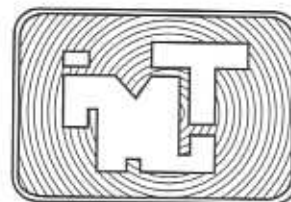
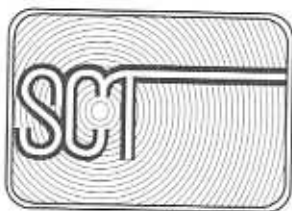


ISSN 0188-7297



DESARROLLO DE ASFALTOS MODIFICADOS CON HULE SBR PARA PAVIMENTOS DE ALTO DESEMPEÑO

Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Instituto Mexicano del Transporte

**Publicación Técnica No. 140
Sanfandila, Qro. 2000**

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**DESARROLLO DE ASFALTOS
MODIFICADOS CON HULE SBR
PARA PAVIMENTOS DE ALTO
DESEMPEÑO**

**Publicación Técnica No. 140
Sanfandila, Qro. 2000**

Este documento fue elaborado por: Rogelio Rodríguez Talavera, Víctor Manuel Castaño Meneses y Miguel Martínez Madrid.

Se contó con el apoyo de los Laboratorios del Departamento de Física Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto de Física de la U.N.A.M. y del Instituto Mexicano del Transporte.

En este proyecto se pretende desarrollar la tecnología necesaria para la fabricación de asfalto modificado con hule SBR (estireno-butadieno) para ser usado, fundamentalmente, en la fabricación de carpetas asfálticas. Esta modificación significa mejorar substancialmente tanto la recuperación elástica del asfalto, como sus propiedades mecánicas (módulos elásticos).

Los resultados obtenidos en este proyecto muestran que es posible modificar el asfalto mexicano con hule SBR (estireno-butadieno), también de fabricación nacional (Industrias Negromex, México), para obtener un material compuesto, el cual presenta buenas propiedades mecánicas, o sea que es posible obtener un incremento substancial en los módulos elásticos del material debido a la presencia del hule SBR. Las pruebas morfológicas del material compuesto se obtuvieron usando un Microscopio Electrónico de Barrido, mientras que para las pruebas mecánicas se usó una Maquina Universal de Pruebas Mecánicas. Los resultados obtenidos de la pruebas mecánicas se ajustaron usando los modelos de Kerner y de Percolación.

The purpose of this work is to develop a technology to produce modified asphalt with SBR rubber copolymer to be used as a high performance material for road construction. For this particular application, it is convenient that the asphalt-rubber composite has reached the phase inversion; this happens when the rubber concentration approaches 10% and it is characterized by the fact that the rubbery phase plays the role of the continuous phase while the asphalt is the discrete phase. When the phase inversion had taken place, a significant improvement in the mechanical properties of the composite is obtained. The mechanical properties to improve are: the elastic recovery and the elastic moduli.

The results show that it is possible to modify asphalt with SBR rubber to obtain a composite with mechanical properties substantially improved. It was also possible to predict the mechanical behavior of this kind of composite for a wide range of rubber concentrations by using the percolation model. The morphology of the composite was obtained using Scanning Electron Microscopy, while the mechanical properties were obtained with a Universal Testing Machine. The morphological results show that it is possible to obtain the right morphology using the styrene-butadiene copolymer produced by Industries Negromex, México. The mechanical results were fitted using the Kerner and the percolation models.

RESUMEN EJECUTIVO

La importancia de diseñar una tecnología propia para la fabricación de asfalto modificado con hule SBR (estireno-butadieno) para ser usado en la fabricación de pavimentos para carreteras, radica no nada más en la posibilidad de tener caminos, carreteras y super-carreteras de buena calidad, sino en aumentar substancialmente tanto el tiempo de vida de estos medios de transporte, como la seguridad de los usuarios de los mismos.

Teniendo como objetivo el presentar los lineamientos necesarios para el desarrollo de la tecnología requerida para la fabricación de asfaltos modificados de alto desempeño para ser usados en la construcción de caminos y carreteras, en este trabajo se presenta primero la técnica para la modificación del asfalto con hule para conferirle a éste las propiedades necesarias para ser usado en la construcción de carreteras, así como la caracterización del material compuesto para determinar si la morfología obtenida para él es la correcta; adicionalmente, se pretende reducir lo más posible la cantidad de hule para que el proceso sea económicamente viable.

Posteriormente se discuten las propiedades del asfalto y del hule, lo cual es de fundamental importancia ya que éstas son las que determinan la morfología que tendrá el material final y es ésta la que controla el comportamiento mecánico del mismo. Estos materiales, el asfalto y el hule, son ambos incompatibles, o sea que a la hora de fabricar el material compuesto, ambas fases se segregan formando, a bajas concentraciones de hule, pequeños dominios de hule en el interior asfalto. Para este grado de modificación, las propiedades del compuesto todavía no son buenas ya que estas partículas de hule dentro del asfalto no están unidas entre sí proporcionándole al material la buena propiedad mecánica requerida.

Si se le sigue agregando hule a este sistema, llega un momento en que la fase discreta (el hule) se comienza a unir entre sí formando una malla de hule en donde ahora el asfalto sería el material de relleno y el hule la matriz continua; esto sucede cuando la concentración de hule es aproximadamente del 10% en el peso del asfalto. Esta concentración crítica es conocida como la concentración de inversión de fase; cuando se alcanza la concentración de inversión de fase se produce un cambio muy drástico en la morfología del compuesto: arriba de esta concentración el hule formará la fase continua, mientras que el asfalto será la

fase discreta. Esto significa que el asfalto jugará el papel de relleno en este material compuesto.

Cuando el compuesto asfalto-hule tiene esta morfología, el material alcanza su óptimo desempeño en cuanto al rendimiento mecánico se refiere. Es posible, cambiando el tipo y la micro-estructura del hule, reducir un poco esta concentración, lo que representaría un ahorro substancial en la fabricación de caminos, ya que los volúmenes involucrados son muy altos.

Por lo anterior, en este trabajo se presenta el desarrollo de la metodología necesaria para fabricar asfalto modificado con hule SBR con el objeto de mejorar substancialmente las propiedades mecánicas del asfalto y formar un compuesto que se pueda usar en la fabricación de carpetas asfálticas. Desarrollar un material asfáltico modificado con hule permite tener un ahorro a mediano y largo plazo en la fabricación de carpetas asfálticas, ya que no nada más su tiempo de vida es mayor, sino el mantenimiento requerido es considerablemente menor que para el asfalto normal.

Este es un logro tecnológico importante, no sólo por el ahorro económico que significa, sino que permite entender más profundamente el comportamiento de los materiales compuestos. En algunos sistemas se ha encontrado que la concentración a la cual se obtiene una conectividad completa del sistema es menor que la estimada, o sea que hay una jerarquización en la percolación que se da a nivel molecular. El entender el comportamiento de sistemas compuestos a nivel molecular permitirá la fabricación de sistemas compuestos usando bajas cantidades de agente modificador, creando efectos dramáticos en el comportamiento de los materiales.

INDICE

Resumen	V
Abstract	VII
Resumen Ejecutivo	IX
1 Introducción	1
1.1 Objetivo General	2
2 Fundamentos	3
2.1 Descripción de los Materiales Precursores	3
2.1.1 El Asfalto	3
2.1.2 El Agente Modificante: Hule SBR (Estireno-Butadieno)	3
2.2 Descripción del Material Compuesto	6
2.2.1 El Compósito Asfalto-Hule SBR	6
3 Modificación de Asfalto con Hule SBR (estireno-butadieno)	11
3.1 Actualización del Estudio Bibliográfico	11
3.2 Adquisición de Reactivos y Materiales	11
3.3 Elección del agente polimérico adecuado para la modificación del asfalto para ser usado en pavimentos de alto desempeño	13
4 Metodología Experimental	17
4.1 Preparación del Asfalto y del Hule SBR (estireno butadieno) para formar el Compósito	17
4.2 Preparación de las Muestras de Asfalto Modificado.	17
5 Caracterización del Compósito Asfalto-Hule	21
5.1 Determinación de Propiedades ASTM	21
5.2 Determinación de la Morfología del Asfalto Modificado	25
5.2.1 Preparación de Muestras para Determinación Morfológica	25

5.2.2	Determinación Morfológica mediante TEM del Asfalto Modificado	26
5.3	Determinación de Propiedades Mecánicas del Asfalto Modificado Mediante Pruebas de Esfuerzo-Deformación	27
5.3.1	Preparación de Muestras para Determinación de Propiedades Mecánicas del Asfalto Modificado	27
5.3.2	Determinación de Propiedades Mecánicas del Asfalto Modificado usando la Máquina Universal de Pruebas Mecánicas	27
6	Análisis de Resultados	31
6.1	Análisis de Resultados de las Pruebas de Morfología	31
6.2	Análisis de Resultados de Pruebas Mecánicas	32
6.2.1	Modelos Mecánicos para predecir la respuesta del Compósito	32
6.2.1.1	Modelo de Takayanagy	33
6.2.1.2	Modelo de Kerner	34
6.2.1.3	Modelo de Percolación	34
6.3	Análisis de Resultados de Pruebas Mecánicas usando el Modelo de Takayanagy, el de Kerner y el de Percolación	36
6.3.1	Uso del Modelo de Takayanagy y Kerner para ajustar los resultados experimentales	37
6.3.2	Uso del Modelo de Percolación para ajustar los resultados experimentales	37
7	Alcances del proyecto	39
8	Aparatos empleados	41
9	Conclusiones	43
10	Referencias	45

1 INTRODUCCION

La tendencia actual en la ciencia de los materiales poliméricos y cerámicos consiste, no en la síntesis o fabricación de nuevos elementos estructurales para generar nuevos tipos de polímeros y/o cerámicos, sino en mezclar apropiadamente dos o más de éstos para formar un nuevo material con propiedades mejoradas. Esta sinergia obtenida para materiales compuestos, ha sido uno de los grandes logros de la ciencia de materiales en los últimos años, dando lugar a la fabricación de materiales inteligentes, en los cuales se puede ajustar su respuesta a voluntad del usuario.

Los materiales compuestos, también llamados materiales celulares, son muy abundantes en la naturaleza. Por ejemplo, los árboles son un ejemplo típico de materiales celulares o compuestos, los cuales presentan una muy alta resistencia a la fractura y peso ligero. Prácticamente todas las plantas tienen estructuras celulares lo que les permite optimizar sus funciones de resistencia mecánica y de metabolización.

Los huesos en el ser humano y en los mamíferos vertebrados tienen también una estructura celular que les confiere una alta resistencia a la fractura con un peso ligero; debido a que los esfuerzos a que los huesos están sujetos durante el movimiento de los seres vertebrados son muy altos, la estructura que deben de tener es muy importante para darle al cuerpo una buena estabilidad mecánica. La naturaleza escoge para el diseño de los huesos, una morfología en donde la fase discreta (la parte orgánica de los huesos formada esencialmente por colágeno) tiene una distribución ancha de tamaño de partícula, pero adicionalmente tiene que tener una distribución espacial determinada, o sea que la porosidad en los huesos es mayor hacia el exterior del hueso y menor hacia la médula, confiriéndole al material sus extraordinarias propiedades mecánicas.

Uno de los primeros materiales compuestos hechos por el hombre es el adobe, el cual presenta excelentes propiedades de resistencia mecánica, aislamiento térmico y bajo peso, lo que hace de éste un material ideal para la construcción de casas. Un material compuesto más moderno es el concreto, en el cual la grava juega el papel de la fase discreta y el cemento con arena la fase continua. Estos son sólo algunos ejemplos de la inmensa variedad de materiales compuestos, tanto naturales como sintéticos que se encuentran en la naturaleza.

Los materiales compuestos o compósitos del tipo polimérico son relativamente nuevos; en estos sistemas los polímeros precursores son tales que ellos se segregan en si mismos, formando pequeños dominios en la escala de manómetros. En esta forma es posible obtener un material que combina, en forma sinérgica, las propiedades de los materiales precursores en un solo material.

Diferentes requisitos tienen que satisfacer los materiales precursores para que el compósito tenga un buen desempeño; entre éstos podemos mencionar: buena adhesión entre las fases de los materiales componentes, alta área de contacto entre las fases, tamaño controlado de la fase discreta, etc.

Uno de los más importantes y más usados materiales compuestos de la actualidad es el asfalto modificado, debido a la amplia variedad de aplicaciones que tiene, como membranas, impermeabilizantes, selladores, mastiques, pavimentos, etc. Debido al gran volumen de producción de este tipo de material, existen algunas pruebas prácticas e industriales, las cuales son comúnmente usadas como control de calidad en los materiales precursores y en el producto final (el compósito). En este sentido es importante tratar de correlacionar estas pruebas industriales como: punto de ablandamiento, índice de penetración y viscosidad, con otra caracterización más fundamental como: el peso molecular de los constituyentes, la reología de los materiales originales y del producto final, los módulos elásticos, etc. Este tipo de correlaciones, aún cuando son soportadas en bases empíricas, son importantes porque permiten determinar no sólo las características de los materiales originales usados para la preparación del compósito, sino para verificar rápidamente si el producto final cumple con las especificaciones impuestas.

1.1 Objetivo General

Podemos decir que el objetivo general de este trabajo es desarrollar la metodología necesaria para fabricar y caracterizar asfalto modificado con hule SBR para ser usado en la fabricación de carpetas asfálticas de alto desempeño.

2 FUNDAMENTOS GENERALES

2.1 Descripción de los Materiales Precursores

Se describe a continuación los materiales precursores que forman el compuesto, haciendo énfasis en sus propiedades fundamentales.

2.1.1 El Asfalto

El asfalto es un material termoplástico de bajo costo, es el residuo en el proceso de refinación del petróleo crudo (ver Figura 1). Este material es ampliamente usado para la construcción de carreteras, adhesivos, impermeabilizantes, mastiques, selladores, etc. Sin embargo, el asfalto tiene propiedades mecánicas muy pobres: para temperaturas un poco abajo de la temperatura ambiente el material es muy quebradizo, mientras que para temperaturas un poco arriba de la temperatura ambiente, el material fluye. Debido a esto, el asfalto es normalmente reforzado con materiales de tipo huloso para mejorar sus propiedades mecánicas.

Uno de los problemas importantes en la modificación del asfalto es que la composición química de éste depende fuertemente de la fuente de la cual se extrae el crudo. Hay crudos ligeros y crudos pesados. Estos últimos producen asfaltos con bajos contenidos de ligeros, lo cual hace difícil la modificación con hule. En la Tabla 1 es posible observar una comparación entre las propiedades de los asfaltos europeos y los producidos en México

Existen varios materiales usados para la modificación del asfalto, sin embargo, uno de los más populares es el hule SBR, que es un copolímero estireno-butadieno; éste produce, en el interior del asfalto, una malla elástica, dando lugar a un compuesto con una excelente recuperación elástica y mejores propiedades mecánicas. En la Fig. 2 es posible observar como se forma la malla de copolímero en el interior del asfalto. Hay que aclarar que la formación de esta malla depende fuertemente de la fracción de ligeros que tenga el asfalto, ya que son éstos los que hinchan el copolímero permitiendo formar la malla. Debido a esto es importante caracterizar el asfalto antes de producir el compuesto para ver si el contenido de ligeros es el apropiado.

2.1.2 El Agente Modificante: Hule Estireno-Butadieno (SBR)

Para la modificación de materiales quebradizos como el asfalto, es común usar materiales elastoméricos, o sea del tipo huloso, ya que ellos absorben la energía de la deformación impidiendo la fractura de éste. Cuando la adhesión entre las fases es buena y debido a que el hule es un material muy elástico, las deformaciones que sufre el asfalto son transmitidas al hule el cual se deforma absorbiendo esta energía de deformación como energía potencial.

OBTENCION DEL ASFALTO A PARTIR DEL PETROLEO CRUDO

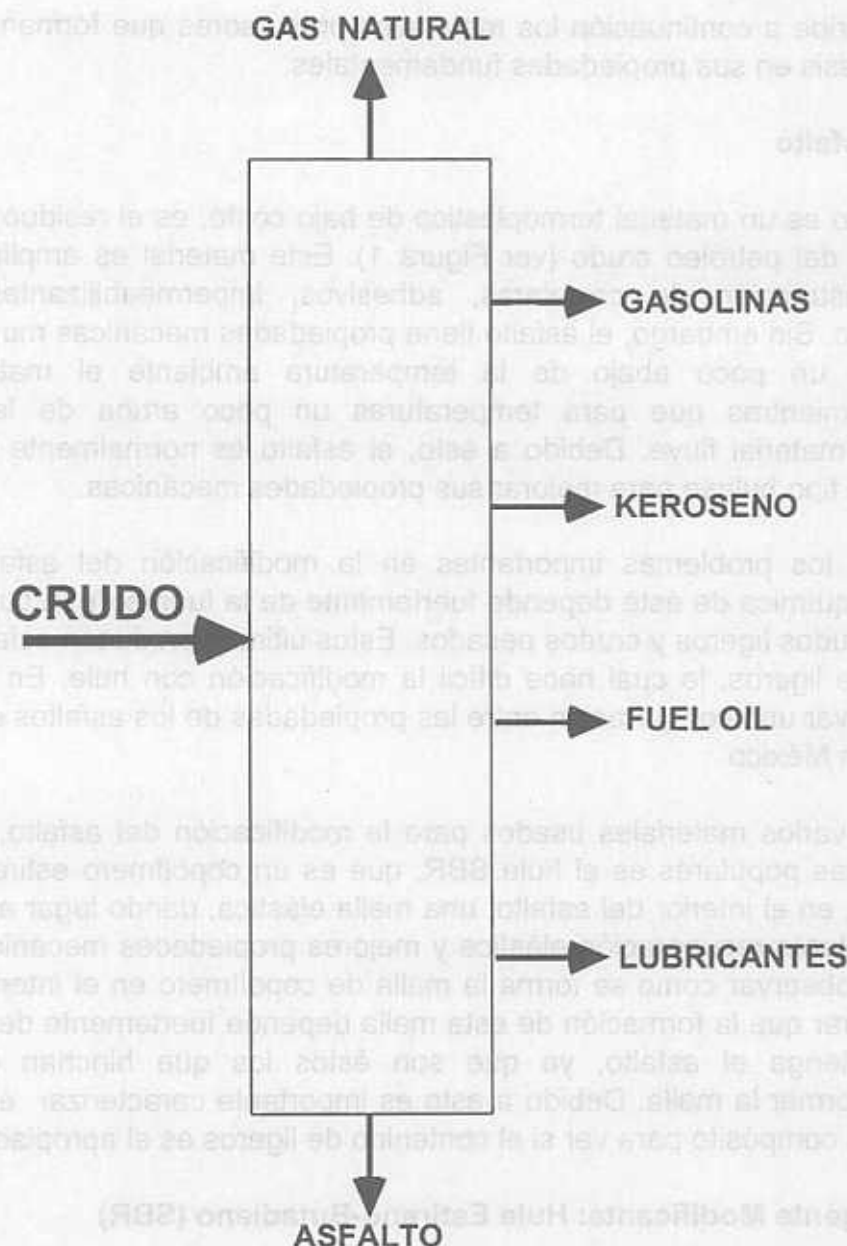


FIGURA 1

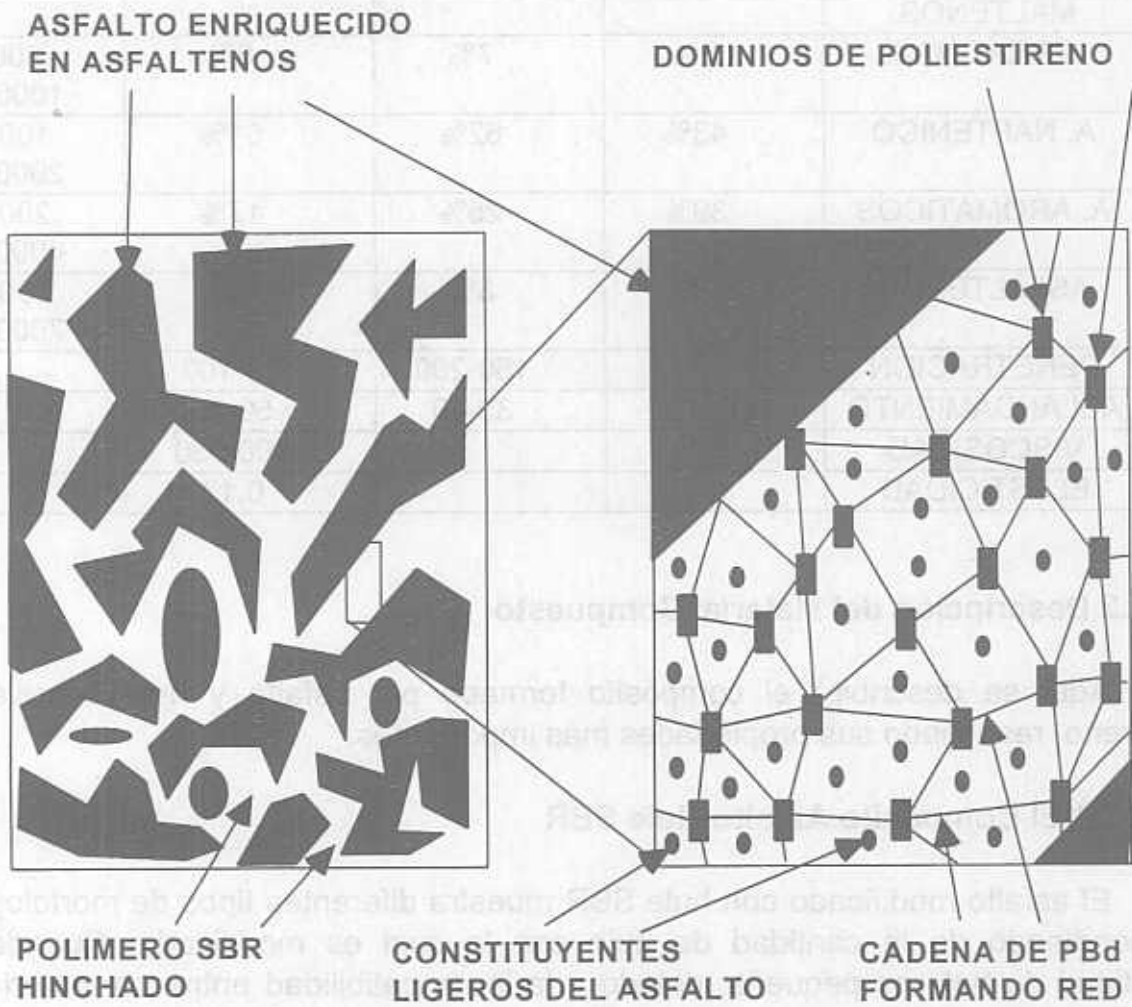
**FIGURA 2**

TABLA I

ASFALTO				
PAIS	EUROPA		MEXICO	
TECNICA	ASTM D-4124	IATROSCAN	IATRO TH-10	GPC (Mw)
MALTENOS:				
PARAFINAS	8%	7%	6%	600-1000
A. NAFTENICO	43%	62%	61%	1000-2000
A. AROMATICOS	39%	25%	17%	2000-4000
ASFALTENOS	10%	6%	16%	4000-7000
PENETRACION		150-200	80-100	
ABLANDAMIENTO		35-40	50-55	
VISCOSIDAD			490-530	
ELASTICIDAD			0.13	

2.2 Descripción del Material Compuesto

Aquí se describirá el compuesto formado por asfalto y hule butadieno-estireno, resaltando sus propiedades más importantes.

2.2.1 El Compósito Asfalto-Hule SBR

El asfalto modificado con hule SBR muestra diferentes tipos de morfologías dependiendo de la cantidad de hule con la cual es modificado. Cuando la cantidad de hule es pequeña, debido a la incompatibilidad entre los materiales precursores, el hule se segrega formando pequeños dominios discretos embebidos en la matriz de asfalto.

En la Figura 3 es posible observar una micro-fotografía obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido, en donde se muestra la distribución de las fases cuando el contenido de hule es del 4% respecto al asfalto. En las figuras 3 a 6 las zonas negras corresponden al hule, el cual está segregado en el interior de la matriz de asfalto que aparece de color claro.

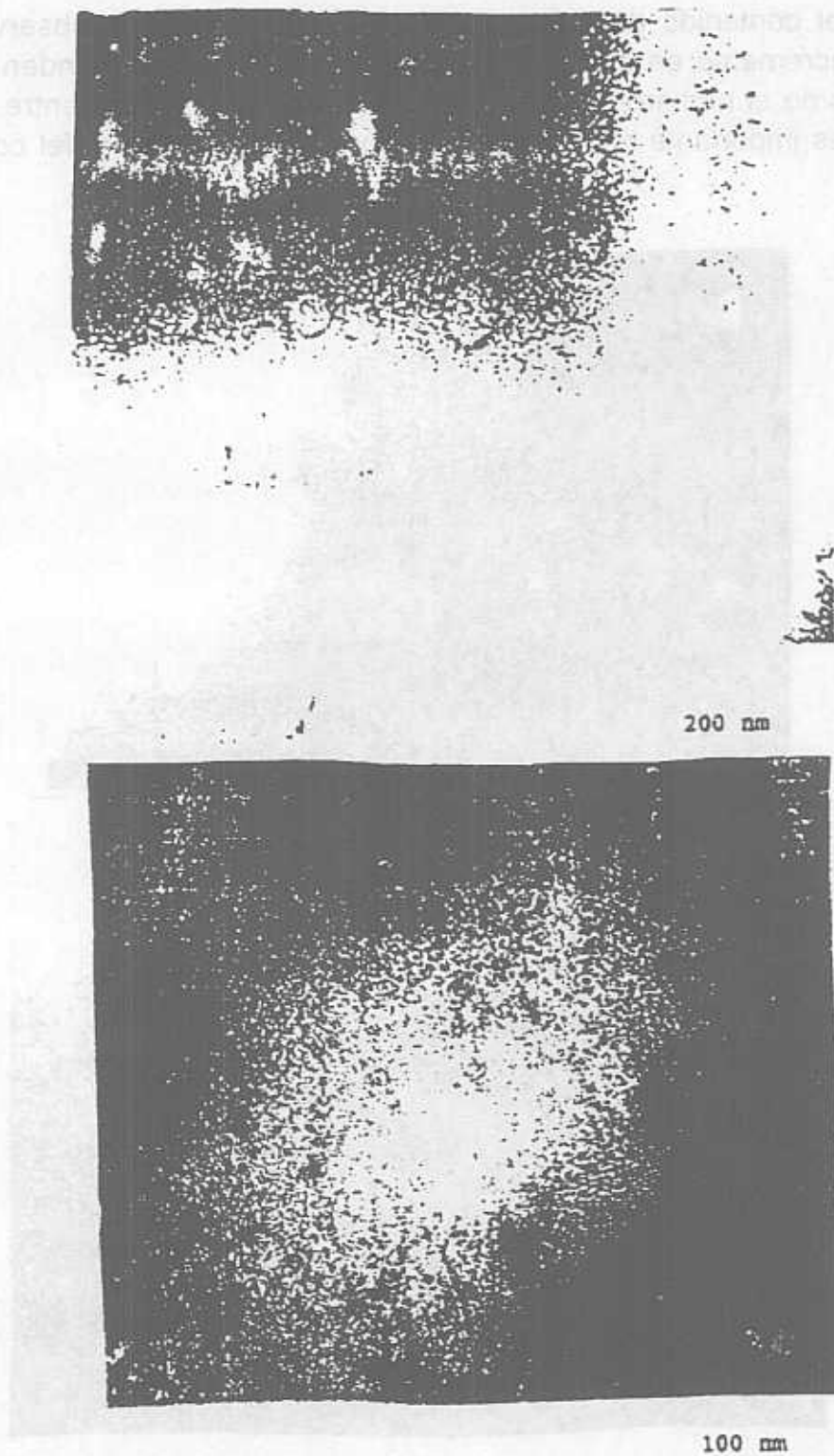


FIGURA 3

Cuando el contenido de hule se aumenta al 6%, sólo se observa en la Figura 4 un incremento en el número de partículas que corresponden al hule; obviamente como el número de partículas es mayor, la distancia entre ellas se reduce. Esto es importante para la modificación de la morfología del compuesto asfalto-hule.

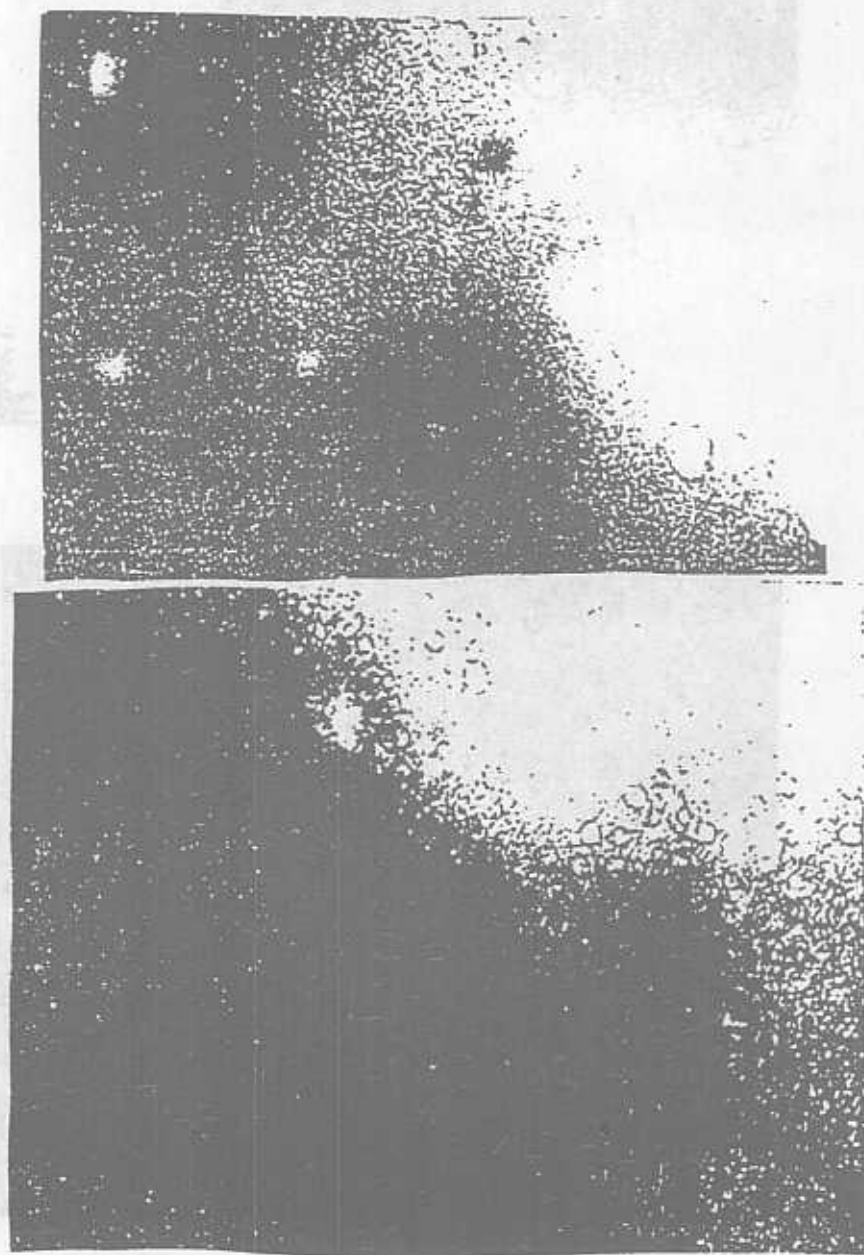


FIGURA 4

En la Figura 5 se puede observar la morfología del material compuesto cuando el contenido de hule es del 8%. Como puede verse de esta figura, las partículas de hule comienzan a unirse formando pequeñas cadenas que comienzan a tener longitudes considerables. Aquí es donde inicia el proceso de conectividad en el interior de todo el material, el cual es de fundamental importancia para el reforzamiento del material asfáltico.

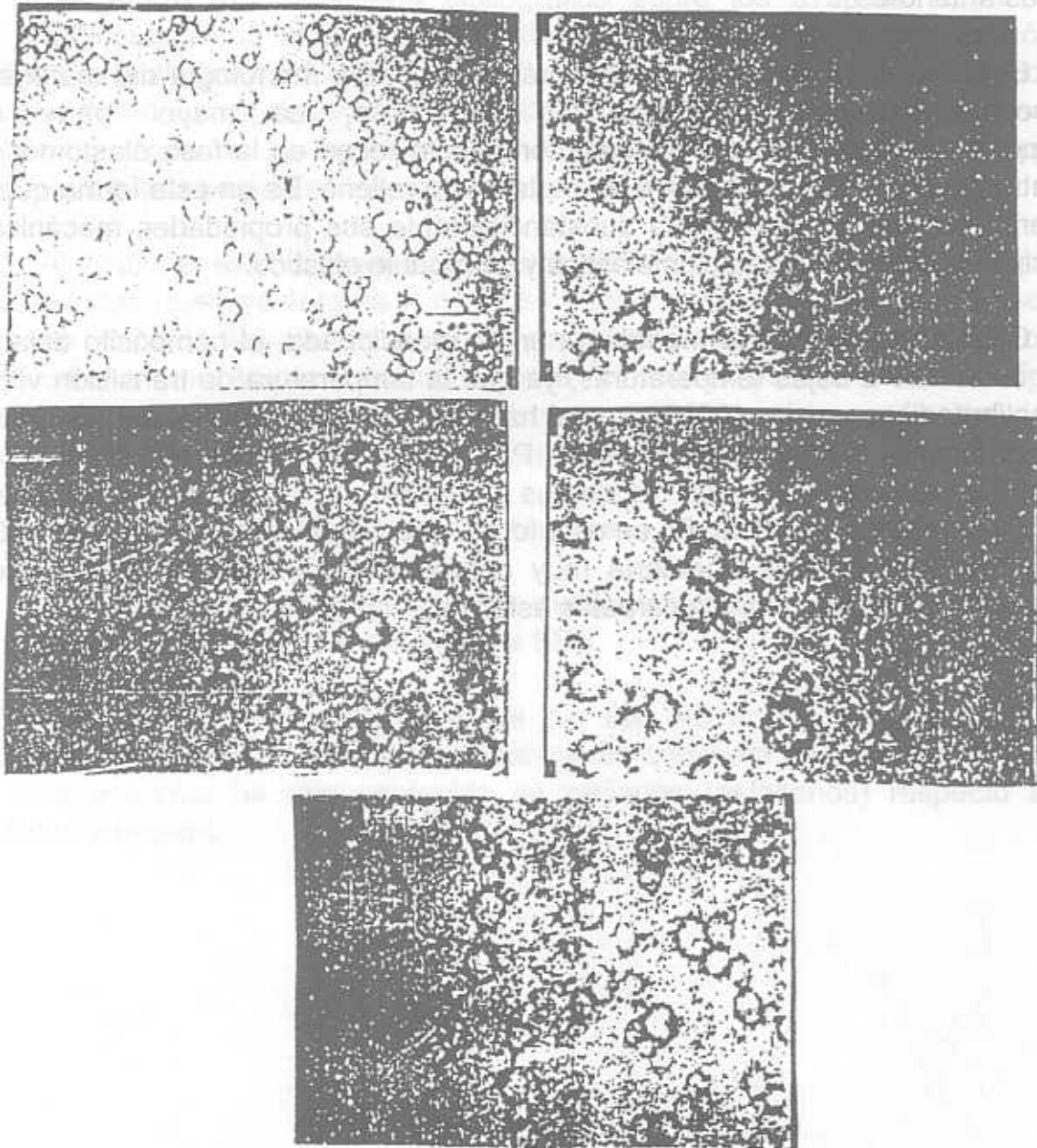


FIGURA 5

Cuando la cantidad de hule aumenta al 10%, la situación cambia drásticamente, ya que la fase elastomérica aparece formando una malla de hule que rodea al asfalto. Consecuentemente, cuando la concentración de hule es cercana al 10% el hule pasa a ser la fase continua mientras que el asfalto juega el papel del material de relleno; esto puede ser observado en la Figura 6. La concentración a la cual esto sucede es llamada concentración de inversión de fase. Esta morfología es completamente diferente a la mostrada en las tres figuras anteriores.

Esta inversión de fase modifica drásticamente la morfología del material y consecuentemente sus propiedades mecánicas. La mayor parte del comportamiento elástico del material compuesto recae en la fase elastomérica, mientras que el asfalto sólo sirve de material de relleno. Es en esta forma que el material compuesto incrementa substancialmente sus propiedades mecánicas, principalmente su recuperación elástica y su módulo elástico.

Cuando se obtiene la morfología antes mencionada, el compuesto deja de ser quebradizo a bajas temperaturas, ya que la temperatura de transición vítrea del polibutadieno es de -100°C , lo cual hace que las propiedades del compuesto se mantengan a bajas temperaturas. Por otro lado, el flujo del material en caliente es también eliminado, ya que es prevenido por la formación de la malla elástica formada por el hule. Es en esta forma que el compuesto asfalto-hule SBR es un material de alta ingeniería muy apropiado para muchas aplicaciones, incluyendo la construcción de carpetas asfálticas.

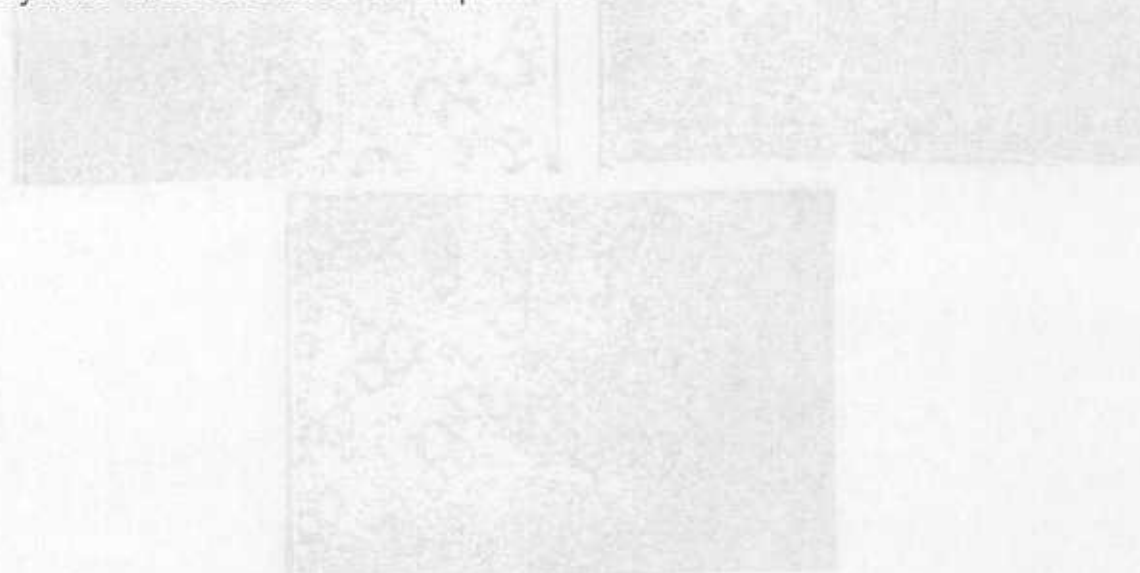


FIGURA 6

3 MODIFICACIONES DE ASFALTO CON HULE ESTIRENO-BUTADIENO

3.1 Actualización del estudio bibliográfico

Se realizó una búsqueda bibliográfica sobre los avances científicos y tecnológicos que ha habido en los últimos 10 años sobre la modificación de asfalto usando hule del tipo poliestireno copolimerizado con polibutadieno. No mucha literatura se encontró sobre este tema, hecho que nosotros lo hemos atribuido a que es un problema tecnológico importante y que este tipo de desarrollos las compañías lo guardan en secreto.

Al final de este documento se enlistan las referencias más importantes encontradas relativas al tema y, como se puede apreciar, varias de ellas son de nuestro grupo de trabajo. Varios de los métodos novedosos de predicción de las propiedades mecánicas obtenidas para el compuesto asfalto-hule, fueron desarrollados parcialmente por nosotros y aplicados a la predicción de las propiedades mecánicas de este tipo de materiales compuestos.

3.2 Adquisición de reactivos y materiales.

Se procedió a la adquisición de los materiales precursores que se usarán en la preparación de muestras asfalto-hule SBR.

Con relación al asfalto, este fue del tipo A6 no-oxidado producido por PEMEX. En la Tabla 1 se da la caracterización completa de este tipo de asfalto, el cual presenta un alto contenido de pesados (asfaltenos) respecto a los asfaltos europeos.

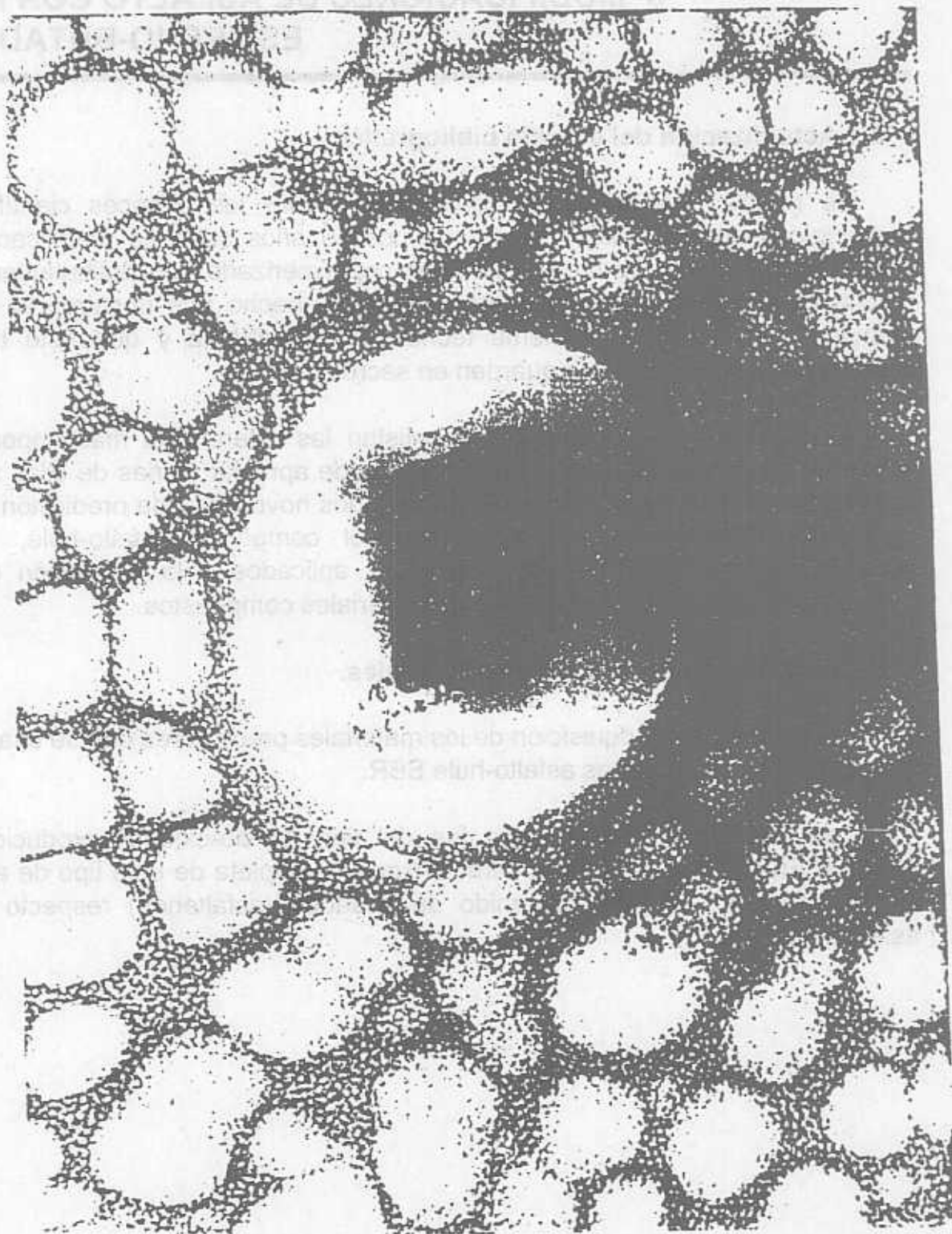


FIGURA 6

Con relación al hule estireno-butadieno, éste se obtuvo de Industrias Negromex y corresponde al tipo Solprene 411 el cual tiene una morfología de cadena radial en forma de estrella con 4 brazos, en donde la parte butadiénica está en el centro, mientras que la parte estirénica en el exterior. En este hule SBR, el 30% es fase estirénica y el resto es la parte butadiénica. La proporción de moléculas tetra-acopladas es en general mayor del 80 %, siendo el resto tri-acopladas y cadenas lineales.

3.3 Elección del agente polimérico adecuado para la modificación del asfalto para ser usado en pavimentos de alto desempeño.

Existen varias propiedades que hay que tomar en cuenta para la elección del agente polimérico que debe de ser empleado en la modificación del asfalto para que éste pueda ser usado en la fabricación de carpetas asfálticas.

Una de las propiedades importantes que deben de tener los agentes modificadores es una baja temperatura de transición vítrea. Esta temperatura es la que dictamina si el material polimérico se comporta como un hule o como un plástico. Para temperaturas abajo de la temperatura de transición vítrea, el polímero se comporta como un plástico, o sea como un material rígido, mientras que para temperaturas arriba de la temperatura de transición vítrea se comporta como un hule, o sea un material suave muy elástico.

Esta propiedad es muy importante para que el compuesto asfalto-hule mantenga sus propiedades en un rango amplio de temperaturas, desde -40°C hasta $+50^{\circ}\text{C}$, que son las temperaturas extremas a que están sujetos los materiales asfálticos usados en carreteras.

Existen varios materiales poliméricos que se han usado para modificar asfalto, entre ellos podemos mencionar: polibutadieno, polisopreno, polipropileno atáctico, policloruro de vinilo, etc. Adicionalmente, hay reportes de que al asfalto se le oxida para incrementar su viscosidad y prevenir el flujo en casos de altas temperaturas. En la Figura 7 es posible ver una comparación de algunas propiedades del asfalto puro y modificado con diferentes agentes poliméricos; aquí se incluye también el asfalto oxidado.

El hule polibutadieno tiene una temperatura de transición vítrea de -100°C , o sea que es ideal para ser usado en la modificación del asfalto, dado que en el intervalo de temperaturas de operación del material la propiedad elastomérica permanece. Sin embargo, el poder de formación de la malla polimérica no es muy alto para el polibutadieno solo. Por esta razón, se acostumbra usar el

polibutadieno junto con otros polímeros los cuales faciliten la formación de la estructura en forma de malla. Existen varios candidatos, sin embargo el poliestireno es muy apropiado debido a que es completamente incompatible con el polibutadieno, facilitando la formación de la malla polimérica. Debido a esto, el uso de un copolímero en bloque de poliestireno-polibutadieno es muy apropiado, ya que las dos fases tratan de separarse entre sí y juntarse con sus similares.

Una configuración de estrella de 4 brazos en donde el polibutadieno está en el centro y el poliestireno en las orillas, es muy apropiada ya que los poliestirenos se buscan entre sí formando pequeños dominios estirénicos, los cuales quedan unidos por cadenas de polibutadieno. Este es el principio de formación de la malla polimérica dentro del asfalto.

A pesar de que este tipo de estructura molecular es relativamente cara, es muy apropiada para la formación de la malla elastomérica en el interior del asfalto. El hule SBR Solprene 411 de Industrias Negromex es el material que mejores resultados proporciona en la modificación del asfalto para ser usado en las aplicaciones antes mencionadas.

MODIFICADORES DE ASFALTO

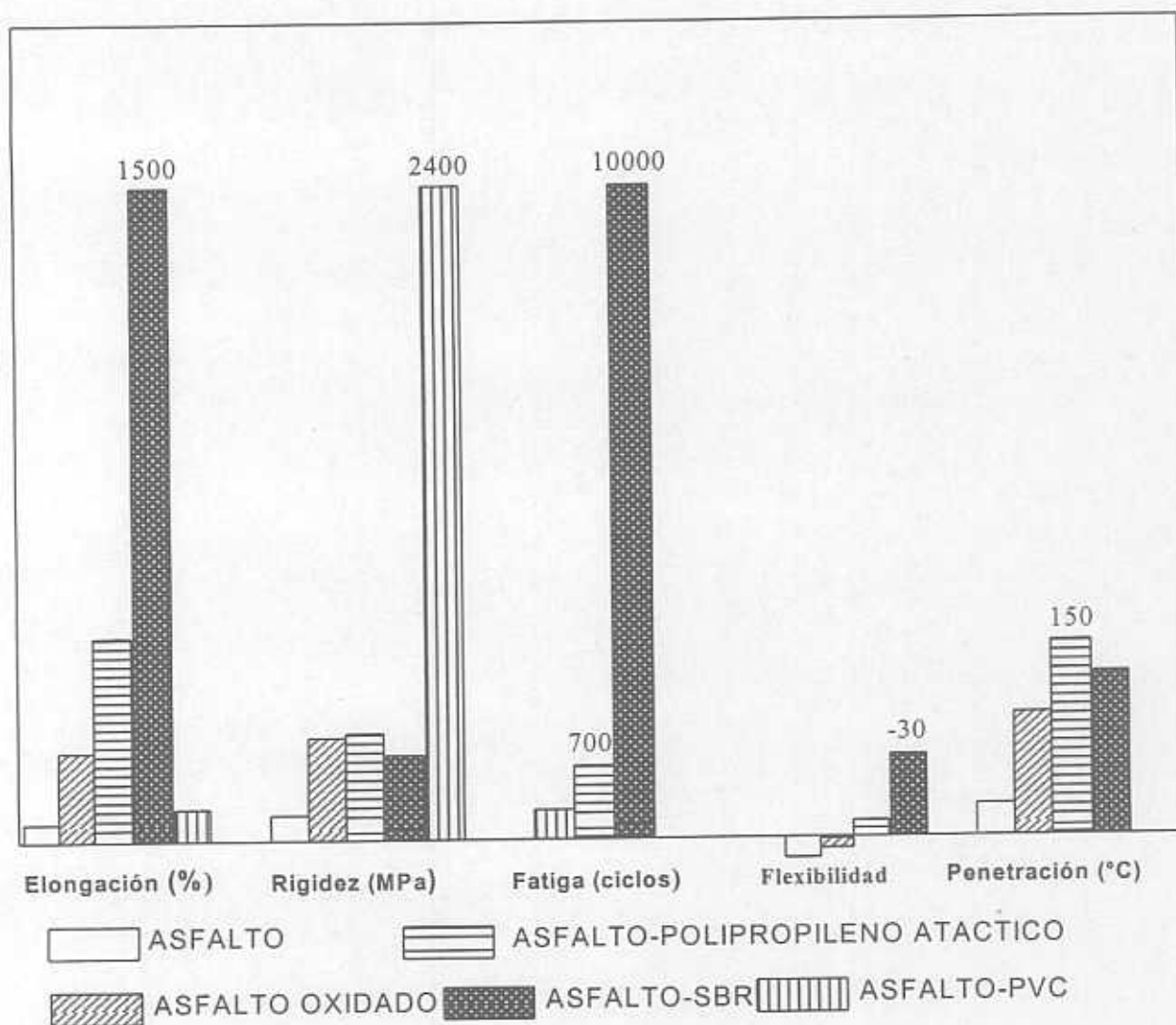


FIGURA 7

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En esta sección se describe la metodología experimental seguida para la preparación de los materiales compuestos preparados a diferentes composiciones químicas.

4.1 Preparación del Asfalto y del Copolímero de Estireno-Butadieno para formar el Compósito

Los materiales precursores fueron caracterizados antes de la preparación del material compuesto para tener una referencia que permita determinar cómo mejoran las propiedades del compuesto cuando los materiales precursores son mezclados apropiadamente.

El asfalto se usó tal como se recibió sin ningún tratamiento previo, sin embargo el hule SBR se molió finamente en frío para poderlo dispersar más fácilmente en el asfalto. Esto reduce significativamente el tiempo de mezclado, lo cual es importante ya que los esfuerzos de corte junto con la alta temperatura de mezclado abren las doble ligaduras del polibutadieno, reticulando el sistema. Hay que evitar que el polibutadieno se reticule ya que esto lo hace completamente insoluble en cualquier solvente.

4.2 Preparación de las Muestras de Asfalto Modificado

Los materiales compuestos fueron preparados mezclando el asfalto con el polímero molido con baja agitación para evitar altos esfuerzos de corte. La temperatura de mezclado se seleccionó en el intervalo de 180 a 200°C. El proceso de mezclado se consideró completo cuando visualmente ya no se apreciaban las pequeñas partículas del copolímero en el asfalto.

Se prepararon materiales compuestos a diferentes composiciones químicas, desde 0% (correspondiente al asfalto puro), hasta 14% de hule SBR. En esta forma fue posible ver cómo cambiaba la morfología dependiendo de la cantidad de hule. En las Tablas 2, 3 y 4 se reportan los resultados obtenidos a concentraciones mayores del 14%, estas muestras se prepararon para observar la tendencia que seguían las propiedades de estos materiales. En la siguiente sección se discuten los resultados reportados en estas Tablas.

TABLA 2

Asfalto	Saturados (%)	Aromáticos (%)	Resinas (%)	Asfaltenos (%)	Módulo Tensil
A-6	11.4	39	39.2	9.7	0.13 MPa

TABLA 3

Copolímero	Butadieno/ Estireno	Estireno (%)	Mw	Densidad	Módulo Tensil
Solprene 411	70/30	30	300,000	0.94 g/cc	3.3 MPa

TABLA 4

Mezcla % de SBR	Temp. Ablandamiento (°C) ASTM: D-36, E-28	Penetración (dmm) ASTM: D-5	Viscosidad Brookfield (cp) ASTM: D-1084
0	50	94	800
96/4	68	80	980
96/6	84	64	1600
92/8	90	58	2200
90/10	92	42	5420
86/14	98	38	12000

5 CARACTERIZACION DEL COMPOSITO ASFALTO-HULE

5.1 Determinación de Propiedades ASTM

Se determinaron varios parámetros ASTM tanto de los materiales precursores como del material compuesto. Estos parámetros fueron obtenidos a diferentes composiciones químicas en el caso de los materiales compuestos. Los resultados obtenidos para los materiales precursores se muestran en las Tablas 2 y 3, mientras que en la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del material compuesto.

La Tabla 2 muestra una caracterización completa del asfalto A-6 usado en este trabajo. Del asfalto se separaron los ligeros (saturados, aromáticos, resinas) de los pesados (asfaltenos) por ultra-centrifugación, y luego los ligeros se caracterizaron usando Cromatografía de Permeación en Gel.

La última columna de la Tabla 2 muestra los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas efectuadas al asfalto. Como puede observarse su módulo elástico es muy bajo, razón por la cual hay que modificarlo para incrementar significativamente sus propiedades mecánicas.

En la Tabla 3 es posible observar la caracterización realizada al copolímero de estireno-butadieno. Este consiste en un copolímero en bloque en donde el 70% es polibutadieno, mientras que el 30% es poliestireno. Como ya lo mencionamos, es un copolímero radial en forma de estrella de 4 picos; el peso molecular obtenido para esta estructura molecular fue de 300,000 y se determinó por Dispersión de Luz Dinámica. La densidad del copolímero se determinó por métodos pignométricos.

En igual forma que para el asfalto puro, también se determinó para el copolímero SBR el módulo elástico, el cual, como puede apreciarse, es considerablemente mayor que el del asfalto. Esta es una de las razones por la que se usa este tipo de materiales para modificar el asfalto.

En la Tabla 4 es posible ver la determinación de las propiedades ASTM para el material compuesto a diferentes composiciones químicas. A pesar de que éstas son pruebas puntuales, dan una idea del comportamiento del material compuesto. Por ejemplo, para la temperatura de ablandamiento se observa un incremento desde 50°C para asfalto puro, hasta 98°C cuando el contenido de

hule es del 14%; o sea que la temperatura de ablandamiento se incrementa por un factor de 2.

La penetración también sufre una reducción significativa de 94 dmm para el asfalto puro a 38 dmm para el compuesto con 14% de hule; esto corresponde a una reducción por un factor de 3.

La viscosidad Brookfield se incrementa substancialmente de 800 cp a 12,000 cp cuando se modifica el asfalto con 14% de hule; esto corresponde a un incremento de más de un orden de magnitud en la viscosidad.

Para resaltar más el efecto que tiene el agente modificador en el desempeño del material compuesto, en las Figuras 8, 9 y 10 se muestra como varían el ablandamiento, la penetración y la viscosidad Brookfield, respectivamente, en función del contenido de hule en el compuesto.

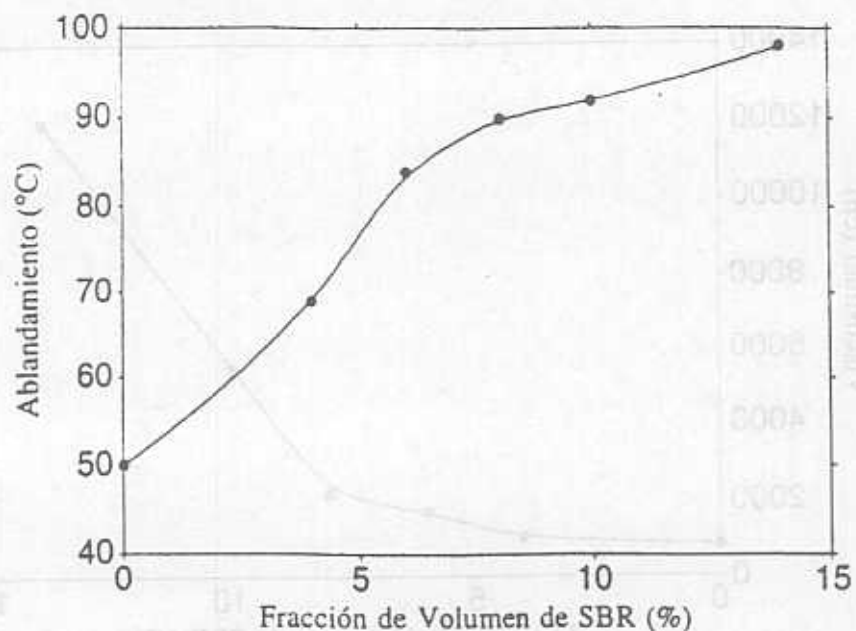


FIGURA 8

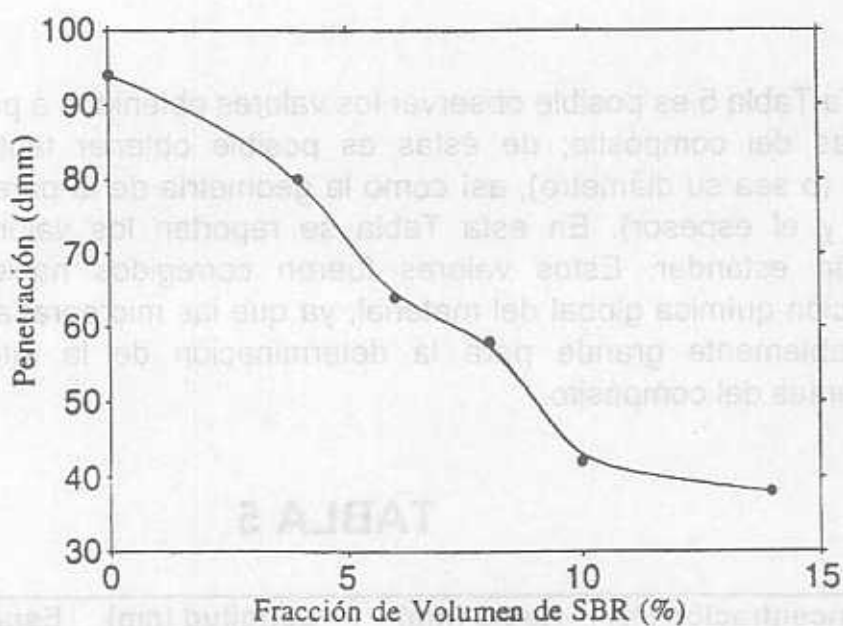
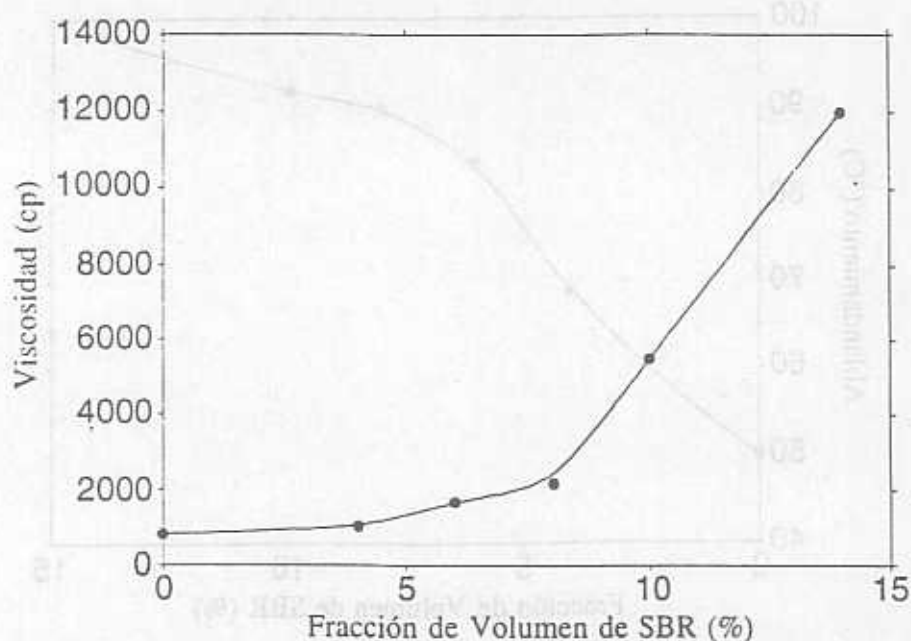


FIGURA 9

**FIGURA 10**

En la Tabla 5 es posible observar los valores obtenidos a partir de las microfotografías del compósito; de éstas es posible obtener tanto el tamaño de partícula (o sea su diámetro), así como la geometría de la pared de la celda (la longitud y el espesor). En esta Tabla se reportan los valores medios y su desviación estándar. Estos valores fueron corregidos haciendo uso de la composición química global del material, ya que las microfotografías tienen un error considerablemente grande para la determinación de la interface entre las componentes del compósito.

TABLA 5

Concentración (%)	Radio (nm)	Longitud (nm)	Espesor (nm)
10	155 ± 34	165 ± 28	59 ± 23
14	123 ± 28	152 ± 28	61 ± 19

Finalmente, en la Tabla 6 se reportan las condiciones bajo las cuales se realizó el laminado del material compuesto para la fabricación de las probetas para ser usadas en la determinación de las propiedades mecánicas del compuesto.

TABLA 6

Muestra	Composición del SBR (%)	Temperatura de Prensado (°C)	Tiempo de Prensado (min)
0	0	25	---
1	6	60	2
2	14	60	2
3	20	67	2
4	25	73	2
5	30	75	2
6	35	78	3
7	40	80	3
8	100	160	5

5.2 Determinación de la Morfología del Asfalto Modificado

Se determinó la morfología del compuesto asfalto-hule a diferentes composiciones químicas usando la técnica de Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM). Para poder obtener buenas fotos de microscopía electrónica, hay que usar un agente de tensión para poder obtener un buen contraste, el cual es necesario para distinguir las diferentes fases que forman el compuesto.

5.2.1 Preparación de Muestras para Determinación Morfológica

Las muestras fueron preparadas disolviendo el compuesto asfalto-hule en tolueno (J.T. Baker, grado reactivo) por varias horas hasta que se obtuvo una disolución completa. Posteriormente, la solución se colocó en una superficie plana de celofán y se dejó que el solvente se evaporara para formar una película de un espesor de aproximadamente 0.1 micrones. Se retira la película del celofán y se tiñe usando vapores de tetróxido de osmio (OsO_4) los cuales atacan químicamente las dobles ligaduras del polibutadieno uniéndose a éstas. Esto se hace para tener un buen contraste en las micro-fotografías y poder distinguir las dos fases presentes en el sistema, ya que el tetróxido de osmio dispersa mucho los electrones produciendo regiones oscuras en las micro-fotografías; por esta

razón las zonas oscuras en las microfotografías corresponden al hule, mientras que las zonas claras al asfalto.

5.2.2 Determinación Morfológica Mediante TEM del Asfalto Modificado

La morfología del compuesto se obtuvo usando un Microscopio Electrónico de Transmisión marca JEOL modelo 100-CX operado en el modo de electrones secundarios. Todas las pruebas fueron hechas a temperatura ambiente. El máximo voltaje usado en todos los experimentos fue de 80 kV.

La determinación de la morfología por Microscopía Electrónica de Transmisión tiene que efectuarse rápidamente, ya que el haz de electrones funde el material compuesto perdiéndose la morfología del compuesto.

Los resultados de la determinación de la morfología del compuesto a diferentes cantidades de hule se pueden observar en la Figuras 3, 4, 5 y 6, las cuales corresponden a concentraciones de hule de 4%, 6%, 8% y 10%, respectivamente.

La Figura 3 muestra la micro-fotografía correspondiente al compuesto con 4% de hule. Aquí es posible observar las partículas de hule dispersas en el asfalto. A este grado de modificación las propiedades del compuesto no aumentan significativamente.

La Figura 4 muestra la morfología del compuesto conteniendo 6% de hule. Aquí se observa sólo un incremento en el número de partículas de hule en el interior del asfalto, con un consecuente incremento en sus propiedades. Hay que hacer resaltar que debido a que el número de partículas de hule es mayor, la distancia entre ellas se reduce.

La Figura 5, la cual corresponde al compuesto modificado con 8% de hule, muestra un hecho importante: a esta concentración las partículas de hule comienzan a unirse formando pequeñas cadenas, las cuales empiezan a tener una longitud considerable. Es aquí en donde comienza el proceso de percolación, que es fundamental para el reforzamiento del material asfáltico.

La Figura 6 muestra un cambio drástico en la morfología del compuesto. Cuando la cantidad de hule aumenta al 10%, la fase elastomérica comienza a unirse volviéndose la fase continua del material, mientras que el asfalto se encuentra rodeado de hule formando la fase discreta, jugando el papel de material de relleno. La concentración a la cual este fenómeno sucede es llamada

la concentración de inversión de fase; a esta concentración los papeles jugado por el asfalto y por el hule, se invierten.

5.3 Determinación de Propiedades Mecánicas del Asfalto Modificado Mediante Pruebas de Esfuerzo-Deformación

Para poder obtener las propiedades mecánicas del material compuesto asfalto-hule, hay que preparar diferentes probetas de las muestras del compuesto a diferentes composiciones. Cuando menos hay que preparar 5 probetas para cada composición a fin de poder efectuar un análisis estadístico apropiado de los resultados experimentales obtenidos. Consecuentemente, los resultados reportados para las propiedades mecánica son un promedio obtenido sobre 5 muestras.

5.3.1 Preparación de Muestras para Determinación de Propiedades Mecánicas del Asfalto Modificado

Para preparar las probetas que se van a usar en el análisis de pruebas mecánicas, el material compuesto, a diferentes composiciones químicas, se vierte en caliente en una laminadora, la cual produce una placa de espesor controlado. La norma ASTM indica que el espesor de las probetas para pruebas mecánicas tiene que ser de 2 mm. Una vez que el espesor de la placa ha sido obtenido, la placa se enfría a temperatura ambiente. Posteriormente se cortan la probetas usando un suaje con la forma apropiada para este tipo de pruebas. Esta forma consiste en una tira del compuesto, la cual tiene en sus extremos un mayor ancho (4 mm) para poderla asir con las mordazas de la máquina de pruebas mecánicas; la forma de las probetas asemeja la de una corbata de moño; el largo de la probeta en la región intermedia es de 17 mm.

5.3.2 Determinación de Propiedades Mecánicas del Asfalto Modificado Usando la Máquina Universal de Pruebas Mecánicas

Las propiedades mecánicas del compuesto asfalto-hule se obtuvieron usando una Máquina Universal de Pruebas Mecánicas marca Instron modelo 1125 con capacidad máxima de 20,000 lb. La máquina fue operada a diferentes velocidades de deformación: 5, 10 y 15 mm/min. La máquina proporciona una gráfica esfuerzo-deformación a diferentes velocidades de corte. A partir de esta información es posible obtener el módulo elástico (o módulo de Young), midiendo la pendiente inicial de estas curvas.

En la Fig. 11 es posible observar el conjunto de curvas esfuerzo-deformación para compósitos de diferentes composiciones químicas. Usando esta información se calculó el módulo elástico. En la Fig. 12 se muestran los valores obtenidos para el módulo elástico como función de la composición química del compósito. En esta gráfica los puntos corresponden a los valores experimentales y las curvas continuas a los modelos matemáticos usados para ajustar los datos experimentales.

2.3.1 Preparación de Muestras para Determinación de Propiedades Mecánicas del Asfalto Modificado

Para preparar las probetas que se van a usar en el análisis de pruebas mecánicas, el material compuesto, a diferentes composiciones químicas, se vierte en caliente en una laminadora, la cual produce una placa de espesor controlado. La norma ASTM indica que el espesor de las probetas para pruebas mecánicas tiene que ser de 3 mm. Una vez que el espesor de la placa ha sido obtenido, la placa se corta a temperaturas ambiente. Posteriormente se cortan las probetas usando un suizo con la forma apropiada para este tipo de pruebas. Estas formas consisten en una tira del compósito, la cual tiene en sus extremos un mayor ancho (4 mm) para poderle unir con las montañas de la máquina de pruebas mecánicas; la forma de las probetas asumirá la de una columna al momento el largo de la probeta en la región intermedia es de 13 mm.

2.3.2 Determinación de Propiedades Mecánicas del Asfalto Modificado Usando la Máquina Universal de Pruebas Mecánicas

Las propiedades mecánicas del compuesto asfáltico-hule se obtuvieron usando una Máquina Universal de Pruebas Mecánicas marca Instron modelo 1132 con capacidad máxima de 20,000 lb. La máquina fue calibrada a diferentes velocidades de deformación: 5, 10 y 15 mm/min. La máquina proporciona una gráfica esfuerzo-deformación a diferentes velocidades de corte. A partir de esta información es posible obtener el módulo elástico (o módulo de Young), cuando la pendiente inicial de estas curvas.

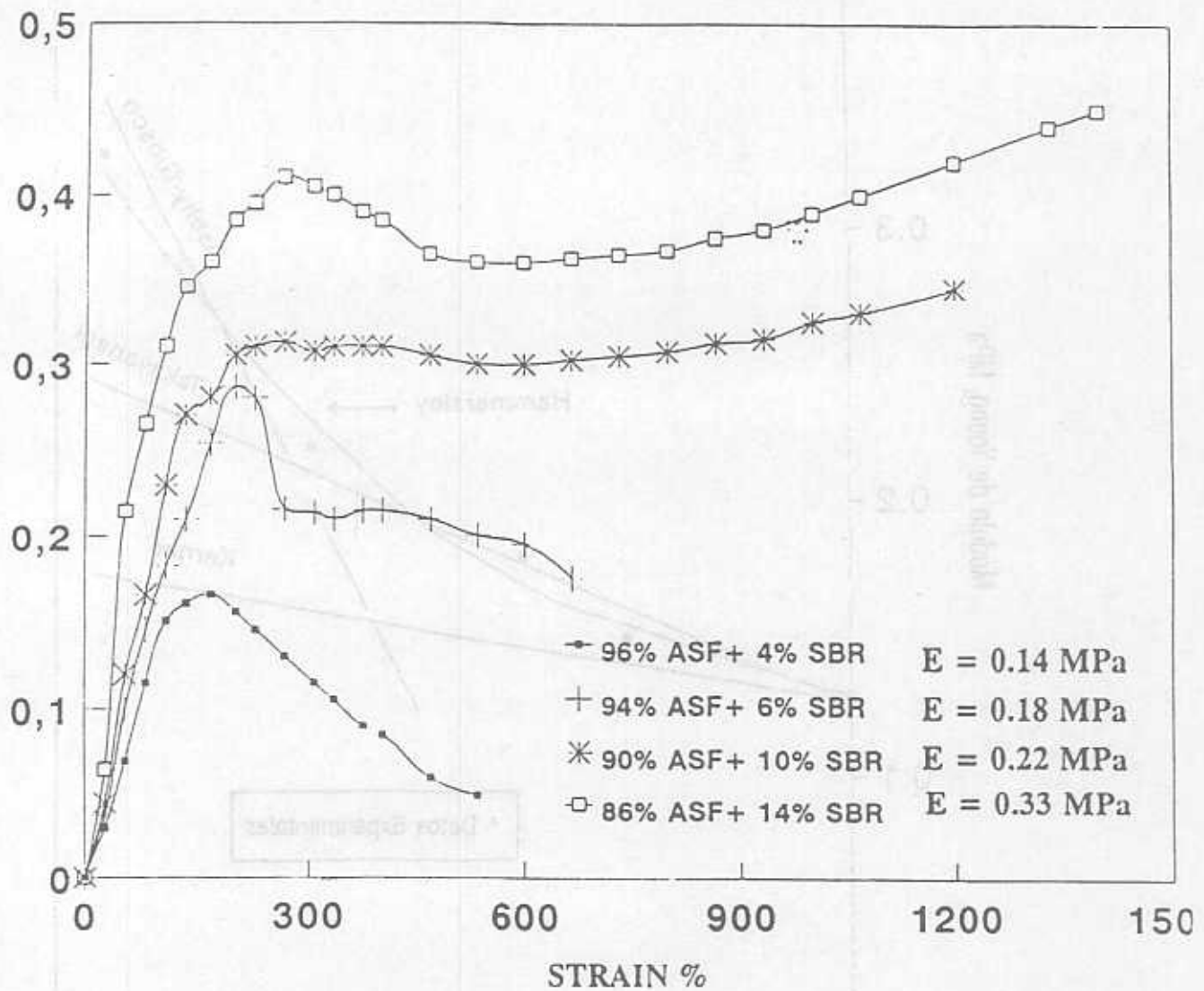


FIGURA 11

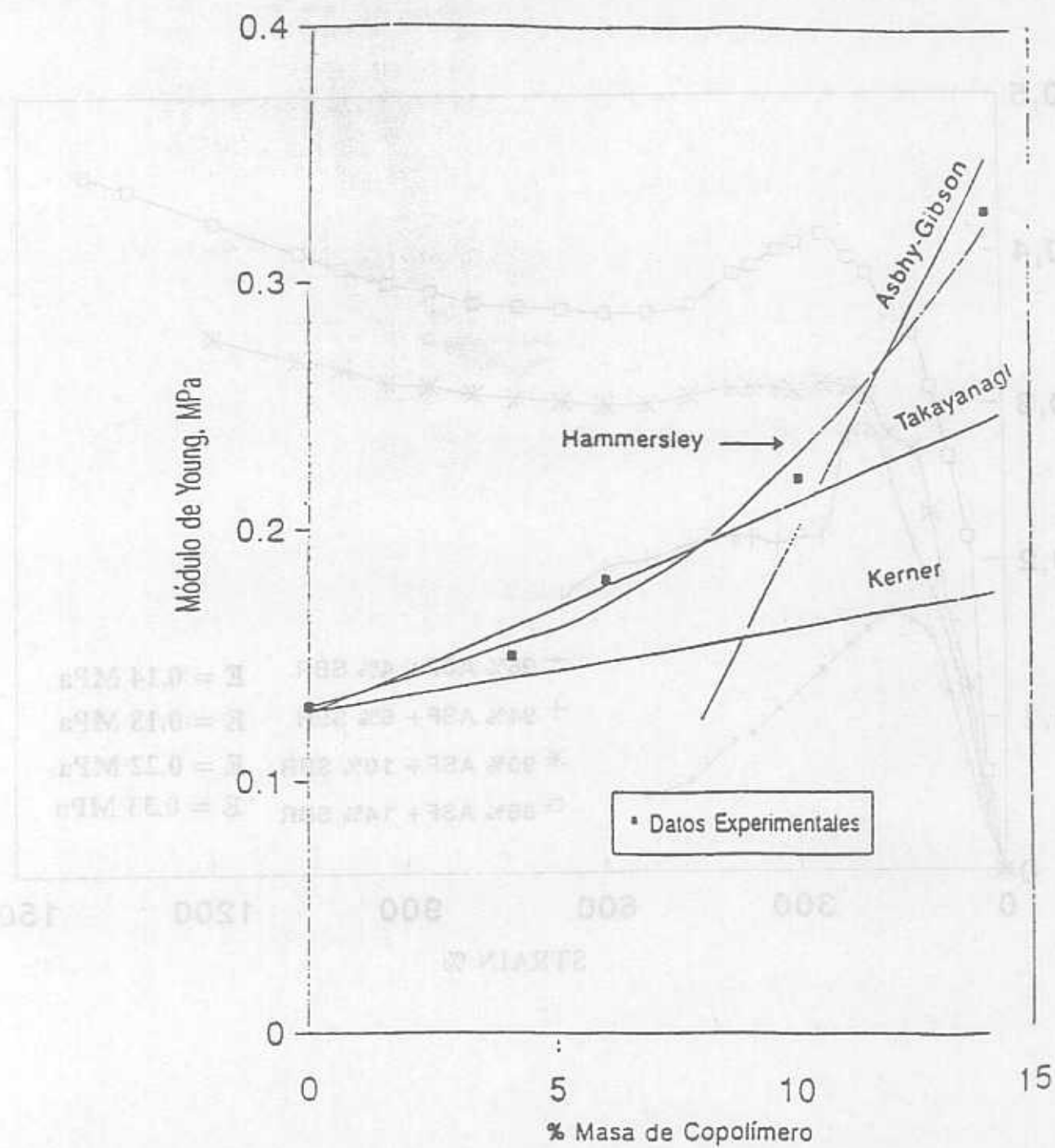


FIGURA 12

6 ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Análisis de Resultados de las Pruebas de Morfología

A partir de las figuras 3 a 6, en donde se muestran los resultados de las morfologías obtenidas por microscopía electrónica de transmisión, es posible observar que la morfología depende fuertemente de la cantidad de hule que contenga el compuesto. Como se mencionó anteriormente, en las microfotografías la parte oscura corresponde al hule teñido usando el tetróxido de osmio, mientras que la parte clara corresponde al poliestireno.

Para bajas concentraciones de hule (de 0 a 6%), las micro-fotografías muestran inclusiones de hule dispersas en una matriz de asfalto; estas inclusiones están distribuidas en una forma homogénea. En este régimen de concentraciones el reforzamiento producido en el asfalto por el hule es pequeño, y la razón principal para este comportamiento es que estas inclusiones de hule son independientes unas de otras, o sea que no hay interacción entre ellas.

Cuando la concentración de hule aumenta al 8% las inclusiones comienzan a aproximarse unas a otras, formando pequeñas estructuras como cadenas de unos pocos eslabones. Aquí comienza la interacción entre los dominios discretos de hule: ellos se comienzan unir conectando todo el sistema de asfalto con pequeños "camino" de hule. Es aquí en donde la percolación comienza.

Cuando la concentración de hule alcanza el 10%, la morfología del material es completamente diferente. En este régimen de concentración prácticamente todo el hule está conectado formando éste la fase continua, mientras que el asfalto, a pesar de que aparece a concentraciones altas (del 90%), pasa a formar la fase discreta. Este cambio drástico en la morfología del asfalto modificado es el responsable del también drástico incremento en las propiedades mecánicas del material compuesto. Esta es la concentración de inversión de fase. Para concentraciones arriba de este valor, no hay cambios drásticos en la morfología, pero la respuesta mecánica aumenta significativamente con el contenido de hule.

6.2 Análisis de Resultados de Pruebas Mecánicas

Las propiedades elásticas o mecánicas a bajas deformaciones de materiales poliméricos amorfos y homogéneos son determinadas por procesos de relajación molecular. Los cambios en la historia térmica y mecánica o la adición de solventes afectan las respuestas mecánicas; todo ello puede ser explicado en términos de los cambios en el entorno molecular que rodea a las cadenas poliméricas. Para compósitos incompatibles las respuestas de relajación molecular son las propias de cada componente más la contribución debida a las interfaces entre los materiales, ya que las respuestas están en función directa de la composición y la estructura de la mezcla, mientras que para compósitos compatibles, la relajación molecular de una componente afecta a la otra y el material tendrá propiedades mecánicas, las cuales son un promedio de las correspondientes a las componentes de la mezcla.

6.2.1 Modelos Mecánicos para Predecir la Respuesta del Compósito

Existen varios modelos que permiten, dependiendo de la morfología del material, predecir el comportamiento mecánico del compósito. En principio estos modelos matemáticos permiten describir las respuestas dinámicas en términos de las propiedades de los constituyentes de la mezcla, através de las características de la respuesta del material compuesto. Soluciones exactas de los modelos a los problemas mecánicos sólo se han obtenido en pocos casos, pero muchas fórmulas empíricas y semi-empíricas han sido desarrolladas.

Entre estos modelos podemos mencionar:

1.- Modelos de Acoplamiento Mecánico:

Estos modelos representan empíricamente las respuestas en términos de las propiedades mecánicas de los constituyentes; el modelo de Takayanagy es un ejemplo típico de este grupo.

2.- Modelos Autoconsistentes:

Estos generan aproximaciones basadas en el análisis de deformaciones y esfuerzos con relación a una inclusión; a este grupo pertenece el modelo de Kerner.

3.- Modelos de Límites de Acotación en los Módulos:

A este grupo pertenecen los modelos que especifican los posibles rangos de los valores de los módulos con base a una serie de suposiciones; el modelo de Hashin-Shtriskman es representativo en este caso.

4.- Modelo para Materiales Celulares:

A este grupo pertenecen modelos que representan al compuesto como un material celular. Una geometría específica para este tipo de materiales es un material con estructura de panal de abejas; el modelo de Ashby-Gibson es representativo de este caso.

5.- Modelo de Percolación:

A este grupo pertenecen modelos que toman en cuenta interacciones a largo alcance, o sea que contemplan efectos de conectividad en el interior del material. A este tipo pertenece el modelo de Hammersly o de Percolación.

La notación seguida para los diferentes modelos es la siguiente:

G_c , G_1 y G_2 corresponden al valor de los módulos de corte del compuesto y de los constituyentes del material compuesto, respectivamente.

ϕ_1 y ϕ_2 son la fracción de volumen de la fase discreta y de la fase continua, respectivamente.

α es un parámetro de ajuste en el modelo de Takayanagy y de Percolación y es la razón de Poisson en el modelo de Kerner.

β es un parámetro de ajuste en el modelo de percolación.

ϕ es la fracción de volumen de la fase discreta en el modelo de percolación.

6.2.1.1 El Modelo de Takayanagy

Este modelo puede ser considerado como una generalización de los modelos de resorte y amortiguador de Maxwell. En este modelo se supone que cada bloque contribuye con su propia respuesta mecánica; esto puede ser observado en la Figura 13. Este modelo sólo requiere un parámetro ajustable α .

$$\frac{G_c}{G_1} = \frac{\phi_1 G_1 + (\alpha + \phi_2) G_2}{(1 + \alpha \phi_2) G_1 + (\alpha \phi_1) G_2}$$

6.2.1.2 Modelo de Kerner

El modelo de Kerner es representativo del grupo llamado de aproximaciones autoconsistentes. En este esquema la estructura del compuesto consiste de una partícula esférica que forma la fase discreta, rodeada por otro medio el cual es la matriz; a su vez, ésta está rodeada por un material con la misma respuesta dinámica que el compuesto; la Figura 14 muestra una representación esquemática del modelo de Kerner. La expresión que Kerner obtuvo para el módulo de corte es de la misma forma que el modelo de Takayanagi, sólo que el parámetro α ya no es empírico sino que es sustituido por la relación de Poisson de la fase continua.

$$\frac{G_c}{G_1} = \frac{\phi_1 G_1 + (\beta + \phi_2) G_2}{(1 + \beta \phi_2) G_1 + (\beta \phi_1) G_2}$$

6.2.1.3 Modelo de Percolación

Este modelo ha sido aplicado exitosamente a sistemas que presentan la propiedad de conectividad. En la Figura 15 se muestra una representación del modelo de percolación en donde es posible observar que la fase rígida (R) conecta el material compuesto (R y S) a grandes distancias. La teoría de percolación está relacionada con los efectos de conectividad que suceden en el interior de un material: un material está percolado si es posible ir de un punto a otro del material a través de una sola fase. Esta conectividad depende de la concentración relativa de las fases presentes en el sistema: a cierta concentración crítica, la conectividad de vuelve extremadamente grande comparada con el tamaño del sistema. Para concentraciones por arriba de esta concentración, el sistema está en un estado percolado. La percolación caracteriza una transición de un estado de conectividad local, a uno en el cual la conectividad se extiende indefinidamente.

Para este tipo de modelo se tiene que:

$$\frac{G_c}{G_2} = \frac{\left[(1 - \alpha \phi^\beta) + (\alpha \phi^\beta) \phi \right] G_1 + \left[(\alpha \phi^\beta) (1 - (\alpha \phi^\beta) - \phi) \right] G_2}{\phi G_1 + \left[1 - (\alpha \phi^\beta) - \phi \right] G_2}$$

siendo α y β los parámetros ajustables.

MODELO DE TAKAYANAGY

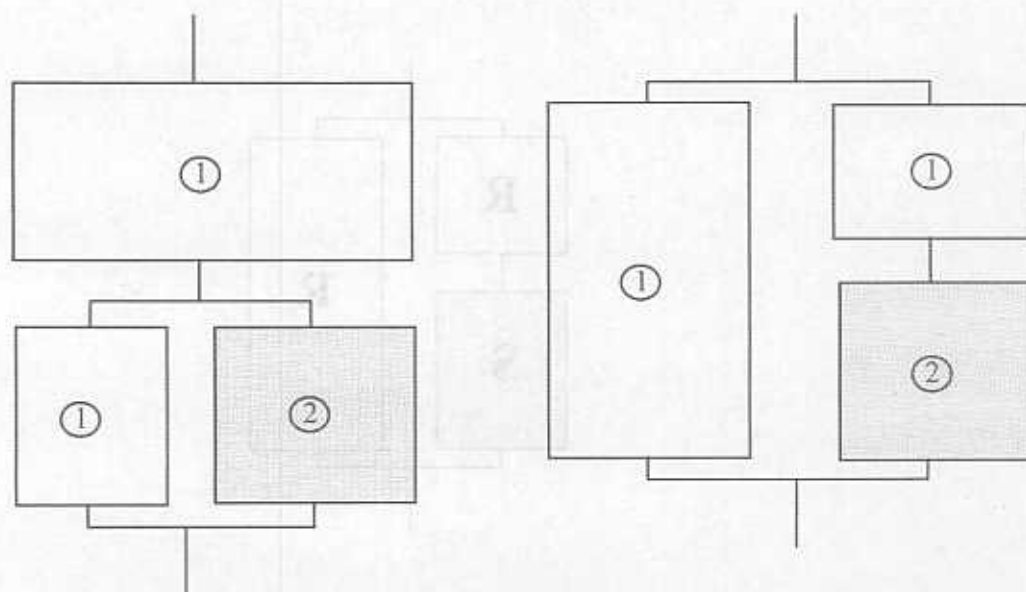


FIGURA 13

MODELO DE KERNER

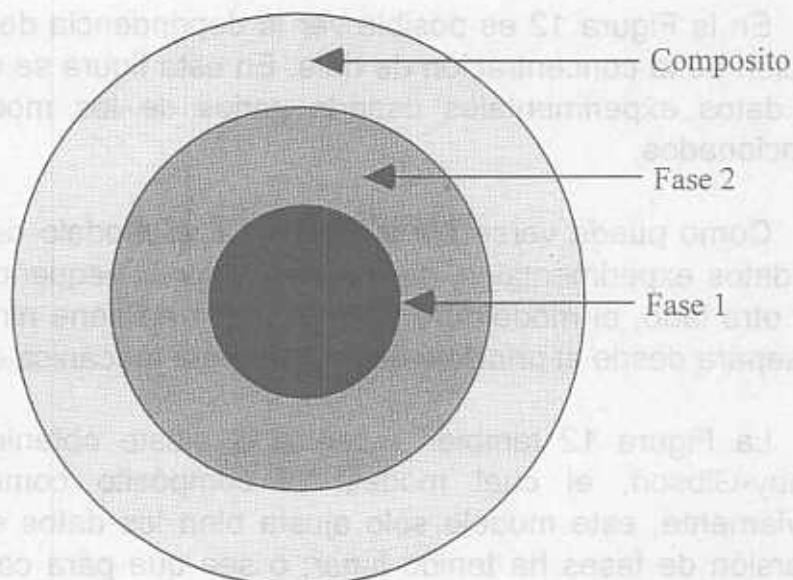


FIGURA 14

MODELO DE PERCOLACION

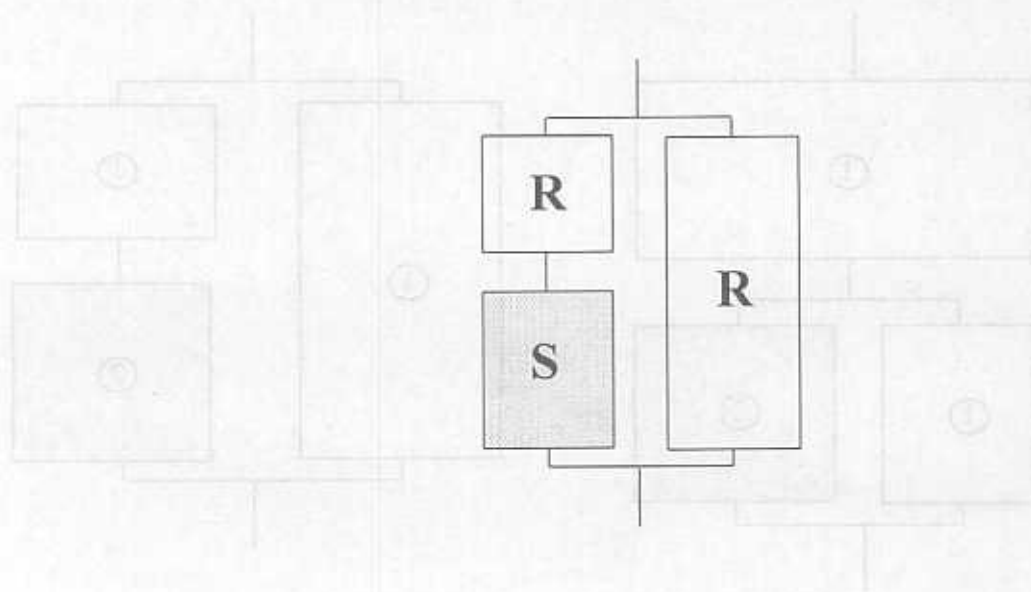


FIGURA 15

6.3 Análisis de resultados de pruebas mecánicas usando el Modelo de Takayanagy, el de Kerner y el de Percolación

En la Figura 12 es posible ver la dependencia de los módulos elásticos en función de la concentración de hule. En esta figura se muestra el ajuste hecho a los datos experimentales usando varios de los modelos matemáticos antes mencionados.

Como puede verse en la Figura 12, el modelo de Takayanagy ajusta bien los datos experimentales, pero sólo a valores pequeños de la cantidad de hule. Por otro lado, el modelo de Kerner, como no tiene ningún parámetro ajustable, se separa desde el principio de la respuesta mecánica del material compuesto.

La Figura 12 también muestra el ajuste obtenido usando el modelo de Ashby-Gibson, el cual modela el compósito como un panel de abejas. Obviamente, este modelo sólo ajusta bien los datos experimentales cuando la inversión de fases ha tenido lugar; o sea que para concentraciones mayores o cercanas al 10% este modelo sí predice el comportamiento del material compuesto.

Finalmente, la Figura 12 también muestra el ajuste obtenido usando el modelo de percolación. Este modelo predice correctamente los módulos elásticos del compuesto para todos los valores de la concentración de hule. Este modelo tiene sólo dos parámetros ajustables.

6.3.1 Uso de los Modelos de Takayanagy y Kerner para ajustar los resultados experimentales

Los modelos de Takayanagy y de Kerner tienen, como una de las suposiciones básicas, el hecho de que las inclusiones discretas en el interior del compuesto no interaccionan unas con otras. Debido a lo anterior, con estos modelos sólo se puede predecir el comportamiento mecánico del compuesto para valores de la concentración de hule abajo del valor de inversión de fase. Para concentraciones de hule por abajo del valor de inversión de fase, prácticamente no hay interacción entre los dominios discretos de hule, por lo que dichos modelos son perfectamente aplicables. Cuando excedemos a este valor de la concentración, los dominios discretos comienzan a interaccionar dejando de ser válidos estos modelos.

6.3.2 Uso del Modelo de Percolación para ajustar los resultados experimentales

El modelo de percolación es un modelo que toma en cuenta los procesos de conectividad que se producen cuando, en un material compuesto, alguna de las fases comienza a aumentar al grado de poder conectar todo el material. Por esta razón este modelo es aplicable a bajas concentraciones de hule. Ya está conectado mediante el asfalto y, por otro lado, también es aplicable cuando nos aproximamos al valor de la concentración de inversión de fases, ya que el sistema comienza a conectarse mediante la fase elastomérica. Por esta razón este modelo es aplicable para todo el rango de concentraciones de hule. Como puede verse de la Fig. 12, el modelo de percolación ajusta bien los resultados experimentales para todos los valores de la concentración de hule.

7 ALCANCES DEL PROYECTO

La realización de este proyecto permitió, no únicamente desarrollar la tecnología necesaria para producir materiales asfálticos modificados con hule SBR, para ser usados en la fabricación de carpetas asfálticas, sino también para entender cómo las propiedades de los materiales precursores repercuten en las propiedades del material compuesto.

Esto permite entender más a fondo la sinergia involucrada en el desarrollo de materiales compuestos, dando la posibilidad de aplicarla a otros sistemas con características similares.

El entender este tipo de tecnología y poderla aplicar a problemas nacionales de primera importancia, como son el de comunicaciones, permite, además de una independencia tecnológica de otros países, tener costos substancialmente más baratos que si esta tecnología se tuviera que importar.

8 APARATOS EMPLEADOS

Para la realización de este proyecto se emplearon fundamentalmente 3 equipos que son:

1.- Un mezclador de alto corte marca Ross, operado a 25 rpm por un tiempo de 2 a 3 horas.

2.- Un Microscopio Electrónico de Transmisión marca JEOL modelo 100-CX, operado en el modo de electrones secundarios. Las micro-fotografías se obtuvieron a diferentes ampliaciones, dependiendo del tamaño de las fases formadas en el interior del asfalto modificado.

3.- Una Máquina Universal de Pruebas Mecánicas marca Instron, modelo 1125 con capacidad para 20,000 lb. Los experimentos esfuerzo-deformación se realizaron a diferentes velocidades de deformación. Se escogieron 5, 10 y 15 mm/min. Todos los experimentos se realizaron a temperatura ambiente.

9 CONCLUSIONES

Como hemos podido ver a lo largo del trabajo presentado en este reporte, el desarrollo de materiales compuestos es muy importante, ya que es posible obtener materiales con excelentes propiedades, si se cuida de preparar el material de tal forma de obtener la morfología correcta.

En el caso particular del asfalto modificado con hule, hay que escoger el tipo de hule correcto para hacer la modificación del asfalto; adicionalmente, el tiempo y la temperatura de mezclado es importante para poder dispersar el hule en la matriz de asfalto, el tiempo suficiente para dejar que el sistema se aproxime a su morfología de equilibrio, impuesta por la condiciones externas.

Si el compósito asfalto hule es preparado como se mencionó en este trabajo, para cantidades de hule del 10%, es posible obtener un compósito en donde el hule sea la fase continua, mientras que el asfalto pase a formar la fase de relleno del compósito. Para esta morfología es posible obtener un material con propiedades mecánicas substancialmente mejoradas.

Fue posible, usando el modelo de percolación, poder predecir el comportamiento mecánico del compósito asfalto-hule, para cualquier valor de la concentración de hule. Esto es muy importante, ya que permite diseñar materiales de este tipo si se conoce el valor del módulo elástico que se quiera obtener. Adicionalmente, este modelo de percolación es de sólo dos parámetros, lo que permite caracterizar esta familia de materiales compuestos con únicamente dos cantidades.

10 REFERENCIAS

- 1.- R.A., Dickie, "Mechanical Properties of Multiphase Polymer Blends", Polymer Blends, Vol. 1, Academic Press, N. Y. (1978).
- 2.- Z. Hashin, "Analysis of Composite Materials", J. Appl. Mech. **50**, 481-505 (1989).
- 3.- A. Echte, "Rubber-Toughened Styrene Polymer" en "Rubber Toughened Plastics", ACS series 222 (1989).
- 4.- C.B. Bucknall, "Rubber-Modified Plastics", en "Comprehensive Polymer Science", Vol. 2 Pergamon Press (1989).
- 5.- R. Blanco, R. Rodríguez, M. García-Garduño V. Castaño, "Morphology and Tensile Properties of the Composite Asphalt-Butadiene-Styrene Copolymer", J. Appl. Polym. Sci. **56**, 57-64 (1995).
- 6.- Dickie, R.A., Polymer Blends, Vol. 1, Academic Press, N.Y. (1978).
- 7.- Bouldin, M. and Collins, A.; "Rheology and Micro-structure of Polymer Asphalt Blends", Shell Development Co., presented at the meeting of Rubber Division, ACS, Las Vegas (1990).
- 8.- Krauss, G.; "Modification of Asphalt Block Polymer of Butadiene and Styrene", Rubber Chem. Tech., **55**, 1389 (1982).
- 9.- "Kraton Thermoplastic Rubber in Asphalt Products", Technical Bulletin, Shell Chemical Co. (1987).
- 10.- R. Blanco, R. Rodríguez, M. García-Garduño and V. Castaño, "Rheological Properties of Styrene-Butadiene Copolymer Reinforced Asphalt", J. Appl. Polym. Sci. **61**, 1493-1501 (1996).
- 11.- Hull, D., "An Introduction of Composite Materials", Cambridge University Press, (1981).
- 12.- J. V. Cavaillé., The Mechanical Behavior and the Effect of Percolation in two Phases Polymeric Systems, CERMAV-CNRS, Grenoble, France.; Conference held in UAM-I, August 1994.

- 13.- G. Hernández, R. Rodríguez, R. Blanco and V.M. Castaño, "Mechanical Properties of the Composite Asphalt-Styrene-Butadiene Copolymer at High Degree of Modification", Intern. J. Polymeric. Mater. **35**, 129-144 (1997).
- 14.- "Finaprene Rubber for Bitumen Modification", Technical Bulletin, Fina Corporation.
- 15.- "Use of Finaprene Block Copolymers to Modify Asphalt from Different Crude Sources", Technical Bulletin, Fina Corp. (1987).

CIUDAD DE MÉXICO

Av. Patriotismo # 683
Col. Mixcoac
03730 México D.F.
Tel. (01) 56 88 76 29
56 88 76 03
Fax (01) 56 88 76 08

SAN FANDILA

Km 12, Carretera
Querétaro - Galindo
76700 San Fandila, Qro.
Tel. (4) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (4) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>