lo que respecta al comportamiento de la penetración de los materiales sintetizados en el lote 4, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con polímero SBS al 2.5% w/w y micro-esfera de óxido de silicio a diferentes concentraciones, se tiene una disminución de la penetración en los materiales conforme se incrementa la cantidad de micro-esfera. Lo anterior es importante dado que nos permite observar cómo es que actúa la concentración de óxido de silicio en éste tipo de mezclas, siendo un factor trascendental a la hora de buscar una mayor resistencia a la penetración por parte de los materiales sintetizados. Cabe destacar que la penetrabilidad de los materiales sintetizados en el lote 4 está representada por la serie 1 de la Figura 26; la otra

serie corresponde al blanco. Finalmente se ha podido constatar que añadiendo micro-esfera de óxido de silicio a una mezcla de asfalto con polímero SBS, y aumentando la concentración de micro-esfera en la misma, se mejora la penetrabilidad del asfalto para éste tipo de materiales.

Toca el turno de mostrar la Tabla 29, así como la Figura 27, donde se observan tanto los valores como el comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 5.

**Tabla 29.** Penetración de los materiales hechos en el lote 5.

Penetración (décimas de mm)											
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
a	27	27	27	26	26	30	28	27.5	28	26.5	27.30 ±1.26
b	25	24	25	25	25.5	28	27	27	25	26	25.75 ±1.36
c	27	28	26.5	28	27.5	28	27	26.5	26	26	27.05 ±0.57
d	19.5	18.5	19	19	18	18	19.5	20.5	19	19	19.00 ±0.50
e	20	21	20.5	23	21	23	21	20	20	21	21.05 ±1.12
f	18	20	20	20	21	19.5	19.5	20	22	20	20.00 ±0.95



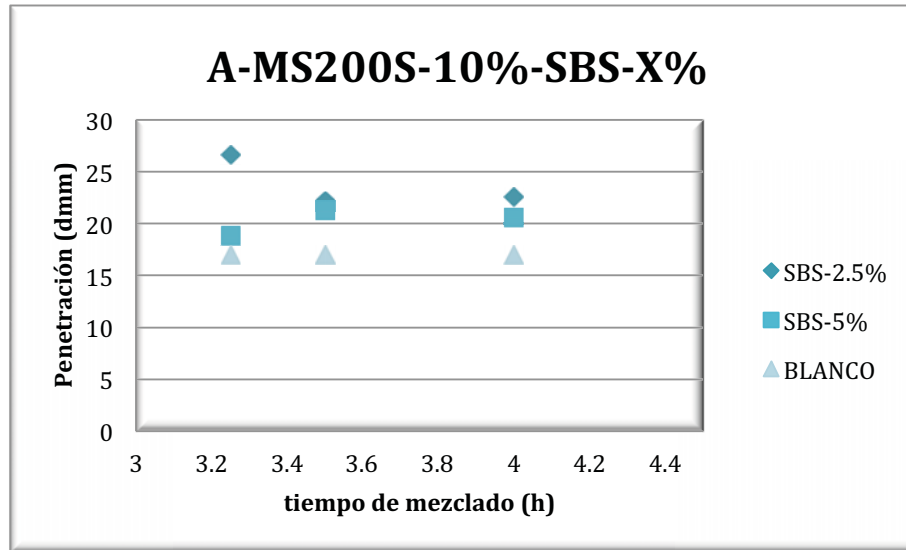
**Figura 27.** Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 5.

En lo que respecta al comportamiento de la penetración de los materiales sintetizados en el lote 5, puede observarse que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio al 4% w/w y polímero SBS a 2 concentraciones, se tiene un comportamiento ligeramente homogéneo de la penetrabilidad en los materiales conforme se incrementa el tiempo de agitación. Cabe recalcar que la penetrabilidad de los materiales sintetizados en el lote 5 para una concentración del 2.5% w/w de polímero está representada por la serie SBS-2.5% de la Figura 27, la de una concentración del 5% w/w de SBS está representada por la serie SBS-5% y la última serie corresponde al blanco. Finalmente se ha podido constatar que aumentar el tiempo de mezclado de 3.25 a 4 horas no cambia significativamente los resultados que se tienen de la penetrabilidad; no así el cambio de concentración de SBS, que conforme se ve aumentado, también lo hace la resistencia a la penetración.

Por último se muestra la Tabla 30, así como la Figura 28, donde se observan tanto los valores como el comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 6.

**Tabla 30.** Penetración de los materiales hechos en el lote 6.

Penetración (décimas de mm)											
Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio
<b>a</b>	26	28	26.5	25	26	28	27.5	27	26.5	26	26.65 ±0.85
<b>b</b>	22	22.5	22	23	20	22.5	21	22	24	22.5	22.15 ±1.05
<b>c</b>	22.5	22	23	22	22.5	23	24	22	22	23	22.60 ±0.39
<b>d</b>	19.5	19	19	18	18.5	19.5	19.5	19	18.5	18	18.85 ±0.30
<b>e</b>	23	23	19.5	22	21	21.5	21	20	22	20	21.30 ±1.36
<b>f</b>	21	19.5	20	21.5	20.5	21	21.5	21	19.5	20.5	20.60 ±0.49



**Figura 28.** Comportamiento de la penetración de los materiales hechos en el lote 6.

En lo que respecta al comportamiento de la penetración de los materiales sintetizados en el lote 6, puede observarse, al igual que en el lote 5, que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio y polímero SBS a dos concentraciones del último, se tiene un comportamiento con tendencia ligeramente homogénea de la penetrabilidad en los materiales conforme se incrementa el tiempo de agitación. Es importante señalar que la única diferencia entre el lote 5 y el 6 es una concentración del 4% w/w de micro-esfera para el primero y un contenido del 10% w/w de óxido de silicio para el segundo. Lo anterior resulta ser de impacto dado que nos permite corroborar cómo es que actúa el tiempo de agitación en éste tipo de mezclas, siendo un factor que no repercute demasiado en la resistencia a la penetración por parte de los materiales. Cabe destacar que la penetrabilidad de los materiales sintetizados en el lote 6 para una concentración del 2.5% w/w de polímero está representada por la serie SBS-2.5% de la Figura 28, la de una concentración del 5% w/w de SBS está representada por la serie SBS-5% y la última serie corresponde al blanco. Finalmente se ha corroborado que aumentar el tiempo de mezclado de 3.25 a 4 horas no cambia significativamente los resultados que se tienen de la penetrabilidad; no así el cambio de concentración de SBS, que conforme se ve aumentado, también lo hace la resistencia a la penetración.

### 5.3.1.- Conclusión parcial

Con respecto a la penetración, analizando las variables para cada lote, se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

- A mayor cantidad de polímero en las mezclas, manteniendo la velocidad y el periodo de agitación constantes, disminuye la penetración.
- A mayor cantidad de micro-esfera en las mezclas, manteniendo la velocidad y el periodo de agitación constantes, disminuye la penetración. Cabe destacar que existe una mayor disminución de la penetración al agregar SBS en comparación con la adición de micro-esfera.
- A mayor velocidad de agitación, manteniendo la concentración de SBS y el periodo de agitación constantes, disminuye la penetración para el caso de la mezcla asfalto/SBS.
- A mayor velocidad de agitación, manteniendo la concentración de micro-esfera y el periodo de agitación constantes, la penetración no se modifica.
- A mayor tiempo de mezclado, manteniendo la concentración de SBS y/o micro-esfera y la velocidad de agitación constantes, no hay efecto alguno en la penetración.

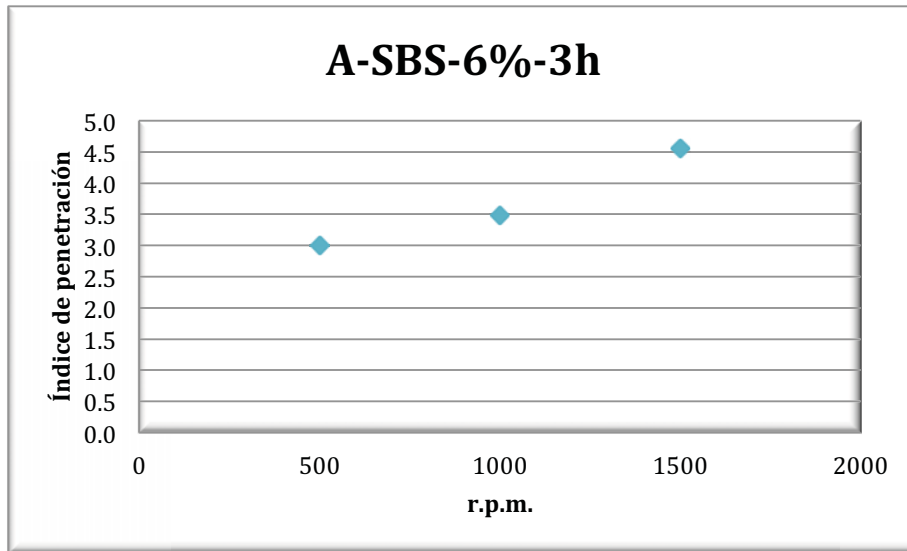
### 5.3.2.- Índice de penetración

En el presente sub-apartado se muestra el comportamiento del índice de penetración para los materiales sintetizados en éste trabajo. En la Tabla 31, así como en la Figura 29, se pueden observar tanto los valores como el comportamiento del índice de penetración de los materiales para el lote 1.

**Tabla 31.** Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 1.

Índice de Penetración	
Muestra	IP
a	3.0

<b>b</b>	3.5
<b>c</b>	4.6



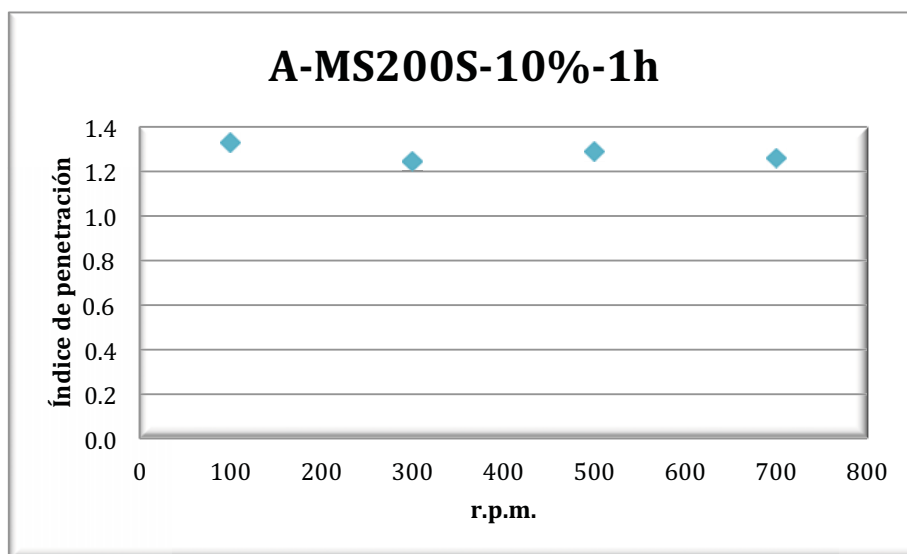
**Figura 29.** Comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 1.

En lo que respecta al comportamiento del índice de penetración de los materiales sintetizados en el lote 1, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con polímero SBS al 6% w/w, se tiene un aumento gradual del mismo en los materiales conforme se incrementa la velocidad de agitación. Cabe destacar que el índice de penetración de los materiales sintetizados en el lote 1 es  $>+1$  para las tres velocidades de agitación, además de que el valor se ve aumentado conforme crecen las revoluciones aplicadas para agitar la mezcla; lo anterior es importante dado que nos indica que a mayor velocidad de giro, se tienen mezclas con menor susceptibilidad a la temperatura, presentando cierta elasticidad.

A continuación se muestra la Tabla 32, así como la Figura 30, donde se observan tanto los valores como el comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 2.

**Tabla 32.** Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 2.

Índice de Penetración	
Muestra	IP
a	1.3
b	1.2
c	1.3
d	1.3



**Figura 30.** Comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 2.

En lo que respecta al comportamiento del índice de penetración de los materiales sintetizados en el lote 2, puede verse que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio al 10% w/w, se tiene un cambio prácticamente nulo del mismo en los materiales conforme se incrementa la velocidad de agitación. Cabe denotar que el índice de penetración de los materiales sintetizados en el lote 2 es  $>+1$  para las cuatro velocidades de agitación, lo anterior es interesante dado que nos indica que a distintas velocidades de giro, se tienen materiales con poca susceptibilidad a la temperatura, presentando cierta elasticidad. Este comportamiento es específico de éstas mezclas, las cuales contienen micro-esfera de óxido de silicio a alta

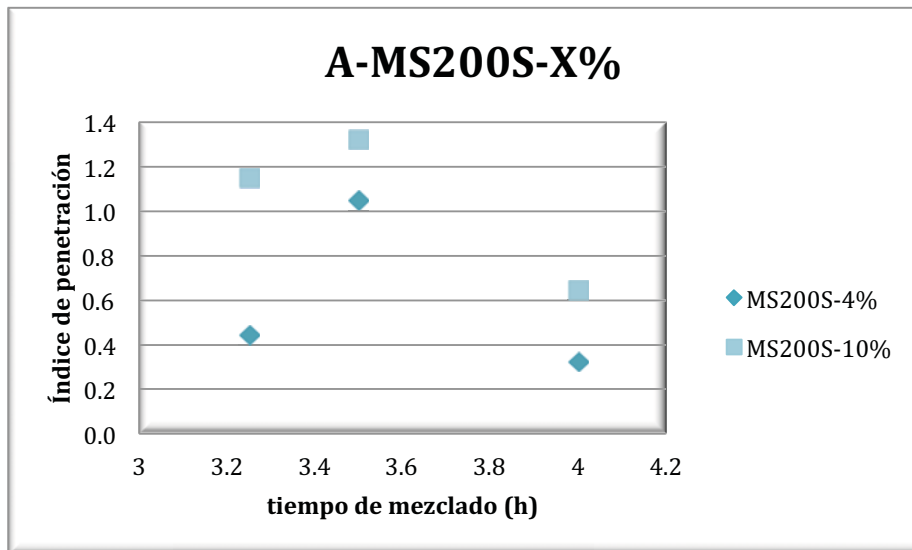


concentración y en las cuales la velocidad de agitación no cambia prácticamente sus propiedades termo-mecánicas.

Aquí se muestra la Tabla 33, así como la Figura 31, donde se observan tanto los valores como el comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 3.

**Tabla 33.** Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 3.

Índice de Penetración	
Muestra	IP
a	0.4
b	1.0
c	0.3
d	1.1
e	1.3
f	0.6



**Figura 31.** Comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 3.

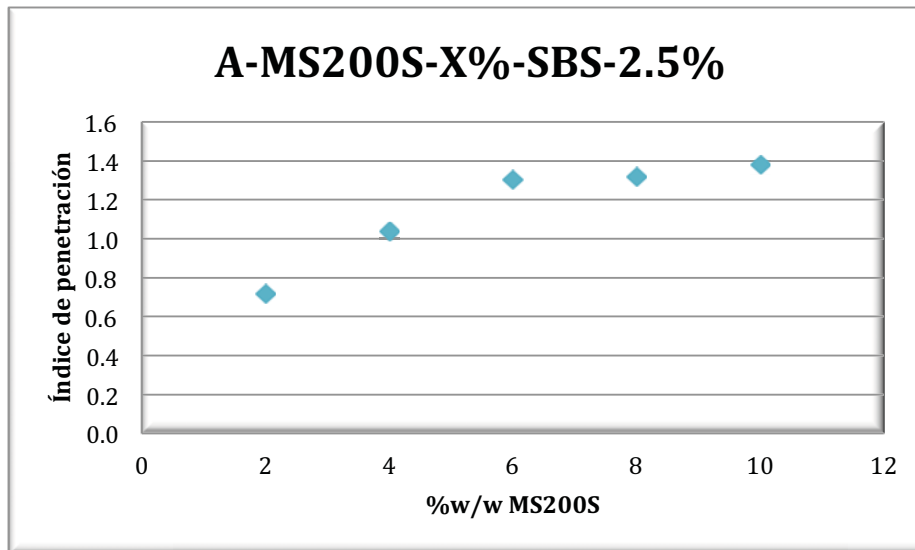
En lo que confiere al comportamiento del índice de penetración de los materiales sintetizados en el lote 3, puede apreciarse que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio a dos concentraciones distintas, se

tiene un decremento intermitente del mismo en los materiales conforme crece el tiempo de agitación. Cabe mencionar que primeramente se tiene un aumento del índice de penetración para un período de tiempo de 3.25 a 3.5 horas, para luego decaer al dejar transcurrir media hora más. Lo anterior es interesante dado que al pasar un mayor tiempo (4 horas), se logran valores entre -1 y +1 para el índice de penetración en ambas concentraciones, lo cual resulta en mezclas asfálticas con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricas en resinas y con un comportamiento parcialmente viscoso. También es importante destacar que a mayor concentración de micro-esfera, se tienen mezclas con menor susceptibilidad a la temperatura, las cuales presentan cierta elasticidad.

Ahora se muestran la Tabla 34 y la Figura 32, donde se observan tanto valores como comportamiento del índice de penetración de los materiales del lote 4.

**Tabla 34.** Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 4.

Índice de Penetración	
Muestra	IP
a	0.7
b	1.0
c	1.3
d	1.3
e	1.4



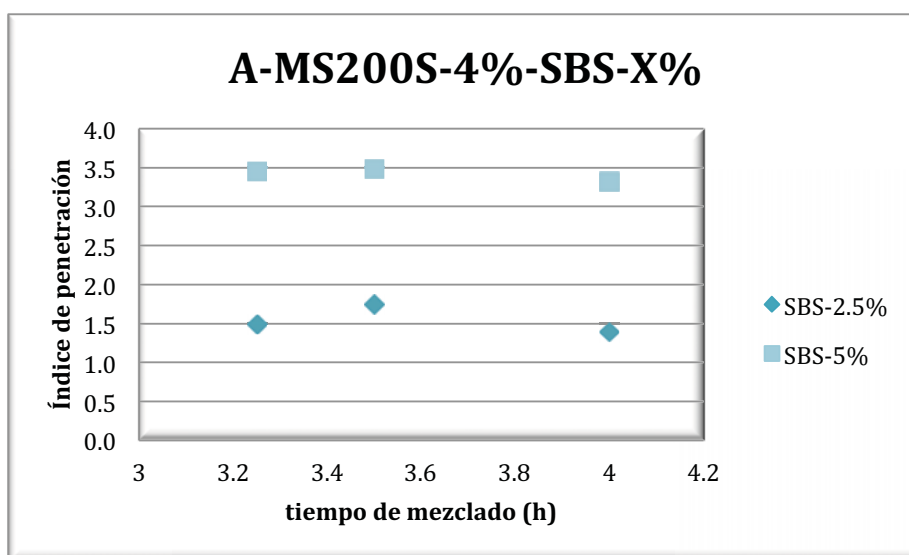
**Figura 32.** Comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 4.

En lo que se refiere al comportamiento del índice de penetración de los materiales sintetizados en el lote 4, puede verse que en una mezcla de asfalto con polímero SBS al 2.5% w/w y micro-esfera de óxido de silicio a diferentes concentraciones, se tiene un aumento gradual del mismo en los materiales conforme se incrementa la cantidad de óxido de silicio. Cabe denotar que el índice de penetración de los materiales sintetizados en el lote 4 es  $>+1$  para concentraciones  $\geq 4\%$  w/w de micro-esfera, además de que el valor se ve aumentado conforme crece la cantidad de óxido de silicio en la mezcla; lo anterior es trascendente dado que nos indica que a mayor cantidad de micro-esfera, se tienen mezclas con menor susceptibilidad a la temperatura, las cuales presentan cierta elasticidad.

Toca el turno de mostrar la Tabla 35, así como la Figura 33, donde se observan tanto los valores como el comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 5.

**Tabla 35.** Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 5.

Índice de Penetración	
Muestra	IP
a	1.5
b	1.7
c	1.4
d	3.4
e	3.5
f	3.3



**Figura 33.** Comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 5.

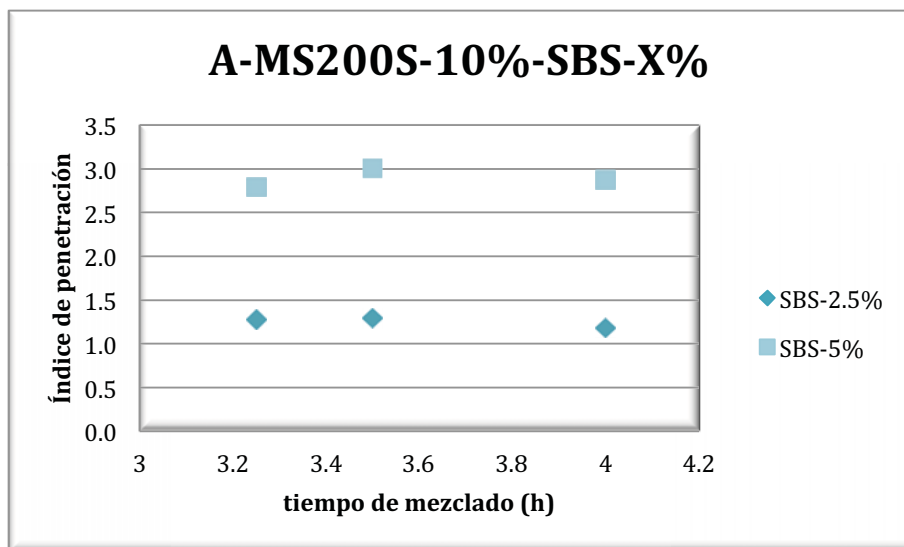
En lo que respecta al comportamiento del índice de penetración de los materiales sintetizados en el lote 5, puede observarse que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio al 4% w/w y polímero SBS a dos concentraciones, se tiene un cambio prácticamente nulo del mismo en los materiales conforme se incrementa el tiempo de agitación. Cabe destacar que el índice de penetración de los materiales sintetizados en el lote 5 es  $>+1$  para los tres tiempos de agitación en ambas concentraciones de SBS, además de que el valor no sufre un cambio significativo conforme transcurre el tiempo; lo

anterior es interesante dado que nos indica que a mayor tiempo de agitación, las mezclas no presentan un cambio en la susceptibilidad a la temperatura. Por otro lado, se aprecia que el incremento en la concentración de polímero SBS sí produce una menor susceptibilidad de los materiales a la temperatura.

Por último se muestra la Tabla 36, así como la Figura 34, donde se observan tanto los valores como el comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 6.

**Tabla 36.** Índice de penetración de los materiales hechos en el lote 6.

Índice de Penetración	
Muestra	IP
a	1.3
b	1.3
c	1.2
d	2.8
e	3.0
f	2.9



**Figura 34.** Comportamiento del índice de penetración de los materiales hechos en el lote 6.

En lo que al comportamiento del índice de penetración de los materiales sintetizados en el lote 6 respecta, puede apreciarse que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio al 10% w/w y polímero SBS a dos concentraciones, se tiene un cambio prácticamente nulo del mismo en los materiales conforme se incrementa el tiempo de agitación. Cabe destacar que el índice de penetración de los materiales sintetizados en el lote 6 es  $>+1$  para los tres tiempos de agitación en ambas concentraciones de SBS, además de que el valor no sufre un cambio significativo conforme transcurre el tiempo; lo anterior es importante dado que nos indica que a mayor tiempo de agitación, las mezclas no presentan un cambio en la susceptibilidad a la temperatura. Por otro lado, puede verse que el incremento en la concentración de polímero SBS sí produce una menor susceptibilidad de los materiales a la temperatura. Finalmente se debe notar que la única diferencia entre los lotes 5 y 6 es la concentración de micro-esfera de óxido de silicio, lo cual deriva en un comportamiento semejante de los materiales.

#### **5.3.2.1.- Conclusión parcial**

Con relación al índice penetración y analizando las variables para cada lote, se tienen las siguientes conclusiones:

- A mayor cantidad de polímero en las mezclas, manteniendo la velocidad y el periodo de agitación constantes, aumenta el índice de penetración.
- A mayor cantidad de micro-esfera en las mezclas, manteniendo la velocidad y el periodo de agitación constantes, crece el valor del índice de penetración. Cabe destacar que existe un aumento mayor del índice de penetración al agregar SBS en comparación con la adición de micro-esfera.
- A mayor velocidad de agitación, manteniendo la concentración de SBS y el periodo de agitación constantes, aumenta el índice de penetración.
- A mayor velocidad de agitación, manteniendo la concentración de micro-esfera y el periodo de agitación constantes, el índice de penetración no se modifica.

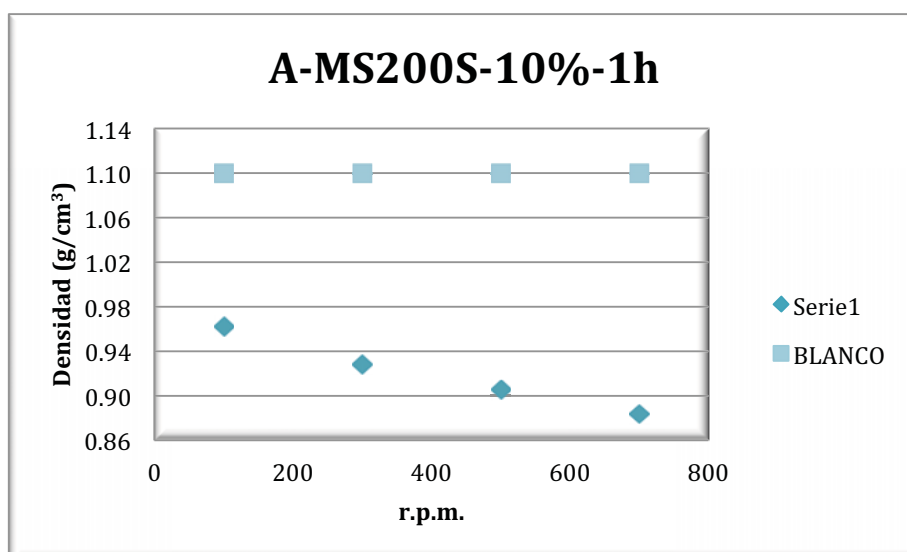
- A mayor tiempo de mezclado, manteniendo la concentración de SBS y/o micro-esfera y la velocidad de agitación constantes, no hay efecto alguno en el índice de penetración.

#### 5.4.- Resultados de densidad

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de densidad hechos para los lotes 2 y 4. En la Tabla 37, así como en la Figura 35, se muestran tanto los valores como el comportamiento de la densidad de los materiales hechos en el lote 2.

**Tabla 37.** Densidad de los materiales hechos en el lote 2.

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	
Muestra	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
a	0.96
b	0.93
c	0.91
d	0.88



**Figura 35.** Comportamiento de la densidad de los materiales hechos en el lote 2.

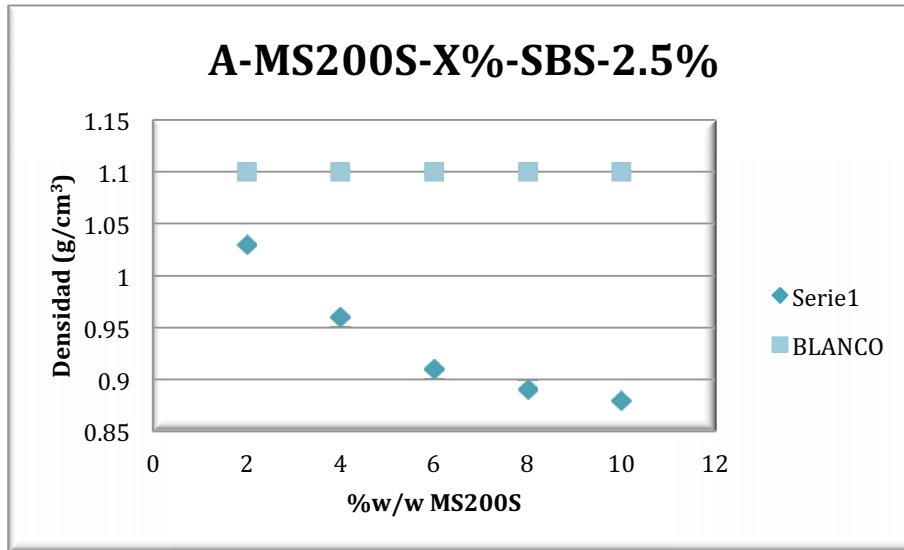
En lo que confiere al comportamiento de la densidad de los materiales sintetizados en el lote 2, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio al 10% w/w, se tiene un decremento gradual de la densidad del material conforme se incrementa la velocidad de agitación. Lo anterior es importante dado que nos permite observar cómo es que actúa la velocidad de giro en éste tipo de mezclas, siendo un factor importante a la hora de buscar una menor densidad por parte de los materiales. Cabe destacar que la densidad decrece debido a una mayor compenetración de la micro-esfera de óxido de silicio con el asfalto conforme crece la velocidad de giro. Finalmente se ha podido constatar que aumentar la velocidad de giro en cierta proporción para la producción de mezclas de asfalto con concentraciones altas de micro-esfera de óxido de silicio, aminora la densidad de los materiales sintetizados.

A continuación se muestran la Tabla 38, así como la Figura 36, en las cuales se pueden observar tanto los valores como el comportamiento de la densidad de los materiales hechos en el lote 4.

**Tabla 38.** Densidad de los materiales hechos en el lote 4.

<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	
<b>Muestra</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>a</b>	1.03
<b>b</b>	0.96
<b>c</b>	0.91
<b>d</b>	0.89
<b>e</b>	0.88





**Figura 36.** Comportamiento de la densidad de los materiales hechos en el lote 4.

En lo que al comportamiento de la densidad de los materiales sintetizados en el lote 4 se refiere, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con polímero SBS al 2.5% w/w y micro-esfera de óxido de silicio a diferentes concentraciones, se tiene un decremento gradual de la densidad del material conforme se incrementa la cantidad de micro-esfera. Lo anterior es de importancia dado que permite observar cómo es que actúa la concentración de óxido de silicio en éstas mezclas, siendo un factor importante a la hora de buscar una menor densidad por parte de los materiales. Cabe destacar que la densidad de la mezcla decrece debido a una mayor concentración de micro-esfera de óxido de silicio, la cual posee una densidad muy baja en comparación con la densidad del asfalto ( $1.1 \text{ g/cm}^3$  para el asfalto utilizado en el presente trabajo).

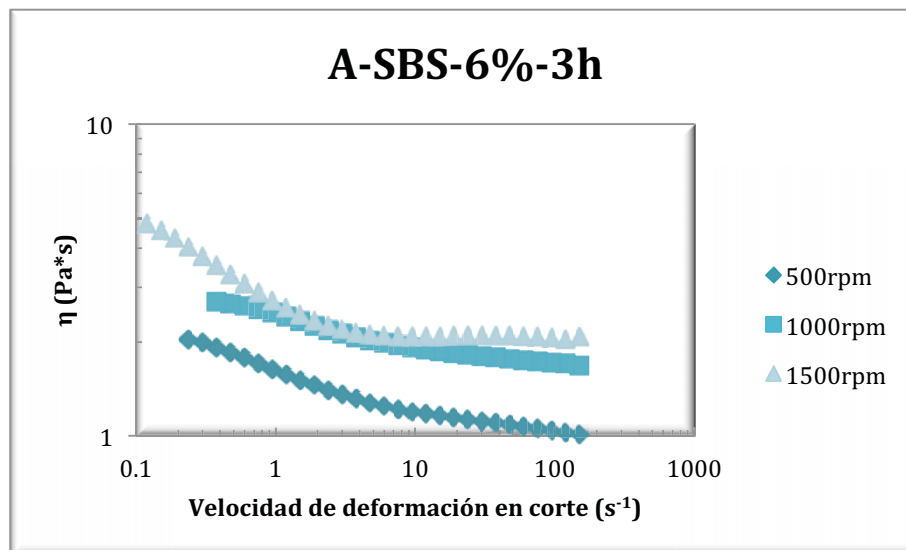
#### 5.4.1.- Conclusión parcial

Con relación a la densidad y analizando las variables para los lotes estudiados, se tienen las siguientes conclusiones:

- A mayor cantidad de micro-esfera en las mezclas, manteniendo la concentración de polímero, la velocidad y el periodo de agitación constantes, disminuye la densidad.
- A mayor velocidad de agitación, manteniendo la concentración de micro-esfera y el periodo de agitación constantes, disminuye la densidad.

### 5.5.- Análisis de viscosidad (reometría a flujo cortante simple)

En éste apartado se muestran los resultados de las pruebas de reometría a flujo cortante simple para los materiales sintetizados. En la Figura 37, se muestra el comportamiento de la viscosidad de los materiales del lote 1.

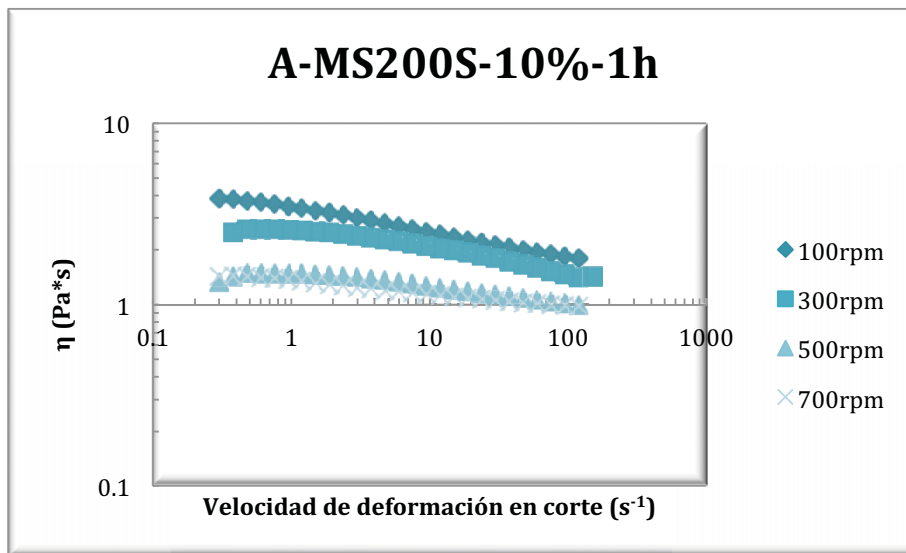


**Figura 37.** Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 1.

En lo que al comportamiento de la viscosidad de los materiales sintetizados en el lote 1 compete, puede observarse claramente que en una mezcla de asfalto con polímero SBS al 6% w/w, se tiene un aumento gradual de la viscosidad en los materiales conforme se incrementa la velocidad de agitación. Lo anterior es importante dado que nos permite observar cómo es que actúa la velocidad de giro en éste tipo de mezclas, siendo un factor importante a la hora de buscar una mayor o menor viscosidad por parte de los materiales sintetizados. Por

otro lado, la Figura 37 permite notar cómo es que la viscosidad de los materiales sintetizados en el presente lote disminuye conforme se ve aumentada la velocidad de deformación en corte. Finalmente se ha podido constatar que añadiendo polímero SBS y aumentando la velocidad de giro a la mezcla, se logra una mayor viscosidad en el asfalto.

A continuación se muestra la Figura 38, en la cual se puede observar el comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 2.

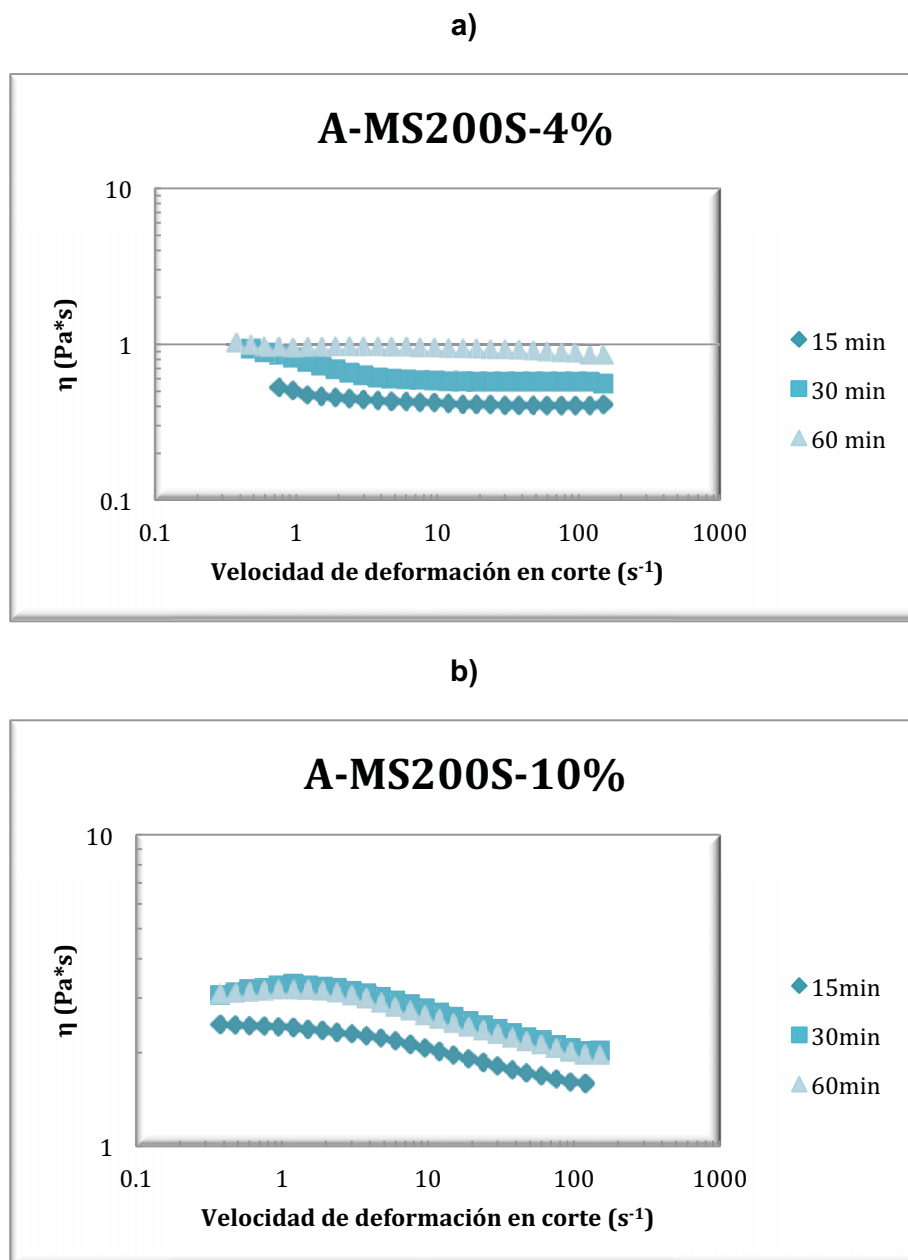


**Figura 38.** Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 2.

En lo que respecta al comportamiento de la viscosidad de los materiales sintetizados en el lote 2, puede notarse que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio al 10% w/w, se tiene una disminución gradual de la viscosidad en los materiales conforme se incrementa la velocidad de agitación. Lo anterior es interesante dado que permite ver cómo es que actúa la velocidad de giro en éste tipo de mezclas, siendo un factor importante a la hora de buscar una menor viscosidad por parte de los materiales sintetizados. Por otro lado, la Figura 38 permite analizar cómo es que la viscosidad de los materiales sintetizados en el presente lote disminuye conforme se ve aumentada la velocidad de deformación en corte. Finalmente se ha podido

constatar que añadiendo micro-esfera de óxido de silicio y aumentando la velocidad de giro a la mezcla, se logra una menor viscosidad en el asfalto.

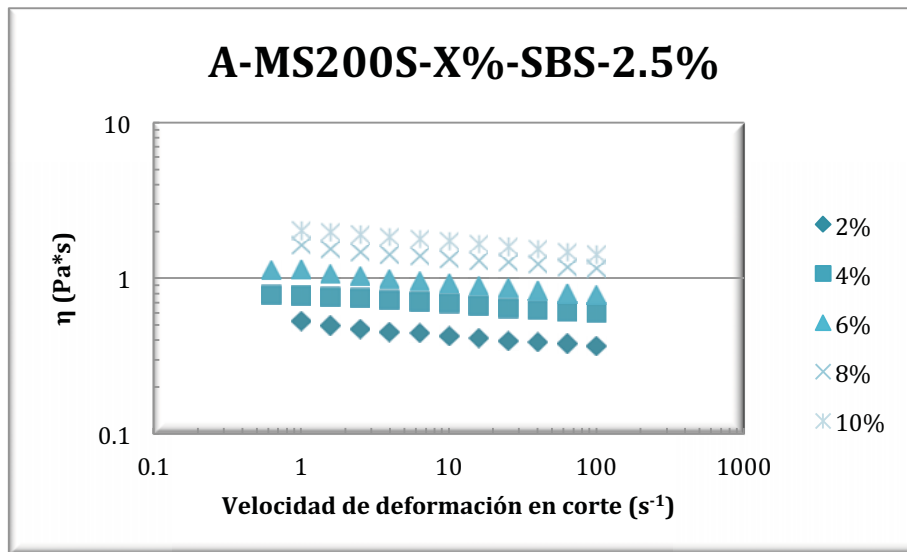
Ahora se muestra la Figura 39, en la cual se puede observar el comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 3.



**Figura 39.** Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 3 para una concentración de **a)** 4% w/w y **b)** 10% w/w de micro-esfera de óxido de silicio.

En lo que confiere al comportamiento de la viscosidad de los materiales sintetizados en el lote 3, puede percibirse claramente que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio a dos concentraciones, se tiene un aumento gradual de la viscosidad en los materiales conforme se incrementa el tiempo de agitación. Lo anterior es significativo dado que nos permite ver cómo es que actúa el tiempo de agitación en éste tipo de mezclas, siendo un factor valioso a la hora de buscar una mayor o menor viscosidad por parte de los materiales sintetizados. Por otro lado, la Figura 39 permite mirar cómo es que la viscosidad de los materiales sintetizados en el presente lote disminuye conforme se ve aumentada la velocidad de deformación en corte. Finalmente se ha podido corroborar que añadiendo micro-esfera de óxido de silicio y aumentando el tiempo de agitación de la mezcla, se logra una mayor viscosidad en el asfalto.

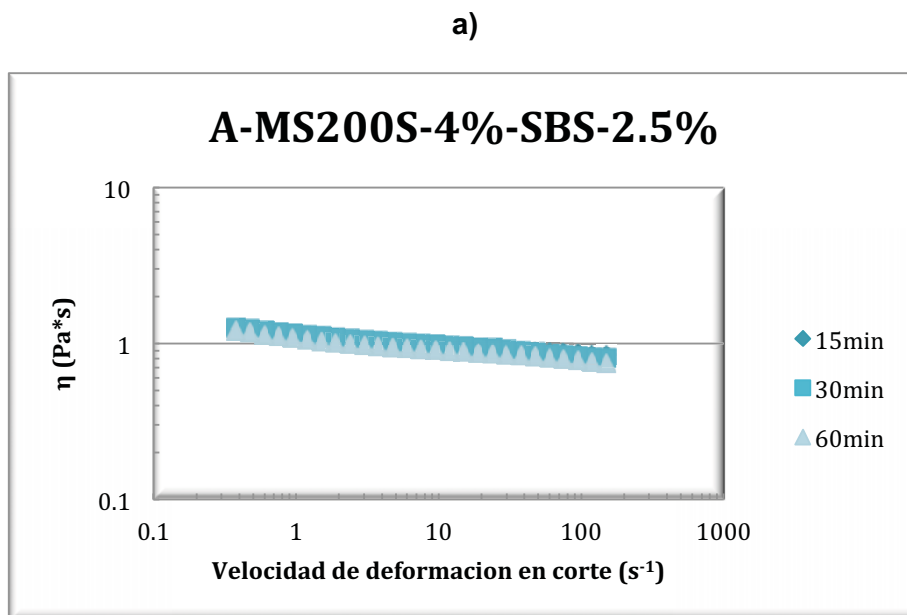
Toca el turno de mostrar la Figura 40, en la cual se puede observar el comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 4.



**Figura 40.** Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 4.

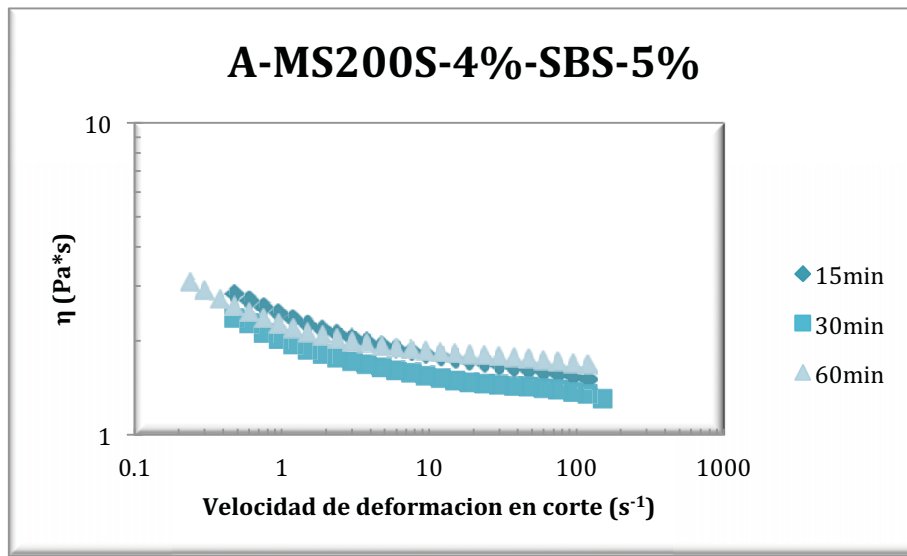
En lo que se refiere al comportamiento de la viscosidad de los materiales sintetizados en el lote 4, puede apreciarse que en una mezcla de asfalto con polímero SBS al 2.5% w/w y micro-esfera de óxido de silicio a diferentes concentraciones, se tiene un aumento gradual de la viscosidad en los materiales conforme se incrementa la cantidad de micro-esfera. Lo anterior es de importancia dado que nos permite observar cómo es que actúa la concentración de óxido de silicio en éstas mezclas, siendo un factor primordial a la hora de considerar la viscosidad de los materiales sintetizados. Por otro lado, la Figura 40 permite contemplar cómo es que la viscosidad de los materiales sintetizados en el presente lote disminuye conforme se ve aumentada la velocidad de deformación en corte. Finalmente se ha podido constatar que altas concentraciones de micro-esfera de óxido de silicio, en combinación con velocidades de deformación en corte bajas, incrementan significativamente la viscosidad de las mezclas asfálticas.

Aquí se muestra la Figura 41, en la cual se puede observar el comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 5.



**Figura 41.** Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 5 para una concentración de **a)** 2.5% w/w y **b)** 5% w/w de polímero SBS.

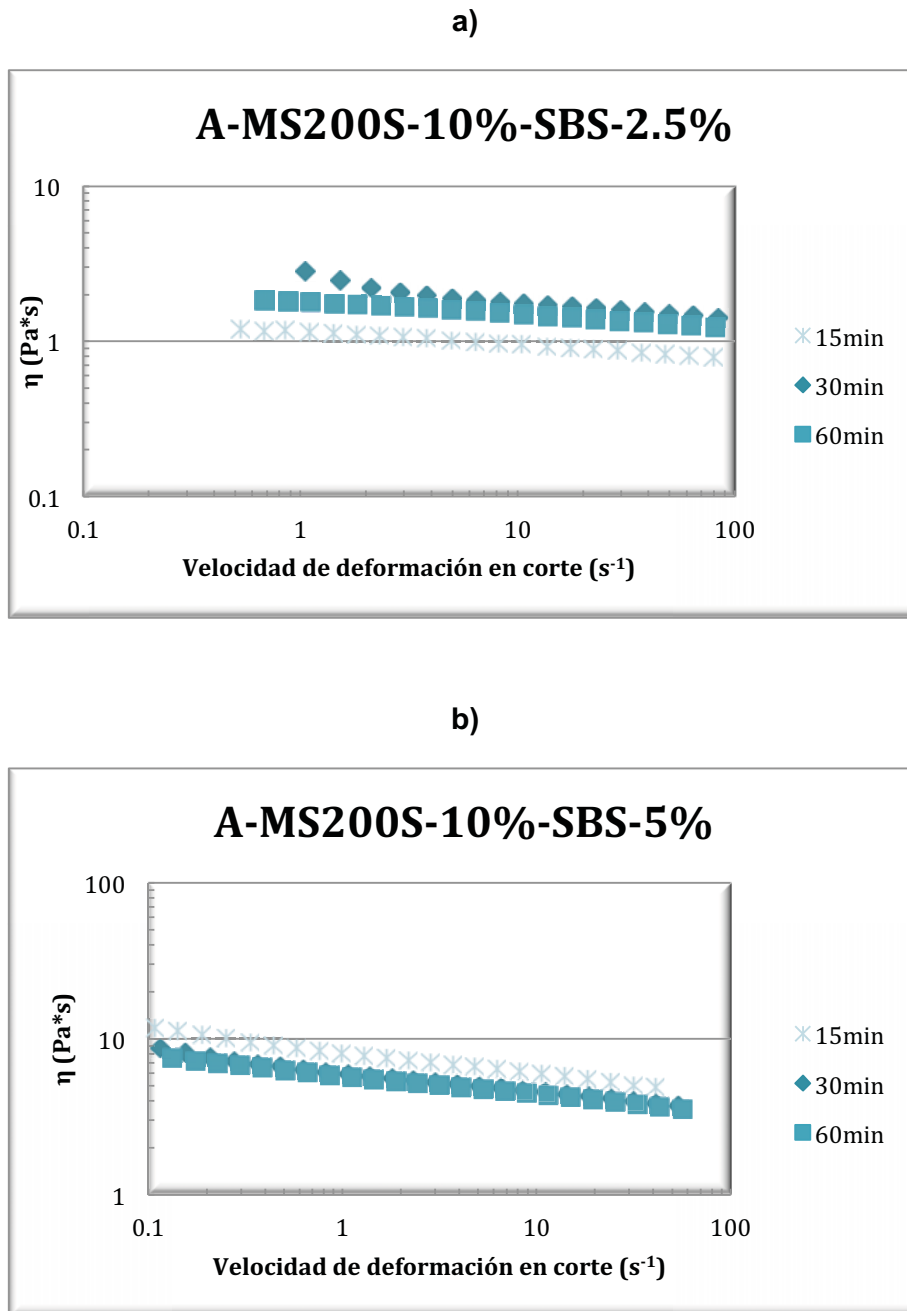
b)



**Figura 41.** Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 5 para una concentración de **a)** 2.5% w/w y **b)** 5% w/w de polímero SBS.

En lo que respecta al comportamiento de la viscosidad de los materiales sintetizados en el lote 5, puede observarse que en una mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio al 4% w/w y polímero SBS a dos concentraciones, se tiene una aparente homogeneidad de la viscosidad en los materiales conforme se incrementa el tiempo de agitación. Lo anterior es significativo dado que nos permite percibir cómo es que actúa el tiempo de mezclado en éste tipo de materiales. Por otro lado, puede observarse que la concentración de SBS afecta de manera sustancial la viscosidad de los materiales; incrementándose la misma conforme mayor es la cantidad de polímero. Cabe destacar que la Figura 41 permite analizar cómo es que la viscosidad de los materiales sintetizados en el presente lote disminuye conforme se ve aumentada la velocidad de deformación en corte. Finalmente se ha podido corroborar que aumentar el tiempo de mezclado de 3.25 a 4 horas, no cambia significativamente los resultados que se tienen de la viscosidad en éstas mezclas; no así el cambio de concentración de SBS, que conforme se ve aumentado, también lo hace la viscosidad.

Por último se muestra la Figura 42, en la cual se puede observar el comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 6.



**Figura 42.** Comportamiento de la viscosidad de los materiales hechos en el lote 6 para una concentración de **a)** 2.5% w/w y **b)** 5% w/w de polímero SBS.

En lo que al comportamiento de la viscosidad de los materiales sintetizados en el lote 6 compete, puede verse claramente que en una mezcla de asfalto con



micro-esfera de óxido de silicio al 10% w/w y polímero SBS a dos concentraciones, se tiene una aparente homogeneidad de la viscosidad en los materiales conforme se incrementa el tiempo de agitación. Esto resulta ser de interés dado que nos permite ver cómo es que actúa el tiempo de mezclado en éstos materiales. Por otro lado, puede apreciarse que la concentración de SBS afecta de manera sustancial la viscosidad de los materiales; incrementándose la misma conforme mayor es la cantidad de polímero. Cabe destacar que la Figura 42 permite denotar cómo es que la viscosidad de los materiales sintetizados en el presente lote disminuye conforme se ve aumentada la velocidad de deformación en corte. Finalmente se ha alcanzado a percibir que aumentar el tiempo de mezclado de 3.25 a 4 horas, no cambia significativamente los resultados que se tienen de la viscosidad en éstas mezclas; no así el cambio de concentración de SBS, que conforme se ve aumentado, también lo hace la viscosidad.

#### **5.5.1.- Conclusión parcial**

Con respecto a la viscosidad, analizando las variables para cada lote, se tienen las siguientes conclusiones:

- A mayor cantidad de polímero en las mezclas, manteniendo la velocidad y el periodo de agitación constantes, aumenta la viscosidad.
- A mayor cantidad de micro-esfera en las mezclas, manteniendo la velocidad y el periodo de agitación constantes, aumenta la viscosidad. Cabe destacar que existe un aumento mayor de la viscosidad al agregar SBS en comparación con la adición de micro-esfera.
- A mayor velocidad de agitación, manteniendo la concentración de SBS y el periodo de agitación constantes, aumenta la viscosidad.
- A mayor velocidad de agitación, manteniendo la concentración de micro-esfera y el periodo de agitación constantes, disminuye la viscosidad.
- A mayor tiempo de mezclado, manteniendo la concentración de SBS y/o micro-esfera y la velocidad de agitación constantes, no hay efecto alguno en la viscosidad de las mezclas.

## **5.6.- Análisis de resultados**

En éste último apartado se pretende hacer un análisis de los resultados presentados con anterioridad; para lograr dicho objetivo se hará una comparación de los tipos de mezcla que se hicieron durante la experimentación del trabajo, tales como fueron:

- Asfalto + Polímero SBS
- Asfalto + Micro-esfera de óxido de silicio
- Asfalto + Micro-esfera de óxido de silicio + Polímero SBS

### **5.6.1.- Análisis de la mezcla de asfalto con polímero SBS**

El presente tipo de mezcla contempla sólo un lote, en el cual se tiene como variable la velocidad de agitación. Dicha variable presenta resultados interesantes dentro de las diferentes pruebas realizadas, los cuales se explican en éste sub-apartado.

En lo que se refiere a la morfología de los materiales obtenidos, puede observarse claramente dentro de la Figura 13, cómo es que se mejora la distribución de las partículas de polímero dentro de la mezcla de asfalto cada vez que se incrementa la velocidad de giro, lo anterior se debe a esfuerzos más grandes al aumentar la agitación en los materiales; del mismo modo, esfuerzos mayores derivan en tamaños más pequeños del polímero, lo que se traduce en un mejor acomodo del SBS.

Por otro lado se han analizado 2 propiedades termo-mecánicas del asfalto, las cuales fueron punto de ablandamiento y penetración de los materiales sintetizados. Para el primer caso se obtuvo una mayor resistencia al ablandamiento por parte del material conforme se producía con una velocidad de agitación más elevada, es decir, soporta una temperatura superior antes de empezar a ablandarse en comparación con el asfalto convencional. Para el caso de la penetración, se encontró que la resistencia del material a ser

penetrado crece conforme se aumenta la velocidad de giro con la cual se producen las mezclas; lo anterior es importante dado que nos permite sintetizar materiales más compactos que sean menos quebradizos. Lo anterior concuerda con las micrografías de éste lote, pues al haber una mejor distribución del polímero en el asfalto, se reduce la penetrabilidad del mismo.

Además de tener el análisis por separado, se obtuvo el índice de penetración de los materiales sintetizados, el cual engloba tanto punto de ablandamiento como penetración de las mezclas realizadas; dicho índice es  $>+1$  para las tres velocidades de agitación evaluadas, lo cual nos indica que en éste lote se tienen materiales poco susceptibles a la temperatura y con cierta elasticidad.

También se analizó una propiedad reológica, la cual es la viscosidad de los materiales sintetizados; para éste caso se obtuvo que conforme se aumenta la velocidad de agitación en una mezcla de asfalto con polímero SBS, también crece de manera sustancial la viscosidad. Es interesante resaltar que a mayor velocidad de giro se tienen partículas de polímero más pequeñas, además de una mejor distribución de las mismas dentro del asfalto, lo cual está estrechamente relacionado con el crecimiento de la viscosidad al aumentar las rpm para la producción de las mezclas. Lo anterior es importante dado que nos permite contemplar el esfuerzo que requiere un material para ser manipulado; por otro lado, se puede decir que una mezcla más viscosa requerirá de una mayor agitación para lograr ser homologada, lo que sugiere un gasto energético superior.

Finalmente se ha podido constatar que el polímero SBS mejora sustancialmente las propiedades termo-mecánicas del asfalto, haciéndolo más resistente al ablandamiento y a la penetración; por otro lado se ha encontrado un ligero inconveniente, el cual es una mayor viscosidad del material, lo cual deriva en un gasto energético más grande para homologar las mezclas. Será conveniente encontrar el punto de equilibrio para sacar el mayor provecho a éstas características.

### **5.6.2.- Análisis de la mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio**

El presente tipo de mezcla contempla 2 lotes, en los cuales se tienen como variables la velocidad de agitación, la concentración de micro-esfera de óxido de silicio y el tiempo de mezclado. Dichas variables presentan resultados interesantes dentro de las diferentes pruebas realizadas, los cuales se explican en éste sub-apartado.

El primer aspecto a analizar para el presente tipo de mezcla es la morfología de los materiales obtenidos, de la cual puede observarse con ayuda de la Figura 14, cómo es que mejora la distribución de las partículas de micro-esfera dentro del asfalto al incrementar el tiempo de mezclado, lo anterior se debe a que el esfuerzo perdura por más tiempo; sin embargo, al presentarse sólo un esfuerzo más prolongado y no uno mayor, no se reduce el tamaño de las partículas de óxido de silicio significativamente.

Por otro lado, se analizaron 2 propiedades termo-mecánicas del asfalto combinado con micro-esfera de óxido de silicio, las cuales fueron punto de ablandamiento y penetración. Para el primer caso se tiene que al aumentar la velocidad de giro en la producción de las mezclas de asfalto modificado con micro-esfera; no cambia de manera significativa la resistencia del material al ablandamiento. Para el efecto de la concentración de micro-esfera de óxido de silicio, se observa un comportamiento positivo, dado que si aumentamos la cantidad de óxido de silicio en las mezclas, el punto de ablandamiento crece. Analizando el tiempo de mezclado se encontró que no afecta drásticamente la resistencia del material a temperaturas superiores. Para el caso de la penetración, se encontró que aumentar la velocidad de agitación, prácticamente no afecta la resistencia del material a ser penetrado; si bien es cierto que una mayor concentración de micro-esfera en las mezclas disminuye un poco su penetrabilidad, también es cierto que éste aumento de la resistencia a ser penetrado no es ampliamente significativo. Del mismo modo, analizando el período de mezclado se encontró que a mayor tiempo de agitación, mejora de manera discreta la penetrabilidad de las muestras sintetizadas. Lo anterior se relaciona con las micrografías obtenidas dado que

al no haber una mejoría significativa en la distribución de las partículas de micro-esfera de óxido de silicio al tener un tiempo de mezclado mayor, tampoco podemos hablar de una resistencia más grande de los materiales a ser penetrados.

Además de tener el análisis por separado, se obtuvo el índice de penetración de los materiales sintetizados, el cual engloba tanto punto de ablandamiento como penetración de las mezclas realizadas; dicho índice es  $>+1$  cuando se varía la velocidad de agitación o cuando se aumenta la concentración de micro-esfera de óxido de silicio en la mezcla asfáltica, lo cual nos indica que en éstos casos se tienen materiales poco susceptibles a la temperatura y con cierta elasticidad. Para el caso de un mayor tiempo de agitación, se tienen valores del índice de penetración entre  $-1$  y  $+1$ , lo cual se ve reflejado en materiales con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricos en resinas y con un comportamiento parcialmente viscoso.

Asimismo, para éste tipo de mezclas se evaluó la densidad de los materiales sintetizados en el lote 2, teniendo como resultado una disminución de la misma al aumentar la velocidad de agitación. Esta variable resulta tener un impacto relativamente estrecho en las densidades de éste tipo de mezclas.

También se analizó la viscosidad de los materiales sintetizados, de un lado se obtuvo que aumentar la velocidad de agitación de las mezclas aminora la viscosidad de los materiales sintetizados. Del otro lado se tiene que la viscosidad aumenta cuando la concentración de micro-esfera de óxido de silicio crece; del mismo modo actúan los materiales al prolongar el periodo de agitación para su producción. Cabe mencionar que el aumento de la viscosidad al cambiar la concentración de micro-esfera es muy significativo.

Finalmente se ha podido constatar que la micro-esfera de óxido de silicio mejora las propiedades termo-mecánicas del asfalto, haciéndolo un poco más resistente al ablandamiento y prácticamente igual de quebradizo; además, se ha encontrado una ventaja, la cual es un decremento de la viscosidad al aumentar la velocidad de giro en las mezclas. Por otro lado, se encontró un

incremento importante de la viscosidad al agregar una mayor concentración de micro-esfera o al alargar el tiempo de mezclado. Lo anterior es importante dado que el hecho de tener una viscosidad elevada deriva en un gasto energético mayor para homologar las mezclas de asfalto modificado. Será conveniente encontrar un punto intermedio para sacar el mayor provecho a éstas características.

### **5.6.3.- Análisis de la mezcla de asfalto con micro-esfera de óxido de silicio y polímero SBS**

El presente tipo de mezcla contempla 3 lotes, en los cuales se tienen como variables la concentración de micro-esfera de óxido de silicio, la concentración de polímero SBS y el tiempo de mezclado. Dichas variables presentaron resultados interesantes dentro de las diferentes pruebas realizadas, los cuales se explican en éste sub-apartado.

En lo que se refiere a la morfología de los materiales obtenidos, pudo observarse claramente dentro de las Figuras 15 y 16 cómo es que se mejora la distribución de las partículas de polímero dentro de la mezcla asfáltica cada vez que se incrementa el periodo de agitación, por otro lado se observó cómo es que el polímero adopta una forma más regular con tendencia a constituir estructuras redondas al prolongarse el tiempo de mezclado, lo anterior se debe a que el esfuerzo tiene una mayor duración. Cabe destacar que en las micrografías tomadas no se aprecia la micro-esfera de óxido de silicio debido a su menor fluorescencia con respecto a la del polímero, por tal motivo no se tiene una idea clara de cómo se comporta, lo único que se deduce es que su interacción en asfaltos modificados con SBS altera la morfología del último.

Por otro lado, se estudiaron 2 propiedades termo-mecánicas del asfalto combinado con micro-esfera de óxido de silicio y polímero SBS, las cuales son punto de ablandamiento y penetración. Para el primer caso se obtuvo que al aumentar el periodo de agitación en la producción de las mezclas de asfalto modificado, la resistencia del material al ablandamiento permanece prácticamente constante. Para el efecto de la concentración de micro-esfera se

observa un comportamiento positivo, dado que si aumentamos la cantidad de óxido de silicio en las muestras, el punto de ablandamiento crece. Analizando el aumento en la concentración de polímero SBS se encontró que incrementa de manera significativa la resistencia del material a ablandarse cuando se tienen altas temperaturas. Para el caso de la penetración, se encontró que aumentar el periodo de agitación prácticamente no afecta la resistencia del material a ser penetrado; también se tiene que un aumento tanto en la concentración de micro-esfera, como en la concentración de SBS en las mezclas, modifica su penetrabilidad, aumentando la resistencia del material a la penetración. Del mismo modo, analizando la cantidad de polímero SBS se encontró que cuanto mayor es, mejora de manera sustancial la penetrabilidad de las muestras sintetizadas, haciéndolas menos fracturables.

Además de tener el análisis por separado, se obtuvo el índice de penetración de los materiales sintetizados, el cual engloba tanto punto de ablandamiento como penetración de las mezclas realizadas; dicho índice es  $>+1$  cuando se aumenta la concentración de micro-esfera de óxido de silicio en la mezcla asfáltica, lo cual indica que en éstos casos se tienen materiales poco susceptibles a la temperatura y con cierta elasticidad. Para el caso de una baja concentración de micro-esfera ( $<2\%$  w/w), se tienen valores del índice de penetración entre  $-1$  y  $+1$ , lo cual se ve reflejado en materiales con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricos en resinas y con un comportamiento parcialmente viscoso.

Asimismo, para éste tipo de mezclas se evaluó la densidad de los materiales sintetizados en el lote 4, teniendo como resultado una disminución de la misma al aumentar la concentración de óxido de silicio. Esta variable resulta tener un impacto amplio en las densidades de éste tipo de mezclas.

También se analizó la viscosidad de los materiales sintetizados, de un lado se obtuvo que aumentar el período de agitación de las mezclas prácticamente no cambia la viscosidad de los materiales sintetizados. Del otro lado se tiene que la viscosidad aumenta cuando la concentración de óxido de silicio o la cantidad de polímero SBS crecen en las muestras. Es importante mencionar que la

micro-esfera afecta de manera importante en la viscosidad de los materiales sintetizados. Lo anterior debe tomarse en consideración a la hora de mezclar los materiales, dado que una mayor viscosidad requerirá una mayor energía para homologar las mezclas.

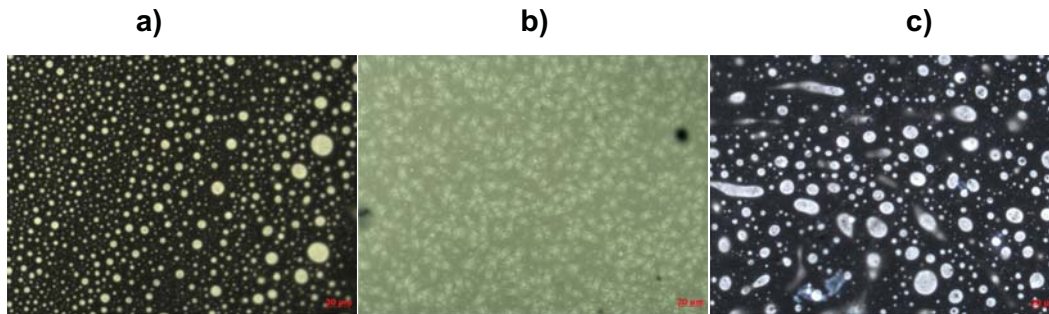
Finalmente se ha podido constatar que la micro-esfera de óxido de silicio en combinación con el polímero SBS, mejoran las propiedades termo-mecánicas del asfalto, haciéndolo más resistente al ablandamiento y a la penetración. Por otro lado se ha encontrado una ligera desventaja, la cual es un incremento en la viscosidad de la mezcla asfáltica al aumentar ya sea la concentración de micro-esfera de óxido de silicio o la cantidad de SBS. Lo anterior es importante dado que el hecho de tener una viscosidad elevada deriva en un gasto energético mayor para homologar las mezclas de asfalto modificado. Será conveniente encontrar un punto intermedio para sacar el mayor provecho a éstas características.

## **6.- Conclusiones**

Las conclusiones del presente trabajo son:

Las micrografías tomadas a las diferentes mezclas muestran una morfología distinta entre ellas; a pesar de eso todos los materiales son bifásicos, destacando el asfalto en un color más oscuro que el polímero SBS o la micro-esfera de óxido de silicio respectivamente. Cabe destacar que a pesar de tener mezclas con 3 componentes, éstas se ven como bifásicas debido a la menor fluorescencia de la micro-esfera con respecto a la del polímero. Es importante mencionar que el polímero forma partículas regulares con tendencia esférica, la micro-esfera forma estructuras irregulares, mientras que la combinación de las anteriores arroja formas de polímero ovaladas, modificadas por la micro-esfera. En la Figura 43 se muestran micrografías en las cuales pueden observarse las diferencias de morfología entre los tres tipos de materiales sintetizados.



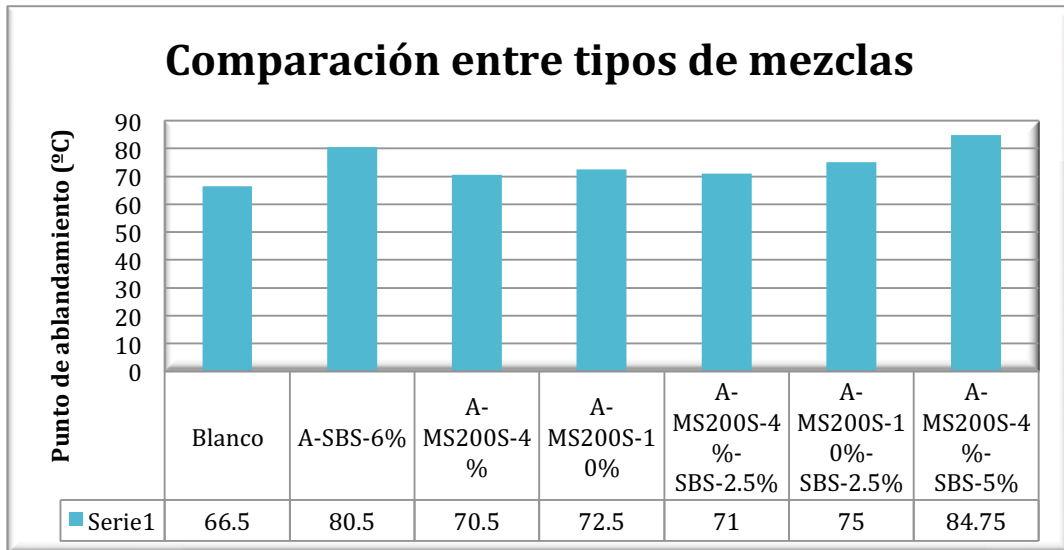


**Figura 43.** Micrografías para mezclas de **a)** Asfalto + polímero SBS **b)** Asfalto + micro-esfera de óxido de silicio y **c)** Asfalto + micro-esfera de óxido de silicio + polímero SBS.

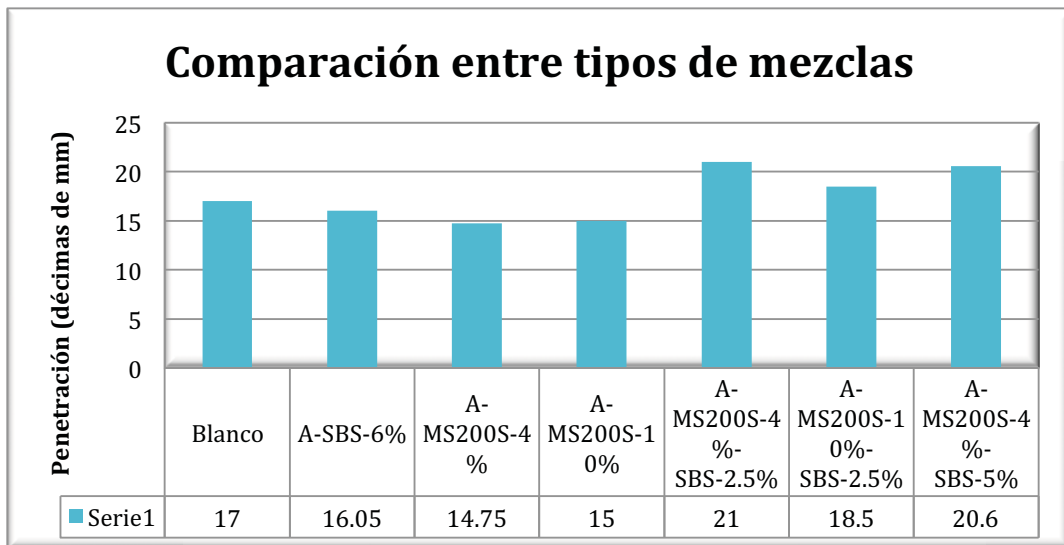
Se obtuvo también que el aumento de la velocidad de agitación mejora la distribución de las partículas ya se de polímero, micro-esfera, o ambas, lo anterior debido a esfuerzos mayores en dichas mezclas. Por otro lado se ha percibido que el tiempo de agitación más prolongado no afecta significativamente la morfología.

Los materiales muestran a la vez mejoras significativas de las propiedades termo-mecánicas del asfalto (punto de ablandamiento y penetración), cuando se agrega polímero a las mezclas para todas las variables evaluadas (velocidad de agitación, concentración de SBS y tiempo de mezclado); siendo la velocidad de giro y la cantidad de SBS las propiedades que más ayudan al mejoramiento del asfalto. De igual modo, al agregar micro-esfera de óxido de silicio, las propiedades termo-mecánicas del asfalto muestran un mayor rendimiento, pero de manera menos importante, haciendo al material más resistente al ablandamiento y a la penetración. Para éste caso la variable que más impacta en el fortalecimiento de la mezcla asfáltica es la concentración de micro-esfera; ya que la velocidad de agitación o el tiempo de mezclado, no juegan un papel importante en éstos materiales. Por último se tiene el caso de la mezcla de asfalto con polímero y micro-esfera, en la cual se combinan los resultados, haciendo un material más resistente al ablandamiento pero con mayor penetrabilidad. Cabe destacar que la modificación de asfalto impacta en mayor medida en puntos de ablandamiento que en penetración, la cual prácticamente no mejora, y en algunos casos, se ve afectada. En las Figuras

44 y 45 se muestran comparaciones de las propiedades termo-mecánicas antes mencionadas, éstas comparaciones se llevan a cabo entre distintos materiales.



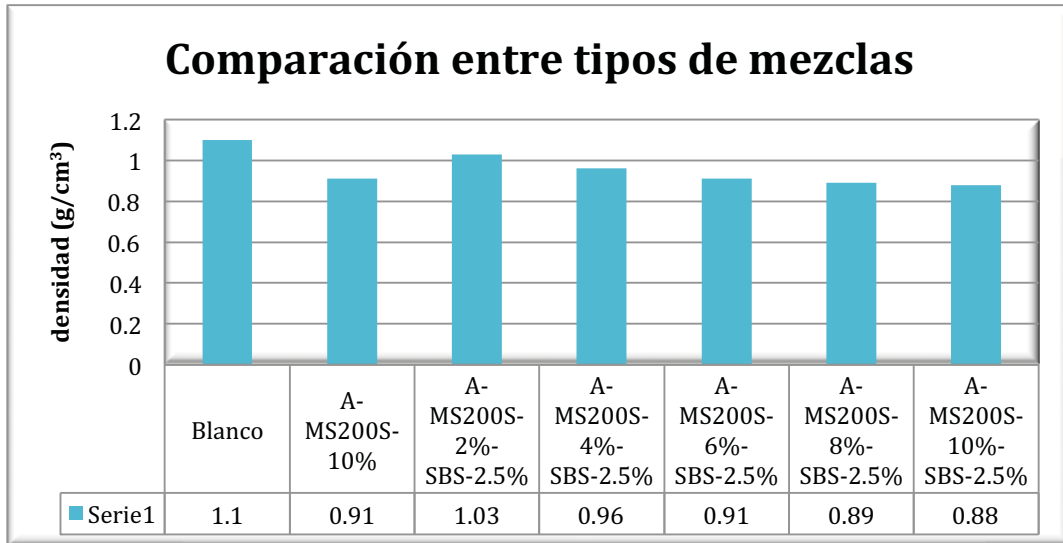
**Figura 44.** Comparación del punto de ablandamiento para diferentes tipos de mezclas.



**Figura 45.** Comparación de la penetración para diferentes tipos de mezclas.

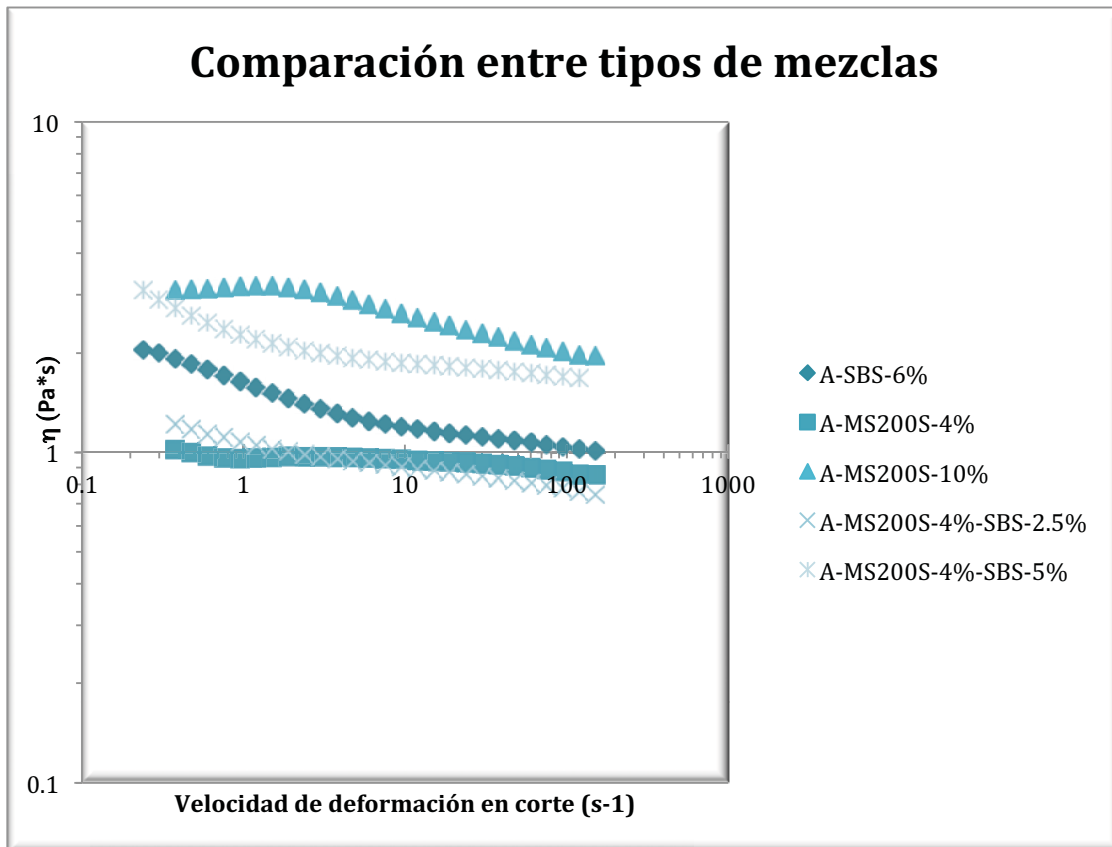
También se encontró que la densidad del material se reduce al agregar microesfera de óxido de silicio, tanto al aumentar la velocidad de agitación como

incrementando la concentración de micro-esfera; lo anterior resulta interesante en la búsqueda de materiales más ligeros que puedan servir en la impermeabilización y pavimentación. En la Figura 46 se muestran comparaciones de la densidad entre distintos tipos de materiales.



**Figura 46.** Comparación de la densidad para diferentes tipos de mezclas.

Asimismo se evaluó la función viscosidad de las distintas mezclas, por un lado se tiene que el polímero SBS hace a los materiales sintetizados ligeramente más viscosos, además de otorgarles un comportamiento adelgazante (no newtoniano) significativo. Por otro lado se tiene que la micro-esfera aumenta drásticamente la viscosidad de las mezclas de asfalto modificado, aunque les otorga un comportamiento adelgazante menor. Si bien es cierto que ambos materiales aumentan la viscosidad, se ha visto que la micro-esfera de óxido de silicio afecta de manera sustancial a la misma, convirtiendo al asfalto en un material mayormente viscoso cuando se tienen concentraciones de óxido de silicio altas. Por otro lado se pudo observar que el polímero SBS no impacta tanto en la viscosidad; sin embargo, otorga un comportamiento adelgazante importante a las mezclas. En la Figura 47 se muestran comparaciones de la viscosidad entre distintos tipos de materiales, en las cuales se pueden visualizar de mejor modo las afirmaciones antes mencionadas.



**Figura 47.** Comparación de la viscosidad para diferentes tipos de mezclas.

Finalmente se tiene que cada material presenta ciertas ventajas, por un lado el polímero SBS mejora en mayor medida las propiedades termo-mecánicas del asfalto y al mismo tiempo no impacta tanto en la viscosidad del mismo; por otro lado se tiene que la micro-esfera de óxido de silicio reduce la densidad de las mezclas asfálticas y hace al material comportarse como un fluido newtoniano. Será cuestión de encontrar la cantidad exacta de uno y de otro para tener el material con las características deseadas.

### 7.- Sugerencias para trabajos posteriores en la línea de investigación

Debido a que no se llevó a cabo un análisis de imagen de las micrografías tomadas con el microscopio de fluorescencia, no se cuenta con un estudio cuantitativo de la distribución de partículas de polímero SBS o de micro-esfera dentro de la mezcla asfáltica; será conveniente llevar a cabo dicho análisis para

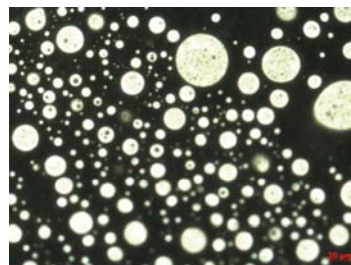
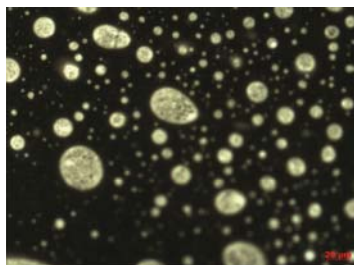
saber la medida en la cual la velocidad de agitación y el tiempo de mezclado actúan en la morfología y el tamaño de partícula de los materiales sintetizados.

Por otro lado, debido a que en el lote 3 se presentan problemas a la hora de determinar el punto de ablandamiento para un tiempo de 3 horas y media, será conveniente repetir esa corrida para saber cuál es el comportamiento de la resistencia al ablandamiento cuando se cambia de manera sustancial la concentración de micro-esfera de óxido de silicio. Lo anterior permitirá analizar de mejor manera cuál es el efecto que tiene la micro-esfera dentro de la mezcla asfáltica a la hora de modificar sus propiedades termo-mecánicas.

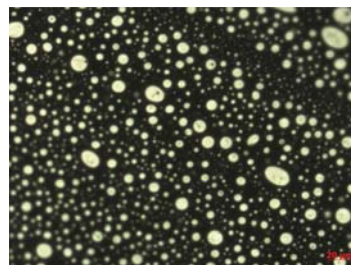
Además, deberá estudiarse a detalle cómo es que afectan las concentraciones de polímero SBS y de micro-esfera de óxido de silicio en las propiedades analizadas en éste trabajo, con lo anterior se podrá determinar la cantidad exacta que se requiera agregar en la mezcla asfáltica para conseguir características específicas en los materiales sintetizados. Si bien es cierto que mayores concentraciones del co-polímero SBS o de la micro-esfera de óxido de silicio mejoran las propiedades termo-mecánicas del asfalto, al tiempo de disminuir su densidad, también es cierto que altas cantidades de éstas sustancias tienen un impacto importante en el aumento de la viscosidad.

Finalmente se sugiere un estudio más amplio de las propiedades reológicas de los materiales sintetizados, dado que en el presente trabajo sólo se observa cómo es que aumenta o disminuye la viscosidad al agregar polímero SBS o micro-esfera de óxido de silicio. Entre las propiedades que se podrían medir se encuentran los módulos almacenamiento ( $G'$ ) y pérdida ( $G''$ ) en corte, el módulo complejo ( $|G^*|$ ), el ángulo de fase ( $\delta$ ) y la función viscosidad ( $\eta$ ).

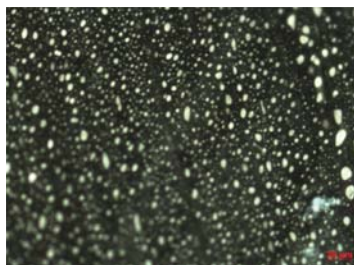
## 8.- Anexos



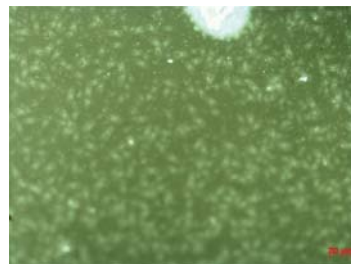
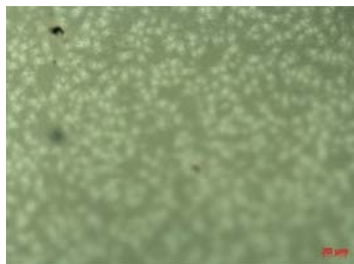
**Figura 48.** Anexo de micrografías del material A-SBS-6%-500 rpm, lote 1.



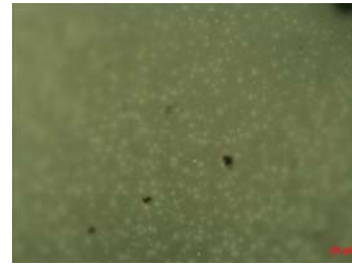
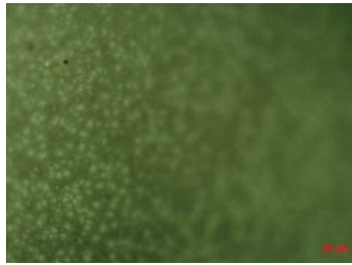
**Figura 49.** Anexo de micrografías del material A-SBS-6%-1000 rpm, lote 1.



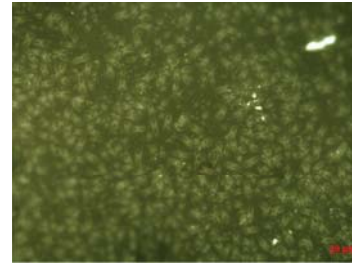
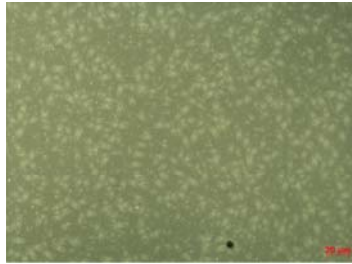
**Figura 50.** Anexo de micrografías del material A-SBS-6%-1500 rpm, lote 1.



**Figura 51.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-3.25 h, lote 3.



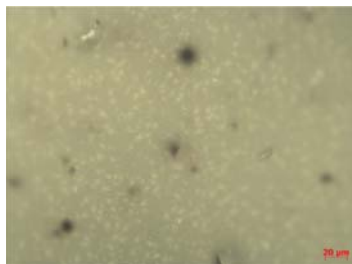
**Figura 52.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-3.5 h, lote 3.



**Figura 53.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-4 h, lote 3.

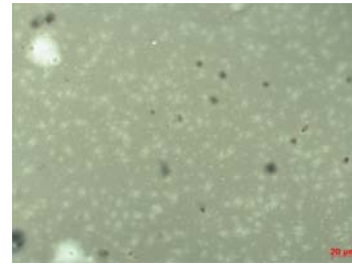
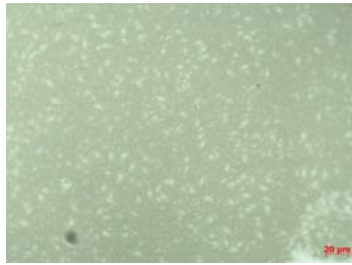


**Figura 54.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-3.25 h, lote 3.

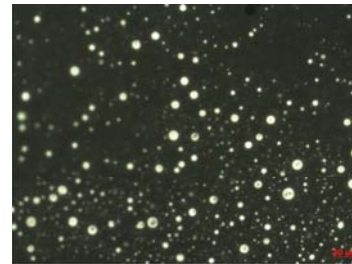
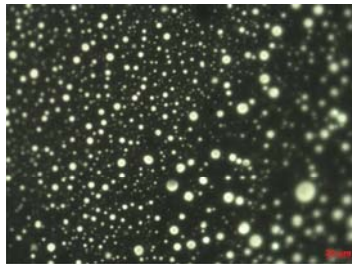


**Figura 55.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-3.5 h, lote 3.

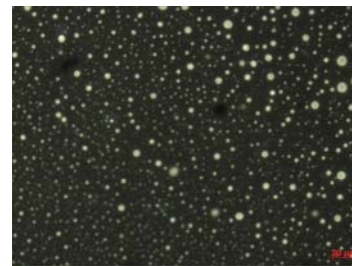
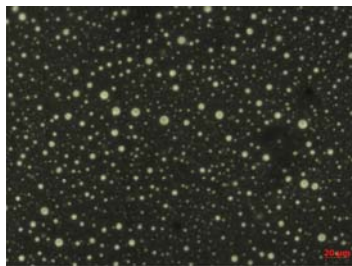




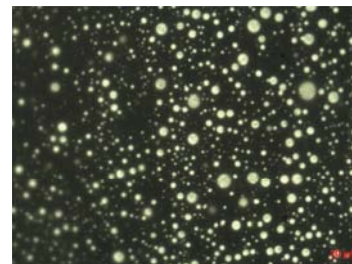
**Figura 56.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-4 h, lote 3.



**Figura 57.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-2.5%-3.25 h, lote 5.

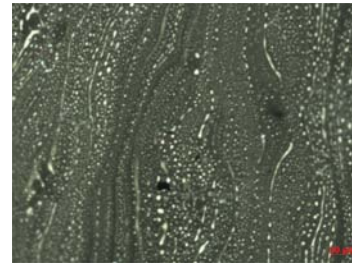
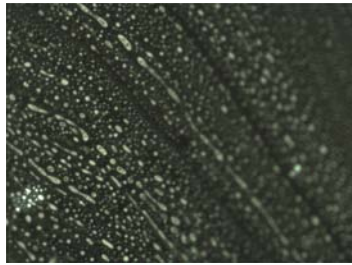


**Figura 58.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-2.5%-3.5 h, lote 5.

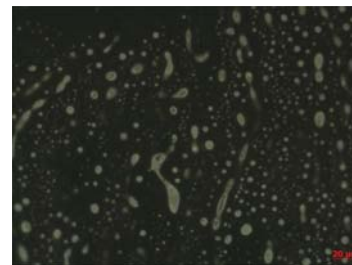


**Figura 59.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-2.5%-4 h, lote 5.

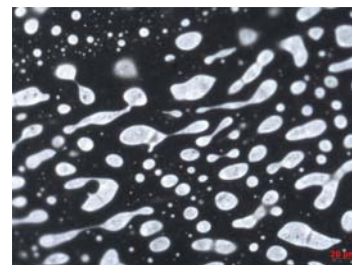




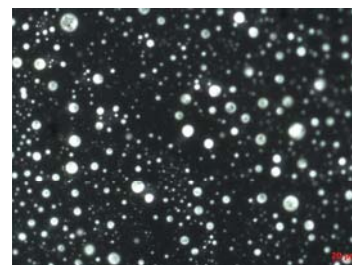
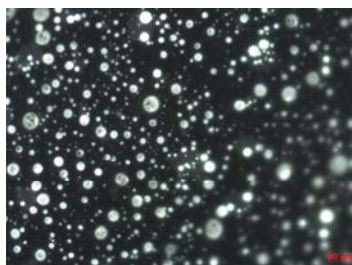
**Figura 60.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-5%-3.25 h, lote 5.



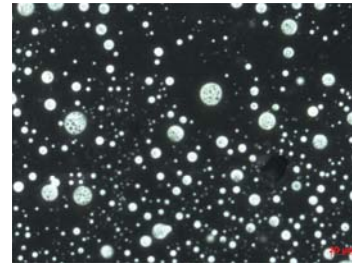
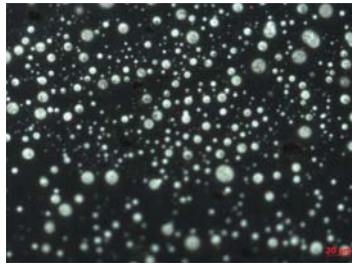
**Figura 61.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-5%-3.5 h, lote 5.



**Figura 62.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-4%-SBS-5%-4 h, lote 5.



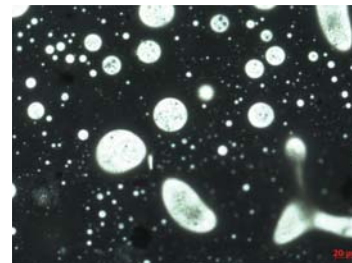
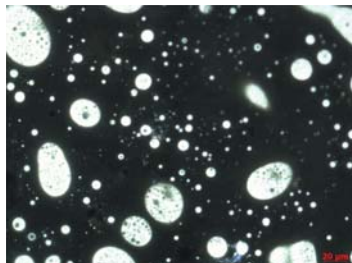
**Figura 63.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-2.5%-3.25 h, lote 6.



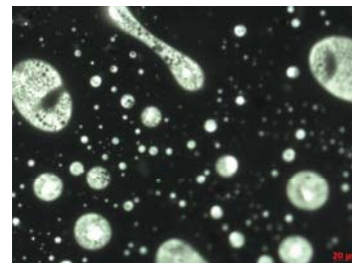
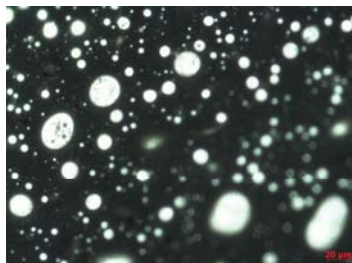
**Figura 64.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-2.5%-3.5 h, lote 6.



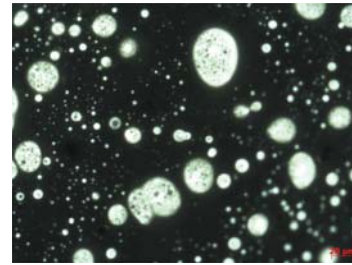
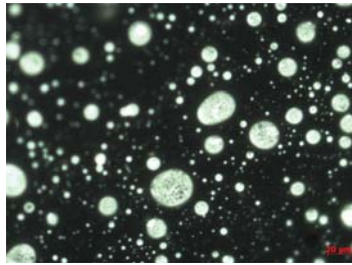
**Figura 65.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-2.5%-4 h, lote 6.



**Figura 66.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-5%-3.25 h, lote 6.



**Figura 67.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-5%-3.5 h, lote 6.



**Figura 68.** Anexo de micrografías del material A-MS200S-10%-SBS-5%-4 h, lote 6.

**Tabla 39.** Lista de precios de los componentes [29].

Componente	Precio
Asfalto (Ton)	9600 pesos
SBS (Ton)	3600 USD
MS200S (Ton)	8840 pesos

# Solprene® 416

## DESCRIPCIÓN:

Solprene 416 es un copolímero termoplástico con bloques de estireno-butadieno, radial, con 30% de estireno total, la mayor parte de él formando un bloque de poliestireno que proporciona al polímero un comportamiento termoplástico. Este grado desarrolla propiedades de caucho vulcanizado sin requerir del proceso de vulcanización.

Está protegido con un sistema de antioxidantes no manchantes, aprobados por FDA, disponible para aplicaciones de contacto con alimentos, esencialmente libre de gel y con un color muy claro.

El Solprene 416 se utiliza como modificador elastomérico para asfalto y plásticos, así como ingrediente en formulaciones de suelas y como base para adhesivos sensibles a la presión.

Este producto se presenta en forma de grumo poroso y ligero de fácil manejo y disolución. Se empaqa en sacos de papel estándar, supersacos y cajas de cartón.

## DATOS TÉCNICOS:

Propiedades del Polímero	Valor Típico	Método Ensayo
Viscosidad en tolueno 5,23%, cSt	11	NM-300-11
Materia volátil, % máx	0,75	ASTM D-5668
Estireno bloque, % mín	28	NM-202-07
Estireno total (sobre polímero), %	30	ASTM D-5775
Gravedad específica	0,94	DIN-53479
Índice de fluidez, g/10' (200 °C, 5 kg)	<0,5	ASTM D-1238
Dureza, °Shore A	78	ASTM D-2240
Carga de rotura, MPa	17	ASTM D-412
Módulo 300%, MPa	2,7	ASTM D-412
Alargamiento, %	800	ASTM D-412

[www.dynasol.com](http://www.dynasol.com)





Febrero, 2004

La información contenida en este documento es propiedad del grupo Dynasol, se permite su compartición e impresión en formato con licencia con el consentimiento escrito de la Empresa.



Figura 69. Hoja técnica del SBS [30].



	<b>FICHA TÉCNICA</b>			Equipo de Seguridad  																															
	Producto: <b>MICROSIL 200 S</b>																																		
IDENTIFICACION: <b>TER - MS200S - 12</b>		AREA DE CONTROL: <b>Departamento de Control de Calidad</b>		Página: <b>1 de 1</b>																															
<p><b>DESCRIPCION:</b> Microsil 200 S es un aluminio-silicato en forma de esfera hueca, recubierto con polímeros especiales para otorgarle gran fluidez y repelencia al agua.</p> <p><b>USOS:</b> Carga Ligera en plásticos, pinturas, cera para autos, impermeabilizantes, explosivos, como agregado ultraligero en la fabricación de paneles de yeso / cemento y todo tipo de compuestos aglutinados ya sean en pastas, geles u otros.</p> <p><b>ESPECIFICACIONES:</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>CARACTERÍSTICA</th> <th>ESPECIFICACION</th> <th>METODO DE PRUEBA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Color</td> <td>Bianco – Blanco Grisáceo</td> <td>Visual</td> </tr> <tr> <td>Densidad Aparente (kg/m<sup>3</sup>)</td> <td>130 ± 30</td> <td>PET-032-TER</td> </tr> <tr> <td>Ph</td> <td>6.8 – 7.5</td> <td>PET-007-TER</td> </tr> <tr> <td>% de Humedad</td> <td>≤ 0.5</td> <td>PI-118</td> </tr> <tr> <td>% de Solubles</td> <td>≤ 0.3</td> <td>PET-031-TER</td> </tr> <tr> <td>% Repelencia</td> <td>&gt; 90</td> <td>PI – 303</td> </tr> <tr> <td>Abs de Aceite (gr aceite /100gr muestra)</td> <td>55 – 65</td> <td>ASTM-D-1463</td> </tr> <tr> <td>% Retenido en malla 50</td> <td>0</td> <td>PI-113</td> </tr> <tr> <td>Tamaño medio de Partícula (micrones)</td> <td>74</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACION	METODO DE PRUEBA	Color	Bianco – Blanco Grisáceo	Visual	Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	130 ± 30	PET-032-TER	Ph	6.8 – 7.5	PET-007-TER	% de Humedad	≤ 0.5	PI-118	% de Solubles	≤ 0.3	PET-031-TER	% Repelencia	> 90	PI – 303	Abs de Aceite (gr aceite /100gr muestra)	55 – 65	ASTM-D-1463	% Retenido en malla 50	0	PI-113	Tamaño medio de Partícula (micrones)	74			
CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACION	METODO DE PRUEBA																																	
Color	Bianco – Blanco Grisáceo	Visual																																	
Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	130 ± 30	PET-032-TER																																	
Ph	6.8 – 7.5	PET-007-TER																																	
% de Humedad	≤ 0.5	PI-118																																	
% de Solubles	≤ 0.3	PET-031-TER																																	
% Repelencia	> 90	PI – 303																																	
Abs de Aceite (gr aceite /100gr muestra)	55 – 65	ASTM-D-1463																																	
% Retenido en malla 50	0	PI-113																																	
Tamaño medio de Partícula (micrones)	74																																		
<p><b>COMPOSICION QUIMICA:</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>COMPUESTO</th> <th>% EN PESO</th> <th>COMPUESTO</th> <th>% EN PESO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Óxido de Silicio (SiO<sub>2</sub>)</td> <td>79.92</td> <td>Óxido de Magnesio (MgO)</td> <td>0.24</td> </tr> <tr> <td>Óxido de Aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</td> <td>11.6</td> <td>Óxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>)</td> <td>0.14</td> </tr> <tr> <td>Óxido de Potasio (K<sub>2</sub>O)</td> <td>4.68</td> <td>Óxido de Zirconio (ZrO<sub>2</sub>)</td> <td>0.08</td> </tr> <tr> <td>Óxido de Sodio (Na<sub>2</sub>O)</td> <td>1.51</td> <td>Óxido de Estroncio (SrO)</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>Óxido de Hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</td> <td>1.16</td> <td>Óxido de Plomo (PbO)</td> <td>≤ 0.02</td> </tr> <tr> <td>Óxido de Calcio (CaO)</td> <td>0.64</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>La composición química que se reporta se determinó mediante Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X.</p> <p><b>RECOMENDACIONES DE MEZCLADO:</b> Mezcle vía húmeda utilizando un agitador apropiado que minimice la ruptura de la partícula.</p> <p><b>PRECAUCIONES:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>En caso de contacto con la piel o después de usarlo, lívese con agua corriente.</li> <li>En caso de contacto con los ojos lívese de inmediato con agua corriente por un mínimo de 15 minutos y después consulte a su médico.</li> <li>Para evitar la respiración de polvos use una mascarilla apropiada.</li> <li>Lea la Hoja de Seguridad para más información.</li> </ol>						COMPUESTO	% EN PESO	COMPUESTO	% EN PESO	Óxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	79.92	Óxido de Magnesio (MgO)	0.24	Óxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	11.6	Óxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> )	0.14	Óxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)	4.68	Óxido de Zirconio (ZrO <sub>2</sub> )	0.08	Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)	1.51	Óxido de Estroncio (SrO)	0.01	Óxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.16	Óxido de Plomo (PbO)	≤ 0.02	Óxido de Calcio (CaO)	0.64				
COMPUESTO	% EN PESO	COMPUESTO	% EN PESO																																
Óxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> )	79.92	Óxido de Magnesio (MgO)	0.24																																
Óxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	11.6	Óxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> )	0.14																																
Óxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)	4.68	Óxido de Zirconio (ZrO <sub>2</sub> )	0.08																																
Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)	1.51	Óxido de Estroncio (SrO)	0.01																																
Óxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.16	Óxido de Plomo (PbO)	≤ 0.02																																
Óxido de Calcio (CaO)	0.64																																		
No. Documento: <b>TER - MS200 - 12</b>		Elaboró: <b>Control de Calidad</b>	Fecha: <b>Enero 2012</b>	Revisó: <b>Nestor Hinojosa</b>																															

TERMOLITA, Callejón del Marmol 201 Santa Catarina, N.L., México C.P. 66350  
Tel: 52 (81) 8151 0480

**Figura 70.** Hoja técnica del Microsil 200S [31].

## 9.- Referencias Bibliográficas

- 1.- Gonzaga Pérez, Miriam, *“Efecto de la relación asfaltenos/maltenos sobre las propiedades de asfalto modificado con SBS”*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM. México. 2007.
- 2.- Vargas X., Afanasjeva N., Álvarez M., Marchal P., Choplin L., *“Evolución del comportamiento viscoelástico del asfalto inducida bajo termo-oxidación in situ en un reo-reactor”*. Dyna, Año 75, No. 155, pp. 191-198. Medellín, 2008.
- 3.- The American Society for Testing and Materials, *“Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements”*. ASTM D 8, 1991.
- 4.- Speight James G., *“Handbook of Petroleum Product Analysis”*. 2002. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc. pp 336.
- 5.- González García, Esteban Alberto, *“Estudio de la modificación de asfalto con polímeros parcialmente hidrogenados y azufre”*. Tesis de Maestría, Facultad de Química, UNAM. México. 2012.
- 6.- Coatl Lorenzo, Alejandra, *“Estudio de propiedades termomecánicas de mezclas asfalto-hule de llanta”*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM. México. 2013.
- 7.- Apéaz Herrera, Luis Alberto, *“Estudio del comportamiento termo-mecánico de asfaltos modelo modificados con un polímero lineal dibloque del tipo SB”*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM. México. 2007.
- 8.- Subiaga A., Cuattrocchio A., *“Partes fundamentales y reología de asfaltos para uso vial”*. LEMaC Centro de Investigaciones Viales, UTN Regional La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- 9.- The American Society for Testing and Materials, *“Standard Test Methods for Separation of Asphalt into Four Fractions”*. ASTM D 4124, 1986.
- 10.- [http://www.repsol.com/pe\\_es/productos\\_y\\_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion/](http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion/) página consultada el 05/08/13 a las 17:35
- 11.- The Asphalt Institute, *“Manual del asfalto”*. Velázquez, Manuel (traductor). 4ª reimpresión. 1973. España. Ediciones Urmo. pp 21-370.
- 12.- Olivos Peralta, Eliot Uriel, *“Estudio del efecto de las condiciones de producción sobre la morfología y propiedades reológicas de asfalto modificado con polímeros de estireno y butadieno del tipo SBS”*. Estancia Académica de Investigación, Facultad de Química, UNAM. México. 2013.

- 13.- Wulf Rodríguez, Fernando Andrés, *"Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero"*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 2008.
- 14.- Whitten K., Davis R., Peck M., Stanley G., *"Química"*. 8ª edición. 2008. México. Cengage Learning. pp 1024.
- 15.- Arias L., Joscowicz P., Rojas I., Villegas C., Escobar J. M., Colina E., *"Asfalto Venezolano modificado con polímero SBS"*. INVEAS, PVDSA INTEVEP, urbanización Santa Rosa, sector El Tambor, Los Teques, Edo. Miranda, Venezuela.
- 16.- Emery S. J., O'Connell J., *"Development of a high performance SBS modified binder for production"*. 7<sup>th</sup> Conf. Asphalt Pavements Southern Africa, Victoria Falls, Zimbabwe.
- 17.- Figueroa Infante A. S., Fonseca Santanilla E.B., Reyes Lizcano F. A., *"Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado"*. Ing. Univ. Bogotá, Colombia. 13(1): 45-70. Enero-junio 2009.
- 18.- Hanyu A., Ueno S., Kasahara A., Saito K., *"Effect of the morphology of SBS modified asphalt on mechanical properties of binder and mixture"*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 1153-1167, 2005.
- 19.- Rochow E. G., *"Química inorgánica descriptiva"*. 1981. España. Ed. Reverté. pp. 120
- 20.- Masaguer Fernández J. R., Paz Andrade I. *"Curso de química inorgánica"*. 1ª edición. 1977. España. Ed. Alhambra. pp. 152, 274-276
- 21.- Moreno Pastor J. A., *"Análisis de óxidos de silicio y estructuras multicapa para aplicaciones microelectrónicas"*. 2000. Departament D Electrònica, Facultat de Física, Universitat de Barcelona, Barcelona, España. pp IV.3
- 22.- Ficha técnica del Microsil 200S. Departamento de control de calidad, Termolita. México. 2012.
- 23.- González Aguirre, Paola Beatriz, *"Morfología y comportamiento reológico de mezclas de maltenos/polímero y asfalto/polímero preparadas con polímeros ramificados tipo SBS parcialmente hidrogenados"*. Tesis de Doctorado, Facultad de Química, UNAM. México. 2008.

- 24.- The American Society for Testing and Materials, “*Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*”. ASTM D 36, 1989.
- 25.- The American Society for Testing and Materials, “*Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*”. ASTM D 5, 1986.
- 26.- García Guzmán, Gustavo, “*Caracterización de asfaltos modificados con copolímeros tipo SB y SBS puros y parcialmente hidrogenados mediante índice de penetración y morfología*”. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM. México. 2008.
- 27.- Giancoli C. D., “*Física. Principios con aplicaciones*”. 6ª edición. 2006. México. Pearson Educación. pp. 256
- 28.- Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N., “”. 1ª edición. 1992. Barcelona, España. Editorial Reverté. pp. 2-15
- 29.- Grupo editorial noroeste. Gestionan ante PEMEX 1600 m3 de asfalto. Fecha de consulta: Agosto del 2012. Información disponible en:  
<http://www.noroeste.com.mx/publicaciones.php?id=778970>
- 30.- <http://www.dynasolelastomers.com/pdf/span/htSol-0416%20esp%20Feb%2004.pdf> página consultada el 22/08/13 a las 15:30
- 31.- <http://www.termolita.com/portal/> página consultada el 22/08/13 a las 15:42