



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**CARACTERIZACIÓN TERMOMECAÁNICA DE MEZCLAS ASFALTO/HULE DE
LLANTA ESTABILIZADAS CON UN COPOLÍMERO RADIAL DE ESTIRENO-
BUTADIENO.**

TESIS

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

PRESENTA

PATRICIA CRUZ VARGAS



MÉXICO, D.F.

2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Rafael Herrera Nájera**
VOCAL: **Profesor: Ángel Enrique Chávez Castellanos**
SECRETARIO: **Profesor: Rodolfo Ruiz Trejo**
1er. SUPLENTE: **Profesor: Marcos Flores Álamo**
2do. SUPLENTE: **Profesor: Oscar Hernández Meléndez**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Facultad de Química
Conjunto E, Laboratorio 213

ASESOR DEL TEMA:

Ing. Rodolfo Ruiz Trejo

SUSTENTANTE:

Patricia Cruz Vargas

CONTENIDO

Capítulos

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos particulares	3
3. ANTECEDENTES	4
3.1 Asfaltos	4
3.1.1 Definición	4
3.1.2 Clasificación de los asfaltos por su origen	4
3.1.3 Características generales.....	4
3.1.4 Composición.....	5
3.1.5 Aplicaciones	8
3.1.6 Clasificación mexicana de los asfaltos	9
3.2 Polímeros.....	10
3.2.1 Definición	10
3.2.2 Clasificación de los polímeros.....	11
3.3 Hule de llanta	16
3.3.1 Composición de las llantas.....	16
3.3.2 Reciclado de neumáticos	20
3.4 Asfaltos modificados	22
3.4.1 Ventajas	23
3.4.2 Asfaltos modificados con polímeros	24
3.4.3 Asfaltos modificados con hule de llanta	27
3.5 Técnicas de caracterización del asfalto	28

3.5.1 Prueba de temperatura de ablandamiento (Norma ASTM D 36)	28
3.5.2 Prueba de penetración (Norma ASTM D 5)	29
3.6 Prueba de estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas	31
3.7 Microscopía de fluorescencia	31
3.8 Índice de penetración	32
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	34
4.1 Sustancias, materiales y equipo empleados	34
4.2 Preparación del blanco (asfalto sin modificar sometido a tratamiento térmico)	36
4.3 Modificación de asfaltos	38
4.4 Prueba de temperatura de ablandamiento	40
4.5 Prueba de penetración	41
4.6 Prueba de estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas	42
4.7 Microscopía de fluorescencia	43
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	44
5.1 Resultados	44
5.1.1 Prueba de temperatura de ablandamiento	44
5.1.2 Prueba de penetración	48
5.1.3 Prueba de estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas	52
5.1.4 Índice de penetración	58
5.1.5 Microscopía de fluorescencia	63
5.2 Análisis de resultados	69
6. CONCLUSIONES	72
7. REFERENCIAS	74

ANEXO I. NORMAS ASTM	78
Norma ASTM D 36	78
Norma ASTM D 5	82
Norma ASTM D 8	85
ANEXO II. HOJA TÉCNICA DEL COPOLÍMERO VECTOR 2411®	89

Figuras

Figura 1. Representación esquemática del método SARA.	6
Figura 2. Monómero de estireno y su polímero, poliestireno.....	10
Figura 3. Clasificación de los polímeros por su composición de monómero: (a) homopolímeros, (b) copolímeros aleatorios, (c) copolímeros alternados, (d) copolímeros de bloque, (e) copolímeros injertados.....	12
Figura 4. Clasificación de los polímeros por su estructura: (a) lineales, (b) ramificados, (c) entrecruzados.	13
Figura 5. Molécula del cis-1,4-poliisopreno, NR.....	16
Figura 6. Molécula del caucho de estireno-butadieno, SBR.....	17
Figura 7. Reacción de vulcanización del cis-1,4-poliisopreno.	18
Figura 8. Dimensiones del anillo (mm) para prueba de temperatura de ablandamiento.....	29
Figura 9. Arreglo para prueba de temperatura de ablandamiento.....	29
Figura 10. Prueba de penetración.....	30
Figura 11. Aguja para prueba de penetración.	30
Figura 12. Equipo para la modificación de asfaltos.....	37
Figura 13. Charola para prueba de penetración.....	41
Figura 14. Tubo para prueba de segregación.	43

Microscopías

Figura MIC 1. Muestras de asfalto modificado con hule de llanta: (a) 5H, (b) 15H y (c) 20H.	64
--	----

Figura MIC 2. Muestras de asfalto modificado con Vector 2411®: (a) V0.5, (b) V1.0 y (c) V2.0.....	65
Figura MIC 3. Muestras de asfalto modificado con 5% de hule de llanta y Vector 2411®: (a) 5H/V0.5, (b) 5H/V1.0 y (c) 5H/V2.0.	66
Figura MIC 4. Muestras de asfalto modificado con 15% de hule de llanta y Vector 2411®: (a) 15H/V0.5, (b) 15H/V1.0 y (c) 15H/V2.0.	67
Figura MIC 5. Muestras de asfalto modificado con 20% de hule de llanta y Vector 2411®: (a) 20H/V0.5, (b) 20H/V1.0 y (c) 20H/V2.0.	68

Gráficas

Prueba de temperatura de ablandamiento

Gráfica TA 1. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/hule de llanta.	45
Gráfica TA 2. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/Vector 2411®.	46
Gráfica TA 3. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.....	47

Prueba de penetración

Gráfica PE 1. Penetración para mezclas asfalto/hule de llanta.....	49
Gráfica PE 2. Penetración para mezclas asfalto/Vector 2411®.....	50
Gráfica PE 3. Penetración para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.....	51

Prueba de estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas

Gráfica PES 1. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/hule de llanta.	53
Gráfica PES 2. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/Vector 2411®.	54
Gráfica PES 3. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/5% hule de llanta/Vector 2411®.....	55

Gráfica PES 4. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/15% hule de llanta/Vector 2411®.....	56
Gráfica PES 5. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/20% hule de llanta/Vector 2411®.....	57

Índice de penetración

Gráfica IP 1. Índice de penetración para mezclas asfalto/hule de llanta.	59
Gráfica IP 2. Índice de penetración para mezclas asfalto/Vector 2411®.	60
Gráfica IP 3. Índice de penetración para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.	62

Tablas

Tabla 1. Composición del asfalto.	5
Tabla 2. Composición porcentual en masa de cada fracción del asfalto.	7
Tabla 3. Clasificación del asfalto según su viscosidad dinámica a 60 °C.....	10
Tabla 4. Composición típica del NR.	17
Tabla 5. Composición típica del SBR.	18
Tabla 6. Composición aproximada de una llanta para vehículos de pasajeros (automóviles) y camiones.....	20
Tabla 7. Niveles de concentración de SBS encontrados en la práctica.	24
Tabla 8. Valores límite del índice de penetración (IP), y características de los asfaltos que presentan dichos valores de IP.	33
Tabla 9. Distribución de tamaño de partícula del hule de llanta.	34
Tabla 10. Características del lote de asfalto AC-20 empleado.....	35
Tabla 11. Masas de asfalto, hule de llanta y Vector 2411® para cada modificación.	39

Tablas de resultados

Prueba de temperatura de ablandamiento

Tabla TA 1. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/hule de llanta.	44
--	----

Tabla TA 2. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/Vector 2411®.	45
Tabla TA 3. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.	47

Prueba de penetración

Tabla PE 1. Penetración para mezclas asfalto/hule de llanta.	48
Tabla PE 2. Penetración para mezclas asfalto/Vector 2411®.	49
Tabla PE 3. Penetración para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.	51

Prueba de estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas

Tabla PES 1. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/hule de llanta.	53
Tabla PES 2. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/Vector 2411®.	54
Tabla PES 3. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/5% hule de llanta/Vector 2411®.	55
Tabla PES 4. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/15% hule de llanta/Vector 2411®.	56
Tabla PES 5. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/20% hule de llanta/Vector 2411®.	57

Índice de penetración

Tabla IP 1. Índice de penetración para mezclas asfalto/hule de llanta.	58
Tabla IP 2. Índice de penetración para mezclas asfalto/Vector 2411®.	60
Tabla IP 3. Índice de penetración para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.	61

RESUMEN

En la presente investigación se estudió el comportamiento termomecánico de sistemas asfalto/hule de llanta estabilizadas con un copolímero radial de estireno-butadieno, Vector 2411[®], para su uso como ligante en carpetas de rodamiento vehicular.

El estudio se realizó a partir de un lote de asfalto AC-20 proveniente de la refinería de Salamanca, Guanajuato, que se modificó por el método de mezclado en caliente con proporciones variables de hule de llanta y copolímero Vector 2411[®], produciéndose tres tipos de mezclas: asfalto/hule de llanta, asfalto/ Vector 2411[®] y asfalto/hule de llanta/ Vector 2411[®].

Los materiales obtenidos se caracterizaron mediante pruebas de penetración, temperatura de ablandamiento, estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas (180 °C) y microscopía de fluorescencia. Adicionalmente, se calculó el índice de penetración con los resultados de temperatura de ablandamiento y penetración.

Globalmente, los resultados mostraron una mejora de las propiedades termomecánicas del asfalto, temperatura de ablandamiento y penetración, con el incremento de las concentraciones en el asfalto de hule de llanta, Vector 2411[®] y la combinación de ambos modificadores, aunque la penetración presentó leves tendencias a incrementarse para algunas de las mezclas (asfalto/Vector 2411[®], asfalto/20% hule de llanta/Vector 2411[®]). Aún con esto último, el índice de penetración mostró una tendencia a aumentar con las concentraciones crecientes de hule de llanta, Vector 2411[®] y la combinación de ambos modificadores, lo que puede interpretarse como materiales con menor susceptibilidad a los cambios de temperatura.

En las pruebas de estabilidad a altas temperaturas, por otro lado, se observa una buena compatibilidad del asfalto con las proporciones estudiadas de Vector 2411[®], y una creciente inestabilidad en las mezclas asfalto/hule de llanta al incrementar las concentraciones del último. No obstante, la adición de las

concentraciones estudiadas de Vector 2411[®] al asfalto modificado con hule de llanta, muestra una estabilización de estas mezclas, obteniéndose el mejor resultado con 1% de Vector 2411[®].

Por último, la prueba de microscopía de fluorescencia permitió la observación de la distribución de los modificadores en el asfalto, presentándolos como una fase luminosa (polímero) en un fondo oscuro (asfalto).

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, aproximadamente el 95% de los asfaltos producidos a nivel mundial se emplean en la construcción de carreteras, en donde fungen principalmente como ligante para los materiales pétreos (1). Sin embargo, el sometimiento del pavimento a esfuerzos tanto térmicos como mecánicos cada vez mayores debido a las variaciones de clima, así como al incremento en el tránsito vehicular, ha provocado el desarrollo de nuevas tecnologías en esta industria, entre las que se encuentra la modificación de asfaltos con diversos materiales, siendo los polímeros los más comunes (1).

Por otro lado, el incremento en el volumen de llantas usadas durante las últimas décadas, y la carencia de mecanismos para su control como desecho, se han convertido en un problema tanto ambiental como de salud para el ser humano, requiriéndose la búsqueda de nuevos métodos para reciclar estos materiales.

El presente trabajo se desarrolló en el Laboratorio 213 del Conjunto E de la Facultad de Química, como complemento a otras investigaciones desarrolladas sobre la modificación de asfaltos con materiales poliméricos. En éste, se estudió el efecto de añadir al asfalto distintas proporciones de dos modificadores: hule de llantas recicladas, y un copolímero radial de estireno-butadieno, Vector 2411®.

La modificación de asfaltos se realizó por el método de mezclado en caliente. Inicialmente, se modificó asfalto AC-20 con 5, 15 y 20% de hule de llanta en peso total de la mezcla. Posteriormente, se utilizó 0.5, 1 y 2 % en peso total de copolímero Vector 2411® para la modificación del cementante. Un tercer lote se obtuvo de la preparación de mezclas con las proporciones de hule previamente mencionadas para este material, modificando a su vez cada una de ellas con los porcentajes de copolímero señalados anteriormente. Además, se sometió una muestra de asfalto sin modificar al mismo tratamiento térmico que el resto de las mezclas con el propósito de realizar una comparación entre muestras con la misma historia térmica.

La caracterización de los materiales obtenidos se realizó a partir de las pruebas termomecánicas temperatura de ablandamiento (ASTM D 36) y

penetración (ASTM D 5). La primera, indica la tendencia que presenta un material a fluir a elevadas temperaturas, mientras que la penetración determina la dureza del mismo. Concluidas estas pruebas, con los resultados se calculó el índice de penetración para cada mezcla, permitiendo la comparación de la susceptibilidad térmica de las muestras a una temperatura determinada de desempeño.

Como complemento a los ensayos mencionados, las muestras de asfalto modificado se sometieron a una prueba de estabilidad de almacenamiento a una temperatura de 180 °C durante 24 horas.

Finalmente, mediante la técnica de microscopía de fluorescencia, se estudió la distribución de los componentes en las mezclas, analizándose la compatibilidad entre los modificadores y el asfalto, además de la efectividad del proceso de mezclado.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Caracterizar mediante pruebas de penetración, temperatura de ablandamiento, estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas y microscopía de fluorescencia sistemas de asfalto/hule de llanta/copolímero Vector 2411[®], preparados por el método de mezclado en caliente, para su uso como ligante en la aplicación de carpetas de rodamiento vehicular.

2.2 Objetivos particulares

- Caracterizar el lote de asfalto AC-20 proveniente de la refinería de Salamanca, Guanajuato.
- Preparar y caracterizar un asfalto de referencia a partir de asfalto AC-20, sometiendo éste al tratamiento térmico que se empleará en las modificaciones.
- Modificar el asfalto AC-20 con tres proporciones de hule de llanta: 5%, 15% y 20% en peso total de la mezcla.
- Modificar el asfalto AC-20 con tres proporciones de un copolímero radial de alto peso molecular de estireno-butadieno (Vector 2411[®]): 0.5%, 1% y 2% en peso total de la mezcla.
- Modificar el asfalto AC-20 con tres proporciones de hule de llanta: 5%, 15% y 20% en peso total de la mezcla. A continuación, modificar cada tipo de mezcla con tres proporciones de copolímero, Vector 2411[®]: 0.5%, 1% y 2% en peso total.
- Caracterizar los materiales obtenidos mediante pruebas de penetración, temperatura de ablandamiento, estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas y microscopía de fluorescencia.

3. ANTECEDENTES

3.1 Asfaltos

3.1.1 Definición

El asfalto es un material aglomerante sólido, semisólido o líquido, de color que varía de pardo oscuro a negro, cuyos constituyentes predominantes son betunes que se dan en la naturaleza como tales, o que se obtienen de la destilación del petróleo (2; 3).

3.1.2 Clasificación de los asfaltos por su origen

De acuerdo a su origen, el asfalto puede ser de tipo natural o derivado del petróleo.

Los asfaltos naturales son aquellos que se dan en la naturaleza por la evaporación de las fracciones más volátiles del petróleo. Este tipo de sustancias puede encontrarse en rocas asfálticas o en yacimientos de lago, como los de Trinidad y Bermúdez en Venezuela.

Por otra parte, los asfaltos derivados son aquellos provenientes de la refinación del petróleo y representan aproximadamente el 90% de los asfaltos totales (4). De la destilación del petróleo puede obtenerse una amplia variedad de tipos y grados de asfaltos que van desde los sólidos duros y quebradizos, hasta líquidos casi tan fluidos como el agua, pero cuyo constituyente básico es el componente semisólido conocido como betún asfáltico.

3.1.3 Características generales

El asfalto es un material aglomerante muy resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero, otorga flexibilidad a los áridos con que se mezcla, además de ser resistente a la mayoría de los álcalis, ácidos y sales (2).

A temperatura ambiente, se encuentra como un líquido muy viscoso o en forma casi sólida, con una densidad que varía entre los 1.01 y 1.4 g/cm³

dependiendo del crudo del que se origina y del grado de pavimentación (1). Presenta una temperatura de transición vítrea alrededor de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, aunque ésta puede variar desde los 5 hasta los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1). Su peso molecular promedio varía entre los 600 y 1500 g/mol , y posee una relación molar hidrógeno carbono $\text{H/C}\approx 1.5$ (1).

3.1.4 Composición

El betún asfáltico se compone mayoritariamente de átomos de carbono e hidrógeno, dando un contenido de hidrocarburos de aproximadamente el 90% en peso total. Adicionalmente, posee en menores cantidades heteroátomos de azufre, nitrógeno y oxígeno, así como trazas de metales como vanadio y níquel. La tabla 1 muestra los porcentajes en peso aproximados de los principales componentes.

Tabla 1. Composición del asfalto. (1)

Componente	Porcentaje en peso (%)
Carbono	80-88
Hidrógeno	8-12
Azufre	0-9
Nitrógeno	0-2
Oxígeno	0-2
Metales (vanadio, níquel)	Trazas

Con la finalidad de obtener un mayor entendimiento acerca de las propiedades del asfalto, las moléculas que lo conforman se han dividido en diferentes familias de acuerdo a su tamaño y solubilidad en disolventes polares, no polares y aromáticos.

Inicialmente, el asfalto puede separarse en maltenos y asfaltenos por precipitación de estos últimos con n-heptano. Los maltenos poseen un peso molecular menor a los asfaltenos y son quienes confieren a las mezclas asfálticas sus propiedades viscosas, mientras que los asfaltenos proporcionan elasticidad. La

descripción de la estructura del asfalto más aceptada es aquella que lo presenta como una dispersión coloidal en la que los asfaltenos forman micelas suspendidas en los maltenos.

A su vez, los maltenos pueden dividirse en tres fracciones. El procedimiento para descomponer el asfalto y obtener en total cuatro grupos: saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos, se conoce comúnmente como método SARA (figura 1), acrónimo formado al tomar la letra inicial de cada uno de los grupos, y se encuentra estandarizado en la norma ASTM D 4124, basada en el análisis de Corbett. La composición química (tabla 2) y características generales de cada fracción se muestran a continuación.

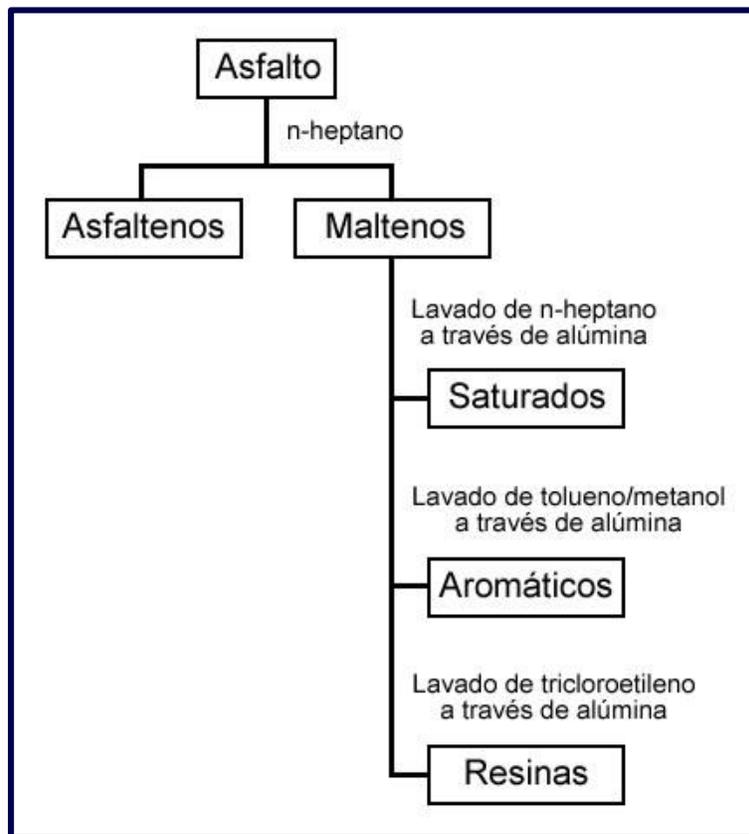


Figura 1. Representación esquemática del método SARA.

Tabla 2. Composición porcentual en masa de cada fracción del asfalto. (1)

Fracción	C (%)	H (%)	S (%)	O (%)	N (%)	PM (g/mol)
Saturados	78-84	12-14	<0.1	<0.1	<0.1	470-880
Aromáticos	80-86	9-13	0-4	0.2	0.4	570-980
Resinas	67-88	9-12	0.4-5	0.3-2	0.2-1	780-1400
Asfaltenos	78-88	7-9	0.3-11	0.3-5	0.6-4	800-3500

Saturados

Se encuentran en forma de un líquido incoloro o ligeramente coloreado a temperatura ambiente debido a su baja temperatura de transición vítrea, comúnmente 40 °C por debajo de la del betún. Poseen un peso molecular entre 470 y 880 g/mol (1). Son principalmente alifáticos, se conforman de algunos n-alcenos lineales, cristalinos; y muy pocos átomos polares y anillos alifáticos. Normalmente constituyen entre el 5 y 20% en peso total del asfalto (5; 6).

Aromáticos

Líquido entre amarillo y rojo a temperatura ambiente, de mayor viscosidad que los saturados debido a su temperatura de transición vítrea de alrededor de -20 °C, similar a la del betún. Tienen un peso molecular entre 570 y 980 g/mol (1). Conformados por moléculas con un esqueleto ligeramente alifático con anillos aromáticos levemente condensados. Son los constituyentes más abundantes, comúnmente representan entre el 40 y 65% del peso total del betún (5; 6).

Resinas

Sólido negro a temperatura ambiente, de composición similar a la de los asfaltenos, pero de menor peso molecular y una estructura aromática menos compleja. Su peso molecular oscila entre los 780 y 1400 g/mol (1). Se encargan de

la estabilización de los asfaltenos en el betún. Generalmente forman entre el 15 y 30% en peso del material (5; 6).

Asfaltenos

A temperatura ambiente, forman un polvo negro responsable del color del asfalto. Son moléculas insolubles en n-heptano que en el betún se asocian como micelas, formando la base de su estructura coloidal. Poseen un peso molecular que va de 800 a 3500 g/mol (1). Contienen más anillos aromáticos condensados y grupos polares que el resto de las moléculas, además de la mayoría de las trazas de los metales presentes en el asfalto. Confieren a éste sus propiedades elásticas, y gracias a los grupos polares, con aromáticos y complejos metálicos, contribuyen en gran manera a la actividad superficial y la adhesión del betún en los agregados minerales. Tradicionalmente forman entre el 5 y 25% del peso total del asfalto (5; 6).

3.1.5 Aplicaciones

En la actualidad, aproximadamente el 95% de los asfaltos producidos a nivel mundial se aplican en la industria del pavimento, en donde son utilizados como aglutinante de los agregados pétreos para formar mezclas asfálticas (1); para ligar diferentes capas de pavimento, o bien estabilizar bases o subbases (7). La resistencia de las mezclas al clima y el tráfico, depende de que el asfalto cumpla con tres principales características (1):

- Ser suficientemente fluido a altas temperaturas (alrededor de 160 °C) para ser bombeable, y permitir un recubrimiento homogéneo de los agregados al mezclarse.
- Ser lo suficientemente rígido a altas temperaturas del pavimento para evitar la formación de roderas (aproximadamente 50 °C dependiendo del clima).

- Permanecer lo suficientemente blando a la temperatura más baja del pavimento para evitar que se quiebre (alrededor de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de acuerdo al clima).

Debido a que las últimas dos propiedades resultan opuestas, y a la dificultad para obtener un material trabajable en todos los tipos de climas, es que existen distintos grados de pavimentos, los más blandos para climas fríos, y los más rígidos para climas calientes. Aunado a esto, con el fin de incrementar el intervalo de temperatura de trabajo del asfalto, se utilizan aditivos tales como polímeros.

Otro de los usos que se da al asfalto es en la impermeabilización de estructuras, techos de pequeñas casas habitación y grandes obras de ingeniería, así como relleno de juntas de los pavimentos de concreto hidráulico. Los asfaltos utilizados con esta finalidad son aquéllos que han sido sometidos a un proceso de aireado a altas temperaturas y se conocen con el nombre de asfaltos soplados u oxidados, obteniéndose del proceso un asfalto con una temperatura de ablandamiento mayor al de los usados para pavimentación.

Adicionalmente, el asfalto puede usarse como relleno de juntas en la construcción de canales, revestimiento de presas, revestimiento para instalaciones de tratamiento de aguas residuales e impermeabilización de cubiertas.

3.1.6 Clasificación mexicana de los asfaltos

Como se mencionó anteriormente, las diversas condiciones de clima y topografías exigen la existencia de varios tipos de asfaltos. En México se manejan básicamente cuatro tipos de estos materiales, clasificados según su viscosidad dinámica a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación del asfalto según su viscosidad dinámica a 60 °C. (7)

Clasificación	Viscosidad a 60 °C (P)
AC-5	500 ± 100
AC-10	1000 ± 200
AC-20	2000 ± 400
AC-30	3000 ± 600

3.2 Polímeros

3.2.1 Definición

Se denomina polímeros a aquellas sustancias formadas de una larga serie de unidades simples repetidas de bajo peso molecular, denominadas monómeros, conectadas por enlaces a través de un proceso denominado polimerización. Cuando en la polimerización se lleva a cabo la unión de pocos monómeros, se obtiene un polímero de bajo peso molecular denominado oligómero, el cual a su vez puede poseer grupos terminales que pueden polimerizarse, generalmente por calentamiento, para formar redes de polímeros (8). La figura 2 muestra un ejemplo de un monómero, estireno, y su correspondiente polímero, poliestireno.

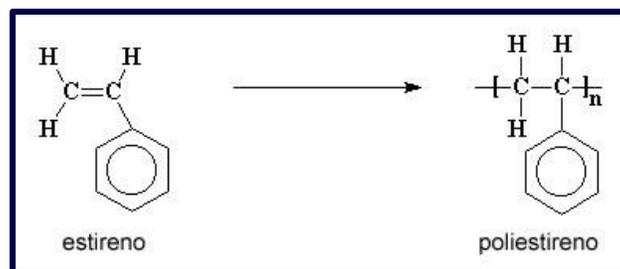


Figura 2. Monómero de estireno y su polímero, poliestireno.

3.2.2 Clasificación de los polímeros

Por su composición de monómero

Se distinguen básicamente dos tipos de polímeros de acuerdo a la cantidad de tipos de monómeros que los forman:

- *Homopolímeros*: Polímeros formados a partir de un mismo monómero (figura 3).
- *Copolímeros*: Son polímeros formados de dos o más unidades repetitivas distintas, como los copolímeros de estireno-butadieno. A su vez se subdividen en (figura 3):
 - a) *Aleatorios*: Polímeros en los que las diferentes unidades repetidas se ordenan de forma aleatoria.
 - b) *Alternados*: Las unidades repetitivas se acomodan de manera alternada.
 - c) *De bloque*: Se forman cuando cadenas con un mismo tipo de unidad repetitiva, se unen con cadenas de otro tipo de unidades, representando cada cadena un bloque, y formando una nueva larga cadena de bloques.
 - d) *Injertados*: Se obtienen cuando un polímero se ramifica de la “columna” de otro (8).

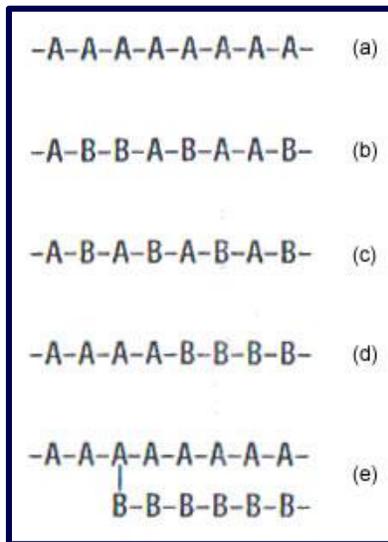


Figura 3. Clasificación de los polímeros por su composición de monómero: (a) homopolímeros, (b) copolímeros aleatorios, (c) copolímeros alternados, (d) copolímeros de bloque, (e) copolímeros injertados. **(8)**

En los polímeros aleatorios y alternados, cada propiedad posee un valor intermedio, mientras que los copolímeros de bloque e injertados presentan las propiedades de ambos homopolímeros (9).

Por estructura de la cadena

Existen tres estructuras base de macromoléculas (figura 4):

- *Lineales*: Surgen cuando la polimerización se da únicamente entre monómeros bifuncionales. Son cadenas largas, flexibles, esencialmente unidimensionales (10). El término lineal, no implica que necesariamente sea ésta la geometría adoptada por el polímero. Si la unidad base que forma a la molécula posee grupos laterales, el polímero no se considera como ramificado (9).
- *Ramificados*: Nacen de la introducción de puntos de tri- o mayor funcionalidad en una cadena lineal. Las ramificaciones poseen una alta influencia en las propiedades debido a efectos estéricos.

- *Entrecruzados*: Al incrementarse la longitud y frecuencia de las ramificaciones, existe una mayor probabilidad de que ocurra una interacción entre una cadena y otra. Al conectarse todas las cadenas entre sí en tres dimensiones, por medio de enlaces covalentes, se forma una molécula de gran tamaño, un polímero entrecruzado. La formación de este tipo de polímeros puede originarse tanto de la reacción de una cantidad suficiente de monómeros con tres o más grupos funcionales, como de la creación química de entrecruzamientos entre moléculas lineales o ramificadas existentes.

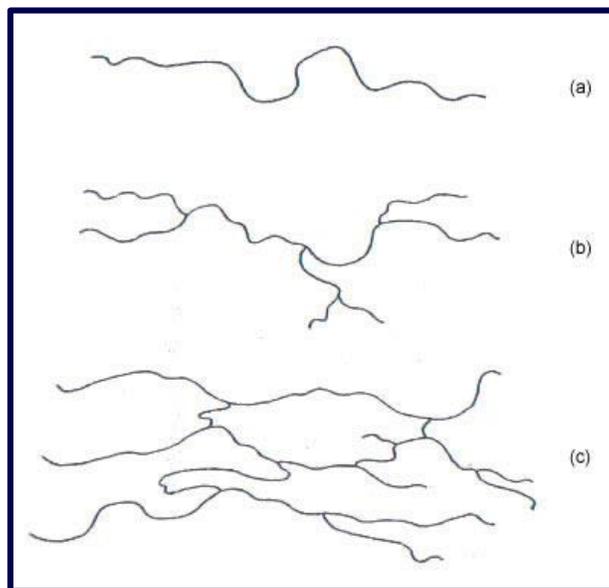


Figura 4. Clasificación de los polímeros por su estructura: (a) lineales, (b) ramificados, (c) entrecruzados. **(8)**

Por su comportamiento al elevar su temperatura

De acuerdo al comportamiento que presentan al ser calentados, los polímeros se clasifican en:

- *Termoplásticos*: Polímeros lineales o ramificados, son suaves y fluyen al calentarse pudiendo moldearse y permanecer en la forma deseada al enfriarse, cualidad que les permite ser reciclados. Pueden además ser disueltos en algunos disolventes.

- *Termofijos (termoestables)*: No se pueden fundir al calentarse debido a su estructura entrecruzada. Son insolubles debido a su alto peso molecular.

Por su mecanismo de polimerización

Por su mecanismo de polimerización, los polímeros se dividen en:

- *Polimerización en etapas*: La construcción del polímero se da por la unión aleatoria de monómeros para formar dímeros, trímeros, etc., en la matriz de monómeros. Posteriormente, las cadenas de polímeros formadas pueden reaccionar entre sí para formar cadenas de mayor tamaño.
- *Polimerización en cadena*: La masa molecular del polímero crece por la unión sucesiva de monómeros al final de una cadena creciente, de forma que la reacción se propaga en un grupo terminal reactivo, y continúa hasta que una terminación lo inactiva, o se termina el monómero. Su mecanismo consta de tres etapas: inicio del crecimiento de la cadena (iniciación), continuación de la expansión de la misma (propagación), y detención del crecimiento (terminación) (9).

Por su aplicación

Según su aplicación, se clasifican en:

- *Plásticos*: Son aquellos polímeros que, al ser sometidos a un esfuerzo intenso, se deforman irreversiblemente no pudiendo retomar su forma original (8). Su amplio desarrollo se ha debido a sus ventajas sobre los metales, entre las que se encuentran un menor peso, mayor resistencia a la corrosión, ser procesados con menores cantidades de energía, y la posibilidad de ser mezclados con aditivos para mejorar sus propiedades. Sus aplicaciones van desde la elaboración de mercancías y productos de la vida diaria, hasta la sustitución de

materiales como el acero, el vidrio y la cerámica en aplicaciones de ingeniería.

Como ejemplos se encuentran el polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP), poli(cloruro de vinilo) (PVC) y poliestireno (PS).

- *Fibras*: Se denomina fibra a toda aquella sustancia con una relación longitud/diámetro de al menos un valor de cien (10). Presentan un alto módulo (rigidez), resistencia y buena estabilidad térmica. Su principal aplicación se da en la industria textil.

Tipos de estos materiales son los celulosos como el rayón, y los no celulosos como el poliéster, nylon, olefinas y acrílicos.

- *Elastómeros*: Materiales que pueden estirarse al menos al doble de su longitud inicial por la aplicación de una fuerza, y retraerse rápidamente a sus dimensiones originales (10); además de ser sometidos fácilmente a grandes alargamientos reversibles a relativamente bajos esfuerzos (11), y recuperarse de las deformaciones sufridas gracias a un cierto grado de entrecruzamiento.

De este tipo de sustancias, los más comunes son los copolímeros de bloque estireno-butadieno (SBR) y de estireno-butadieno-estireno (SBS), producidos en solución por polimerización aniónica. Estas moléculas poseen bloques de polibutadieno, los cuales son segmentos blandos unidos a segmentos duros cristalinos de bloques de poliestireno que se ablandan a altas temperaturas.

- *Adhesivos*: Son sustancias que pueden mantener dos materiales juntos por contacto superficial, lo que resulta del enlazamiento mecánico entre adhesivo y adherente y de enlaces covalentes primarios o enlaces polares secundarios entre ambos (10).

- *Recubrimientos*: Sustancias que se adhieren a una superficie con fines decorativos, o para protección (12). Se clasifican en cinco tipos principales: pinturas al óleo, barnices, esmaltes, lacas, y látex.

3.3 Hule de llanta

3.3.1 Composición de las llantas

Los componentes de una llanta pueden clasificarse en dos grandes grupos: compuestos de caucho y refuerzos textiles y mecánicos.

Compuestos de caucho

El hule de llanta se compone de una mezcla de caucho natural (NR), y un elastómero sintético de estireno-butadieno (SBR), que ofrecen resistencia mecánica y longevidad a la llanta.

El caucho natural proviene de los árboles de *Hevea*, localizados en el suroeste de Asia, Latinoamérica y África. Su molécula es la del cis-1,4-poliisopreno (figura 5):

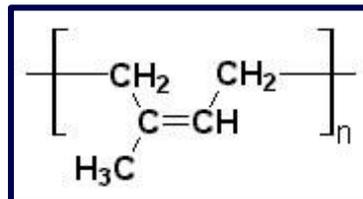


Figura 5. Molécula del cis-1,4-poliisopreno, NR.

La composición típica del NR es la siguiente (tabla 4):

Tabla 4. Composición típica del NR. (13)

Componente	Porcentaje en peso (%)
Sólidos	36.0
Proteínas	1.0-1.5
Resinas	1.0-1.5
Cenizas	<1.0
Azúcares	1.0
Agua	60.0

Los cauchos sintéticos, por otra parte, se producen a partir de hidrocarburos derivados del petróleo. Existe una amplia variedad de polímeros SBR, siendo el más empleado en la industria llantera el conocido como 1712 (10; 13). La estructura simplificada de un elastómero de estireno-butadieno puede presentarse como (figura 6):

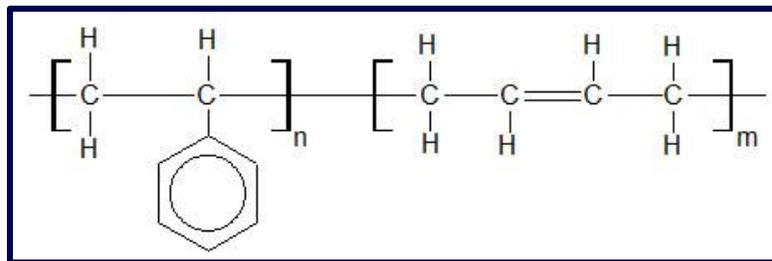


Figura 6. Molécula del caucho de estireno-butadieno, SBR.

La composición típica de los SBR es (tabla 5):

Tabla 5. Composición típica del SBR. (13)

Componente	Porcentaje en peso (%)
Estireno	23.5
Butadieno	76.5
<ul style="list-style-type: none"> • -cis-1,4-polibutadieno 9.0 • -trans-1,4-polibutadieno 76.0 • -1,2-polibutadieno 15.0 	
Contenido de gel	Despreciable

Las masas de caucho resultan en un elastómero termoplástico débil, por lo que se requiere de aditivos y procesos adicionales para mejorar sus propiedades.

La vulcanización es un proceso por el cual se genera una serie de entrecruzamientos químicos en un elastómero mediante calentamiento con azufre (figura 7), con el propósito de convertirlo en un caucho resistente, flexible y tenaz. El mecanismo consiste en la formación de uno o dos enlaces transversales de azufre entre cadenas, y la extracción de protones de cadenas adyacentes para formar H₂S, con las cadenas entrecruzándose con los electrones libres restantes (10).

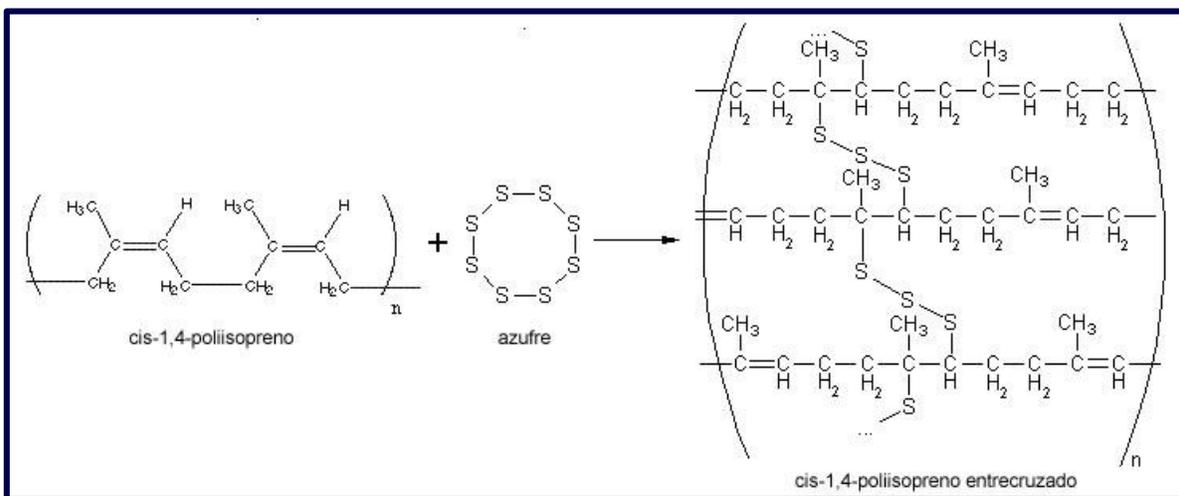


Figura 7. Reacción de vulcanización del cis-1,4-poliisopreno.

El proceso de vulcanización, sin embargo, es bastante lento e ineficiente debido a que normalmente se introducen entre 40 y 50 átomos de azufre por entrecruzamiento, desperdiciándose azufre en la formación de entrecruzamientos de polisulfuros, entrecruzamientos vecinales y estructuras de azufre cíclicas intramoleculares (11). Es por esta razón que en la industria se utiliza una variedad de aditivos conocidos como aceleradores, siendo los más eficaces compuestos orgánicos, en su mayoría derivados del 2-mercaptobenzotiazol (12; 11). Estos a su vez requieren de promotores o activadores, como óxidos básicos, o sales de plomo, calcio, zinc o magnesio, cuya función mejora en presencia de ácidos grasos.

Entre otros aditivos previos a la vulcanización, se encuentran los plastificantes, antioxidantes y refuerzos (rellenos).

Los plastificantes consisten en aceites y resinas, que suavizan al polímero y lo hacen más fácil de procesar.

Los antioxidantes poseen particular importancia en los elastómeros ricos en butadieno e isopreno, pues evitan la degradación por oxígeno y ozono al eliminar la presencia de radicales libres.

Por otra parte, los refuerzos son aditivos que mejoran las propiedades mecánicas de los elastómeros. El refuerzo más importante es el negro de carbón o negro de humo, el cual, como su nombre lo indica, es un compuesto de carbono que al adicionarse constituye entre un 25 y 30% del hule de llanta (14), además de otorgarles su color característico. Este compuesto mejora propiedades tales como la dureza, el módulo y la resistencia a la abrasión. Adicionalmente, retarda la degradación UV y actúa como un material antiestático.

Refuerzos metálicos y textiles

Los refuerzos metálicos y textiles forman la estructura de la llanta, aseguran su geometría y proveen la flexibilidad requerida para el contacto de la llanta con la carretera.

Los refuerzos metálicos están constituidos por cables de acero que se utilizan como reforzamiento de cinturones para llantas radiales, otorgando resistencia y rigidez.

Los refuerzos textiles están elaborados generalmente de cuerdas de poliéster, nylon, rayón, aramida, o una combinación de las anteriores. Estos materiales fortalecen las llantas proporcionándoles resistencia adicional, durabilidad y confort.

En conjunto, la composición aproximada de una llanta es la siguiente (tabla 6):

Tabla 6. Composición aproximada de una llanta para vehículos de pasajeros (automóviles) y camiones. **(15)**

Material	Composición en peso (%)	
	Automóviles	Camiones
Caucho natural	14	27
Caucho sintético	27	14
Negro de humo	28	28
Acero	14-15	14-15
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16-17	16-17
Otras características		
Masa promedio (kg)	8.6	45.4
Volumen (m ³)	0.06	0.36

3.3.2 Reciclado de neumáticos

El amplio desarrollo en la industria automovilística ha traído consigo un incremento significativo en el volumen de llantas usadas durante las últimas décadas. La fabricación de neumáticos con mayor resistencia ha provocado que, una vez desechados, estos objetos sean difíciles de descomponer.

Actualmente, ciudades mexicanas fronterizas como Tijuana, Ciudad Juárez y Mexicali poseen pilas con decenas de miles de llantas provenientes tanto de México como de Estados Unidos (16). Estos tiraderos presentan un gran número de problemas tanto ambientales, como de salud al ser humano. La incorrecta disposición de estos residuos puede llevar consigo, por ejemplo, la generación de incendios en pilas de llantas, los cuales pueden tener una duración de semanas, incluso meses, generando gases densos y vapores altamente tóxicos que afecten la calidad del aire; o la liberación de líquidos que contaminen los mantos acuíferos. Aunado a esto, estos sitios presentan el ambiente perfecto para la crianza de mosquitos, roedores y demás organismos propagadores de enfermedades como malaria, dengue y encefalitis, entre otras.

Aunque se han desarrollado métodos para disminuir el impacto ambiental de estos materiales, en México únicamente el 9% del total de las llantas usadas es reutilizado, mientras que el 91% restante permanece como desecho (17), por lo que resulta urgente el surgimiento de regulaciones y la aplicación de sistemas que ayuden a atenuar el problema.

Las llantas recicladas poseen una variedad de usos, desde la fabricación de objetos de uso cotidiano tales como suelas de zapatos, muebles, mangueras y pinturas, hasta la construcción de áreas para juegos, canchas deportivas, y creación de pavimentos, e inclusive como combustibles en centrales generadoras de energía, proceso conocido como reconversión energética.

El proceso de reciclado de una llanta consiste en moler la misma, recuperando así el caucho del neumático. El tamaño de partícula requerido dependerá del uso final que se dé al material. Este método se denomina proceso mecánico y se desarrolla en cuatro principales pasos (18):

- *Clasificación:* Los neumáticos se dividen por tamaño y composición.
- *Fragmentación:* Las llantas se desmontan y fragmentan en tiras.

- *Eliminación del acero:* Por medio de rotores se tritura el material, y las fibras de acero se separan del caucho con ayuda de imanes.
- *Trituración:* Eliminado el acero, se continúa triturando el material hasta convertirlo en gránulos, pedazos pequeños, migajas o polvo.

Existen mecanismos especiales como el proceso criogénico, en el cual se adiciona a los fragmentos de neumático nitrógeno líquido con el fin de facilitar la trituración y la separación del acero; o el proceso pirolítico, que consiste en calentar las llantas en una atmósfera libre de oxígeno y descomponerlas en aceites, gases y residuos de carbón (18). Una tercera forma de reciclado conlleva la aplicación de una nueva capa de rodadura y una capa lateral, para posteriormente someter la llanta a un nuevo proceso de vulcanización y curado.

3.4 Asfaltos modificados

Los asfaltos modificados surgen de la incorporación de materiales que se añaden para modificar las propiedades físicas del asfalto, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura, humedad y oxidación. Una amplia cantidad de materiales se ha empleado para este fin. De entre ellos, los polímeros elastoméricos han demostrado gran éxito, siendo en particular los copolímeros de estireno y butadieno de un empleo extendido.

De acuerdo a la norma mexicana N-CMT-4-5-002/06 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, los modificadores se dividen en (19):

- *Polímeros tipo I:* Mejoran el comportamiento de los asfaltos tanto a bajas como a altas temperaturas. Estos modificadores lo forman los elastómeros radiales de estireno-butadieno-estireno (SBS), o estireno-butadieno (SBR), entre otros. Se utiliza para carpetas asfálticas de pavimentos con alto índice de tránsito y tráfico pesado, en climas fríos y cálidos, así como para emulsiones utilizadas en tratamientos superficiales.

- *Polímeros tipo II:* Mejoran el comportamiento de asfaltos a bajas temperaturas. Fabricados en base a elastómeros lineales caucho de estireno, butadieno-látex o neopreno-látex. Se utilizan en lugares de climas fríos o templados y para elaborar emulsiones utilizadas en tratamientos superficiales.
- *Polímeros tipo III:* Mejoran el comportamiento del asfalto a altas temperaturas y su resistencia al ahuellamiento. Se basan en polímeros de acetato de etil vinilo (EVA), o polietileno de alta (HDPE) o baja densidad (LDPE), entre otros. Se usan en climas calientes, en carreteras con altos índices de tránsito y para elaborar emulsiones usadas en tratamientos superficiales.
- *Hule molido de neumáticos:* Mejora la flexibilidad del asfalto y su resistencia a la tensión, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o cambios de temperatura. Se obtiene de la molienda de neumáticos.

3.4.1 Ventajas

Entre los cambios favorables que presenta el pavimento al ser modificado con los compuestos mencionados, se encuentran:

- Mayor resistencia a la fatiga.
- Mejora del desempeño a altas temperaturas.
- Disminución de la formación de roderas.
- Mejora de la resistencia a la deformación permanente.
- No se reblandece y a bajas temperaturas no se fractura.
- Reducción de los costos de mantenimiento.

3.4.2 Asfaltos modificados con polímeros

La modificación de asfaltos se ha realizado con polímeros de naturaleza variada, tales como cauchos de estireno-butadieno (SBR), copolímeros de estireno-butadieno-estireno (SBS), polietileno y acetato de etil vinilo (EVA), entre otros. Sin embargo, los materiales que han presentado los resultados más satisfactorios son los copolímeros de estireno-butadieno-estireno debido a que mejoran la resistencia mecánica del asfalto en un amplio intervalo de temperatura.

Los niveles de concentración de polímeros SBS en el asfalto modificado encontrados en la práctica se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Niveles de concentración de SBS encontrados en la práctica. (20)

Porcentaje en peso de SBS (%)	Uso
Menor a 3%	El asfalto domina las propiedades, el beneficio por la modificación es limitado (beneficios similares al SBR).
De 3 a 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%	El SBS domina las propiedades (niveles típicos para sellador de grietas).

La producción de asfaltos modificados por el método de mezclado en caliente consiste en la adición del copolímero al asfalto a una alta temperatura (~180 ° C) y bajo la acción de un esfuerzo cortante durante un periodo de 2 a 4 h. Durante este proceso, la fase asfáltica soluble en el copolímero, es decir, los aceites aromáticos de los maltenos, hinchan los segmentos de polibutadieno del copolímero hasta nueve veces su volumen original. Finalmente, se distinguen dos fases en la mezcla: una constituida por el polímero hinchado con los constituyentes de más bajo peso molecular del asfalto (maltenos), y otra de carácter bituminoso enriquecida con asfaltos sin contener polímero (6). En la fase polimérica, coexisten el

polibutadieno hinchado y dominios de poliestireno puro que actúan como sitios de entrecruzamientos físicos, formándose así una red elástica tridimensional cuya función será absorber gran parte de los esfuerzos a los que será sometido el pavimento (6).

De esta forma, se otorga una mayor resistencia mecánica al asfalto, en donde, a temperaturas bajas, el polibutadieno proporciona elasticidad al material haciéndolo más resistente a las deformaciones y evitando que se quiebre gracias a su baja T_g (alrededor de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Por otro lado, a temperaturas menores a la T_g del poliestireno (aproximadamente $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$), éste forma entrecruzamientos físicos creando una red que dé mayor resistencia y dureza al asfalto; mientras que, a temperaturas mayores de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, los dominios de poliestireno se suavizan y el copolímero fluye permitiendo su mezclado con el asfalto bajo la acción de un esfuerzo cortante.

Los cambios esperados en las propiedades del asfalto son:

- Disminución de la penetración.
- Aumento de la temperatura de ablandamiento.
- Aumento del intervalo de plasticidad.
- Disminución de la fragilidad a baja temperatura.
- Aumento de la viscosidad.
- Disminución de la susceptibilidad térmica.
- Mejora de la adhesividad.
- Incremento de la cohesividad.
- Aumento de la durabilidad.
- Disminución en deterioro por permeabilidad.

La obtención de un material con las propiedades deseadas depende de diversos factores tales como la naturaleza química del asfalto, las características del agente modificador y las condiciones de producción del asfalto modificado.

En lo concerniente a la naturaleza química del asfalto, se requiere que éste sea bajo en asfaltenos, y la cantidad de maltenos sea suficiente para disolver el polímero; sin embargo, la modificación de un asfalto con un contenido demasiado bajo en asfaltenos puede resultar en una mezcla con pobres propiedades viscoelásticas (21).

Las características del material resultante dependen también de las del material modificador: composición, distribución monomérica, morfología y peso molecular, entre otras. Si el peso molecular del modificador, por ejemplo, resulta similar al de los asfaltenos o más alto, se presenta una competencia por la fase malténica soluble y puede darse una separación de fases si no hay muchos maltenos disponibles, lo que se presenta como un índice de la incompatibilidad entre el asfalto y el polímero (5).

Por último, factores de producción como el tiempo, temperatura, velocidad de corte de mezclado y composición de la mezcla (relación modificador/asfalto), resultan cruciales en la calidad del material obtenido debido a que determinan la distribución de los agentes modificadores en el asfalto.

Así, según lo expuesto anteriormente, la mezcla entre el asfalto y un polímero puede resultar en tres materiales distintos (5):

- *Mezcla heterogénea*: El polímero y el asfalto son incompatibles, hay una separación de dos fases en la que el conjunto presenta las características del ligante original (22).
- *Mezcla totalmente homogénea*: El polímero y el asfalto son compatibles, la parte aceitosa solubiliza completamente al polímero formando una mezcla totalmente estable, pero el mejoramiento en las propiedades es pobre, y existen incrementos en la viscosidad no deseados.

- *Mezcla microheterogénea*: Constituida por dos fases finamente entrelazadas, en donde una está formada por el polímero hinchado con la parte aceitosa del asfalto y la otra por las fracciones pesadas del mismo, resinas y asfaltenos. Esta es la compatibilidad deseada.

3.4.3 Asfaltos modificados con hule de llanta

Se define al asfalto ahulado como una mezcla de asfalto, hule de llantas y aditivos, en la cual el hule es al menos 15% del peso total de la mezcla y tiene una interacción con el asfalto suficiente para causar un aumento de volumen en las partículas de hule (3; 23).

La modificación requiere la previa obtención del hule molido, ya sea por el proceso mecánico o criogénico. La posterior incorporación del material en el asfalto puede darse por dos vías:

- *Vía húmeda*: El hule de llanta se mezcla con el asfalto fundido; posteriormente, este asfalto modificado se mezclará con el agregado mineral.
- *Vía seca*: Se utiliza en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente. Consiste en mezclar el hule de llanta con el material pétreo antes de incorporar el asfalto fundido al mezclador (24).

Durante la modificación, el hule de llanta absorbe parte de los maltenos, dejando un gran contenido de asfaltenos, incrementando la elasticidad y la temperatura de ablandamiento del material y disminuyendo la penetración (22). La adición de este compuesto trae además mejoras como:

- Disminución de la susceptibilidad térmica.
- Aumento en la cohesión interna.
- Mejora de la elasticidad y flexibilidad a bajas temperaturas.
- Mejora el comportamiento a la fatiga.

- Aumenta la resistencia al envejecimiento.
- Reduce la deformación permanente.

Al igual que en la modificación con polímeros, la calidad del material obtenido depende de factores como la naturaleza química del asfalto, las características del agente modificador (granulometría del hule, superficie específica, presencia de impurezas) y las condiciones de producción.

3.5 Técnicas de caracterización del asfalto

Las técnicas de caracterización consisten en una serie de ensayos realizados para determinar propiedades específicas de los asfaltos.

A continuación se presenta una descripción de las técnicas empleadas en el presente trabajo.

3.5.1 Prueba de temperatura de ablandamiento (Norma ASTM D 36) (25)

La temperatura de ablandamiento es un indicativo de la tendencia que presenta un material a fluir a elevadas temperaturas.

La prueba consiste en llenar con una muestra de asfalto un anillo de latón de alrededor de 20 mm de diámetro (figura 8), para colocarse en un soporte con un termómetro y dos porta anillos. Posteriormente, en el centro del anillo se coloca una esfera de acero de 9.5 mm de diámetro y una masa de 3.50 ± 0.05 g, y el conjunto se sumerge en un baño que puede ser de agua destilada, glicerina o etilenglicol (figura 9). A continuación, se calienta el baño uniformemente a una velocidad de 5 °C/min, y se registra la temperatura a la cual la película de asfalto contenida en el anillo se deforma verticalmente una longitud de 25 mm debido al peso del balín.

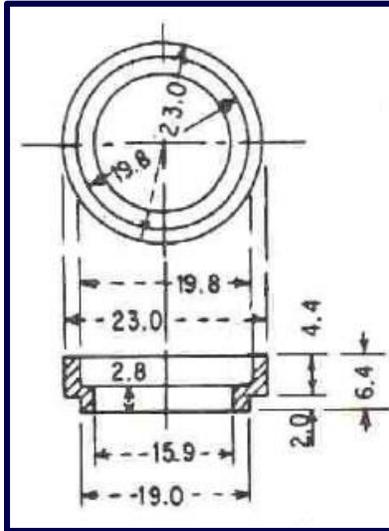


Figura 8. Dimensiones del anillo (mm) para prueba de temperatura de ablandamiento. (25)

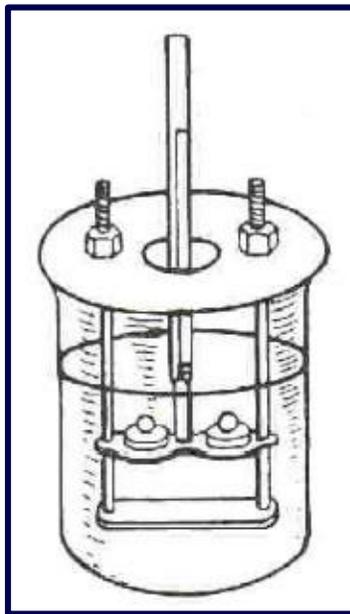


Figura 9. Arreglo para prueba de temperatura de ablandamiento. (25)

3.5.2 Prueba de penetración (Norma ASTM D 5) (26)

La penetración determina la dureza de un material bituminoso, expresada como la distancia en décimas de milímetro que una aguja estándar penetra verticalmente una muestra de material bajo condiciones definidas de carga, tiempo

y temperatura, siendo éstas normalmente de 100 g, 5 s, y 25 °C respectivamente (figura 10). Esta prueba se aplica para materiales con penetraciones entre 0 y 350 (1/10 mm), presentando valores mayores aquellos con una menor dureza.

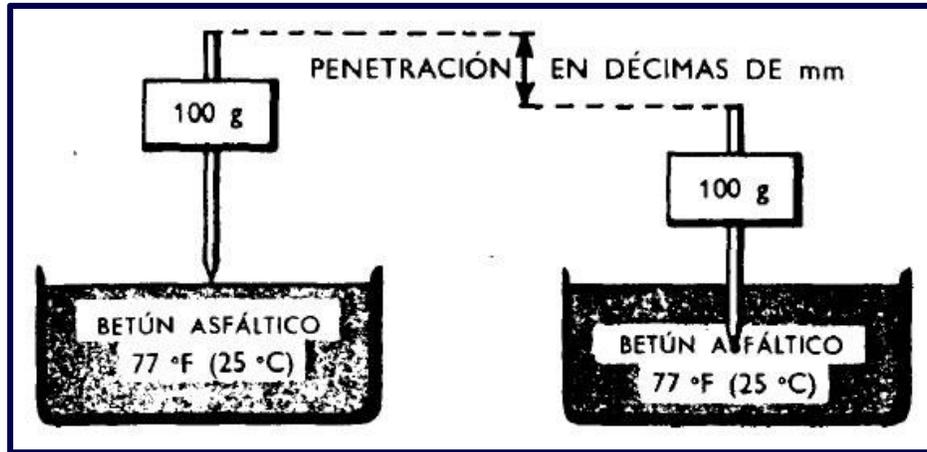


Figura 10. Prueba de penetración. (2)

La medición se lleva a cabo con un aparato de penetración o penetrómetro que permita al huso moverse verticalmente sin que exista una fricción apreciable y con una resolución de hasta 1/10 mm. El peso del huso debe ser de 47.5 ± 0.05 g, sumando un peso con la aguja de 50.0 ± 0.05 g, y finalmente de 100 ± 0.05 g como carga total. La aguja es de acero inoxidable endurecido y templado, con una longitud de 50 mm y un diámetro de entre 1.00 y 1.02 mm (figura 11).

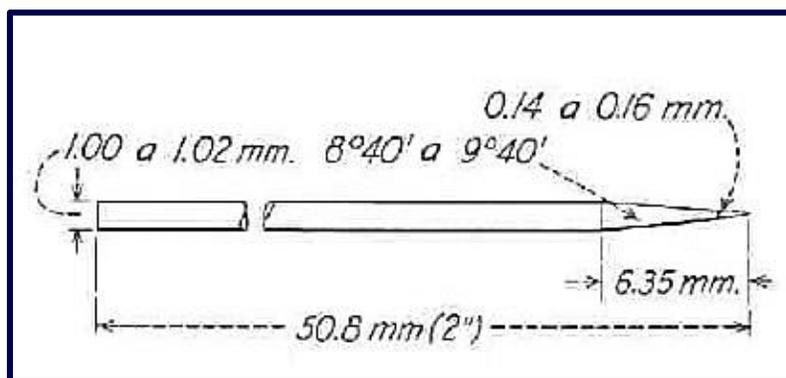


Figura 11. Aguja para prueba de penetración. (26)

3.6 Prueba de estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas

Como se mencionó anteriormente, existe una convivencia entre los asfaltenos y maltenos, en donde ambos componentes son relativamente compatibles entre sí. Sin embargo, esta compatibilidad se ve afectada al adicionar alguno de los modificadores mencionados, pues estos absorben a los maltenos generando una competencia con los asfaltenos por la fase malténica.

La prueba de estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas consiste en someter una muestra de asfalto modificado, en un tubo en posición vertical, a altas temperaturas durante un largo periodo, con la finalidad de determinar la existencia de una separación de los componentes de la mezcla. La formación de más de una fase se puede comprobar mediante la comparación de las temperaturas de ablandamiento de las partes superior e inferior de la muestra tomada del tubo con asfalto modificado (27).

La separación natural entre los componentes del asfalto modificado se acelera con la temperatura llegando a su máxima segregación teórica a 180 °C en 24 h (21).

3.7 Microscopía de fluorescencia

La microscopía de fluorescencia aprovecha la propiedad de algunos átomos y moléculas para absorber luz de una cierta longitud de onda y posteriormente emitir otra luz de una longitud de onda más larga. Esta técnica consiste en aislar la luz de excitación de una lámpara o láser mediante un filtro de excitación, para ser absorbida por el componente capaz de fluorescer, el cual emitirá otra luz que se observará mediante un filtro barrera que bloquea todas las longitudes de onda menores a la de la emisión (28).

De la microscopía de fluorescencia es posible obtener micrografías que se utilizan para determinar la distribución y compatibilidad del polímero y el asfalto. Para ello, se ilumina la muestra con un haz de luz ultravioleta, que es absorbida por el asfalto y reflejada por el polímero como una fluorescencia. El hule de llanta, por

otra parte, al estar compuesto por polímeros, también presenta luminosidad, siendo ésta menor a la del copolímero debido a que uno de sus componentes, el negro de humo, no tiene capacidad de emitir fluorescencia.

3.8 Índice de penetración

En el año de 1936, Pfeiffer y Van Doormal observaron una relación lineal entre el logaritmo de la penetración y la temperatura a la que se realiza el ensayo, en donde la pendiente de la recta puede interpretarse como la susceptibilidad térmica del material.

Con base en relaciones experimentales, y extrapolando valores de penetración, dedujeron que los asfaltos tienen un valor de penetración de 800 (1/10 mm) cuando alcanzan una temperatura a la cual presentan un comportamiento líquido muy viscoso (temperatura de ablandamiento) (29). Al graficar los valores de penetración en escala semilogarítmica vs distintas temperaturas de ensayo, se definió la pendiente de esta curva como la susceptibilidad térmica (A), representada matemáticamente como:

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

En donde PEN_{25} es el valor de la prueba de penetración a temperatura estándar (25 °C), 25 la temperatura estándar a la que se realiza el ensayo de penetración, $\log(800)$ el valor de penetración a la temperatura de ablandamiento, y TA la temperatura de ablandamiento.

Posteriormente, se ajustó la susceptibilidad térmica con un índice de penetración, el cual es un parámetro adimensional que relaciona las pruebas de temperatura de ablandamiento y penetración, y permite comparar la tendencia que presentan diferentes mezclas asfálticas a cambiar sus características en función de la temperatura a la que están expuestas (29).

El índice de penetración (IP) se calcula como:

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

De acuerdo al IP, los asfaltos pueden clasificarse en tres grupos (tabla 8):

Tabla 8. Valores límite del índice de penetración (IP), y características de los asfaltos que presentan dichos valores de IP. **(29)**

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

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Sustancias, materiales y equipo empleados

Sustancias

- Copolímero radial de estireno-butadieno, Vector[®] 2411. Es un copolímero en bloque de estireno-butadieno producido vía polimerización aniónica. Posee un 30% en peso de estireno, y un 12% en peso de contenido de dibloque.
- Hule de llanta comercial obtenido por el proceso mecánico, tamizado con una serie de tamices USA Standard ASTM E 11-61, con la siguiente distribución de tamaño de partícula (tabla 9):

Tabla 9. Distribución de tamaño de partícula del hule de llanta.

USA Standard ASM E 11-61	Cantidad que se retiene en el tamiz (%)	Abertura (mm)
10	0	1.680
18	46.0	1.000
25	27.7	0.707
30	26.3	0.595

- Asfalto AC-20 de la Refinería de Salamanca, Guanajuato con las siguientes características (tabla 10):

Tabla 10. Características del lote de asfalto AC-20 empleado.

Composición Asfaltenos (30) (%) Maltenos	20.8
	79.2
Temperatura de ablandamiento (°C) (ASTM D 36)	51.5
Penetración (1/10 mm) (25 °C, ASTM D 5)	46.2

- Aceite automotriz comercial resistente a la degradación a temperaturas mayores a 200 °C.
- n-heptano QP, Química Barsa S.R.L.
- Etilenglicol QP, Química Barsa S.R.L.

Materiales

- Latas de aluminio de 6 cm de diámetro y 10 cm de profundidad sin tapa ni rebaba.
- Propela de doble hélice.
- Termopar tipo J.
- Vaso de precipitados de 800 mL.
- Anillos estandarizados para prueba de temperatura de ablandamiento.
- Soporte para anillos estandarizados y termómetro para temperatura de ablandamiento.
- Anillo centrador de balín para temperatura de ablandamiento.
- Balines estandarizados para prueba de temperatura de ablandamiento.

- Charolas de aluminio de 5 cm de diámetro y 1.5 cm de profundidad para prueba de penetración.
- Aguja estandarizada para prueba de penetración.
- Tubos de aluminio de 2.2 cm de diámetro y 12 cm de longitud para prueba de segregación.

Equipo

- Balanza analítica.
- Parrilla eléctrica con transformador variable.
- Motor agitador.
- Controlador de temperatura.
- Termómetro digital.
- Penetrómetro universal.
- Parrilla electromagnética con agitación.
- Microscopio de fluorescencia Carl-Zeiss KS 300, equipado con una lámpara de fluorescencia con longitudes de onda de 390-450 nm, con un lente de 20x.

4.2 Preparación del blanco (asfalto sin modificar sometido a tratamiento térmico)

Para realizar una comparación entre muestras con la misma historia térmica, se sometió una muestra de asfalto sin modificar al mismo tratamiento que las modificaciones. El procedimiento utilizado fue el de “mezclado en caliente”, que consiste en lo siguiente:

1. Fundir 150 g de asfalto a 90 °C y verterlos en un recipiente de metal.
2. Montar el equipo mostrado en la figura 12.

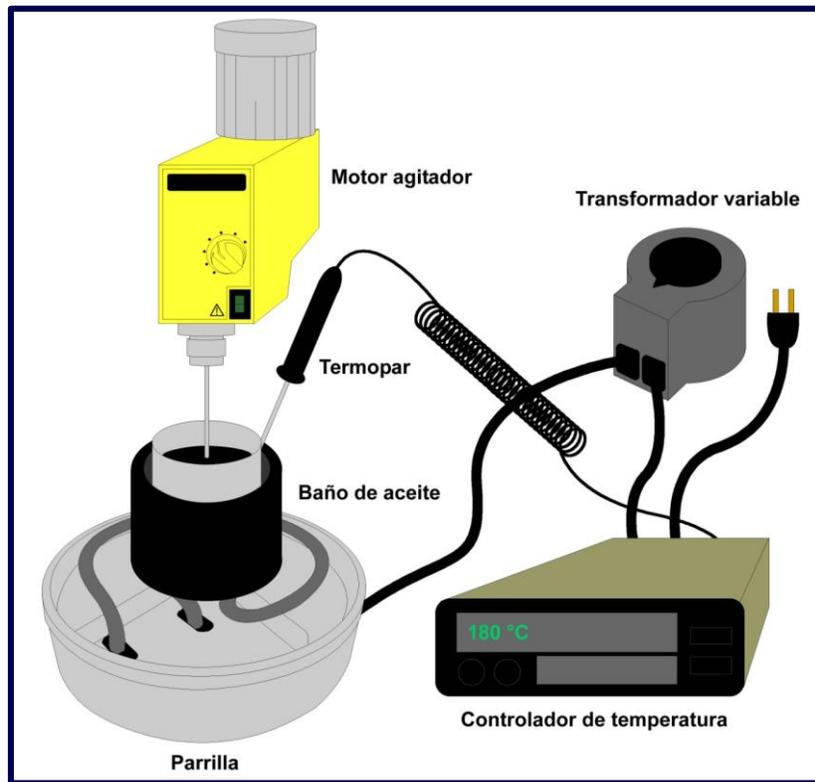


Figura 12. Equipo para la modificación de asfaltos.

3. La muestra de asfalto se coloca en un baño de aceite para evitar gradientes de temperatura, y se eleva la temperatura gradualmente hasta llegar a 180 °C, en donde se mantendrá durante el resto del tiempo de modificación con ayuda de un controlador de temperatura.
4. Durante 4 horas, la muestra se somete a una agitación de 500 rpm, manteniendo constante la temperatura previamente mencionada.
5. Al finalizar el tiempo de modificación, se detiene la agitación y se apaga el controlador de temperatura para, finalmente, colocar la muestra en una charola de aluminio para prueba de penetración, y en un anillo para prueba de temperatura de ablandamiento.

4.3 Modificación de asfaltos

Se crearon 3 tipos de mezclas asfálticas: asfalto/hule de llanta, asfalto/Vector 2411[®] y asfalto/hule de llanta/Vector 2411[®]. De cada tipo, se prepararon las siguientes mezclas con los porcentajes en peso del modificador respecto a la masa total de cada mezcla:

- Asfalto/hule de llanta: 5, 15 y 20% p/p.
- Asfalto/Vector 2411[®]: 0.5, 1 y 2% p/p.
- Asfalto/hule de llanta/Vector 2411[®]: 5, 15 y 20% p/p de hule de llanta, modificadas cada una con tres porcentajes de Vector 2411[®], 0.5, 1 y 2% p/p.

Se elaboraron así un total de 15 mezclas asfálticas, de 150 g cada una. La tabla 11 muestra las masas de asfalto, hule de llanta y Vector 2411[®], utilizadas en cada modificación, así como la nomenclatura que se empleará para referirse a cada una de ellas, incluyendo la muestra de asfalto sin modificar (blanco).

Tabla 11. Masas de asfalto, hule de llanta y Vector 2411® para cada modificación.

Muestra	Asfalto	Hule		Vector 2411®	
	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)
Blanco	150.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5H	142.50	5.00	7.50	0.00	0.00
15H	127.50	15.00	22.50	0.00	0.00
20H	120.00	20.00	30.00	0.00	0.00
V0.5	149.25	0.00	0.00	0.50	0.75
V1.0	148.50	0.00	0.00	1.00	1.50
V2.0	147.00	0.00	0.00	2.00	3.00
5H/V0.5	141.75	5.00	7.50	0.50	0.75
5H/V1.0	141.00	5.00	7.50	1.00	1.50
5H/V2.0	139.50	5.00	7.50	2.00	3.00
15H/V0.5	126.75	15.00	22.50	0.50	0.75
15H/V1.0	126.00	15.00	22.50	1.00	1.50
15H/V2.0	124.50	15.00	22.50	2.00	3.00
20H/V0.5	119.25	20.00	30.00	0.50	0.75
20H/V1.0	118.50	20.00	30.00	1.00	1.50
20H/V2.0	117.00	20.00	30.00	2.00	3.00

Una vez obtenidas las cantidades requeridas de cada componente, se procedió a la modificación del asfalto como se muestra a continuación:

1. Fundir la masa requerida de asfalto y verterla en un recipiente metálico.
2. Montar el equipo mostrado en la figura 12.
3. Colocar la lata de asfalto en un baño de aceite y elevar la temperatura gradualmente hasta alcanzar los 180 °C. Con ayuda de un

controlador, mantener la temperatura en este valor durante el resto de la modificación.

4. Alcanzada la temperatura mencionada, iniciar la agitación a 500 rpm e incorporar lentamente, de acuerdo al tipo de modificación, el hule de llanta, Vector 2411® o el hule de llanta y posteriormente el copolímero Vector 2411®.
5. Una vez incorporados el o los modificadores correspondientes, mantener la agitación a 500 rpm y temperatura a 180 °C constantes durante un periodo de 4 horas.
6. Al finalizar el tiempo, detener la agitación y apagar el controlador. Inmediatamente, verter la mezcla en un tubo de aluminio para prueba de segregación, en una charola para prueba de penetración, y en un anillo para temperatura de ablandamiento.

4.4 Prueba de temperatura de ablandamiento

La prueba de temperatura de ablandamiento se llevó acabo de acuerdo a las especificaciones indicadas en la norma ASTM D 36. El ensayo consistió en lo siguiente:

1. Preparar el baño de etilenglicol colocando 600 mL de esta sustancia en un vaso de precipitados 800 mL.
2. Posicionar en el soporte para temperatura de ablandamiento los anillos estandarizados con las muestras de asfalto.
3. Centrar un balón en cada anillo con ayuda del anillo centrador, y sumergir el soporte con los anillos y el termómetro en el baño de etilenglicol.
4. Calentar el baño en un parrilla electromagnética a una tasa de 5°C/min con agitación suave. Conforme la temperatura se incrementa, la película de muestra contenida en el anillo se deforma por el peso del

balín y cae, fluye, hacia la placa inferior, la cual se encuentra a una pulgada (25 mm) de donde es colocado el anillo inicialmente. En el momento en que la muestra toca la placa, se mide la temperatura, correspondiendo este valor a la temperatura de ablandamiento.

4.5 Prueba de penetración

La prueba de penetración se realizó en base a la norma ASTM D 5, cuyo procedimiento se describe a continuación:

1. Previo a las mediciones, se preparan las charolas de aluminio (figura 13) con las muestras de asfalto, introduciéndolas en un baño de agua a 25 °C durante 1 h para así conseguir en éstas una temperatura uniforme.



Figura 13. Charola para prueba de penetración.

2. Insertar la aguja para penetración en el huso del penetrómetro y atornillarla, para luego ajustar el aparato a cero.
3. Extraer la charola con la muestra del baño dejando una leve capa de agua sobre su superficie y colocarla en un gato que se ajusta hasta que la aguja roce la superficie de la muestra.

4. Inmediatamente, dejar caer la aguja liberando el seguro durante 5 segundos. Tomar la lectura de penetración.
5. Devolver la muestra al baño para evitar cambios en la temperatura.
6. Limpiar la aguja con n-heptano hasta que quede libre de residuos para la realización de la siguiente medición.
7. A partir del punto 3, el procedimiento se repite en 9 ocasiones más en distintas regiones de la muestra, registrándose un total de 10 valores por muestra, con los cuales se realiza el cálculo del promedio.

4.6 Prueba de estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas

Terminada cada modificación de asfalto, ésta se vierte una muestra en un tubo de aluminio de 2.2 cm de diámetro y 12 cm de longitud (figura 14), cuidando de no llenar demasiado el tubo para evitar derrames por dilatación. A continuación, se introduce el tubo en una estufa precalentada a 180 °C durante 24 h, sin agitación, pues el estudio consiste en analizar la separación de componentes bajo condiciones de almacenamiento estático.

Concluido el tiempo mencionado, se deja enfriar la muestra para, una vez solidificada, proceder a cortarla en tres secciones, dejando las partes superior e inferior con una longitud de alrededor de 4.5 cm, desechando la parte central. La parte superior se denomina “cabeza”, mientras que la inferior “cola”.

Finalmente, cada segmento se funde y se coloca en un anillo para temperatura de ablandamiento.



Figura 14. Tubo para prueba de segregación.

4.7 Microscopía de fluorescencia

Las pruebas de microscopía de fluorescencia se realizaron con un lente de 20x y a temperatura ambiente. La toma de microscopías se realizó de la siguiente manera:

1. Iniciar en la computadora el software “AxioCam”.
2. Encender la lámpara.
3. Las muestras asfálticas en charolas de aluminio se colocan en la base para muestras del microscopio.
4. Abrir la rejilla para permitir el paso del haz de luz.
5. Enfocar la muestra y finalmente capturar la imagen en la computadora.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Resultados

5.1.1 Prueba de temperatura de ablandamiento

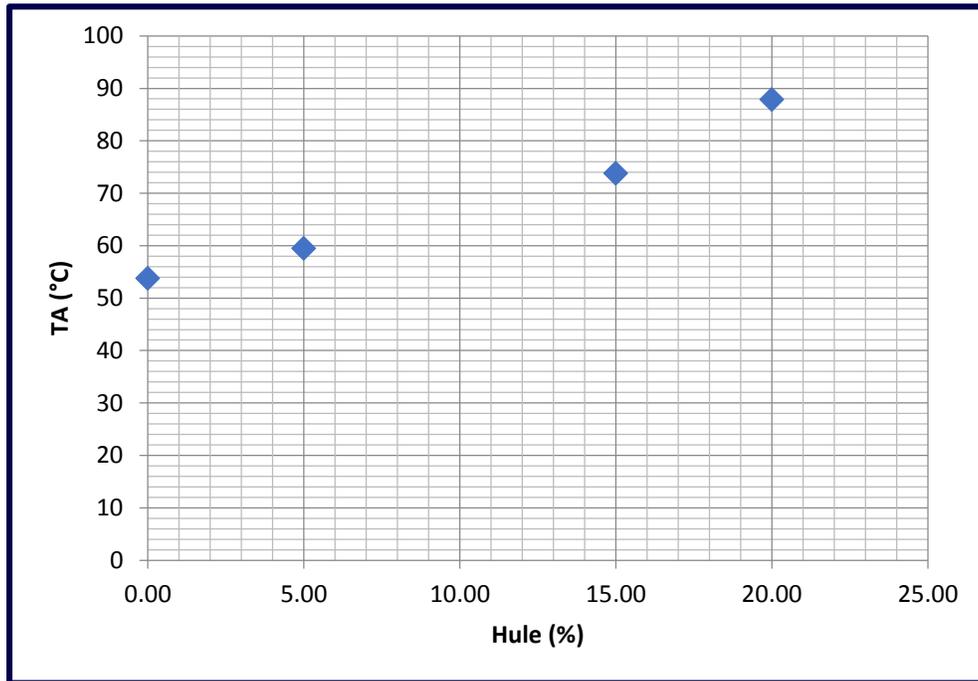
En el siguiente apartado se presentan los resultados del ensayo de temperatura de ablandamiento para el asfalto AC-20 sin modificar sometido a tratamiento térmico (blanco), del asfalto modificado únicamente con distintos porcentajes de hule de llanta (5, 15 y 20% p/p), posteriormente, sólo con Vector 2411® (0.5, 1 y 2% p/p), y finalmente con una combinación de ambos en las proporciones señaladas para cada uno.

Asfalto modificado con hule de llanta

Tabla TA 1. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/hule de llanta.

Muestra	Hule (%)	TA (°C)
Blanco	0.00	53.8
5H	5.00	59.5
15H	15.00	73.8
20H	20.00	87.9

Gráfica TA 1. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/hule de llanta.



En la gráfica TA 1 se puede observar que:

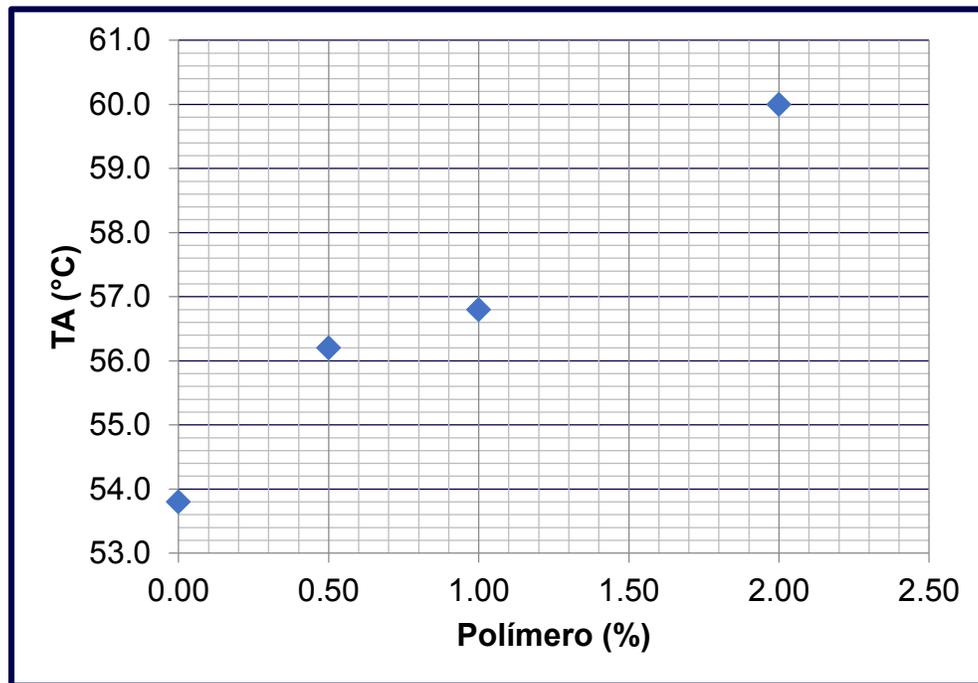
- Al modificar el asfalto con mayores proporciones de hule, el asfalto se ablanda a temperaturas más altas, lo que indica una mejora en esta propiedad termomecánica del material.

Asfalto modificado con Vector 2411®

Tabla TA 2. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/Vector 2411®.

Muestra	Vector 2411® (%)	TA (°C)
Blanco	0.00	53.8
V0.5	0.50	56.2
V1.0	1.00	56.8
V2.0	2.00	60.0

Gráfica TA 2. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/Vector 2411®.



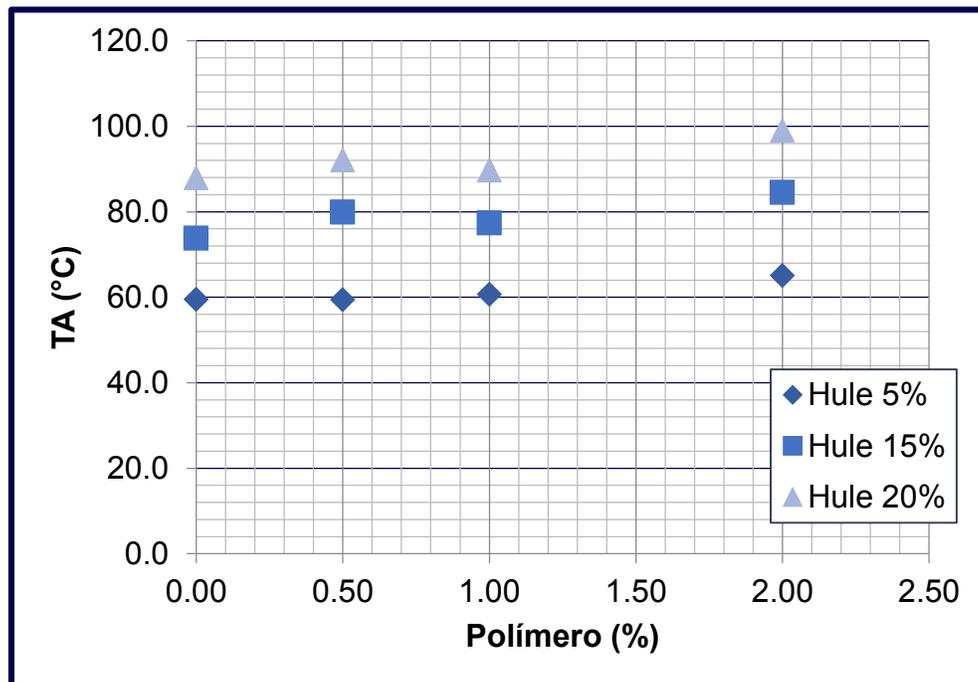
En la gráfica TA 2 se muestra que:

- Al incrementar la proporción de copolímero en el material, la temperatura de ablandamiento aumenta, resultando nuevamente un asfalto con mayor resistencia termomecánica.

Tabla TA 3. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.

Muestra	Hule (%)	Vector 2411® (%)	TA (°C)
5H	5.00	0.00	59.5
5H/V0.5	5.00	0.50	59.4
5H/V1.0	5.00	1.00	60.7
5H/V2.0	5.00	2.00	65.1
15H	15.00	0.00	73.8
15H/V0.5	15.00	0.50	79.9
15H/V1.0	15.00	1.00	77.4
15H/V2.0	15.00	2.00	84.5
20H	20.00	0.00	87.9
20H/V0.5	20.00	0.50	92.1
20H/V1.0	20.00	1.00	89.7
20H/V2.0	20.00	2.00	99.0

Gráfica TA 3. Temperatura de ablandamiento para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.



De la gráfica TA 3 se tiene que:

- Para un mismo porcentaje de hule de llanta, al incrementar la proporción de Vector 2411[®] utilizado para modificar el asfalto, la temperatura de ablandamiento tiende a crecer.
- Al utilizar mayores proporciones de hule de llanta para un mismo porcentaje de Vector 2411[®], la temperatura de ablandamiento adquiere valores más altos.

De los resultados anteriores, se observa que la mayor temperatura de ablandamiento se obtiene al utilizar un 20% de hule de llanta y 2% de polímero Vector 2411[®], casi duplicándose el valor de esta propiedad respecto a aquél para el asfalto sin modificar.

5.1.2 Prueba de penetración

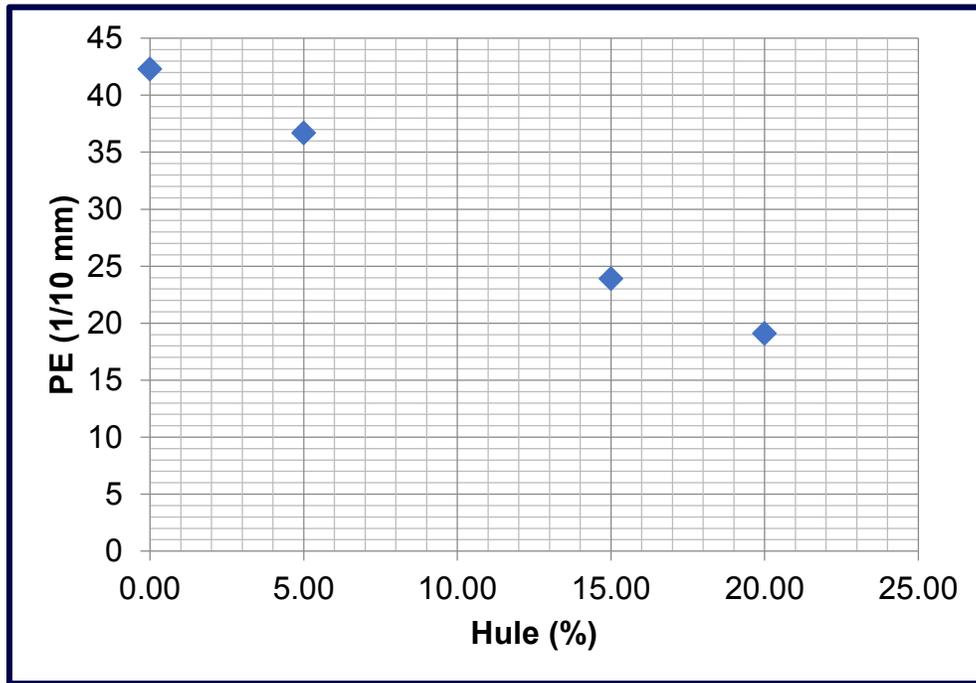
En lo concerniente al ensayo de penetración, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Asfalto modificado con hule de llanta

Tabla PE 1. Penetración para mezclas asfalto/hule de llanta.

Muestra	Hule (%)	PE (1/10 mm)
Blanco	0.00	42.3
5H	5.00	36.7
15H	15.00	23.9
20H	20.00	19.1

Gráfica PE 1. Penetración para mezclas asfalto/hule de llanta.



De la gráfica PE 1:

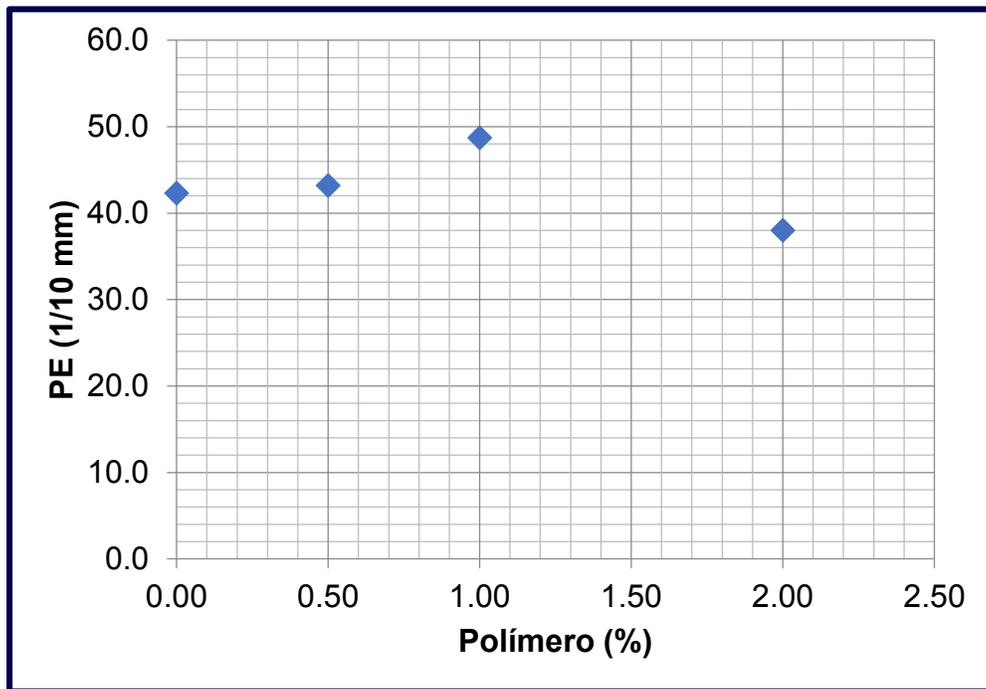
- El aumento en la proporción de hule utilizado en la modificación del asfalto produce una disminución en la penetración del mismo, lo que indica una mayor dureza de los materiales modificados, y por ende una mejora en su resistencia termomecánica.

Asfalto modificado con Vector 2411®

Tabla PE 2. Penetración para mezclas asfalto/Vector 2411®.

Muestra	Vector 2411® (%)	PE (1/10 mm)
Blanco	0.00	42.3
V0.5	0.50	43.2
V1.0	1.00	48.7
V2.0	2.00	38.0

Gráfica PE 2. Penetración para mezclas asfalto/Vector 2411®.



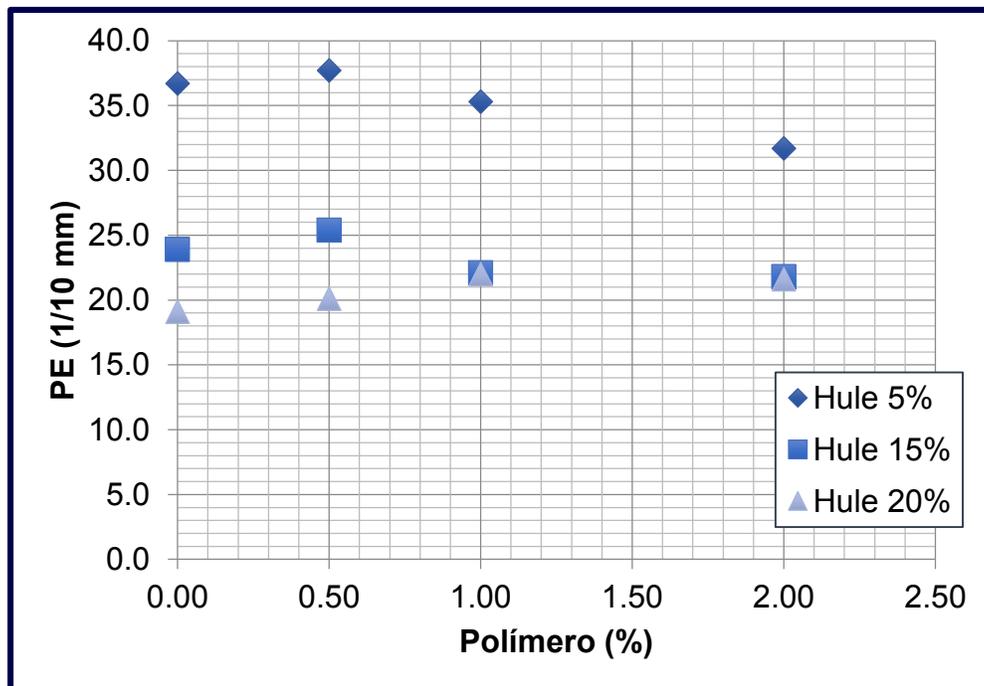
De la gráfica PE 2:

- El asfalto modificado con 0.5 y 1% de Vector 2411® presentan una menor dureza que el asfalto sin modificar sometido a tratamiento térmico.
- El asfalto mejora su resistencia a la penetración respecto al asfalto sin modificar sometido a tratamiento térmico (blanco de asfalto) únicamente al adicionar 2% en peso de Vector 2411®.

Tabla PE 3. Penetración para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.

Muestra	Hule (%)	Vector 2411® (%)	PE (1/10 mm)
5H	5.00	0.00	36.7
5H/V0.5	5.00	0.50	37.7
5H/V1.0	5.00	1.00	35.3
5H/V2.0	5.00	2.00	31.7
15H	15.00	0.00	23.9
15H/V0.5	15.00	0.50	25.4
15H/V1.0	15.00	1.00	22.1
15H/V2.0	15.00	2.00	21.8
20H	20.00	0.00	19.1
20H/V0.5	20.00	0.50	20.1
20H/V1.0	20.00	1.00	22.0
20H/V2.0	20.00	2.00	21.6

Gráfica PE 3. Penetración para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.



Al observar la gráfica PE 3, puede decirse que:

- En todos los casos para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411[®] existe una mejora en la penetración, manifestada por la disminución de su valor, respecto al asfalto original con y sin tratamiento térmico.
- En los casos en que se modifica con 5 y 15% de hule de llanta y Vector 2411[®], manteniendo constante la concentración de hule e incrementando la proporción del copolímero, la penetración tiende a disminuir, obteniéndose los valores más pequeños para esta prueba cuando se mezcla un 2% en peso total de Vector 2411[®].
- Al modificar con 20% de hule de llanta y Vector 2411[®], al aumentar la proporción de Vector 2411[®] usado, el valor para la penetración tiende a crecer, de donde se concluye que la adición de copolímero en mezclas asfalto/20% hule de llanta empeora esta propiedad termomecánica en este tipo de mezclas en particular.

Desde el punto de vista de la prueba de penetración, la mejor fórmula es aquella en la que únicamente se modifica con 20% de hule de llanta.

5.1.3 Prueba de estabilidad de almacenamiento a altas temperaturas

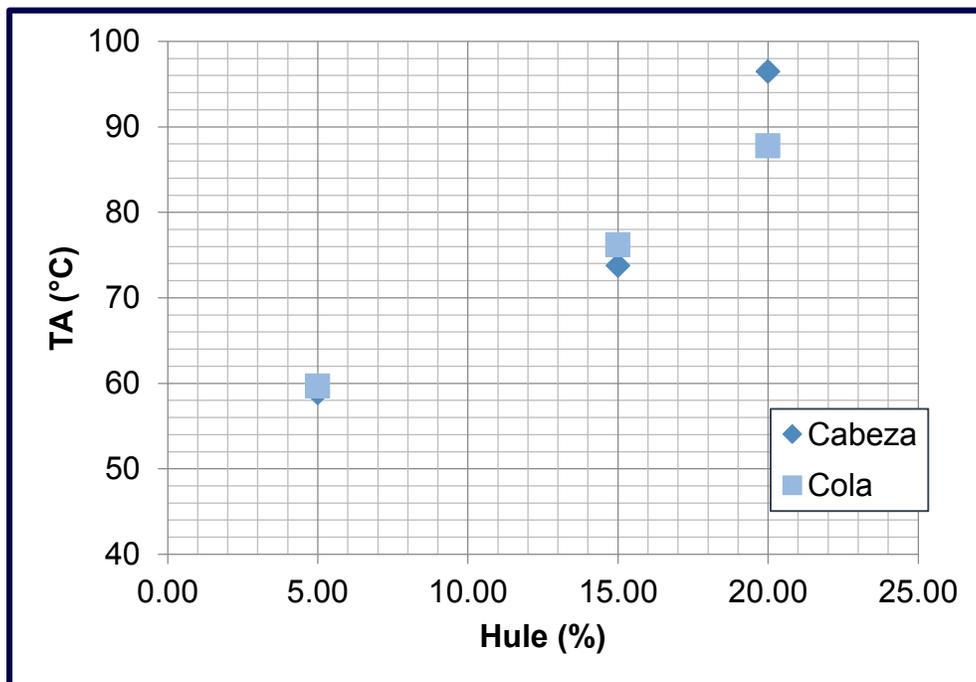
El estudio de la estabilidad de las mezclas se realizó por medio de la comparación de las temperaturas de ablandamiento de la “cabeza” (CA) y la “cola” (CO), obtenidas del seccionamiento de la muestra asfáltica sometida a almacenamiento estático durante 24 horas.

Los resultados de esta prueba se muestran a continuación.

Tabla PES 1. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/hule de llanta.

Muestra	Hule (%)	TAcA (°C)	TAcO (°C)
5H	5.00	58.9	59.7
15H	15.00	73.8	76.2
20H	20.00	96.5	87.8

Gráfica PES 1. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/hule de llanta.



De acuerdo a la gráfica PES 1:

- Las mezclas asfálticas con 5 y 15% de hule de llanta presentan estabilidad bajo condiciones de almacenamiento estático durante 24 horas.
- La diferencia entre las temperaturas de ablandamiento para la cabeza y cola de las mezclas asfalto/hule de llanta tiende a crecer conforme hay un aumento en la concentración de hule, lo que indica que

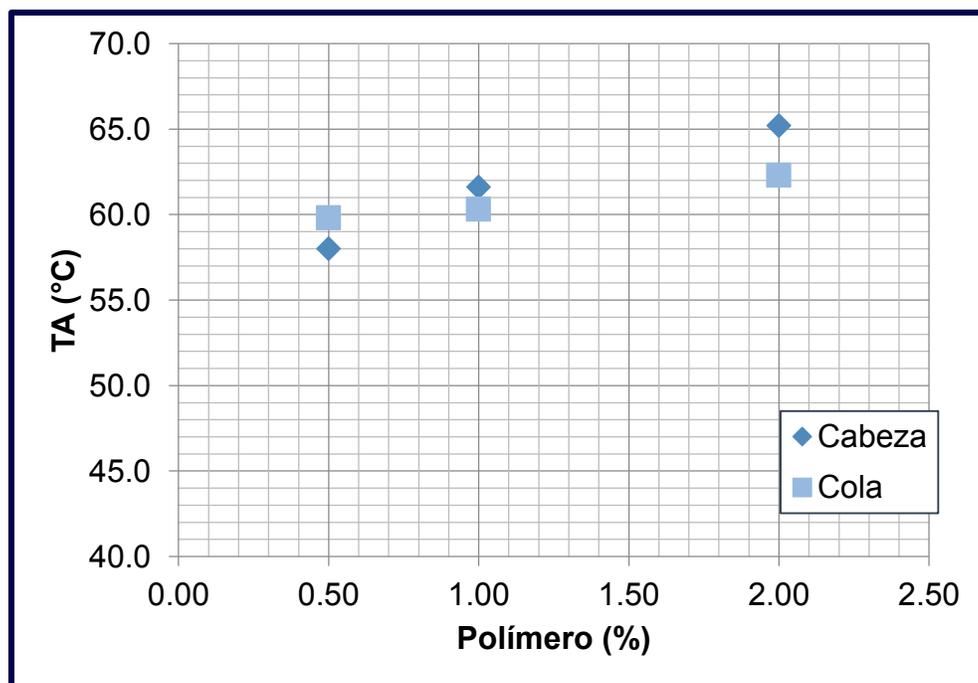
conforme mayor es el porcentaje de este modificador, más grande será la inestabilidad de la mezcla, es decir, existe mayor incompatibilidad entre los componentes.

Asfalto modificado con Vector 2411®

Tabla PES 2. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/Vector 2411®.

Muestra	Vector 2411® (%)	T _{ACA} (°C)	T _{ACO} (°C)
V0.5	0.50	58.0	59.8
V1.0	1.00	61.6	60.3
V2.0	2.00	65.2	62.3

Gráfica PES 2. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/Vector 2411®.



En lo concerniente a la gráfica PES 2:

- Los tres asfaltos modificados con las proporciones de Vector 2411® estudiadas presentan una buena estabilidad, aunque se observa una leve tendencia al crecimiento de la diferencia entre temperaturas de

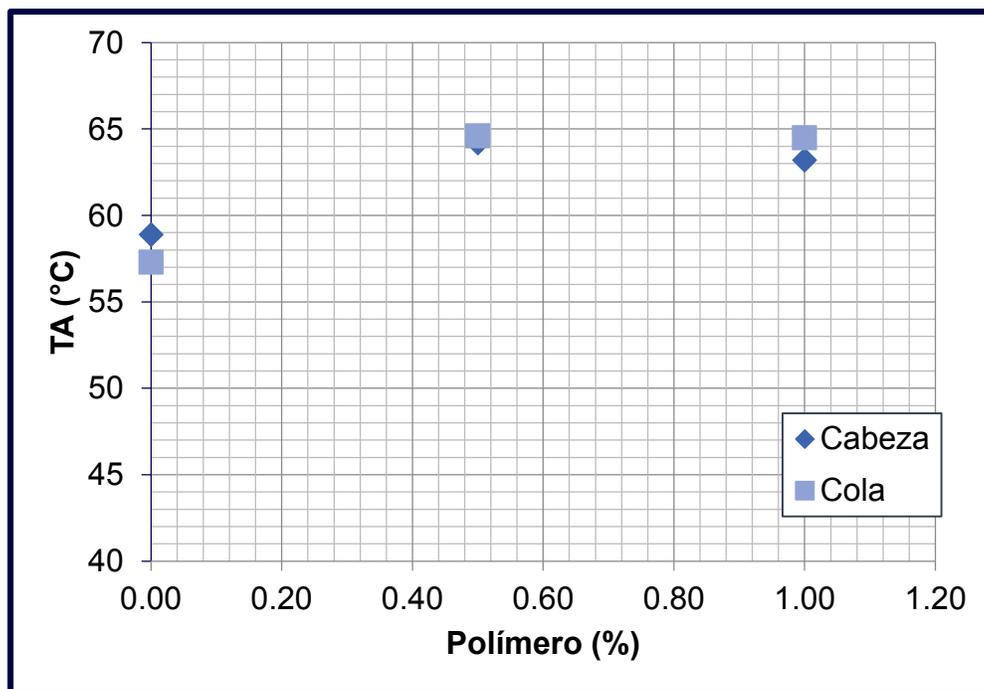
ablandamiento de cabeza y cola al incrementar la relación de Vector 2411®.

Asfalto modificado con hule de llanta/Vector 2411®

Tabla PES 3. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/5% hule de llanta/Vector 2411®.

Muestra	Hule (%)	Vector 2411® (%)	T _{CA} (°C)	T _{Co} (°C)
5H	5.00	0.00	58.9	57.3
5H/V0.5	5.00	0.50	64.2	64.6
5H/V1.0	5.00	1.00	63.2	64.5

Gráfica PES 3. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/5% hule de llanta/Vector 2411®.



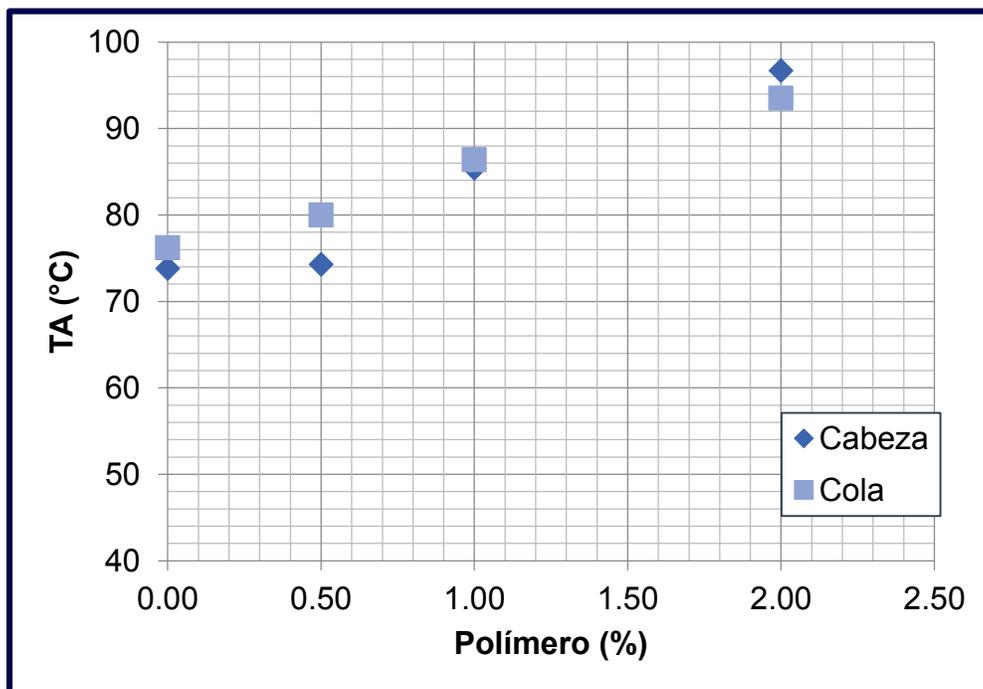
De la gráfica PES 3:

- Dentro del intervalo estudiado, las mezclas asfalto/5% hule de llanta/Vector 2411® muestran bastante estabilidad, indicio de una buena compatibilidad entre los componentes.

Tabla PES 4. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/15% hule de llanta/Vector 2411®.

Muestra	Hule (%)	Vector 2411® (%)	T _{CA} (°C)	T _{Co} (°C)
15H	15.00	0.00	73.8	76.2
15H/V0.5	15.00	0.50	74.3	80.0
15H/V1.0	15.00	1.00	85.4	86.4
15H/V2.0	15.00	2.00	96.7	93.5

Gráfica PES 4. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/15% hule de llanta/Vector 2411®.



Al estudiar la gráfica PES 4:

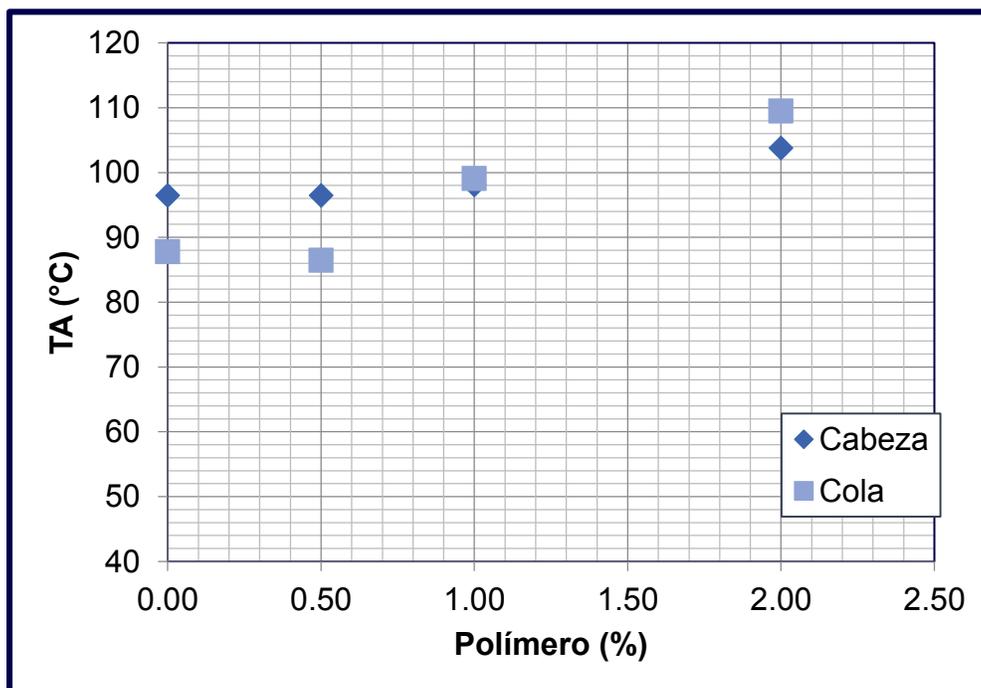
- En las muestras asfalto/15% de hule de llanta/Vector 2411®, la mayor segregación se presenta en la mezcla en que se modifica con 0.5% de Vector 2411®.
- La muestra modificada con 15% de hule que presenta la mayor estabilidad es en la que Vector 2411® se encuentra en un 1%.

- Dentro del intervalo de concentraciones estudiado, el aumento de la proporción de Vector 2411® produce una relativa estabilidad en las mezclas con 15% de hule de llanta.

Tabla PES 5. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/20% hule de llanta/Vector 2411®.

Muestra	Hule (%)	Vector 2411® (%)	TA _{CA} (°C)	TA _{CO} (°C)
20H	20.00	0.00	96.5	87.8
20H/V0.5	20.00	0.50	96.5	86.5
20H/V1.0	20.00	1.00	98.1	99.1
20H/V2.0	20.00	2.00	103.8	109.5

Gráfica PES 5. Estabilidad de almacenamiento para mezclas asfalto/20% hule de llanta/Vector 2411®.



A partir de la gráfica PES 5:

- Para las mezclas con 20% de hule de llanta y concentraciones variables de Vector 2411[®], aquella modificada con 0.5% de Vector 2411[®] presenta la mayor separación entre los componentes.
- Las muestras 20H/V1.0 y 20H/V2.0 presentan estabilidad, consiguiéndose la mayor con una concentración de 1% de Vector 2411[®].

Al modificar el asfalto con hule de llanta y el polímero Vector 2411[®], las muestras con una proporción de 1% del copolímero presentan la mayor estabilidad.

5.1.4 Índice de penetración

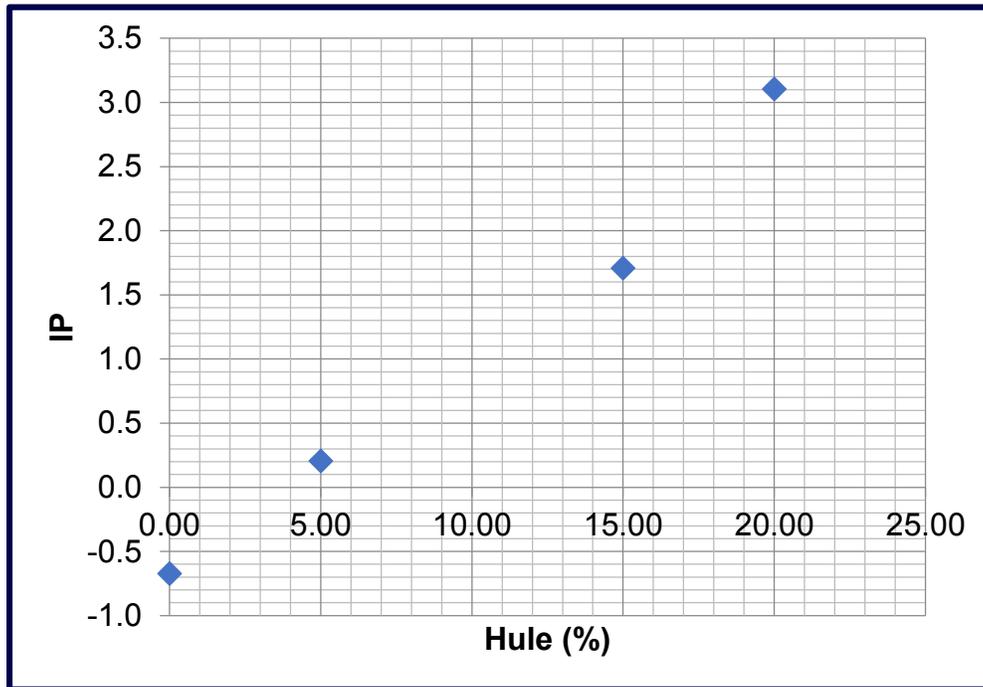
En el apartado siguiente se muestran los valores obtenidos del cálculo del índice de penetración, a partir de los resultados de temperatura de ablandamiento y penetración, para cada muestra elaborada.

Asfalto modificado con hule de llanta

Tabla IP 1. Índice de penetración para mezclas asfalto/hule de llanta.

Muestra	Hule (%)	IP
Blanco	0.00	-0.7
5H	5.00	0.2
15H	15.00	1.7
20H	20.00	3.1

Gráfica IP 1. Índice de penetración para mezclas asfalto/hule de llanta.



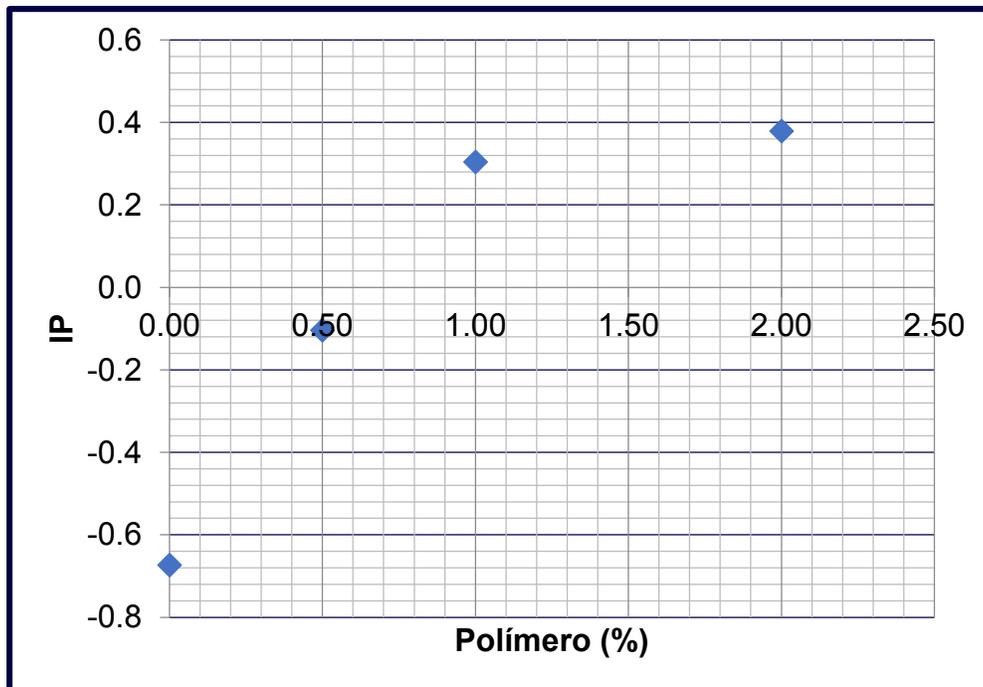
De la gráfica IP 1:

- El índice de penetración aumenta conforme lo hace el porcentaje de hule para la modificación, lo que implica que el incremento en el porcentaje de este modificador, produce materiales con una menor susceptibilidad térmica.
- Aunque el blanco y el asfalto modificado con 5% de hule de llanta se encuentran dentro de la clasificación de asfaltos aptos para la pavimentación, presentan una alta susceptibilidad térmica.
- Las mezclas con 15 y 20% de hule de llanta presentan valores de IP mayores a 1, lo que indica una mejor resistencia térmica y elasticidad de estos materiales.

Tabla IP 2. Índice de penetración para mezclas asfalto/Vector 2411®.

Muestra	Vector 2411® (%)	IP
Blanco	0.00	-0.7
V0.5	0.50	-0.1
V1.0	1.00	0.3
V2.0	2.00	0.4

Gráfica IP 2. Índice de penetración para mezclas asfalto/Vector 2411®.



De acuerdo a la gráfica IP 2:

- El incremento en la concentración de Vector 2411® utilizado para modificar el asfalto genera una disminución de la susceptibilidad térmica del material.
- Aunque los resultados de IP obtenidos para todas las mezclas asfalto/Vector 2411® se encuentran dentro del intervalo para la mayoría de los asfaltos utilizados en pavimentación, los valores para

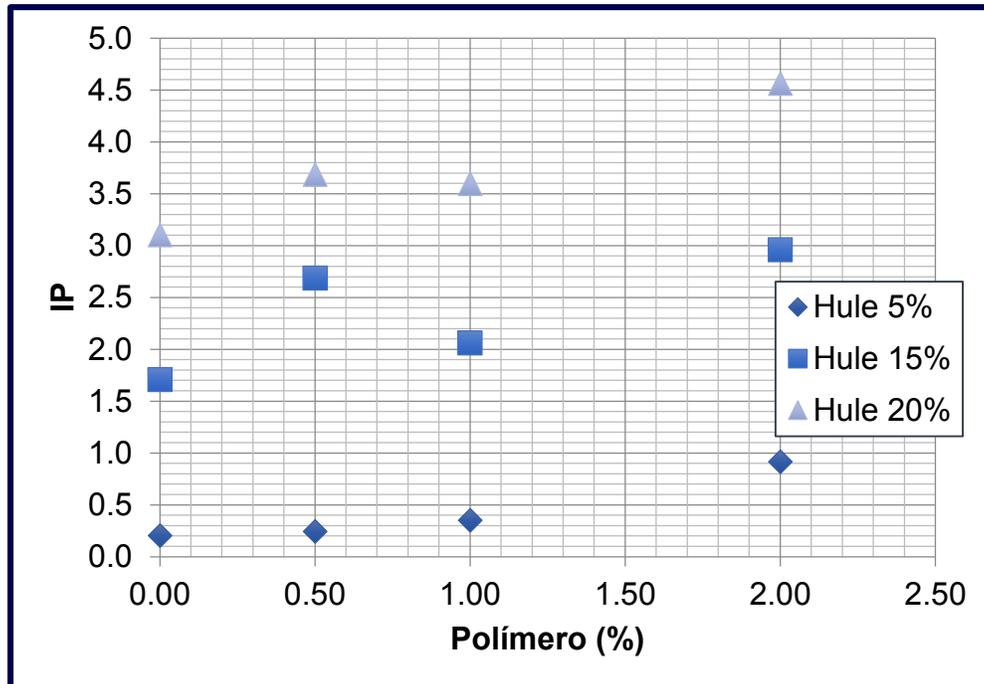
estas muestras continúan siendo relativamente pequeños, por lo que aún se presentarán una alta susceptibilidad a la temperatura.

Asfalto modificado con hule de llanta/Vector 2411®

Tabla IP 3. Índice de penetración para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.

Muestra	Hule (%)	Vector 2411® (%)	IP
5H	5.00	0.00	0.2
5H/V0.5	5.00	0.50	0.2
5H/V1.0	5.00	1.00	0.4
5H/V2.0	5.00	2.00	0.9
15H	15.00	0.00	1.7
15H/V0.5	15.00	0.50	2.7
15H/V1.0	15.00	1.00	2.1
15H/V2.0	15.00	2.00	3.0
20H	20.00	0.00	3.1
20H/V0.5	20.00	0.50	3.7
20H/V1.0	20.00	1.00	3.6
20H/V2.0	20.00	2.00	4.6

Gráfica IP 3. Índice de penetración para mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411®.



A partir de la gráfica IP 3:

- Considerando las tres proporciones de hule de llanta estudiadas, al mantener constante ésta última e incrementar la proporción de copolímero, el índice de penetración tiende a crecer, traducido como una mejora en la resistencia térmica del material.
- Los asfaltos modificados con 5% de hule de llanta y diversos porcentajes de Vector 2411® muestran la mayor susceptibilidad térmica de las tres series de mezclas modificadas con hule y Vector 2411®.
- Las mezclas asfálticas con 15 y 20% de hule de llanta y distintas concentraciones de Vector 2411® muestran valores altos de IP (mayores a 1), lo que indica materiales con una menor susceptibilidad térmica y mayor elasticidad.

Dentro del intervalo de estudio, el material con menor susceptibilidad térmica se obtuvo a de la modificación del asfalto AC-20 con 20% en peso de hule de llanta y 2% de polímero Vector 2411®.

5.1.5 Microscopía de fluorescencia

A partir de las fotografías de microscopía de fluorescencia, es posible distinguir la distribución y morfología de los modificadores empleados en la matriz asfáltica.

Las imágenes mostradas a continuación se capturaron con un lente de 20X y a temperatura ambiente. En ellas se puede identificar la presencia de diversas fases: una oscura correspondiente al asfalto, y otra luminosa constituida por el o los modificadores empleados en la mezcla.

Asfalto modificado con hule de llanta

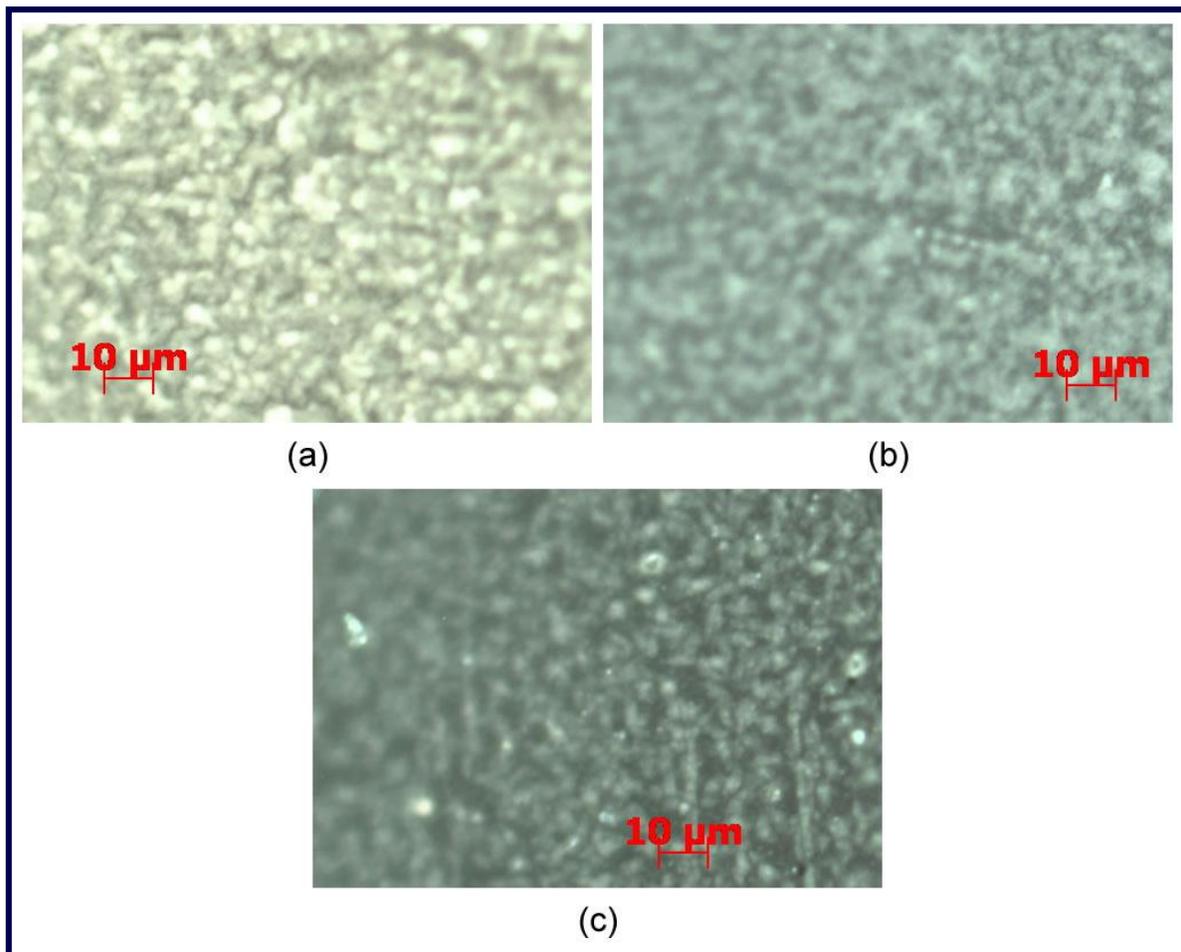


Figura MIC 1. Muestras de asfalto modificado con hule de llanta: (a) 5H, (b) 15H y (c) 20H.

En lo concerniente a la figura MIC 1, en las tres microscopías para mezclas asfalto/hule de llanta se presenta una inversión de fases, en donde se observa el asfalto disperso en un medio claro continuo constituido por hule de llanta hinchado.

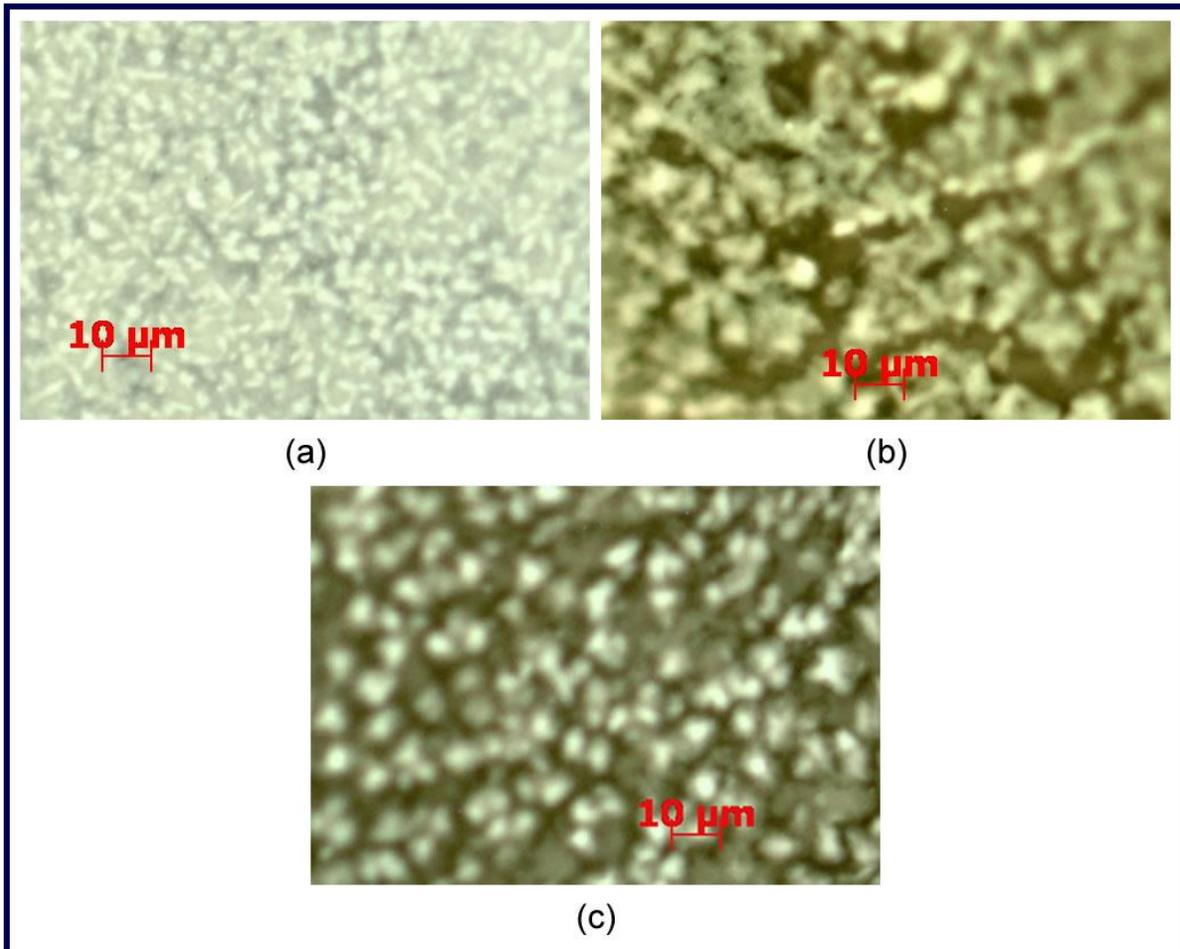


Figura MIC 2. Muestras de asfalto modificado con Vector 2411®: (a) V0.5, (b) V1.0 y (c) V2.0.

En cuanto a las microscopías de asfalto modificado con Vector 2411® (figura MIC 2), en la fotografía de la mezcla V0.5 puede observarse que a bajas concentraciones de Vector 2411®, éste tiende a formar conglomerados de forma ovalada y esférica distribuidos de manera uniforme por toda la superficie asfáltica.

Por otra parte, en las microscopías de las muestras V1.0 y V2.0, el copolímero Vector 2411® hinchado tiende a formar una fase continua, disminuyéndose las áreas conformadas por asfalto.

Asfalto modificado con hule de llanta/Vector 2411®

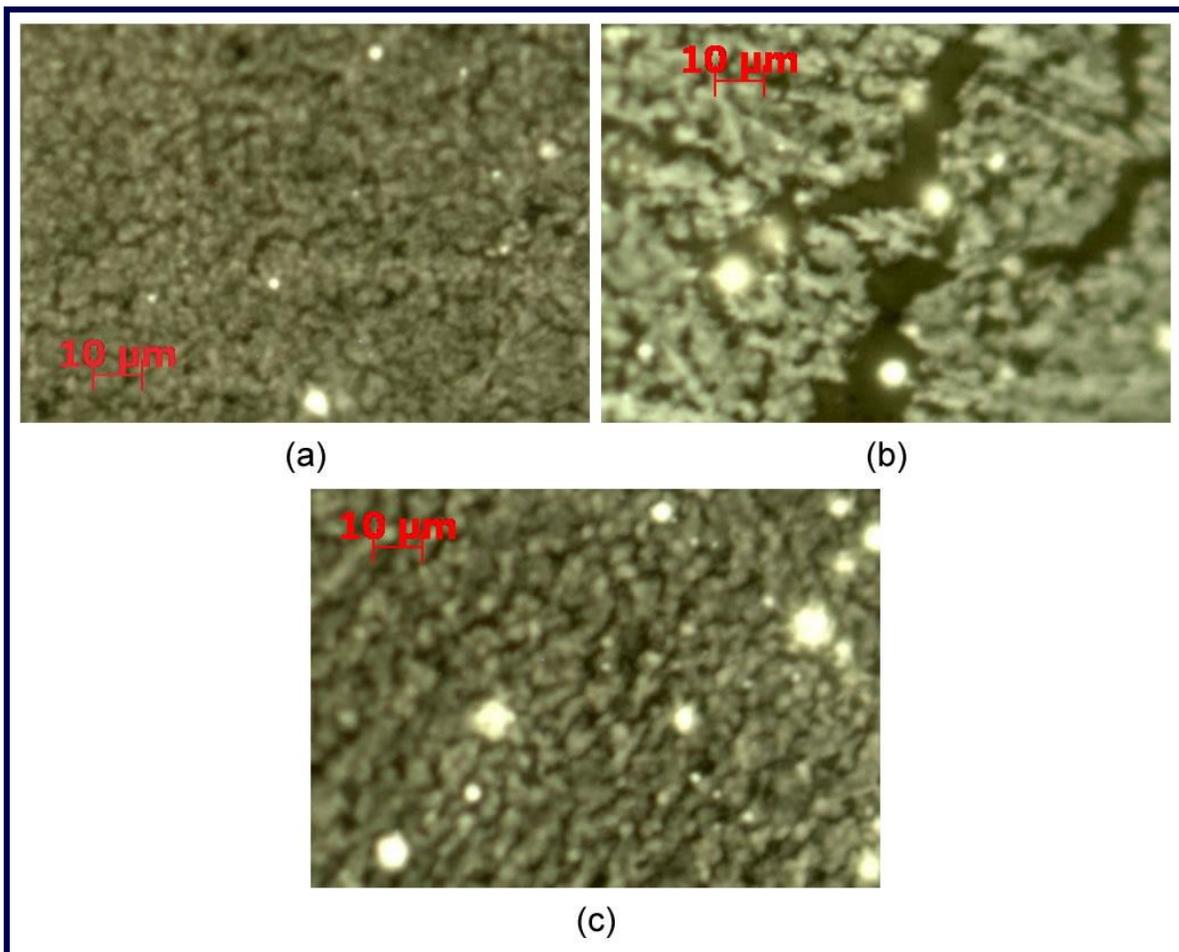


Figura MIC 3. Muestras de asfalto modificado con 5% de hule de llanta y Vector 2411®: (a) 5H/V0.5, (b) 5H/V1.0 y (c) 5H/V2.0.

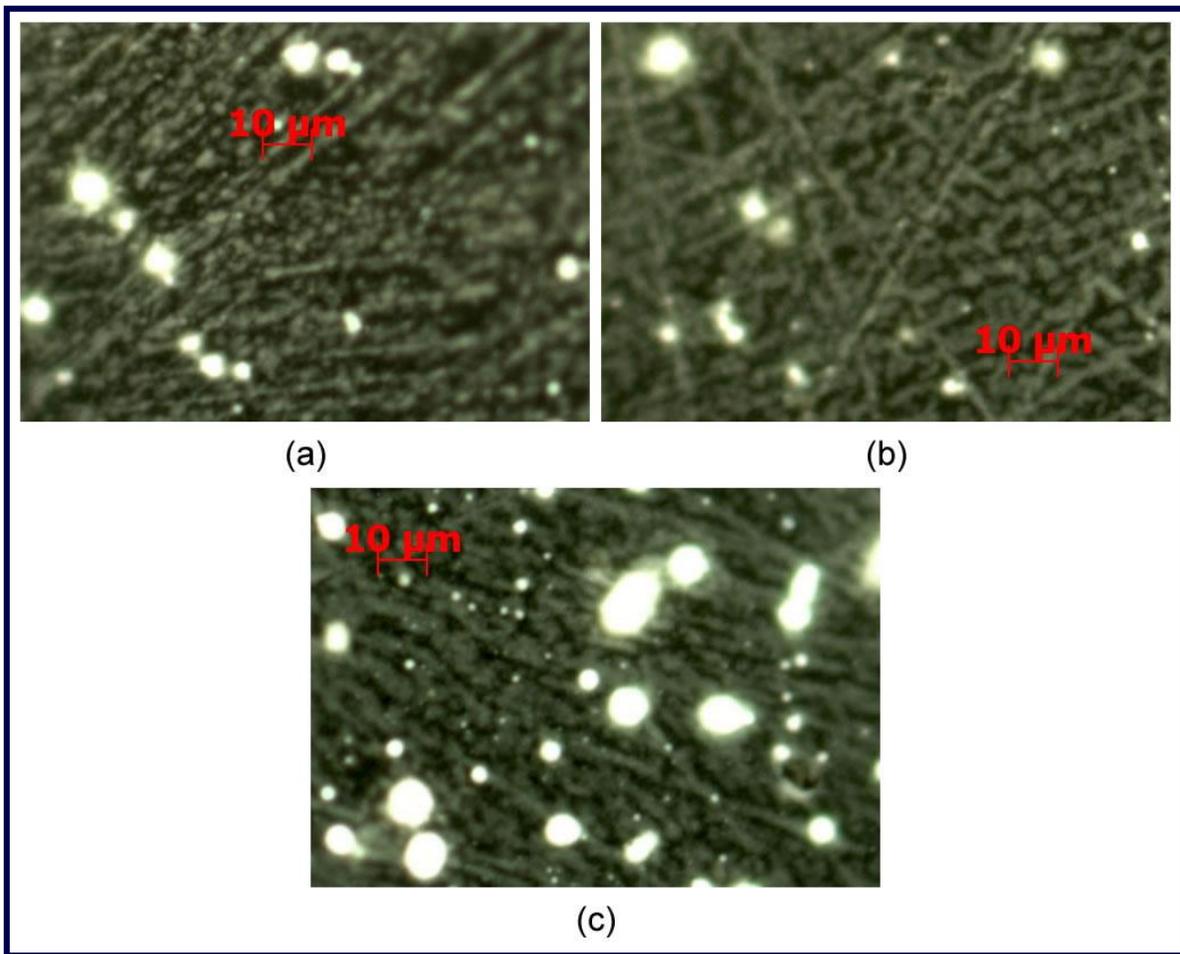


Figura MIC 4. Muestras de asfalto modificado con 15% de hule de llanta y Vector 2411[®]: (a) 15H/V0.5, (b) 15H/V1.0 y (c) 15H/V2.0.

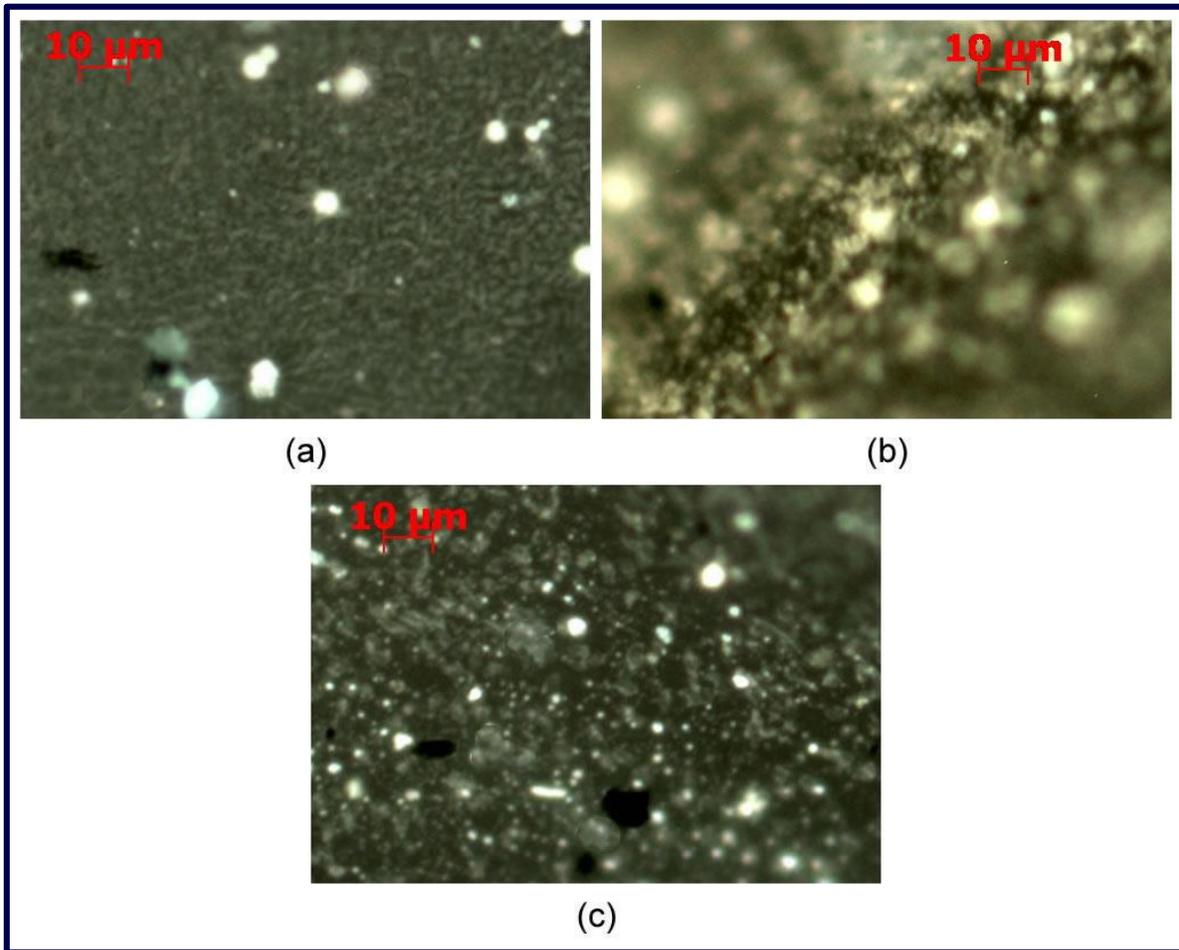


Figura MIC 5. Muestras de asfalto modificado con 20% de hule de llanta y Vector 2411[®]: (a) 20H/V0.5, (b) 20H/V1.0 y (c) 20H/V2.0.

En el caso de las mezclas asfalto/hule de llanta/Vector 2411[®] (figuras MIC 3, 4 y 5), es posible observar la presencia de tres fases: una continua de color gris formada de hule de llanta hinchado y dos dispersas conformadas por asfalto y Vector 2411[®] respectivamente.

Como se muestra en las microscopías para este tipo de materiales, Vector 2411[®] tiende a formar conglomerados esféricos que se incrementan al aumentar el porcentaje de Vector 2411[®] para una misma proporción de hule de llanta. Esto puede explicarse debido a que al estar en una concentración mucho mayor, el hule de llanta absorbe la mayor parte de los maltenos dejando una cantidad que no es

suficiente para la incorporación de Vector 2411[®], el cual en consecuencia tiende a acomodarse en la geometría previamente mencionada.

5.2 Análisis de resultados

Los resultados presentados en la sección anterior, muestran una mejora en las propiedades del asfalto estudiadas: penetración y temperatura de ablandamiento, traducido como un aumento en la elasticidad y disminución de la susceptibilidad térmica del material.

En lo que respecta a las pruebas de asfalto modificado únicamente con proporciones variables de hule de llanta, los resultados logrados a partir del incremento en la proporción del modificador son favorables: por una parte, existe un aumento en la temperatura de ablandamiento de más de 30 °C y una caída en el valor de la penetración a poco menos de la mitad respecto al blanco de referencia, lo que indica una mayor resistencia del pavimento a deformarse a temperaturas elevadas, resultados respaldados por el crecimiento con la concentración de hule del índice de penetración, que, como se mencionó anteriormente, puede interpretarse como un indicador de la susceptibilidad térmica del material, siendo ésta última menor a valores más altos de IP.

Los cambios descritos en el párrafo anterior pueden explicarse con ayuda de las microscopías tomadas para estos materiales, en donde se observa la formación de una red tridimensional elástica de hule hinchado conteniendo al asfalto disperso, misma que mejorará la resistencia mecánica del asfalto al absorber gran parte de los esfuerzos a que se someta el pavimento, proporcionando a su vez mayor resistencia a las variaciones de temperatura.

Desde el punto de vista de las pruebas de estabilidad, únicamente la mezcla con 20% de hule de llanta muestra, de acuerdo a los datos de temperatura de ablandamiento, una clara inestabilidad bajo condiciones de almacenamiento estático a altas temperaturas.

En lo concerniente a las muestras de asfalto modificadas con polímero Vector 2411[®], el incremento en la concentración del modificador trae consigo el aumento en la temperatura de ablandamiento de la mezcla asfalto/Vector 2411[®]; mientras que la penetración aumenta en los casos en que se modifica con 0.5 y 1% de Vector 2411[®], y disminuye para la mezcla con el 2%. A pesar de ello, el índice de penetración tiende a incrementarse al modificar con una concentración más alta de copolímero, resultando materiales menos susceptibles a la temperatura.

Adicionalmente, las microscopías de fluorescencia para mezclas asfalto/Vector 2411[®] muestran que a concentraciones más bajas del último, el modificador tiende a formar conglomerados de forma entre ovalada y esférica, y que conforme se incrementa el porcentaje de Vector 2411[®], el copolímero tiende a formar una red que mejora las propiedades mecánicas del asfalto gracias a los entrecruzamientos físicos del poliestireno.

Por otro lado, en lo relativo a la separación de componentes bajo condiciones de almacenamiento estático a altas temperaturas, las mezclas entre el asfalto y el polímero Vector 2411[®] a concentraciones menores a 2% en peso de copolímero muestran bastante estabilidad, lo que puede interpretarse como una buena compatibilidad entre los componentes.

Finalmente, del estudio de los materiales asfálticos creados de la modificación con una combinación de variadas proporciones de hule de llanta y Vector 2411[®], resultó que al incrementar el porcentaje de Vector 2411[®] en muestras con una misma proporción de hule, el valor de la temperatura de ablandamiento también aumentó, siendo estos valores a su vez más grandes con mayores concentraciones de hule.

En el caso de los ensayos de penetración, particularmente en las muestras con 5 y 15% de hule de llanta, la adición de una concentración de 0.5% de Vector 2411[®] no produce mejora en el material, mientras que proporciones de 1 y 2% lo vuelven más rígido, disminuyendo su penetración. En cambio, en las mezclas con 5% de hule en peso, el incremento en la relación de Vector 2411[®] en el material presenta una ligera tendencia a aumentar, lo que implica un material más suave. A

pesar de ello, los resultados para el índice de penetración poseen una tendencia a crecer junto a las concentraciones de ambos modificadores, por lo que los materiales con las mayores concentraciones de ambos modificadores en los intervalos estudiados son los que presentan la menor susceptibilidad térmica.

Las microscopías de fluorescencia, por su parte, muestran la formación de una fase continua conformada por hule de llanta hinchado y otra por el asfalto y Vector 2411[®] dispersos. Como se mencionó con anterioridad, al absorber la mayor parte de los maltenos el hule, Vector 2411[®] presenta una mayor dificultad para incorporarse, acomodándose en conglomerados de forma esférica, siendo esta la razón por la que a mayores porcentajes de hule para una misma concentración de Vector 2411[®], es posible ver un número más alto de aglomeraciones de copolímero.

En las pruebas de segregación se observa que la adición de Vector 2411[®] en bajas concentraciones a las mezclas modificadas con hule resulta favorable para la estabilidad de las mismas, generándose los mejores materiales desde el punto de vista de esta prueba al adicionar 1% de Vector 2411[®].

6. CONCLUSIONES

En las mezclas asfalto/hule de llanta, el incremento en la proporción de hule mejora las propiedades termomecánicas del material, lo que se observa en el aumento de la temperatura de ablandamiento y disminución de la penetración. El índice de penetración incrementa junto con el porcentaje de hule en la mezcla, obteniéndose materiales con menor susceptibilidad a los cambios de temperatura. El crecimiento de la concentración de hule en la mezcla produce una mayor inestabilidad de la misma bajo condiciones de almacenamiento.

Con respecto a las mezclas asfalto/Vector 2411[®], el aumento en la proporción de polímero Vector 2411[®] mejora la temperatura de ablandamiento mas no la dureza del material, salvo en el caso en que se utiliza una concentración del 2%; aun así, el índice de penetración aumenta con la relación de polímero Vector 2411[®]. Las mezclas asfalto/Vector 2411[®] exhiben una buena estabilidad bajo condiciones de almacenamiento a altas temperaturas a concentraciones de Vector 2411[®] entre el 0.5 y 2% en peso.

En lo concerniente a los materiales asfalto/hule de llanta/Vector 2411[®], para una misma concentración de hule, el aumento en la proporción de polímero Vector 2411[®] produce una mejora en la temperatura de ablandamiento. De la misma forma, los materiales con porcentajes mayores de hule presentan valores más altos para esta propiedad. En el caso de las muestras con 5 y 15% de hule de llanta, estos materiales exhiben una menor dureza al ser modificados con 0.5% de polímero Vector 2411[®]. Las muestras con 1% y 2%, sin embargo, sí presentan una mejora creciente en la penetración del material volviéndolo mecánicamente más resistente. La adición del polímero Vector 2411[®] en concentraciones entre el 1 y 2% de este modificador a las mezclas asfalto/hule de llanta favorece la estabilidad de las mismas bajo condiciones de almacenamiento estático a altas temperaturas, obteniéndose una estabilidad máxima con un porcentaje de copolímero del 1%.

De las formulaciones estudiadas, se puede concluir que aquélla con las mejores características corresponde a la preparada con 20% de hule de llanta y 2%

de polímero Vector 2411[®], ya que posee el valor más alto de temperatura de ablandamiento, una de las penetraciones más bajas, y el mayor índice de penetración, lo que se traduce como un material bastante elástico y poco susceptible a las variaciones de temperatura, además de que posee una buena estabilidad bajo condiciones de almacenamiento.

No obstante, debe tomarse en cuenta que la mezcla con 20% de hule de llanta y 1% de Vector 2411[®] permite la incorporación de la mayor cantidad de hule del intervalo, empleando la mitad de la cantidad de Vector 2411[®] que la muestra 20H/V2.0. La diferencia en penetración entre ambas mezclas es de únicamente 1.8% (20H/V1.0 con 22 dmm frente a 21.6 dmm para 20H/V1.0) y con total estabilidad de 20H/V1.0 para el almacenamiento estático.

Finalmente, en lo concerniente a la aplicación de los materiales obtenidos, cabe destacar que las mezclas que involucran en su composición un 15 y 20% de hule de llanta poseen propiedades de penetración (19.1 – 25.4 dmm) y de temperatura de ablandamiento (73.8 – 99.0 °C) similares a aquéllas señaladas en la norma ASTM 312 para los asfaltos utilizados en la impermeabilización de techos (TA: 85 – 96 °C y PE (25 °C): 15 – 35 dmm, para asfalto Tipo III) (31); lo que podría sugerir un posible uso de estas modificaciones también como impermeabilizante.

7. REFERENCIAS

1. *The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification.* **LEUSEUR, Didier.** Madrid : Elsevier, 2009, Advances in coloid and interface science 145, pp. 42-82.
2. **The Asphalt Institute.** *Manual del asfalto.* [trans.] Manuel Velázquez. 4a reimpresión. Bilbao : URMO, S. A., 1973.
3. **The American Society for Testing and Materials.** *Standard terminology relating to materials for roads and pavements.* ASTM D 8. 1991.
4. **KIRK, Raymond F. and OTHMER, Donald F.** *The Asphalt. Encyclopedia of chemical technology.* 4th ed. New York : A Wiley-Interscience Publication, 1998. Vol. III.
5. **GONZÁLEZ García, Esteban Alberto.** *Estudio de la modificación de asfaltos con polímeros parcialmente hidrogenados y azufre. Tesis de Maestría en Ingeniería Química.* México : Facultad de Química, UNAM, 2012.
6. **MARTÍNEZ Estrada, Abigail.** *Efecto del azufre sobre las propiedades mecánicas de asfalto modificado con polímeros del tipo SB y SBS. Tesis de Doctorado en Ingeniería Química.* México : Facultad de Química, UNAM, 2009.
7. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** CMT. Características de los materiales. Materiales para pavimentos. *Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. Calidad de materiales asfálticos. N-CMT-4-05-001/06.* 2006.
8. **STEVENS, Malcolm P.** *Polymer chemistry. An introduction.* 3rd ed. New York : Oxford University Press, 1999.
9. **CHALLA, Ger.** *Polymer chemistry. An introduction.* London : Ellis Horwood Limited, 1993.
10. **ROSEN, Stephen L.** *Fundamental principles of polymeric materials.* 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, 1993.

11. **ODIAN, George.** *Principles of polymerization.* 4th ed. New Jersey : John Wiley & Sons, 2004.
12. **CARRAHER, Charles E. and SEYMOUR, Raymond B.** *Polymer chemistry.* 7th. Florida : CRC Press, 2008.
13. **SEGOVIA Gamboa, Edgar Alberto.** *Criterios generales para la optimización del proceso de fabricación de llantas neumáticas. Tesis de Ingeniería Química Petrolera.* México : Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, IPN, 1996.
14. **Michelin.** The tire digest. *An unknown object: the tire.* [Online] 2014. [Cited: 1 Mayo 2014.] thetiredigest.michelin.com/an-unknown-object-the-tire-materials.
15. **CASTRO, Guillermo.** Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A. *Materiales y compuestos para la industria del neumático.* [Online] Diciembre 2008. [Cited: 1 Mayo 2014.] http://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf.
16. *Llantas de desecho. La contaminación por llantas un problema binacional.* **Andellac.** 84, Marzo-Abril 2014, Andellac, pp. 44-54.
17. **Valan.** Valanllantas. *Proceso de reciclado de llantas y sus usos.* [Online] 2014. [Cited: 3 Mayo 2014.] <http://www.valanllantas.com/reciclado-de-llantas-y-sus-usos/>.
18. **Bureau of International Recycling.** Bureau of International Recycling. *La industria. Neumáticos.* [Online] [Cited: 3 Mayo 2014.] <http://www.bir.org/industry-es-es/tyres-es-es/>.
19. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** CMT. Características de los materiales. Materiales para pavimentos. *Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. Calidad de materiales asfálticos modificados. N-CMT-4-05-002/06.* 2006.
20. *The use of polymer modification of bitumen for durant hot asphalt mixtures.* **HAMID, Behbahani, HASSAN, Ziari and SHAMS, Noubakhat.** s.l. : INSInet Publication, 2008, Journal of Applied Sciences Research, 4(1), pp. 96-102.

21. **ÁPAEZ Herrera, Luis Alberto.** *Estudio del comportamiento termo-mecánico de asfaltos modelo modificados con un copolímero lineal dibloque del tipo SB. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química.* México : Facultad de Química, UNAM, 2007.
22. **CÓATL Lorenzo, Alejandra.** *Estudio de las propiedades termomecánicas de mezclas asfalto-hule de llanta. Tesis de Ingeniería Química.* México : Facultad de Química, UNAM, 2013.
23. **The American Society for Testing and Materials.** *Standard specification for asphalt-rubber binder. ASTM D 6114.* 1997.
24. **GARNICA Anguas, Paul, et al.** Publicación Técnica No 254. *Comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con SBR.* Querétaro : Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte, 2004.
25. **The American Society for Testing and Materials.** *Standard test methods for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus). ASTM D 36.* 1986.
26. **The American Society for Testing and Materials.** *Standard test method for penetration of bituminous materials. ASTM D 5.* 1986.
27. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** MMP. Métodos de muestreo y prueba de materiales. Materiales para pavimentos. *Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. Separación en cemento asfáltico modificado. M-MMP-4-05-022/02.* 2002.
28. **SLAVÍK, Jan.** *Fluorescence microscopy and fluorescent probes.* New York : Plenum Press, New York, 1996.
29. **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 Ingeniería Química.* México : Facultad de Química, UNAM, 2008.
30. **PEÑA Ávila, Ariel Mauricio Antonio.** *Estudio del comportamiento termomecánico de asfaltos con diferente relación asfaltenos/maltenos modificados con un copolímero radial de alto peso molecular de estireno-butadieno para su*

aplicación en carpetas de rodamiento vehicular. Estancia Académica. México : Facultad de Química, UNAM, 2013.

31. **The American Society for Testing and Materials.** *Standard specification for asphalt used in roofing. ASTM D 312.* 2000.

32. **Secretaría de Comunicaciones y Transportes.** CMT. Características de los materiales. Materiales para pavimentos. *Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. Calidad de mezclas asfálticas para carreteras. N-CMT-4-05-003/08.* 2008.

33. **VELÁZQUEZ Torres, Luis. R.** *Diseño de pavimentos flexibles con superficie de rodamiento conformada con asfaltos ahulados y reforzados con polímeros. Tesis de Ingeniería Civil.* México : Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Zacatenco, IPN, 2011.

34. *Efecto de la composición del bloque elastomérico de SBS y SEBES en las propiedades reológicas de asfaltos modificados.* **HERRERA Nájera, R., et al.** México : s.n., 2012, Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 11.

35. **The American Society for Testing and Materials.** *Standard test methods for separation of asphalt into four fractions. ASTM D 4124.* 1986.

36. *The effect of asphaltene on thermal properties of bitumen.* **FIROOZIFAR, S. Hassan, FOROUTAN, Sanaz and FOROUTAN, Sara.** Tehran : Elsevier, 2011, Chemical engineering research and design 89, pp. 2044-2048.

ANEXO I. NORMAS ASTM

Norma ASTM D 36



Designation: D 36 – 86 (Reapproved 1989)

Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)¹

This standard is issued under the fixed designation D 36; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

NOTE—A formula in 10.4 was corrected editorially and the year date changed on Feb. 10, 1986.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the softening point of bitumen in the range from 30 to 157°C (86 to 315°F) using the ring-and-ball apparatus immersed in distilled water (30 to 80°C), USP glycerin (above 80 to 157°C), or ethylene glycol (30 to 110°C).

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.3 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials²
- D 92 Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup³
- D 140 Practice for Sampling Bituminous Materials⁴
- E 1 Specification for ASTM Thermometers⁵

3. Summary of Test Method

3.1 Two horizontal disks of bitumen, cast in shouldered brass rings, are heated at a controlled rate in a liquid bath while each supports a steel ball. The softening point is reported as the mean of the temperatures at which the two disks soften enough to allow each ball, enveloped in bitumen, to fall a distance of 25 mm (1.0 in.).

4. Significance and Use

4.1 Bitumens are viscoelastic materials without sharply defined melting points; they gradually become softer and less viscous as the temperature rises. For this reason, softening points must be determined by an arbitrary and closely defined method if results are to be reproducible.

4.2 The softening point is useful in the classification of bitumens, as one element in establishing the uniformity of shipments or sources of supply, and is indicative of the tendency of the material to flow at elevated temperatures encountered in service.

5. Apparatus

5.1 *Rings*—Two square-shouldered brass rings conforming to the dimensions shown in Fig. 1(a).

5.2 *Pouring Plate*—A flat, smooth, brass plate approximately 50 by 75 mm (2 by 3 in.).

5.3 *Balls*—Two steel balls, 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ in.) in diameter, each having a mass of 3.50 ± 0.05 g.

5.4 *Ball-Centering Guides*—Two brass guides for centering the steel balls, one for each ring, conforming to the general shape and dimensions shown in Fig. 1 (b).

5.5 *Bath*—A glass vessel, capable of being heated, not less than 85 mm in inside diameter and not less than 120 mm in depth from the bottom of the flare.

NOTE 1—An 800-mL, low-form Griffin beaker of heat-resistant glass meets this requirement.

5.6 *Ring Holder and Assembly*—A brass holder designed to support the two rings in a horizontal position, conforming to the shape and dimensions shown in Fig. 1 (c), supported in the assembly illustrated in Fig. 1 (d). The bottom of the shouldered rings in the ring holder shall be 25 mm (1.0 in.) above the upper surface of the bottom plate, and the lower surface of the bottom plate shall be 16 ± 3 mm ($\frac{5}{8} \pm \frac{1}{8}$ in.) from the bottom of the bath.

5.7 Thermometers:

5.7.1 An ASTM Low Softening Point Thermometer, having a range from -2 to $+80^\circ\text{C}$ or 30 to 180°F , and conforming to the requirements for Thermometer 15C or 15F as prescribed in Specification E 1.

5.7.2 An ASTM High Softening Point Thermometer, having a range from 30 to 200°C or 85 to 392°F , and conforming to the requirements for Thermometer 16C or 16F as prescribed in Specification E 1.

5.7.3 An ASTM Bituminous Materials Softening Point Thermometer, having a range from -1 to $+175^\circ\text{C}$ or 30 to 350°F , and conforming to the requirements for Thermometer 113C or 113F as prescribed in Specification E 1.

5.7.4 The appropriate thermometer shall be suspended in the assembly as shown in Fig. 1 (d) so that the bottom of the bulb is level with the bottom of the rings and within 13 mm (0.5 in.) of the rings, but not touching them or the ring holder.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-8 on Roofing, Waterproofing, and Bituminous Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D08.03 on Surfacing and Bituminous Materials for Membrane Waterproofing and Builtup Roofing.

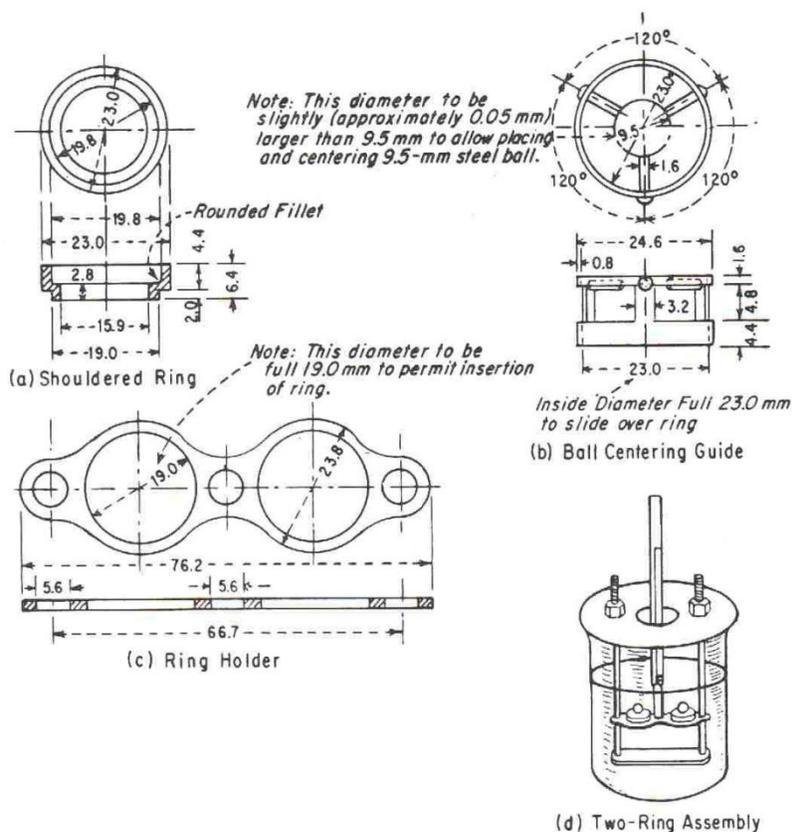
Current edition approved Feb. 10, 1986. Published April 1986. Originally published as D 36 – 62T. Last previous edition D 36 – 84.

² Annual Book of ASTM Standards, Vols 04.01, 04.02, 04.04, and 04.08.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vols 04.04, 05.01, and 10.03.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vols 04.03, 04.04, and 04.08.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vols 05.03 and 14.01.



NOTE—All dimensions are in millimetres.

FIG. 1 Shouldered Ring, Ball-Centering Guide, Ring Holder, and Assembly of Apparatus Showing Two Rings

6. Reagents and Materials

6.1 Bath Liquids:

6.1.1 Freshly Boiled Distilled Water.

NOTE 2—The use of freshly boiled distilled water is essential to avoid trapping air bubbles on the surface of the specimen which may affect the results.

6.1.2 USP Glycerin, or

NOTE 3—CAUTION:—Glycerin has a flash point of 160°C (320°F) in accordance with Test Method D 92.

6.1.3 Ethylene Glycol, with a boiling point between 195 and 197°C (383 and 387°F).

NOTE 4—CAUTION:—Ethylene glycol is toxic when taken internally or inhaled as a vapor. Avoid prolonged or repeated skin contact and inhalation of vapors. Its flash point is 115°C (239°F) in accordance with Test Method D 92. When using this bath liquid, conduct the test in a vented laboratory hood with adequate exhaust fan capacity to ensure removal of toxic vapors.

6.2 Release Agents:

6.2.1 To prevent adhesion of bitumen to the pouring plate when casting disks, the surface of the brass pouring plate

may be thinly coated just before use with silicone oil or grease (Note 5), a mixture of glycerin and dextrin, talc, or china clay.

NOTE 5—CAUTION:—Isolate silicones from other bituminous testing equipment and samples to avoid contamination, and wear disposable rubber gloves whenever handling silicones or apparatus coated with them. Silicone contamination can produce erroneous results in other tests such as those for penetration and flash point.

7. Sampling

7.1 Sample the material in accordance with Practice D 140.

8. Test Specimens

8.1 Do not start unless it is planned to complete preparation and testing of all asphalt specimens within 6 h and all coal-tar pitch specimens within 4½ h. Heat the bitumen sample with care, stirring frequently to prevent local overheating, until it has become sufficiently fluid to pour (Note 6). Stir carefully to avoid incorporation of air bubbles in the sample.

NOTE 6—An electric hot plate having a minimum power to unit-surface-area ratio of 37 kW/m² has been found satisfactory for this purpose.

8.1.1 Take no more than 2 h to heat an asphalt sample to its pouring temperature; in no case shall this be more than 110°C (200°F) above the expected softening point of the asphalt.

8.1.2 Take no more than 30 min to heat a coal-tar pitch sample to its pouring temperature; in no case shall this be more than 55°C (100°F) above the expected softening point of the coal-tar-pitch.

8.1.3 If the test must be repeated later, do not reheat this sample; use a fresh sample in a clean container to prepare new test specimens.

8.2 Heat the two brass rings (but not the pouring plate) to the approximate pouring temperature, and place them on the pouring plate treated with one of the release agents.

8.3 Pour a slight excess of the heated bitumen into each ring, and then allow the specimens to cool in ambient air for at least 30 min. For materials that are soft at room temperature, cool the specimens for at least 30 min at an air temperature at least 10°C (18°F) below the expected softening point. From the time the specimen disks are poured, no more than 240 min shall elapse before completion of the test.

8.4 When the specimens have cooled, cut away the excess bitumen cleanly with a slightly heated knife or spatula, so that each disk is flush and level with the top of its ring.

9. Procedure

9.1 Select one of the following bath liquids and thermometers appropriate for the expected softening point:

9.1.1 Freshly boiled distilled water for softening points between 30 and 80°C (86 and 176°F); use Thermometer 15C or 15F, or Thermometer 113C or 113F. The starting bath temperature shall be 5 ± 1°C (41 ± 2°F).

9.1.2 USP glycerin for softening points above 80°C (176°F) and up to 157°C (315°F); use Thermometer 16C or 16F, or Thermometer 113C or 113F. The starting bath temperature shall be 30 ± 1°C (86 ± 2°F).

9.1.3 Ethylene glycol for softening points between 30 and 110°C (86 and 230°F); use Thermometer 113C or 113F. The starting bath temperature shall be 5 ± 1°C (41 ± 2°F).

NOTE 7—For referee purposes, all softening points up to 80°C (176°F) shall be determined in a water bath and all softening points above 80°C (176°F) shall be determined in a glycerin bath.

9.2 Assemble the apparatus in the laboratory hood with the specimen rings, ball-centering guides, and thermometer in position, and fill the bath so that the liquid depth will be 105 ± 3 mm (4¹/₈ ± ¹/₈ in.) with the apparatus in place. If using ethylene glycol, make sure the hood exhaust fan is turned on and operating properly to remove toxic vapors. Using forceps, place the two steel balls in the bottom of the bath so they will reach the same starting temperature as the rest of the assembly.

9.3 Place the bath in ice water, if necessary, or gently heat to establish and maintain the proper starting bath temperature for 15 min with the apparatus in place. Take care not to contaminate the bath liquid.

9.4 Again using forceps, place a ball from the bottom of the bath in each ball-centering guide.

9.5 Heat the bath from below so that the temperature indicated by the thermometer rises at a uniform rate of 5°C (9°F)/min (Note 8). Protect the bath from drafts, using shields if necessary. Do not average the rate of temperature rise over the test period. The maximum permissible variation for any 1-min period after the first 3 min shall be ± 0.5°C (± 1.0°F). Reject any test in which the rate of temperature rise does not fall within these limits.

NOTE 8—Rigid adherence to the prescribed heating rate is essential to reproducibility of results. Either a gas burner or electric heater may be used, but the latter must be of the low-lag, variable output type to maintain the prescribed rate of heating.

9.6 Record for each ring and ball the temperature indicated by the thermometer at the instant the bitumen surrounding the ball touches the bottom plate. Make no correction for the emergent stem of the thermometer. If the difference between the two temperatures exceeds 1°C (2°F), repeat the test.

10. Calculation

10.1 For a given bitumen specimen, the softening point determined in a water bath will be lower than that determined in a glycerin bath. Since the softening point determination is necessarily arbitrary, this difference matters only for softening points slightly above 80°C (176°F).

10.2 The change from water to glycerin for softening points above 80°C creates a discontinuity. With rounding, the lowest possible asphalt softening point reported in glycerin is 84.5°C (184°F), and the lowest possible coal-tar pitch softening point reported in glycerin is 82.0°C (180°F). Softening points in glycerin lower than these translate to softening points in water of 80°C (176°F) or less, and shall be so reported.

10.2.1 The correction for asphalt is -4.2°C (-7.6°F), and for coal-tar pitch is -1.7°C (-3.0°F). For referee purposes, repeat the test in a water bath.

10.2.2 Under any circumstances, if the mean of the two temperatures determined in glycerin is 80.0°C (176.0°F) or lower for asphalt, or 77.5°C (171.5°F) or lower for coal-tar pitch, repeat the test in a water bath.

10.3 To convert softening points slightly above 80°C (176°F) determined in water to those determined in glycerin, the correction for asphalt is +4.2°C (+7.6°F) and for coal-tar pitch is +1.7°C (+3.0°F). For referee purposes, repeat the test in a glycerin bath.

10.3.1 Under any circumstances, if the mean of the two temperatures determined in water is 85.0°C (185.0°F) or higher, repeat the test in a glycerin bath.

10.4 Results obtained by using an ethylene glycol bath will vary from those using water and glycerin by amounts calculated from the following formulas:

Asphalt:

$$\begin{aligned} \text{SP (glycerin)} &= 1.026583 \times \text{SP (ethylene glycol)} - 1.334968^\circ\text{C} \\ \text{SP (water)} &= 0.974118 \times \text{SP (ethylene glycol)} - 1.44459^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Coal Tar:

$$\begin{aligned} \text{SP (glycerin)} &= 1.044795 \times \text{SP (ethylene glycol)} - 5.063574^\circ\text{C} \\ \text{†SP (water)} &= 1.061111 \times \text{SP (ethylene glycol)} - 8.413488^\circ\text{C} \end{aligned}$$

† Editorially corrected.

11. Report

11.1 When using ASTM Thermometer 15C or 15F, report to the nearest 0.2°C or 0.5°F the mean or corrected mean of the temperatures recorded in 9.6 as the softening point.

11.2 When using ASTM Thermometer 16C or 16F, or ASTM Thermometer 113C or 113F, report to the nearest 0.5°C or 1.0°F the mean or corrected mean of the temperatures recorded in 9.6 as the softening point.

11.3 Report the bath liquid used in the test.

12. Precision

12.1 With distilled water or USP glycerin, the following criteria shall be used for judging the acceptability of results (95 % probability):

12.1.1 *Single-Operator Precision*—The single-operator standard deviation has been found to be 0.41°C (0.73°F). Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on the same sample of bitumen should not

differ by more than 1.2°C (2.0°F).⁶

12.1.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory standard deviation has been found to be 0.70°C (1.26°F). Therefore, results of two properly conducted tests on the same sample of bitumen from two laboratories should not differ by more than 2.0°C (3.5°F).⁶

12.2 With ethylene glycol, the following criteria shall be used for judging the acceptability of results:

12.2.1 *Single-Operator Precision*—The single-operator standard deviation has been found to be 0.72°C (1.29°F). Therefore, results of two properly conducted tests by the same operator on the same sample of bitumen should not differ by more than 2.0°C (3.5°F).⁶

12.2.2 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory standard deviation has been found to be 1.08°C (1.95°F). Therefore, results of two properly conducted tests on the same sample of bitumen from two laboratories should not differ by more than 3.0°C (5.5°F).⁶

⁶ These numbers represent, respectively, the (1S) and (D2S) limits as described in Practice C 670.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.



Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D 5; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This method has been approved for use by agencies of the Department of Defense and for listing in the DoD Index of Specifications and Standards.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of the penetration of semi-solid and solid bituminous materials. Materials having penetrations below 350 can be tested by the standard apparatus and procedure described. Materials having penetrations between 350 and 500 can be determined using the special apparatus and modifications given in 9.3.

1.2 *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety problems associated with its use. It is the responsibility of whoever uses this standard to consult and establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials²
- D 2398 Test Method for Softening Point of Bitumen in Ethylene Glycol (Ring-and-Ball)³
- E 1 Specification for ASTM Thermometers⁴
- E 77 Method for Inspection and Verification of Liquid-in-Glass Thermometers⁴

2.2 ANSI Standards:

B 46.1 Surface Texture

2.3 IP Standards:

IP Standard Thermometers

3. Definition

3.1 *penetration*—consistency of a bituminous material expressed as the distance in tenths of a millimeter that a standard needle vertically penetrates a sample of the material under known conditions of loading, time, and temperature.

4. Summary of Method

4.1 The sample is melted and cooled under controlled conditions. The penetration is measured with a penetrometer by means of which a standard needle is applied to the sample under specific conditions.

5. Significance and Use

5.1 The penetration test is used as a measure of consistency. Higher values of penetration indicate softer consistency.

6. Apparatus

6.1 *Penetration Apparatus*—Any apparatus that permits the needle holder (spindle) to move vertically without measurable friction and is capable of indicating the depth of penetration to the nearest 0.1 mm, will be acceptable. The weight of the spindle shall be 47.5 ± 0.05 g. The total weight of the needle and spindle assembly shall be 50.0 ± 0.05 g. Weights of 50 ± 0.05 g and 100 ± 0.05 g shall also be provided for total loads of 100 g and 200 g, as required for some conditions of the test. The surface on which the sample container rests shall be flat and the axis of the plunger shall be at approximately 90° to this surface. The spindle shall be easily detached for checking its weight.

6.2 Penetration Needle:

6.2.1 The needle (see Fig. 1) shall be made from fully hardened and tempered stainless steel, Grade 440-C or equal, HRC 54 to 60. It shall be approximately 50 mm (2 in.) in length and 1.00 to 1.02 mm (0.0394 to 0.0402 in.) in diameter. It shall be symmetrically tapered at one end by grinding to a cone having an angle between 8.7° and 9.7° over the entire cone length. The cone should be coaxial with the straight body of the needle. The total axial variation of the intersection between the conical and straight surfaces shall not be in excess of 0.2 mm (0.008 in.). The truncated tip of the cone shall be within the diameter limits of 0.14 and 0.16 mm (0.0055 and 0.0063 in.) and square to the needle axis within 2° . The entire edge of the truncated surface at the tip shall be sharp and free of burrs. When surface texture is measured in accordance with American National Standard B46.1 or the United Kingdom equivalent, the surface roughness height of the tapered cone surface shall be 0.2 to $0.3 \mu\text{m}$ (8 to 12 $\mu\text{in.}$) arithmetic average. The needle shall be mounted in a brass or stainless steel ferrule and the exposed length shall be within the limits of 40 and 45 mm (1.57 and

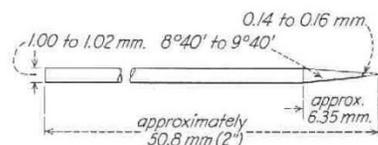


FIG. 1 Needle for Penetration Test

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-4 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.44 on Rheological Tests.

Current edition approved April 25, 1986. Published May 1986. Originally published as D 5 - 59 T. Last previous edition D 5 - 83.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.03.

³ Discontinued—see 1984 Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.04.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.03.

1.77 in.). The ferrule shall be 3.2 ± 0.05 mm (0.12 ± 0.003 in.) in diameter and 38 ± 1 mm (1.50 ± 0.04 in.) in length. The needle shall be rigidly mounted in the ferrule. The run-out (total-indicator reading) of the needle tip and any portion of the needle relative to the ferrule axis shall not exceed 1 mm (0.04 in.). The weight of the ferrule needle assembly shall be 2.50 ± 0.05 g. (A drill hole at the end of the ferrule or a flat on the side is permissible to control the weight.) Individual identification markings shall be placed on the ferrule of each needle; the same markings shall not be repeated by a manufacturer within a 3-year period.

6.2.2 Needles used in testing materials for conformance to specifications shall be shown to have met the requirements of 6.2.1 when tested by a qualified agency.

NOTE 1—In the United States the manufacturer or commercial laboratories will certify the test needles for conformance to the permissible variations. In the United Kingdom the National Physical Laboratory will certify needles.

6.3 *Sample Container*—A metal or glass cylindrical, flat-bottom container of essentially the following dimensions shall be used:

For penetrations below 200:	
Diameter, mm	55
Internal depth, mm	35
For penetrations between 200 and 350:	
Diameter, mm	70
Internal depth, mm	45

NOTE 2—In the United States containers known as tin boxes or as seamless ointment boxes may be obtained in dimensions approximating the above requirements. A 3-oz container is used for penetrations below 200 and a 6-oz container is used for penetrations between 200 and 350.

6.4 *Water Bath*—A bath having a capacity of at least 10 litres and capable of maintaining a temperature of $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ or any other temperature of test within 0.1°C . The bath shall have a perforated shelf supported in a position not less than 50 mm from the bottom and not less than 100 mm below the liquid level in the bath. If penetration tests are to be made in the bath itself, an additional shelf strong enough to support the penetrometer shall be provided. Brine may be used in the bath for determinations at low temperatures.

NOTE 3—The use of distilled water is recommended for the bath. Take care to avoid contamination of the bath water by surface active agents, release agents, or other chemicals; as their presence may affect the penetration values obtained.

6.5 *Transfer Dish*—When used, the transfer dish shall have a capacity of at least 350 mL and of sufficient depth of water to cover the large sample container. It shall be provided with some means for obtaining a firm bearing and preventing rocking of the container. A three-legged stand with three-point contact for the sample container is a convenient way of ensuring this.

6.6 *Timing Device*—For hand-operated-penetrometers any convenient timing device such as an electric timer, a stop watch, or other spring activated device may be used provided it is graduated in 0.1 s or less and is accurate to within ± 0.1 s for a 60-s interval. An audible seconds counter adjusted to provide 1 beat each 0.5 s may also be used. The time for a 11-count interval must be 5 ± 0.1 s. Any automatic timing device attached to a penetrometer must be accurately calibrated to provide the desired test interval within ± 0.1 s.

6.7 *Thermometers*—Calibrated liquid-in-glass thermometers of suitable range with subdivisions and maximum scale error of 0.1°C (0.2°F) or any other thermometric device of equal accuracy, precision and sensitivity shall be used. Thermometers shall conform to the requirements of Specification E 1.

6.7.1 Suitable thermometers commonly used are:

ASTM Number	Range
17C or 17F	19 to 27°C (66 to 80°F)
63C or 63F	-8 to $+32^\circ\text{C}$ (18 to 89°F)
64C or 64F	25 to 55°C (77 to 131°F)

6.7.2 The thermometer used for the water bath shall periodically be calibrated in accordance with Method E 77.

7. Preparation of Test Specimen

7.1 Heat the sample with care, stirring when possible to prevent local overheating, until it has become sufficiently fluid to pour. In no case should the temperature be raised to more than 60°C above the expected softening point for tar pitch in accordance with Test Method D 2398, or to more than 90°C above for asphalt (bitumen). Do not heat samples for more than 30 min. Avoid incorporating bubbles into the sample.

7.2 Pour the sample into the sample container to a depth such that, when cooled to the temperature of test, the depth of the sample is at least 10 mm greater than the depth to which the needle is expected to penetrate. Pour two separate portions for each variation in test conditions.

7.3 Loosely cover each container as a protection against dust (a convenient way of doing this is by covering with a lipped beaker) and allow to cool in an atmosphere at a temperature between 15 and 30°C for 1 to $1\frac{1}{2}$ h for the small container and $1\frac{1}{2}$ to 2 h for the larger. Then place the two samples together with the transfer dish, if used, in the water bath maintained at the prescribed temperature of test. Allow the smaller (3 oz) container to remain for 1 to $1\frac{1}{2}$ h and the larger (6 oz) container to remain for $1\frac{1}{2}$ to 2 h.

8. Test Conditions

8.1 Where the conditions of test are not specifically mentioned, the temperature, load, and time are understood to be 25°C (77°F), 100 g, and 5 s, respectively. Other conditions may be used for special testing, such as the following:

Temperature, $^\circ\text{C}$ ($^\circ\text{F}$)	Load, g	Time, s
0 (32)	200	60
4 (39.2)	200	60
46.1 (115)	50	5

In such cases the specific conditions of test shall be reported.

9. Procedure

9.1 Examine the needle holder and guide to establish the absence of water and other extraneous matter. Clean a penetration needle with toluene or other suitable solvent, dry with a clean cloth, and insert the needle in the penetrometer (Note 4). Unless otherwise specified place the 50-g weight above the needle, making the total moving load 100 ± 0.1 g. If tests are made with the penetrometer in the bath, place the sample container directly on the submerged stand of the penetrometer. Keep the sample container completely covered with the water in the bath. If the tests are made with the

penetrometer outside the bath, place the sample container in the transfer dish, cover the container completely with water from the constant temperature bath and place the transfer dish on the stand of the penetrometer. In either case, position the needle by slowly lowering it until its tip just makes contact with the surface of the sample. This is accomplished by bringing the actual needle tip into contact with its image reflected by the surface of the sample from a properly placed source of light (Note 5). Either note the reading of the penetrometer dial or bring the pointer to zero. Quickly release the needle holder for the specified period of time and adjust the instrument to measure the distance penetrated in tenths of a millimetre. If the container moves, ignore the result.

NOTE 4—For certain types of asphalts erratic results are sometimes obtained. When this occurs, the customary practice in the United Kingdom is to pretreat the needles by immersing them for 5 min in a 1% solution of oleic acid prior to drying and running the test. This practice is not followed in the United States.

NOTE 5—The positioning of the needle can be materially aided by using an illuminated methyl methacrylate tube.

9.2 Make at least three determinations at points on the surface of the sample not less than 10 mm from the side of the container and not less than 10 mm apart. If the transfer dish is used, return the sample and transfer dish to the constant temperature bath between determinations. Use a clean needle for each determination. If the penetration is greater than 200, use at least three needles leaving them in the sample until the three determinations have been completed.

NOTE 6—For referee tests, penetrations at temperatures other than 25°C (77°F) should be made without removing the sample from the bath.

9.3 The needles, containers, and other conditions described in this method provide for determinations of penetrations up to 350. However, the method may be used for direct determinations up to 500 provided special containers and needles are used. The container shall be at least 60 mm in depth. The over-all volume of material in the container should not exceed 125 mL to permit proper temperature adjustment of the sample.

9.3.1 Specially made needles for such determination shall meet all the requirements of 6.2 for dimensions and weight except that the minimum exposed length of the needle shall be 50 mm.

9.3.2 An approximation of the penetration of such high penetration materials may also be obtained by determining the penetration using the standard needle and 6-oz container but with a 50-g loading. The penetration is then calculated by multiplying the result for the 50-g load by the square root of 2. That is:

$$\text{Penetration under 100-g load} = \text{penetration under 50-g load} \times 1.414$$

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

TABLE 1 Precision Criteria

Material	Standard Deviation or Coefficient of Variation (IS) or (IS %)	Acceptable Range of Two Test Results (D2S) or (D2S %)
Single-operator precision:		
Asphalts at 77°F (25°C) below 50 penetration, units	0.35	1
Asphalts at 77°F (25°C) 50 penetration and above, percent of their mean	1.1	3
Tar pitches at 77°F (25°C) ^A percent of their mean	5.2	15
Multilaboratory precision:		
Asphalts at 77°F (25°C) below 50 penetration, units	1.4	4
Asphalts at 77°F (25°C) 50 penetration and above, percent of their mean	2.8	8
Tar pitches at 77°F (25°C) ^A units	1.4	4

^A Estimates of precision for tar pitches are based on results from 2 pitches with penetration of 7 and 24. Estimates may not be applicable to appreciably harder or softer materials.

The report of results obtained by this procedure shall indicate the basis of the test.

10. Report

10.1 Report to nearest whole unit the average of three penetrations whose values do not differ by more than the following:

Penetration	0 to 49	50 to 149	150 to 249	250
Maximum difference between highest and lowest determination	2	4	6	8

10.1.1 If the differences are exceeded repeat the test using the second sample.

10.1.2 If the appropriate tolerance is again exceeded, ignore all results and repeat the test completely.

11. Precision and Bias (Note 7)

11.1 Criteria for judging the acceptability of penetration results obtained by this method are given in Table 1. The figures given in Column 2 of Table 1 are the standard deviations or coefficients of variation that have been found to be appropriate for the materials and conditions of test described in Column 1. The figures given in Column 3 are the limits that should not be exceeded by the difference between the results of two properly conducted tests. The range of two acceptable results for single operation precision is often referred to as repeatability. The range for multilaboratory precision is often referred to as reproducibility. A "test result" is the average of acceptable penetrations as described in Section 10.

NOTE 7—For definition of terms and significance of the parameters indicated reference should be made to Practice C 670.



Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements¹

This standard is issued under the fixed designation D 8; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

BITUMINOUS MATERIALS

Relating in General to Bituminous Materials

anionic emulsion—a type of emulsion such that a particular emulsifying agent establishes a predominance of negative charges on the discontinuous phase.

bitumen—a class of black or dark-colored (solid, semisolid, or viscous) cementitious substances, natural or manufactured, composed principally of high molecular weight hydrocarbons, of which asphalts, tars, pitches, and asphaltites are typical.

bituminous, *adj.*—containing or treated with bitumen (also *bituminized*). Examples: bituminous concrete, bituminized felts and fabrics, bituminous pavement.

bituminous emulsion—(1) a suspension of minute globules of bituminous material in water or in an aqueous solution, (2) a suspension of minute globules of water or of an aqueous solution in a liquid bituminous material.

cationic emulsion—a type of emulsion such that a particular emulsifying agent establishes a predominance of positive charges on the discontinuous phase.

cut-back asphalt—petroleum residuum (asphalt) which has been blended with petroleum distillates.

DISCUSSION—Slow-curing materials may be made directly by distillation and are often referred to as road oils.

cut-back products—petroleum or tar residuums which have been blended with distillates.

flux—a bituminous material, generally liquid, used for softening other bituminous materials.

Relating Specifically to Petroleum or Asphalts

asphalt—a dark brown to black cementitious material in which the predominating constituents are bitumens which occur in nature or are obtained in petroleum processing.

asphalt cement—a fluxed or unfluxed asphalt specially prepared as to quality and consistency for direct use in the manufacture of bituminous pavements, and having a penetration at 25°C (77°F) of between 5 and 300, under a load of 100 g applied for 5 s.

asphaltenes—the high molecular weight hydrocarbon fraction precipitated from asphalt by a designated paraffinic naphtha solvent at a specified solvent-asphalt ratio.

DISCUSSION—The asphaltene fraction should be identified by the solvent and solvent-asphalt ratio used.

¹ This terminology is under the jurisdiction of ASTM Committee D-4 on Road and Paving Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D04.91 on Editorial and Definitions.

Current edition approved Feb. 19, 1991. Published April 1991. Originally published as D 8 – 12. Last previous edition D 8 – 89.

asphalt rock (rock asphalt)—a naturally occurring rock formation, usually limestone or sandstone, impregnated throughout its mass with a minor amount of bitumen.

asphalt-rubber—a blend of asphalt cement, reclaimed tire rubber, and certain additives in which the rubber component is at least 15 % by weight of the total blend and has reacted in the hot asphalt cement sufficiently to cause swelling of the rubber particles.

naphthene-aromatics—a mixture of naphthenic and aromatic hydrocarbons which are adsorbed from a paraffinic solvent on an adsorbent during percolation and then desorbed with an aromatic solvent such as toluene.

DISCUSSION—The naphthene-aromatics fraction should be identified by the solvent, the solvent-asphalt ratio and the absorbing medium.

native asphalt—asphalt occurring as such in nature.

polar-aromatics—a polar aromatic hydrocarbon fraction that is adsorbed on an adsorbing medium from a paraffinic solvent during percolation and then desorbed with a chlorinated hydrocarbon solvent such as trichloroethylene.

DISCUSSION—The polar-aromatics fraction should be identified by the solvent, the solvent-asphalt ratio and the absorbing medium.

reclaimed asphalt pavement (RAP)—asphalt pavement or paving mixture removed from its original location for use in recycled asphalt paving mixture.

recycled asphalt paving mixture—a mixture of reclaimed asphalt pavement with the inclusion, if required, of asphalt cement, emulsified asphalt, cut-back asphalt, recycling agent, mineral aggregate, and mineral filler.

recycling agent (RA)—a blend of hydrocarbons with or without minor amounts of other materials that is used to alter or improve the properties of the aged asphalt in a recycled asphalt paving mixture.

rock asphalt—see **asphalt rock**.

saturates—a mixture of paraffinic and naphthenic hydrocarbons that on percolation in a paraffinic solvent are not adsorbed on the adsorbing medium. Other compounds such as naphthenic and polar aromatics are adsorbed thus permitting the separation of the saturate fraction.

DISCUSSION—The saturates fraction should be identified by the solvent, the solvent-asphalt ratio and the absorbing medium.

Relating Specifically to Tars and Pitches

coal tar—a dark brown to black cementitious material produced by the destructive distillation of bituminous coal.

coke-oven tar—coal tar produced in by-product coke ovens in the manufacture of coke from bituminous coal.

“free-carbon” in tars—the hydrocarbon fraction that is precipitated from a tar by dilution with carbon disulfide or benzene.

gas-house coal tar—coal tar produced in gas-house retorts in the manufacture of illuminating gas from bituminous coal.

oil-gas tars—tars produced by cracking oil vapors at high temperatures in the manufacture of oil gas.

itches—black or dark-brown solid cementitious materials which gradually liquefy when heated and which are obtained as residua in the partial evaporation or fractional distillation of tar.

refined tar—tar freed from water by evaporation or distillation which is continued until the residue is of desired consistency; or a product produced by fluxing tar residuum with tar distillate.

straight-run pitch—a pitch run to the consistency desired in the initial process of distillation and without subsequent fluxing.

tar—brown or black bituminous material, liquid or semi-solid in consistency, in which the predominating constituents are bitumens obtained as condensates in the destructive distillation of coal, petroleum, oil-shale, wood, or other organic materials, and which yields substantial quantities of pitch when distilled.

Relating Specifically to Tests

normal temperature—as applied to laboratory observations of the physical characteristics of bituminous materials, 25°C (77°F).

penetration—the consistency of a bituminous material expressed as the distance in tenths of a millimetre (0.1 mm) that a standard needle penetrates vertically a sample of the material under specified conditions of loading, time, and temperature.

Relating Specifically to Bituminous Mixing Plants

aggregate storage bins—bins that store the necessary aggregate sizes and feed them to the dryer in substantially the same proportions as are required in the finished mix.

automatic cycling control—a control system in which the opening and closing of the weigh hopper discharge gate, the bituminous discharge valve, and the pugmill discharge gate are actuated by means of self-acting mechanical or electrical machinery without any intermediate manual control. The system includes preset timing devices to control the desired periods of dry and wet mixing cycles.

automatic dryer control—a system that automatically maintains the temperature of aggregates discharged from the dryer within a preset range.

automatic proportioning control—a system in which proportions of the aggregate and bituminous fractions are controlled by means of gates or valves which are opened and closed by means of self-acting mechanical or electronic machinery without any intermediate manual control.

batch plant—a manufacturing facility for producing bituminous paving mixtures that proportions the aggregate constituents into the mix by weighed batches and adds bituminous material by either weight or volume.

continuous mix plant—a manufacturing facility for producing bituminous paving mixtures that proportions the aggregate and bituminous constituents into the mix by a continuous volumetric proportioning system without definite batch intervals.

delivery tolerances—permissible variations from the exact desired proportions of aggregate and bituminous material as delivered into the pugmill.

digital recorder—an instrument that prints the weight of material or materials in digital form on a tape or ticket.

drum mix plant—a manufacturing facility for producing bituminous paving mixtures that continuously proportions aggregates, heats and dries them in a rotating drum, and simultaneously mixes them with a controlled amount of bituminous material. The same plant may produce cold-mixed bituminous paving mixtures without heating and drying the aggregates.

dry mixing period—the interval of time between the beginning of the charge of dry aggregates into the pugmill and the beginning of the application of bituminous material.

dryer—an apparatus that will dry the aggregates and heat them to the specified temperatures.

graphic recorder—an instrument that scribes a line or lines on a chart simultaneously with the indication of the scale or meter as the materials are being weighed.

hot aggregate storage bins—bins that store the heated and separated aggregates prior to their final proportioning into the mixer.

manual cycling control—a control system in which the opening and closing of the weigh hopper gate, the bituminous discharge valve, and the pugmill discharge gate are controlled by manual means, with or without assist devices or time locking device or both, which prevent premature opening of the gates or valves.

manual proportioning control—a control system in which proportions of the aggregate and bituminous fractions are controlled by means of gates or valves which are opened and closed by manual means. The system may or may not include power assist devices in the actuation of gate and valve opening and closing.

plant screens—screens located between the dryer and hot bins which separate the heated aggregates into the proper hot bin sizes.

proportioning tolerance interlock—a device that prevents continuance of the proportioning cycle when a component quantity varies outside of a preset range.

pugmill—a device for mixing the separate hot aggregate and bituminous components into a homogenous bituminous concrete ready for discharge into a delivery vehicle.

recording device—a device that presents a record that is unquestionably legible and permanent.

time locking device—an interlocking system automatically locking the weigh box gate after the mixer is charged; locking out the bituminous material throughout the dry mix cycle; and locking the mixer throughout the dry and wet mixing cycles.

weigh box—a weigh box or hopper in weigh batch plants connected with the scales, which weighs each aggregate fraction before dropping the aggregates into the pugmill.

wet mixing period—the interval of time between the beginning of application of bituminous material and the opening of the mixer gate.

BITUMEN-AGGREGATE MIXTURES

Relating in General to Combinations of Bituminous Material and Aggregate that are Mixed, Spread on the Job-site, and Compacted

- maintenance mix**—a mixture of bituminous material and mineral aggregate applied at ambient temperature for use in patching holes, depressions, and distress areas in existing pavements using appropriate hand or mechanical methods in placing and compacting the mix. These mixes may be designed for immediate use or for use out of a stockpile at a later time without further processing.
- mixed-in-place (road mix)**—a bituminous surface or base course produced by mixing mineral aggregate and cut-back asphalt, bituminous emulsion, or tar at the job-site by means of travel plants, motor graders, drags, or special road-mixing equipment. Open or dense-graded aggregates, sand, and sandy soil may be used.
- plant mix, cold-laid**—a mixture of cut-back asphalt, bituminous emulsion, or tar and mineral aggregate prepared in a central bituminous mixing plant and spread and compacted at the job-site when the mixture is at or near ambient temperature.
- plant mix, hot-laid bituminous emulsion mixtures**—a mixture of emulsion and heated mineral aggregate usually prepared in a conventional asphalt plant or drum mixer and spread and compacted at the job site at a temperature above ambient.
- slurry seal**—an application of a fluid mixture of bituminous emulsion, fine aggregate, mineral filler, and water to an existing pavement. Single or multiple applications may be used.
- tar concrete, cold-laid**—a plant mix containing a medium-viscosity grade of tar and a graded mineral aggregate, designed to be laid either shortly after mixing or when the mixture is at or near ambient temperature.
- tar concrete, hot laid**—a plant mix containing a high-viscosity grade of tar and a densely graded mineral aggregate designed to be laid at or near the elevated temperature of mixing.

BITUMEN—AGGREGATE APPLICATIONS

Relating in General to the Application of Bituminous Material on Prepared Aggregate or Pavement Surfaces which are Covered with Mineral Aggregate

- penetration macadam**—a pavement layer containing essentially one-size coarse aggregate, penetrated in place by a heavy application of bituminous material, followed by an application of a smaller size coarse aggregate, and compacted. Multiple layers containing still smaller coarse aggregate may be used.
- surface treatment**—an application of bituminous material followed by a layer of mineral aggregate. Multiple applications of bituminous material and mineral aggregate may be used.

BITUMEN APPLICATIONS

Relating in General to the Uses of Sprayed Bituminous Materials not Involving the Use of Aggregates

- crack filler**—bituminous material used to fill and seal cracks in existing pavements.

dust binder—a light application of bituminous material for the express purpose of laying and bonding loose dust.

fog seal—a light application of bituminous material to an existing pavement as a seal to inhibit raveling, or to seal the surface, or both. Medium and slow-setting bituminous emulsions are usually used and may be diluted with water.

mulch treatment—a spray application of bituminous material used to temporarily stabilize a recently seeded area. The bituminous material can be applied to the soil or to straw or hay mulch as a tie-down, also.

prime coat—an application of a low-viscosity bituminous material to an absorptive surface, designed to penetrate, bond, and stabilize this existing surface and to promote adhesion between it and the construction course that follows.

tack coat (bond coat)—an application of bituminous material to an existing relatively nonabsorptive surface to provide a thorough bond between old and new surfacing.

NONBITUMINOUS MATERIALS

Relating in General to Nonbituminous Materials

- aggregate**—a granular material of mineral composition such as sand, gravel, shell, slag, or crushed stone, used with a cementing medium to form mortars or concrete, or alone as in base courses, railroad ballasts, etc.
- crusher-run**—the total unscreened product of a stone crusher.
- dense-graded aggregate**—an aggregate that has a particle size distribution such that when it is compacted, the resulting voids between the aggregate particles, expressed as a percentage of the total space occupied by the material, are relatively small.
- fractured face**—an angular, rough, or broken surface of an aggregate particle created by crushing, by other artificial means, or by nature.
- macadam, dry-bound and water bound**—a pavement layer containing essentially one-size coarse aggregate choked in place with an application of screenings or sand; water is applied to the choke material for water-bound macadam. Multiple layers must be used.
- open-graded aggregate**—an aggregate that has a particle size distribution such that when it is compacted, the voids between the aggregate particles, expressed as a percentage of the total space occupied by the material, remain relatively large.
- rubble**—rough stones of irregular shapes and sizes, broken from larger masses either naturally or artificially, as by geological action, in quarrying, or in stone cutting or blasting.
- screenings**—a residual product resulting from the artificial crushing of rock, boulders, cobble, gravel, blast-furnace slag or hydraulic cement concrete, all of which passed the smallest screen used with the crushing operation and most of which passed the No. 8 sieve.
- soil aggregate**—natural or prepared mixtures consisting predominantly of stone, gravel, or sand which contain a significant amount of minus No. 200 (0.075-mm) silt-clay material.

stone chips—small angular fragments of stone containing no dust.

Relating Specifically to Materials

bank gravel—gravel found in natural deposits, usually more or less intermixed with fine material, such as sand or clay, or combinations thereof; gravelly clay, gravelly sand, clayey gravel, and sandy gravel indicate the varying proportions of the materials in the mixture.

blast-furnace slag—the nonmetallic product, consisting essentially of silicates and aluminosilicates of lime and of other bases, that is developed simultaneously with iron in a blast furnace.

clinker—generally a fused or partly fused by-product of the combustion of coal, but also including lava and portland-

cement clinker, and partly vitrified slag and brick.

steel slag—the nonmetallic product consisting essentially of calcium silicates and ferrites combined with fused oxides of iron, aluminum, manganese, calcium and magnesium, that is developed simultaneously with steel in basic oxygen, electric, or open hearth furnaces.

Relating Specifically to Tests

mesh—the square opening of a sieve.

screen—in laboratory work an apparatus, in which the apertures are circular, for separating sizes of material.

sieve—in laboratory work an apparatus, in which the apertures are square, for separating sizes of material.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

ANEXO II. HOJA TÉCNICA DEL COPOLÍMERO VECTOR 2411®



VECTOR 2411

Styrene-Butadiene (SB)_n Block Copolymer

- Radial (SB)_n⁽¹⁾ block copolymer.
- Contains ~10% SB diblock copolymer.
- Medium styrene, high modulus copolymer.
- Supplied as a porous pellet, dusted with talc.
- VECTOR styrenic block copolymers find use under certain regulations as articles or as ingredients in articles intended for food contact or medical applications. Please contact your Dexco Polymers agent for a detailed letter of certification or further information.

VECTOR 2411 styrene-butadiene block copolymer is produced via anionic polymerization technology from Dexco Polymers LP, a Dow/ExxonMobil Venture.

It is a very high viscosity product. It has outstanding physical strength and is designed for use in asphalt modification, elastomeric compounds, and adhesive formulations.

Properties			
Polymer Properties	TEST METHOD	Unit	Typical Values ⁽²⁾
Styrene	Dexco Method	Wt. %	30
Diblock Content	Dexco Method	Wt. %	12
Melt Flow Rate ⁽³⁾	ASTM D 1238	dg/min	<1
Solution Viscosity ⁽⁴⁾	ASTM D 2196	Cps	21
Volatiles	Dexco Method	Wt. %	0.3
Ash	ASTM D 1416	Wt. %	0.5
Physical Properties			
Tensile Strength ⁽⁵⁾	ASTM D 412	PSI (MPa)	4000 (27.6)
300% Modulus ⁽⁵⁾	ASTM D 412	PSI (MPa)	650 (4.5)
Elongation at Break ⁽⁵⁾	ASTM D 412	%	725
Hardness ⁽⁶⁾	ASTM D 2240	Shore A	71
Specific Gravity	ASTM D 792		0.94

(1) "(SB)_n" denotes radial styrene-butadiene block copolymer.

(2) Typical values, intended only as guides, and should not be construed as specifications.

(3) Condition 200°C/5 kg.

(4) 5 Wt. % in toluene at 25°C.

(5) Tested on roll milled/compression molded plaques (0.035" thick). Tested in the machine direction.

(6) 1 sec. dwell.

DEXCO POLYMERS LP
a Dow/ExxonMobil Venture

VECTOR is a trademark of Dexco Polymers LP

12/08