

00580



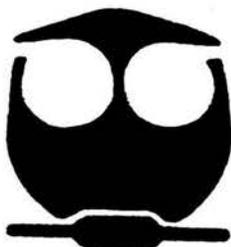
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERIA
MAESTRIA EN INGENIERIA

"ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS A BAJA
TEMPERATURA (CREEP) DE ASFALTO MODIFICADO CON
COPOLIMERO MODELO DE ESTIRENO-BUTADIENO."

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
P R E S E N T A
JORGE OCTAVIO VIRUES DELGADILLO

DIRECTOR DE TESIS: RAFAEL HERRERA NAJERA



MEXICO, D.F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado Asignado:

Presidente: Dr. Alberto Tecante Coronel (FQ)

Vocal: Dr. Humberto Vázquez Torres (UAM I)

Secretario: Dr. Ángel Enrique Chávez Castellanos (FQ)

1 er. Suplente: Dra. Laura Patricia Martínez Padilla (FES C)

2º. Suplente: Dr. Dmitri Likhatchev (IIM)

Sitio donde se desarrollo el tema:

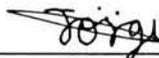
L. 213, Edificio de Ingeniería Química, Conjunto "E", Facultad de Química, Cd.
Universitaria.

Asesor:



Dr. Rafael Herrera Nájera.

Sustentante:



Jorge Octavio Virues Delgadillo

*“Y se dijeron unos a otros:
Vamos, hagamos ladrillo y cozámoslo con fuego.
Y les sirvió el ladrillo en lugar de piedra,
y el asfalto en lugar de mezcla”
Génesis 11,3*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT),
a la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEP),
a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA),
por el apoyo económico otorgado; y, en especial,
al Dr. Rafael Herrera Nájera por la supervisión académica de esta tesis y al
Dr. Ángel Enrique Chávez Castellanos por su valiosa ayuda.

A Papá, a mamá, a mi hermano,
a mis abuelitas,
a mis tíos, tías, primos y,
a mis amigos.

Agradecimientos	<i>iv</i>
Dedicatorias	<i>v</i>
Índice	<i>vi</i>
Figuras	<i>viii</i>
Cuadros	<i>xiii</i>
Resumen	<i>xviii</i>
1. Introducción	1
2. Objetivo e Hipótesis	3
3. Antecedentes	5
3.1. Asfalto	5
3.1.1. Tipos de asfalto	5
3.1.1.1. Asfalto “lago”	5
3.1.1.2. Asfalto “roca”	6
3.1.1.3. Alquitrán	6
3.1.1.4. Asfalto manufacturado a partir del petróleo	6
3.1.2. Composición y estructura del asfalto	7
3.1.2.1. Composición	7
3.1.2.2. Estructura	10
3.1.2.3. Relación entre composición y reología	11
3.1.3. Pruebas mecánicas	11
3.1.3.1. Prueba de penetración (IP 49, ASTM D5, BS 2000: PART 49)	12
3.1.3.2. Prueba de punto de ablandamiento (IP 58, ASTM D36, BS 2000: PART 58)	12
3.1.4. Propiedades del asfalto	13
3.1.4.1. Relación de Poisson	15
3.1.4.2. El concepto de rigidez	15
3.1.4.2.1. Determinación del módulo de rigidez del asfalto	15
3.1.4.2.2. Capacitancia contra módulo de rigidez	16
3.2. Asfalto modificado	16
3.2.1. Modificación del asfalto	19
3.2.1.1. Modificación del asfalto con la adición de azufre	19
3.2.1.2. Modificación del asfalto con la adición de hule	19
3.2.1.3. Modificación del asfalto con compuestos organo-manganosos	19
3.2.1.4. Modificación del asfalto con polímeros termoplásticos	19
3.2.1.5. Modificación del asfalto con hules termoplásticos	20
3.2.1.6. Modificación del asfalto con mezclas termoestables	21
3.2.2. Tipos de polímeros usados para modificar el asfalto	22
3.2.2.1. Polímeros en bloque y otros termoplásticos	22
3.2.2.2. Hules naturales y sintéticos	23
3.2.2.3. Otros polímeros	23
3.2.3. Morfología de los polímeros modificadores	24
3.2.4. Deficiencias en pavimentación	24
3.2.4.1. Deformación permanente a alta temperatura	25
3.2.4.2. Carga asociada con el rompimiento por fatiga	25
3.2.4.3. Rompimiento térmico a baja temperatura	25
3.2.4.4. Endurecimiento del asfalto	25
3.3. Fuerza, esfuerzo y deformación	26

3.4. Prueba de fluencia-recuperación	27
3.4.1. Bases moleculares de la prueba de fluencia	29
3.4.2. Capacitancia y módulo de rigidez	29
3.4.3. Teoría de la viscoelasticidad lineal	31
3.4.4. La curva maestra (Principio de superposición tiempo-temperatura)	34
3.4.5. Relación estructura-propiedad	36
4. Modelos Reológicos	37
4.1. Introducción	37
4.2. Modelos mecánicos	40
4.2.1. Modelo de cinco elementos	40
4.3. Prueba de fluencia	42
4.4. Prueba de recuperación	44
5. Parte Experimental	47
5.1. Caracterización del asfalto	47
5.2. Propiedades del asfalto	48
5.3. Copolímeros estireno-butadieno	48
5.4. Modificación del asfalto	48
5.5. Muestras de asfalto modificado	49
5.6. Prensado del asfalto modificado	50
5.7. Análisis mecánico dinámico	50
5.7.1. Introducción	50
5.7.2. Principio de operación	52
5.7.3. Modos de operación	53
5.7.3.1. Modo de fluencia	53
5.7.4. Pruebas efectuadas	53
6. Resultados	55
6.1. Condición de prueba	55
6.1.1. Comportamiento lineal	55
6.1.2. Condiciones de prueba	57
6.2. Asfalto modificado con 5% del polímero comercial S-1205, vulcanizado	59
6.3. Asfalto modificado con SBS, hidrogenado	64
6.4. Asfalto modificado con polímeros comerciales o funcionalizados	69
6.5. Análisis de resultados en términos del modelo de cinco elementos	78
7. Conclusiones y Recomendaciones	85
Bibliografía	87
Apéndice A: Desarrollo modelos mecánicos utilizados	91
Apéndice B: Resultados desplazamiento inicial a 0.1 mm	100
Apéndice C: Resultados desplazamiento inicial a 0.05 y 0.2 mm	125
Apéndice D: Definición de parámetros calculados con el DMA 983	141
Apéndice E: Especificaciones técnicas DMA 983	144
Apéndice F: Pasos a seguir para realizar un experimento en el DMA 983	146
Apéndice G: Calibración del equipo (DMA 983)	147
Apéndice H: Ecuaciones usadas por el DMA 983	150

Figura	Descripción	Página
3.1.	Composición del asfalto	7
3.2.	Representación esquemática del análisis de la composición química del asfalto	8
3.3.	Estructura de (a) Asfaltenos, (b) Aromáticos, (c) Saturados	9
3.4.	(a) Representación esquemática de un asfalto tipo solución y, (b) de un asfalto tipo gel	10
3.5.	La prueba de penetración	12
3.6.	La prueba del punto de suavización	13
3.7.	Respuesta viscoelástica a la aplicación de un esfuerzo estático (Menard, 1999)	17
3.8.	Respuesta viscoelástica debida a la fuerza aplicada por una llanta en movimiento	17
3.9.	Hules termoplásticos lineales y ramificados	20
3.10.	Estructura de los hules termoplásticos	21
3.11.	Prueba fluencia-recuperación. (a) La prueba de fluencia se realiza aplicando un esfuerzo constante a la muestra, (b) La prueba de recuperación comienza cuando el esfuerzo es removido y el material comienza a recuperarse	27
3.12.	Respuesta elástica, viscosa y viscoelástica en un material sometido a un esfuerzo constante	27
3.13.	Regiones observadas en la curva de la deformación en un experimento de fluencia-recuperación	28
3.14.	Gráfico típico del módulo de rigidez contra el tiempo para el asfalto, en escala logarítmica (SHRP-A-369, 1994)	30
3.15.	(a) Curva esfuerzo en función del tiempo. (b) Respuesta en la deformación de un material viscoelástico lineal. (c) Respuesta a la deformación de un material viscoelástico no lineal	31
3.16.	Isócronas esfuerzo-deformación para varios tiempos, construidas a partir de los datos de fluencia mostrados en la figura 3,15.b; ilustrando el comportamiento lineal	33
3.17.	Otro método para determinar la región lineal en una prueba de fluencia	33
3.18.	(a) Curvas típicas del módulo de rigidez a cinco temperaturas para el asfalto. (b) Aplicación del principio de superposición tiempo-temperatura para obtener una curva maestra a la temperatura deseada. (c) Factores de corrimiento aplicados a los datos de fluencia para obtener la curva maestra	35
3.19.	Efecto de la temperatura y el entrecruzamiento en la curva de fluencia	36
4.1.	Componentes más simples de cualquier modelo mecánico	37
4.2.	(a) Modelo de Maxwell y, (b) Modelo de Kelvin-Voigt	38
4.3.	Modelos de tres elementos, (a) en serie (Kaufman, 1977), (b) en paralelo	39
4.4.	Modelos de cuatro elementos, (a) en serie: modelo de Burgers (Grabowski <i>et. al.</i> , 2002 y Wang <i>et. al.</i> , 2001), (b) en paralelo – amortiguador independiente, y, (c) en paralelo – resorte independiente	39
4.5.	Modelo de cinco elementos	39
5.1.	Muestras de asfalto	50
5.2.	Analizador dinámico mecánico (DMA) 983 de DuPont	51

5.3.	Analizador térmico 9900 con accesorios	51
5.4.	Accesorio para refrigeración de nitrógeno líquido	51
5.5.	Brazos en donde se sujeta la muestra	52
6.1.1.	Isócronas a distintas temperaturas para asfalto modificado TXPR-2 (SBR funcionalizado con un grupo COOH) al 3% en peso: (a) -20 °C, (b) -10 °C y (c) 0 °C	56
6.1.2.	Isócronas a distintas temperaturas para asfalto modificado TXPR-2 (SBR funcionalizado con un grupo COOH) al 8% en peso: (a) -20 °C, (b) -10 °C y (c) 0 °C	57
6.2.1.	Módulos de rigidez de asfaltos modificados con S-1205 (polímero comercial) al 5% en peso y con distintos grados de vulcanización, (a) -15 °C, (b) -10 °C, (c) 0 °C, y (d) capacitancias a 0 °C para los mismos materiales	59
6.2.2.	Curvas maestras de los asfaltos modificados con S-1205 al 5% en peso y distintos grados de vulcanización	60
6.2.3.	Porcentaje de deformación en función del tiempo (pruebas de fluencia y recuperación) de los asfaltos modificados con S-1205 al 5% en peso y distintos grados de vulcanización, (a) -15 °C, (b) -10 °C y (c) 0 °C	63
6.3.1.	Módulos de rigidez de asfaltos modificados con SBS y con distintos porcentajes de hidrogenación, (a) -15 °C, (b) -10 °C, (c) 0 °C, y (d) capacitancias a 0 °C para los mismos materiales	64
6.3.2.	Curvas maestras de los asfaltos modificados con SBS (copolímero estireno-butadieno-estireno) y distintos porcentajes de hidrogenación	66
6.3.3.	Porcentaje de deformación en función del tiempo (pruebas de fluencia y recuperación) de los asfaltos modificados con SBS y distintos porcentajes de hidrogenación, (a) -15 °C, (b) -10 °C y (c) 0 °C	67
6.4.1.	Módulos de rigidez de asfaltos modificados con 3 u 8% de polímero comercial o funcionalizado, (a) -20 °C, (b) -10 °C, (c) 0 °C, y (d) capacitancias a 0 °C para los mismos materiales	69
6.4.2.	Curvas maestras de los asfaltos modificados con 3 u 8% de polímero comercial o funcionalizado	71
6.4.3.	Efecto del peso molecular en el porcentaje de deformación en función del tiempo (pruebas de fluencia y recuperación) de los asfaltos modificados con 3 u 8% de polímero lineal S-1205 o TXPR-2, (a) -20 °C, (b) -10 °C y (c) 0 °C	72
6.4.4.	Efecto del peso molecular en el porcentaje de deformación en función del tiempo (pruebas de fluencia y recuperación) de los asfaltos modificados con 3 u 8% de polímero radial S-411 o S-416 (comercial), (a) -20 °C, (b) -10 °C y (c) 0 °C	74
6.4.5.	Efecto de la morfología en el porcentaje de deformación en función del tiempo (pruebas de fluencia y recuperación) de los asfaltos modificados con 3 u 8% de polímero lineal TXPR-2 o radial S-411, (a) -20 °C, (b) -10 °C y (c) 0 °C	76
6.5.1.	(a) Comparación del modelo de cinco elementos con los datos experimentales del asfalto modificado con 8% de polímero comercial S-1205 a -10 °C, (b) modelo de cinco elementos	78

6.5.2.	Parámetros del modelo de cinco elementos para los asfaltos modificados vulcanizados: (a) módulo elástico del resorte independiente, (b) viscosidad del amortiguador independiente, (c) tiempo de retraso (prueba de fluencia) y, (d) tiempo de retraso (prueba de recuperación)	81
6.5.3.	Parámetros del modelo de cinco elementos para los asfaltos modificados hidrogenados: (a) módulo elástico del resorte independiente, (b) viscosidad del amortiguador independiente, (c) tiempo de retraso (prueba de fluencia) y, (d) tiempo de retraso (prueba de recuperación)	82
B.1.	Capacitancias de los asfaltos modificados con 5% de S-1205 con distintos grados de vulcanización (a) a -15 °C y (b) a -10 °C	100
B.1.1.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con Phr-0 (sin azufre). Desplazamiento inicial 0.1 mm	101
B.1.2.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con Phr-3 (con 3% de azufre). Desplazamiento inicial 0.1 mm	102
B.1.3.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con Phr-5 (con 5% de azufre). Desplazamiento inicial 0.1 mm	104
B.1.4.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con Phr-7 (con 7% de azufre). Desplazamiento inicial 0.1 mm	105
B.2.	Capacitancias de los asfaltos modificados con SBS y distintos porcentajes de hidrogenación (a) a -15 °C y (b) a -10 °C	106
B.2.1.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con SBS-0 (no hidrogenado). Desplazamiento inicial 0.1 mm	107
B.2.2.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con SBS-25 (25% hidrogenado). Desplazamiento inicial 0.1 mm	108
B.2.3.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con SBS-50 (50% hidrogenado). Desplazamiento inicial 0.1 mm	110
B.2.4.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con SBS-65 (65% hidrogenado). Desplazamiento inicial 0.1 mm	111
B.3.	Capacitancias de los asfaltos modificados con 3 u 8% de polímeros comerciales (a) a -20 °C y (b) a -10 °C	112

B.3.1.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-1205 al 3%.Desplazamiento inicial 0.1 mm	113
B.3.2.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-1205 al 8%.Desplazamiento inicial 0.1 mm	115
B.3.3.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-411 al 3%. Desplazamiento inicial 0.1 mm	116
B.3.4.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-411 al 8%. Desplazamiento inicial 0.1 mm	118
B.3.5.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-416 al 3%. Desplazamiento inicial 0.1 mm	119
B.3.6.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-416 al 8%. Desplazamiento inicial 0.1 mm	121
B.3.7.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado (funcionalizado con un grupo COOH) con TXPR-2 al 3%. Desplazamiento inicial 0.1 mm	122
B.3.8.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado (funcionalizado con un grupo COOH) con TXPR-2 al 8%. Desplazamiento inicial 0.1 mm	124
C.1.	Módulo de Rigidez y capacitancia de asfaltos modificados con SBR comerciales o funcionalizados, (a) y (b) -20 °C, (c) y (d) -10 °C, (e) y (f) 0 °C; y, (g) y (h) Curvas maestras de dichas propiedades a -20 °C. Desplazamiento inicial 0.2 mm	125
C.2.1.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-1205 al 3%.Desplazamiento inicial 0.2mm	126
C.2.2.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-1205 al 8%.Desplazamiento inicial0.2 mm	128

C.2.3.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-411 al 3%. Desplazamiento inicial 0.2 mm	129
C.2.4.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-411 al 8%. Desplazamiento inicial 0.2 mm	131
C.2.5.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-416 al 3%. Desplazamiento inicial 0.2 mm	132
C.2.6.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-416 al 8%. Desplazamiento inicial 0.2 mm	134
C.2.7.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado (funcionalizado con un grupo COOH) con TXPR-2 al 3%. Desplazamiento inicial 0.2 mm	135
C.2.8.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado (funcionalizado con un grupo COOH) con TXPR-2 al 8%. Desplazamiento inicial 0.2 mm	137
C.2.9.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado (funcionalizado con un grupo COOH) con TXPR-2 al 3%. Desplazamiento inicial 0.05 mm	138
C.2.10.	Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado (funcionalizado con un grupo COOH) con TXPR-2 al 8%. Desplazamiento inicial 0.05 mm	140
H.1.	Deformación de la muestra	151
H.2.	Modelo mecánico utilizado en el DMA 983	152

Cuadro	Descripción	Página
3.1.	Análisis elemental del asfalto	7
3.2.	Análisis elemental de algunos tipos de asfalto	9
3.3.	Análisis elemental de los componentes del asfalto	9
3.4.	Equipos comúnmente utilizados para obtener propiedades del asfalto	14
3.5.	Valores típicos de la relación de Poisson	15
3.6.	Copolímeros en bloque y otros termoplásticos usados en la modificación del asfalto	22
3.7.	Influencia de los elastómeros SBS en las propiedades del asfalto	22
3.8.	Hules naturales y sintéticos usados en la modificación del asfalto	23
3.9.	Otros tipos de polímeros usados en la modificación del asfalto	23
4.1.	Ecuaciones diferenciales de cada modelo mecánico estudiado	42
4.2.	Ecuaciones que describen el comportamiento de fluencia de un material viscoelástico	43
4.3.	Ecuaciones diferenciales para una prueba de recuperación	44
4.4.	Solución inicial para la deformación en una prueba de recuperación	45
4.5.	Ecuaciones que describen el comportamiento de recuperación de un material viscoelástico	46
5.1.	Caracterización del asfalto	47
5.2.	Propiedades del asfalto AC-20 de la planta de asfalto del Ajusco	48
5.3.	Características de los polímeros utilizados en la modificación del asfalto AC-20	48
5.4.	Muestras de asfalto modificado analizadas	49
6.1.	Esfuerzos aplicados sobre los asfaltos modificados con TXPR-2 (SBR funcionalizado con un grupo COOH)	55
6.2.	Deformación (%) obtenida a tres esfuerzos distintos para el asfalto modificado con 3% de TXPR-2 a -20 °C	55
6.3.	Esfuerzos aplicados por el DMA en cada material estudiado	58
6.4.	Factores de corrimiento ($\text{Log}[a_T]$), C_1 y C_2 para los asfaltos modificados vulcanizados	61
6.5.	Factores de corrimiento ($\text{Log}[a_T]$), C_1 y C_2 para los asfaltos modificados hidrogenados	65
6.6.	Factores de corrimiento ($\text{Log}[a_T]$), C_1 y C_2 para los asfaltos modificados con los SBR (hules de estireno-butadieno)	71
6.7.	Parámetros del modelo de cinco elementos para los asfaltos modificados con 3% de polímero comercial o funcionalizado	83
6.8.	Parámetros del modelo de cinco elementos para los asfaltos modificados con 8% de polímero comercial o funcionalizado	84
B.1.1.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (material sin azufre: Phr-0, -15 °C)	101
B.1.1.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (Phr-0, -10 °C)	101
B.1.1.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (Phr-0, 0 °C)	101

B.1.2.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (material con 3% de azufre: Phr-3, -15 °C)	102
B.1.2.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (Phr-3, -10 °C)	103
B.1.2.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (Phr-3, 0 °C)	103
B.1.3.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (material con 5% de azufre: Phr-5, -15 °C)	104
B.1.3.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (Phr-5, -10 °C)	104
B.1.3.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (Phr-5, 0 °C)	104
B.1.4.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (material con 7% de azufre: Phr-7, -15 °C)	105
B.1.4.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (Phr-7, -10 °C)	106
B.1.4.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (Phr-7, 0 °C)	106
B.2.1.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (material no hidrogenado: SBS-0, -15 °C)	107
B.2.1.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (SBS-0, -10 °C)	107
B.2.1.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (SBS-0, 0 °C)	108
B.2.2.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (material 25% hidrogenado: SBS-25, -15 °C)	109
B.2.2.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (SBS-25, -10 °C)	109
B.2.2.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (SBS-25, 0 °C)	109
B.2.3.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (material 50% hidrogenado: SBS-50, -15 °C)	110
B.2.3.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (SBS-50, -10 °C)	110
B.2.3.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (SBS-50, 0 °C)	111
B.2.4.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (material 65% hidrogenado: SBS-65, -15 °C)	112
B.2.4.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (SBS-65, -10 °C)	112

B.2.4.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (SBS-65, 0 °C)	112
B.3.1.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (polímero lineal y comercial: S-1205, 3%, -20 °C)	113
B.3.1.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-1205, 3%, -10 °C)	114
B.3.1.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-1205, 3%, 0 °C)	114
B.3.2.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-1205, 8%, -20 °C)	115
B.3.2.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-1205, 8%, -10 °C)	115
B.3.2.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-1205, 8%, 0 °C)	115
B.3.3.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (polímero radial y comercial: S-411, 3%, -20 °C)	116
B.3.3.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-411, 3%, -10 °C)	117
B.3.3.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-411, 3%, 0 °C)	117
B.3.4.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-411, 8%, -20 °C)	118
B.3.4.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-411, 8%, -10 °C)	118
B.3.4.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-411, 8%, 0 °C)	118
B.3.5.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (polímero radial y comercial: S-416, 3%, -20 °C)	119
B.3.5.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-416, 3%, -10 °C)	120
B.3.5.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-416, 3%, 0 °C)	120
B.3.6.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-416, 8%, -20 °C)	121
B.3.6.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-416, 8%, -10 °C)	121
B.3.6.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (S-416, 8%, 0 °C)	121
B.3.7.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (polímero lineal y funcionalizado: TXPR-2, 3%, -20 °C)	122
B.3.7.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (TXPR-2, 3%, -10 °C)	123

B.3.7.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (TXPR-2, 3%, 0 °C)	123
B.3.8.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (TXPR-2, 8%, -20 °C)	124
B.3.8.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (TXPR-2, 8%, -10 °C)	124
B.3.8.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.1 mm (TXPR-2, 8%, 0 °C)	124
C.2.1.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-1205, 3%, -20 °C)	126
C.2.1.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-1205, 3%, -10 °C)	127
C.2.1.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-1205, 3%, 0 °C)	127
C.2.2.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-1205, 8%, -20 °C)	128
C.2.2.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-1205, 8%, -10 °C)	128
C.2.2.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-1205, 8%, 0 °C)	128
C.2.3.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-411, 3%, -20 °C)	129
C.2.3.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-411, 3%, -10 °C)	130
C.2.3.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-411, 3%, 0 °C)	130
C.2.4.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-411, 8%, -20 °C)	131
C.2.4.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-411, 8%, -10 °C)	131
C.2.4.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-411, 8%, 0 °C)	131
C.2.5.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-416, 3%, -20 °C)	132
C.2.5.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-416, 3%, -10 °C)	133
C.2.5.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-416, 3%, 0 °C)	133
C.2.6.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-416, 8%, -20 °C)	134
C.2.6.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-416, 8%, -10 °C)	134
C.2.6.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (S-416, 8%, 0 °C)	134
C.2.7.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (TXPR-2, 3%, -20 °C)	135

C.2.7.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (TXPR-2, 3%, -10 °C)	136
C.2.7.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (TXPR-2, 3%, 0 °C)	136
C.2.8.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (TXPR-2, 8%, -20 °C)	137
C.2.8.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (TXPR-2, 8%, -10 °C)	137
C.2.8.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.2 mm (TXPR-2, 8%, 0 °C)	137
C.2.9.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.05 mm (TXPR-2, 3%, -20 °C)	138
C.2.9.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.05 mm (TXPR-2, 3%, -10 °C)	139
C.2.9.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.05 mm (TXPR-2, 3%, 0 °C)	139
C.2.10.1.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.05 mm (TXPR-2, 8%, -20 °C)	140
C.2.10.2.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.05 mm (TXPR-2, 8%, -10 °C)	140
C.2.10.3.	Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales, desplazamiento inicial 0.05 mm (TXPR-2, 8%, 0 °C)	140
E.1	Guía para montar una muestra	144
E.2	Intervalos de medición	144
E.3	Dimensiones de la muestra	144
E.4	Control de la temperatura	145
E.5	Requerimiento de energía	145
G.1	Dependencia de los procedimientos de calibración	148
G.2	Valores típicos de los parámetros de calibración	149
H.1.	Propiedades medidas con el DMA 983 (DuPont)	155

Estudio de las propiedades mecánicas a baja temperatura (creep) de asfalto modificado con copolímeros modelo de estireno-butadieno.

En este trabajo se reporta la caracterización dinámico-mecánica de tres tipos diferentes de asfalto modificado con polímero, AM, la cual se llevó a cabo utilizando un analizador mecánico-dinámico de DuPont: TA Instruments, modelo 983.

La mezcla de asfalto con materiales poliméricos permite obtener materiales con mejores propiedades termo-mecánicas que aquellas que exhibe el asfalto solo, en un amplio rango de temperatura. Por lo frágil que es el asfalto a bajas temperaturas ($< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), es importante obtener conocimiento de primera mano del comportamiento de asfalto modificado, AM, en esas condiciones. Consecuentemente, el objetivo principal de este trabajo consistió en analizar las propiedades mecánicas de los tres tipos de AM mediante pruebas consecutivas de fluencia-recuperación en condiciones isotérmicas: -20 , -15 , -10 y $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la prueba de fluencia la muestra fue sometida a la acción de un esfuerzo constante durante un intervalo de tiempo, registrándose la deformación (%) que sufrió el material, su módulo de rigidez y su capacitancia en función del tiempo. La prueba de recuperación del material se llevó a cabo inmediatamente después de haber concluido la prueba de fluencia, para lo cual se suspendió el esfuerzo aplicado y se procedió a registrar su recuperación (%). Los resultados de las pruebas de fluencia-recuperación se usaron para obtener las curvas del módulo de rigidez en función del tiempo, así como también las curvas maestras del módulo de rigidez y del porcentaje de deformación. Finalmente, con el propósito de tener una mejor idea del comportamiento de los materiales investigados se desarrollaron sistemáticamente algunos modelos mecánicos, utilizando los modelos de Maxwell y Voigt como punto de partida, encontrándose que el modelo de cinco elementos permitió la mejor reproducción de los datos experimentales, con un error menor al 5%.

Los tres diferentes sistemas que se estudiaron consistieron de asfalto AC-20 modificado con: A) polímero comercial S-1205 y azufre; B) copolímeros en bloque con la parte central de polibutadieno parcialmente saturada, SEBS; y C) polímeros comerciales: S-1205, S-411, S-416 y TXPR-2, que tienen características moleculares muy diferentes. Por lo que respecta a los materiales vulcanizados (serie A), los resultados obtenidos muestran que al incrementarse la cantidad de azufre el módulo de rigidez disminuye y el porcentaje de deformación aumenta. Los resultados de los AM modificados con SEBS (serie B) revelan que el grado de saturación está relacionado directamente con el módulo de rigidez y la deformación (%). Finalmente, los resultados de la serie C indican que características moleculares tales como composición, distribución monomérica, distribución de pesos moleculares y morfología de las cadenas poliméricas influyen en forma determinante en la modificación del asfalto.

Este trabajo permite afirmar que el estudio de las propiedades mecánicas de asfalto modificado a través de pruebas consecutivas de fluencia-recuperación en condiciones de baja temperatura ($< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) permite elucidar acerca del efecto modificador de diferentes materiales. Sin embargo, para complementar este tipo de estudio es necesario llevar a cabo pruebas reológicas a temperaturas moderadas y altas, y obtener información de la morfología y distribución de la fase polimérica del polímero en la matriz de asfalto, para entender mejor la complejidad de este material y estar en posibilidades de contribuir efectivamente en la producción de asfalto modificado a partir de los polímeros existentes, así como en el diseño de polímeros para este tipo de aplicación, en forma sistemática.

Study of the mechanical properties at low temperature (creep) of polymer modified asphalt produced from model styrene-butadiene polymers.

In this work dynamic mechanical characterization of three different kinds of polymer modified asphalt is reported; analysis was carried out using a Dupont dynamic mechanical analyzer, TA Instruments model 983. A method to produce materials with better thermo-mechanical properties in a wide range of temperature than those of asphalt itself is by blending asphalt with polymers. Since asphalt is relatively fragile material at low temperatures ($< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), is important to obtain first-hand knowledge on the PMA performance at those conditions. Therefore, the main objective of this work was to analyze the mechanical properties of three kinds of PMA through consecutive creep-recovery tests at isothermal conditions: -20 , -15 , -10 and $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

During the creep test each sample was yielded to a constant stress for a given time, and their strain (%), stiffness modulus, and compliance were recorded as function of time. The recovery test was performed immediately after the creep test, by basically removing the applied stress and recording the sample recovery (%) as a function of time. Results from creep and recovery tests were used to prepare curves of the stiffness modulus versus time, and the master curves for both stiffness modulus and strain (%). Finally, in order to have a better idea on the materials performance a series of mechanical models were reviewed, using as basic configurations the Maxwell and Voigt models; it was found that the five elements model granted superior reproduction of the experimental data, with an error less than 5%.

Three different systems were studied, for all of them AC-20 asphalt was modified by using: A) a commercial polymer S-1205 and sulfur; B) block copolymers having a central block of polybutadiene partially saturated, SEBS; and C) commercial polymers owing different molecular characteristics: S-1205, S-411, S-416 and TXPR-2. Results for vulcanized samples (Series A) indicate that an increase in the sulfur content leads a decrease in the stiffness modulus and an increase in the strain. SEBS-PMA results (B series) show that saturation of the polybutadiene block is directly related to both stiffness modulus and strain. The study of asphalt modification by means of commercial polymers (C series) substantiated the report that polymer's molecular characteristics such as overall composition, monomer distribution, molecular weight, and chain morphology are significant for asphalt modification.

In the course of this work it was corroborated that the analysis of mechanical properties of modified asphalt by means of consecutive creep-recovery tests at low temperature ($< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) provide important information on the effect of using a specific material for asphalt modification. However, for completeness it is convenient to carry out rheological tests at both moderate and high temperatures, plus to get information regarding polymer macro-phase distribution and morphology, as for example through fluorescence and transmission electron microcopies. Hence the complexity of this material will be better understood, and the possibilities for diminishing the empirical work for PMA production from the existing polymers as well as polymer design for a specific PMA application could be systematized.

INTRODUCCIÓN

El asfalto ha sido usado por los seres humanos desde la antigüedad. Es posible que haya sido el material usado en la torre de Babel para mantener pegados los ladrillos que la conformaron (Génesis 11, 3). Sin embargo, la utilización industrial a gran escala comenzó con la explotación de los depósitos naturales localizados en Trinidad, cuyo primer cargamento llegó a Inglaterra en los años 1840 (AASHTO, 1993).

Químicamente el asfalto es una mezcla compleja de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, algunos de ellos con grupos funcionales que contienen nitrógeno, oxígeno y azufre. Siendo el residuo de la destilación del petróleo crudo, el asfalto varía considerablemente en su composición, dependiendo del crudo del que provenga (Becker *et al.*, 2003). En forma general, se piensa que el asfalto está compuesto por las siguientes especies: asfaltenos y maltenos, estos últimos subdivididos en saturados, aromáticos y resinas (Read *et al.*, 1995).

A menudo, el asfalto es considerado como un sistema coloidal constituido por micelas de asfaltenos/resinas de alto peso molecular dispersadas en un medio aceitoso (aromáticos y saturados) de bajo peso molecular (Palade *et al.*, 2000). Los asfaltenos y las resinas pueden estar unidos en una red abierta o también pueden estar dispersos como partículas discretas, dependiendo de la cantidad relativa de resinas, aceites y asfaltenos. De este modo, la interacción o grado de asociación entre los asfaltenos, así como su tamaño y forma, influye en la viscosidad del asfalto (Rozeveld *et al.*, 1997). Las propiedades reológicas del asfalto dependen enormemente de sus constituyentes, especialmente del contenido de asfaltenos en la mezcla. En el caso de asfaltos con alto contenido de asfaltenos se debe reducir el peso molecular del copolímero para mejorar la compatibilidad de éste con el asfalto.

Actualmente, con el número de vehículos incrementándose drásticamente cada año, la industria está bajo la presión de proveer asfaltos para pavimentación con mejor desempeño (Atofina, 2000). Esta tendencia incrementa la demanda de una mayor cantidad de reparaciones en tiempos cada vez más cortos. A estas demandas se debe añadir la preocupación del público acerca de la seguridad en las carreteras y el manejo confortable. En especial, con especificaciones para el mejor agarre de las llantas, la resistencia a patinar y disminuir el resplandor de la superficie del pavimento en condiciones húmedas.

Estos requerimientos no son alcanzados por el puro asfalto, ya que éste posee propiedades mecánicas poco atractivas: frágil y quebradizo a bajas temperaturas, muy blando a altas temperaturas y tiene una capacidad de recuperación pequeña. Para poder utilizar el asfalto es necesario mezclarlo con un elastómero termoplástico; esta modificación del asfalto garantiza mejoras sustanciales en el desempeño del pavimento, aumentando su longevidad en términos de: mayor resistencia a la deformación del pavimento a altas temperaturas, resistencia a la ruptura a bajas temperaturas y mayor impermeabilidad al agua.

La principal ventaja de utilizar elastómeros termoplásticos, como los copolímeros a base de estireno-butadieno, es el hecho de que el polibutadieno absorbe a los maltenos y se hincha, mientras que el bloque de poliestireno no presenta cambios después de mezclar el copolímero y el asfalto. Esto permite a las moléculas de estireno y butadieno formar una red física, dando al asfalto una buena recuperación elástica. El bloque de estireno es quien

forma las regiones reticuladas físicamente, y el bloque de butadieno es el componente elástico de la red resultante. Aunque estos copolímeros son relativamente caros, tienen la ventaja de que, usados en pequeñas proporciones (3 al 12% en peso del polímero disuelto en el asfalto), mejoran notablemente las propiedades del asfalto, de tal modo que resultan benéficos en términos de la relación costo-beneficio.

Las propiedades del asfalto modificado son dependientes de la naturaleza del asfalto, las características y contenido del polímero, así como del proceso de mezclado (Lu y Isacsson, 2001).

El asfalto y el asfalto modificado a bajas temperaturas son sólidos viscoelásticos que exhiben un comportamiento mecánico similar al de los polímeros amorfos. Debido a que, a bajas temperaturas (≈ -20 °C), los asfaltos tienen módulos de rigidez altos (10^7 a 10^8 Pa), las técnicas desarrolladas para medir su comportamiento a temperaturas altas y moderadas no son adecuadas al tratar de usarlas a bajas temperaturas. La mayoría de los equipos diseñados para pruebas a temperaturas moderadas y altas miden las propiedades de materiales en el estado líquido (menos de 1 kPa de rigidez). El principal problema de llevar a cabo mediciones a bajas temperaturas es que, debido a la rigidez alta, las deformaciones son tan pequeñas que son difíciles de medir.

Es por esto que se diseñaron equipos como el DMA y el reómetro viga-vibratoria para medir las propiedades de materiales con rigidez alta (mayor a 10^7 Pa) que son las que exhiben el asfalto y asfalto modificado a bajas temperaturas (Olard *et. al.*, 2003).

Para investigar el comportamiento reológico del asfalto a bajas temperaturas se pueden aplicar varias técnicas experimentales, como por ejemplo, pruebas dinámico-mecánicas, pruebas de esfuerzo-relajación y pruebas de fluencia-recuperación (Gabriel y Kaschta, 1998).

Independientemente del tipo de prueba realizada, cuando una deformación es aplicada al sistema, la estructura de la red comienza a cambiar, volviéndose flexible el material, el cual comienza a fluir. Cuando se deja de aplicar la fuerza, la estructura de la red se restablece completa o parcialmente a su estado original. Después de varios estudios se ha podido establecer que son la temperatura, energía de activación y resistencia mecánica debidas a la matriz polímero-partícula las que gobiernan la cinética de este proceso de flujo (Joshi y Leonov, 2001).

Para enriquecer los resultados obtenidos experimentalmente es necesario el desarrollo y la utilización de modelos reológicos, los cuales han recibido gran interés en los últimos años. A bajas temperaturas, se pueden utilizar modelos mecánicos basados en los modelos de Maxwell y Kelvin-Voigt para tratar de reproducir el comportamiento viscoelástico del asfalto modificado.

En el presente trabajo, se decidió efectuar pruebas de fluencia-recuperación a distintas temperaturas para cada uno de los asfaltos modificados estudiados y de esta forma, determinar qué tipo de polímero, de los analizados, provee las mejores propiedades mecánicas para su utilización en pavimentos.

OBJETIVO E HIPÓTESIS

OBJETIVO:

El objetivo principal de esta tesis consiste en determinar mediante pruebas estáticas de fluencia-recuperación efectuadas a temperaturas de -20, -15, -10 y 0 °C, el módulo de rigidez, la capacitancia y el porcentaje de deformación de un asfalto modificado con distintos copolímeros de estireno-butadieno para conocer el comportamiento mecánico de las mezclas y encontrar combinaciones cuyas propiedades sean superiores a las del asfalto solo tal que ofrezcan alternativas de uso en las aplicaciones más comunes del mismo. Un objetivo adicional es la descripción cuantitativa del comportamiento mecánico a través del uso de modelos mecánicos con varios elementos elástico-viscosos.

Para alcanzar dicho objetivo se consideraron los siguientes objetivos particulares:

- Determinar la cantidad de asfaltenos presentes en el asfalto, mediante la caracterización del mismo
- Preparar las muestras de asfalto modificado, utilizando para ello, las condiciones de mezclado más adecuadas (reportadas en trabajos previos) para incorporar el polímero al asfalto
- Obtener las barras rectangulares de asfalto modificado que se analizarán en el DMA, mediante el prensado de éstas en un molde de acero
- Obtener las propiedades mecánicas, tal como el módulo de rigidez y el porcentaje de deformación, de dichas muestras de asfalto modificado mediante pruebas estáticas de fluencia-recuperación
- Utilizar distintos modelos mecánicos, basándose para ello en las leyes de Hooke y de Newton, así como en los modelos de Maxwell y Kelvin-Voigt
- Calcular los parámetros de los modelos desarrollados utilizando los datos experimentales
- Analizar y explicar los resultados obtenidos.

HIPÓTESIS:

Las propiedades mecánicas del asfalto modificado, como por ejemplo, el módulo de rigidez, dependen tanto de la composición y orígenes del asfalto como de las características de los polímeros modificadores; es decir, si éstos son lineales, radiales, ramificados o entrecruzados.

Por lo tanto, es de esperarse que las mezclas de asfalto modificado producidas a partir del asfalto (AC-20 de la planta de asfalto del Ajusco) y distintos polímeros modificadores, posean diferentes propiedades mecánicas, tal como el módulo de rigidez y el porcentaje de deformación, que están relacionadas con las características (peso molecular, morfología, porcentaje de saturación y grado de vulcanización) del polímero modificador.

ANTECEDENTES

3. ANTECEDENTES

3.1. ASFALTO

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) define el asfalto como un material café oscuro o negro que existe en forma natural (yacimientos) o que es obtenido como un producto de la refinación del petróleo.

El asfalto es un material adhesivo, resistente, impermeable y durable. También otorga cierta flexibilidad a la mezcla de agregados minerales con los que es usualmente combinado. Además, es resistente a la reacción con la mayoría de los ácidos, bases y sales. A pesar de que es sólido a temperatura ambiente, puede ser licuado rápidamente aplicando calor y/o disolviéndolo en solventes no polares como el tricloroetileno, o emulsificándolo en agua (AASHTO, 1993).

La acumulación del petróleo en yacimientos que fueron llevados hasta la superficie por las fuerzas geológicas, dejó lagos naturales de asfalto, como por ejemplo el lago de asfalto en Trinidad y los fosos de alquitrán “La Brea” cerca de Los Ángeles (AASHTO, 1993).

Se dice que desde hace 5000 años, el asfalto natural fue usado por los babilonios, egipcios, griegos y romanos como un material para impermeabilización, pavimentación, y como pegamento (Read *et. al.*, 1995).

El registro más antiguo de su uso data del año 3,800 A.C., y se atribuye a los sumerios. De las construcciones edificadas en ese entonces por los sumerios se conserva en buen estado un tanque de agua que data del año 3,000 A.C. Las paredes de piedra de este tanque fueron pegadas entre sí con un tipo de asfalto natural. Se cree que Nabucodonosor utilizaba regularmente este material, ya que hay evidencia de que se utilizó en la impermeabilización de las piedras de su palacio (Read *et. al.*, 1995).

Sin embargo, la evolución del asfalto como el ingrediente principal en pavimentación no ocurrió sino hasta principios del siglo XX, con el desarrollo de las técnicas modernas de refinación del petróleo (Lewandowski, 1994).

3.1.1. TIPOS DE ASFALTO

3.1.1.1. ASFALTO “LAGO”

Mejor conocido como asfalto natural. Este tipo de asfalto se encuentra en depósitos bien definidos en la superficie. Los depósitos más importantes están localizados en Trinidad. Se cree que este depósito fue descubierto por Sir Walter Raleigh en 1595. Existen varios depósitos pequeños de asfalto en la isla, pero es el lago de alquitrán, localizado en la parte meridional (al sur) de la isla a un kilómetro del mar, el que constituye uno de los depósitos más grandes del mundo. El lago tiene aproximadamente 100 acres (35 hectáreas), cerca de 90 metros de profundidad y se estima que tiene entre 10 y 15 millones de toneladas. La superficie del lago es lo suficientemente dura como para soportar el paso de

tractores y camiones de carga. La enorme masa del lago aparentemente tiene un movimiento circulatorio muy lento y constante desde el fondo a la superficie, y se supone que el flujo regresa al centro del cuerpo del lago. El nivel del lago ha disminuido mucho menos de lo esperado, de acuerdo con la cantidad de material removido hasta la fecha. Los agujeros en la superficie, producto de las excavaciones, lentamente se rellenan hasta desaparecer en casi 24 horas ((Read *et. al.*, 1995).

Este material una vez extraído se refina por calentamiento a 160 °C, evaporándose el agua; y pasa a través de tamices finos para remover la materia vegetal. El producto refinado se le llama “Trinidad Epuré” y tiene la siguiente composición: 54% de asfalto, 36% de materia mineral y 10% de materia orgánica. Sin embargo, Epuré es muy duro para usarse en cualquier aplicación (tiene un índice de penetración de 2 y una temperatura de ablandamiento de 95 °C), por lo que generalmente se mezcla con un asfalto con índice de penetración de 200 (mezcla 50% Epuré). La mezcla resultante tiene una penetración de 50 (Read *et. al.*, 1995).

3.1.1.2. ASFALTO “ROCA”

Es un material compuesto que se forma naturalmente por la impregnación de rocas calcáreas, como la piedra caliza o la arenisca en depósitos de asfalto natural. Este producto se puede extraer de minas o canteras, cuando el contenido sea de al menos 12% en masa de asfalto. Después de triturarse, este material es calentado y compactado en estratos o capas. Los principales depósitos de este tipo están en Francia, Suiza e Italia. Estos productos fueron los primeros materiales usados en pavimentación, aunque ahora se usan muy poco (Read *et. al.*, 1995).

3.1.1.3. ALQUITRÁN

Así se le conoce al líquido obtenido al carbonizar o destilar destructivamente materiales orgánicos como la madera en ausencia de aire (Read *et. al.*, 1995). Este material es producido a altas temperaturas (600 – 1200 °C).

3.1.1.4. ASFALTO MANUFACTURADO A PARTIR DEL PETRÓLEO

Las regiones principales que extraen el petróleo en el planeta son los Estados Unidos, el Medio Oriente, los países localizados alrededor del Mar Caribe, y los países que formaban la ex-Unión Soviética (Boffetta y Burstyn, 2003). El crudo extraído en cada región tiene propiedades físicas y químicas distintas. Físicamente puede variar desde líquidos negros viscosos hasta líquidos coloreados poco viscosos. Químicamente pueden ser predominantemente parafínicos, nafténicos o aromáticos, donde la combinación de los dos primeros son muy comunes (AASHTO, 1993).

Existen cerca de 1,500 crudos distintos producidos mundialmente. Con base en la calidad del crudo producido, sólo algunos pocos de éstos son apropiados para manufacturar asfalto. En Gran Bretaña se usa el crudo del Medio Oriente o el de América del Sur para este fin (Lewandowski, 1994).

3.1.2. COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DEL ASFALTO

La facilidad del asfalto para fluir a una temperatura fija depende tanto de su composición química como de su estructura (arreglo físico de las moléculas de hidrocarburos predominantes en el material).

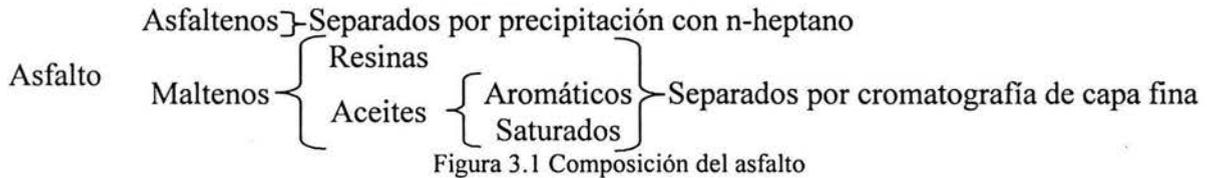
3.1.2.1. COMPOSICIÓN

El asfalto es una mezcla química compleja de moléculas, predominantemente hidrocarburos, con cantidades mínimas de especies con heteroátomos y grupos funcionales que contienen átomos de azufre, nitrógeno y oxígeno. Además contiene trazas de metales (menos del 1%) como vanadio, níquel, hierro, magnesio y calcio en forma de sales inorgánicas y óxidos. Inclusive, el tipo y cantidad de átomos de metal sirven para determinar el origen del asfalto. A continuación se presenta el análisis elemental del asfalto:

Cuadro 3.1 Análisis elemental del asfalto

<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje</i>
Carbono	82 – 88
Hidrógeno	8 – 11
Azufre	0 – 6
Oxígeno	0 – 1.5
Nitrógeno	0 – 1

Como la composición química del asfalto es muy compleja, un análisis químico preciso resulta extremadamente laborioso. Sin embargo, es posible separar el asfalto en dos grupos químicos, asfaltenos y maltenos. Los maltenos se subdividen en saturados, aromáticos y resinas (Figura 3.1).



Los métodos disponibles para separar el asfalto en sus fracciones son:

- Extracción con disolvente
- Adsorción con sólidos finos y filtración de la solución no adsorbida
- Cromatografía
- Destilación molecular, usada en combinación con una de las técnicas anteriores.

La cromatografía es la técnica más usada (método de cromatografía de Corbett – ASTM 4124, Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions), donde primero precipitan los asfaltenos usando n-heptano y después por cromatografía se separa el material restante. La figura 3.2 muestra el método cromatográfico.

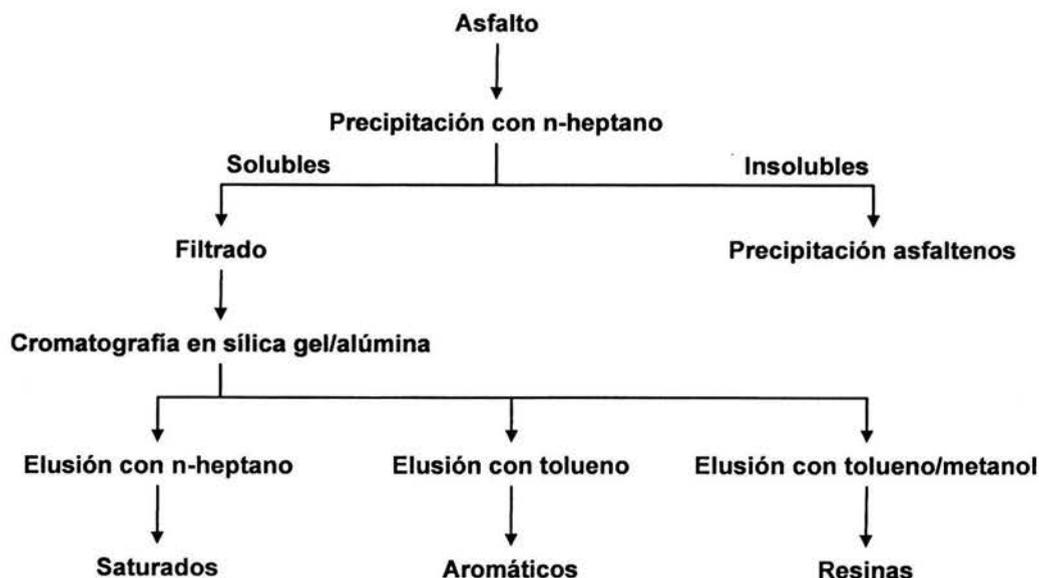


Figura 3.2 Representación esquemática del análisis de la composición química del asfalto

Las características principales de los cuatro componentes del asfalto son:

Asfaltenos: Son sólidos negros o cafés amorfos insolubles en n-heptano que contienen átomos de carbono, hidrógeno y pequeñas cantidades de nitrógeno, azufre y oxígeno. Son considerados como unos materiales aromáticos complejos, altamente polares con pesos moleculares altos (1,000 a 100,000). El tamaño de partícula oscila entre 5 nm a 30 nm y en promedio una relación hidrógeno-carbono de 1 a 1. El contenido de asfaltenos tiene un gran efecto en las propiedades reológicas del asfalto; un incremento en el contenido de asfaltenos produce un asfalto más rígido, con una menor penetración, un punto de ablandamiento más alto y una mayor viscosidad. Los asfaltenos constituyen del 5% al 25% del asfalto (Figura 3.3.a).

Resinas: Son materiales solubles en n-heptano, principalmente compuestas de carbono e hidrógeno, con pequeñas cantidades de oxígeno, azufre y nitrógeno. Son de color café oscuro, sólidas o semisólidas a temperatura ambiente, y de naturaleza muy polar. Esta característica particular las hace fuertemente adhesivas. Son los agentes dispersantes o peptizantes de los asfaltenos, y la proporción de resinas respecto a los asfaltenos gobierna las características del tipo de asfalto, ya sea solución o gelatinoso. Su peso molecular oscila entre 500 y 50,000; sus partículas tienen un tamaño de 1 nm a 5 nm y tienen una relación hidrógeno-carbono de 1:3 a 1:4.

Aromáticos: Comprenden a los compuestos nafténicos aromáticos del menor peso molecular en el asfalto, y representan la mayor proporción del medio dispersante para los asfaltenos peptizados. Constituyen del 40% al 65% del asfalto y son líquidos viscosos café oscuro. Su peso molecular oscila entre 300 y 2,000. Consisten de cadenas de carbono no polares en las cuales domina el sistema de anillos insaturados y tienen una alta capacidad para disolver otros hidrocarburos de mayor peso molecular (Figura 3.3.b).

Saturados: Comprenden a hidrocarburos alifáticos con ramificaciones, junto con compuestos alquil-nafténicos y algunos compuestos alquil-aromáticos. Son aceites viscosos no polares que son de color paja o blanco. Su peso molecular es similar al de los aromáticos. Constituyen del 5% al 20% del asfalto (Figura 3.2.c).

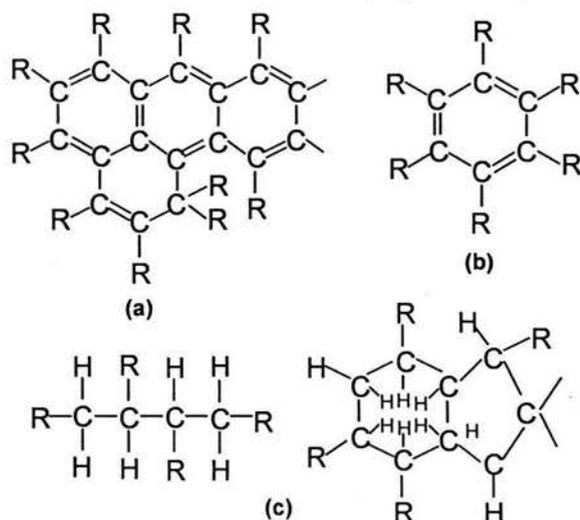


Figura 3.3 Estructura de (a) Asfaltenos, (b) Aromáticos, (c) Saturados

Todas las moléculas que contiene el asfalto caen dentro de dos categorías: moléculas polares y no polares (AASHTO, 1993). Las moléculas polares forman una red y dan al asfalto sus propiedades elásticas. Las moléculas no polares forman el cuerpo del material alrededor de la red y contribuyen a las propiedades viscoelásticas del asfalto. Ambos tipos de moléculas existen juntas formando una mezcla pseudohomogénea.

El análisis elemental de algunos tipos de asfalto se muestra en los cuadros 3.2 y 3.3.

Cuadro 3.2 Análisis elemental de algunos tipos de asfalto

Composición (%) Elemento	Mezcla Mexicana (obtenido del crudo Maya)	Arkansas-Louisiana	Boscan	California
Carbono	83.77	85.78	82.90	86.77
Hidrógeno	9.91	10.19	10.45	10.93
Nitrógeno	0.28	0.26	0.78	1.10
Azufre	5.25	3.41	5.43	0.99
Oxígeno	0.77	0.36	0.29	0.20
Vanadio (ppm)	180	7	1380	4
Níquel (ppm)	22	0.4	109	6

Cuadro 3.3 Análisis elemental de los componentes del asfalto

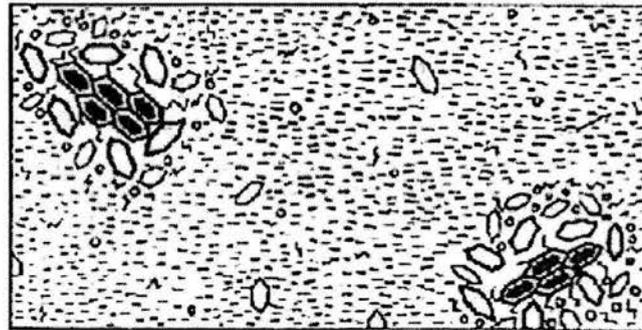
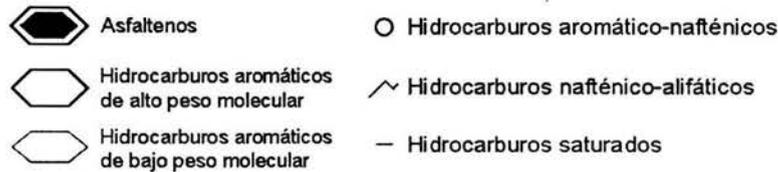
	Peso %	Carbono %	Hidrógeno %	Nitrógeno %	Azufre %	Oxígeno %	Relación H/C	Peso Molecular
Asfaltenos	5.7	82.6	7.3	1.0	7.8	0.8	1:1	11,300
Resinas	19.8	81.6	9.1	1.0	5.2	-	1:4	1270
Aromáticos	62.4	83.3	10.4	0.1	5.6	-	1:5	870
Saturados	9.6	85.6	13.2	0.05	0.3	-	1:8	835

3.1.2.2. ESTRUCTURA

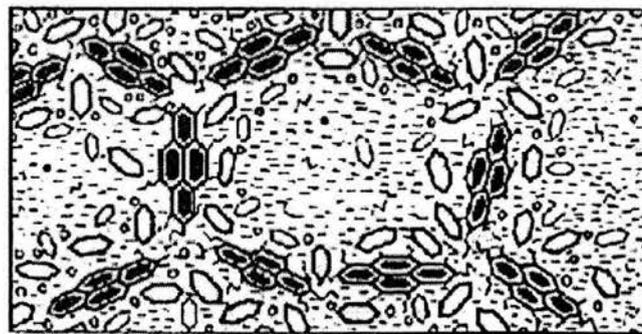
Se considera que el asfalto es un sistema coloidal que contiene micelas de asfaltenos de alto peso molecular dispersas en un medio aceitoso de bajo peso molecular constituido por resinas, aromáticos y saturados, donde las resinas actúan como una capa solvatante-estabilizadora (Rozeveld *et. al*, 1997).

En presencia de cantidades suficientes de resinas y aromáticos los asfaltenos son solvatados completamente, y las micelas resultantes poseen una buena movilidad en el asfalto; a este tipo de asfalto se le conoce como asfalto tipo solución (Figura 3.4.a).

Si la cantidad de aromáticos y resinas no es la suficiente para solvatar a las micelas los asfaltenos se pueden asociar unos junto a otros. Esto produce una estructura empaquetada-abierta irregular de micelas enlazadas, en donde los agujeros internos se rellenan con fluido intermicelar de una mezcla de componentes. A estos asfaltos se les conoce como asfaltos tipo gelatinoso (Figura 3.4.b).



(a)



(b)

Figura 3.4 (a) Representación esquemática de un asfalto tipo solución y, (b) de un asfalto tipo gel

Los enlaces físicos que mantienen unidas a los diferentes tipos de moléculas son relativamente débiles, y son fáciles de romper por calentamiento o por la aplicación de un esfuerzo, lo cual explica la naturaleza viscoelástica del asfalto.

3.1.2.3. RELACIÓN ENTRE COMPOSICIÓN Y REOLOGÍA

Manteniendo el contenido de asfaltenos constante, y variando la concentración de los otros tres componentes del asfalto, se ha demostrado que:

- Incrementando el contenido de aromáticos en un asfalto con una relación constante entre saturados y resinas, se tiene un pequeño efecto en las propiedades reológicas (reducción de la susceptibilidad en corte).
- Manteniendo una relación constante de resinas con aromáticos e incrementando el contenido de saturados, el asfalto se suaviza.
- La adición de resinas endurece el asfalto, reduce el índice de penetración e incrementa la viscosidad.

También se ha demostrado que las propiedades reológicas del asfalto dependen fuertemente del contenido de asfaltenos. A temperatura constante, la viscosidad del asfalto se incrementa al aumentar la concentración de asfaltenos en la mezcla. Sin embargo, este incremento en viscosidad es mayor del que se esperaría si los asfaltenos fueran entidades no solvatadas y esféricas, lo que sugiere que los asfaltenos pueden interactuar entre sí y con el medio solvatante. Se cree que los asfaltenos son un cúmulo de hojas en forma de plato formado de estructuras cíclicas nafténicas-aromáticas. Al aumentar la temperatura los enlaces de hidrógeno que mantienen unidas las hojas se rompen, resultando en un cambio en el tamaño y forma de los asfaltenos y en una disminución de la viscosidad.

3.1.3. PRUEBAS MECÁNICAS

Debido a la infinidad de variedades de asfaltos que pueden manufacturarse, es necesario tener pruebas para caracterizar los distintos tipos o grados de asfalto.

Las pruebas más utilizadas en a nivel industrial para caracterizar al asfalto son la prueba de penetración y la prueba del punto de ablandamiento o suavización. Estas pruebas fueron establecidas empíricamente, por lo que organizaciones como el Instituto del Petróleo de Gran Bretaña (IP), la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) y los Estándares Británicos (BS) publican sus propios métodos para caracterizar al asfalto. Afortunadamente, en muchos casos estos métodos son prácticamente iguales entre sí, con pequeñas diferencias que hacen necesario el uso de factores de corrección para relacionar entre sí las pruebas desarrolladas por cada institución.

Con el único propósito de tener una idea de las pruebas que se hacen al asfalto y de la terminología asociada a ellas, a continuación se presentan brevemente algunas de las pruebas más comunes en la caracterización del asfalto.

3.1.3.1. PRUEBA DE PENETRACIÓN (IP 49, ASTM D5, BS 2000: PART 49)

En esta prueba se utiliza una aguja de dimensiones conocidas, la cual penetra en una muestra de asfalto por la acción de una carga conocida (100 g) y a una temperatura fija (25 °C) durante un tiempo conocido (5 s).

La distancia que penetra la aguja, en decimilímetros (1 dmm = 0.1 mm) es llamada penetración (pen), y puede variar desde 1 hasta 450 pen. El control de la temperatura es crítico (± 0.1 °C).

Para cada espécimen se realizan varias determinaciones y se reporta el promedio de los valores.

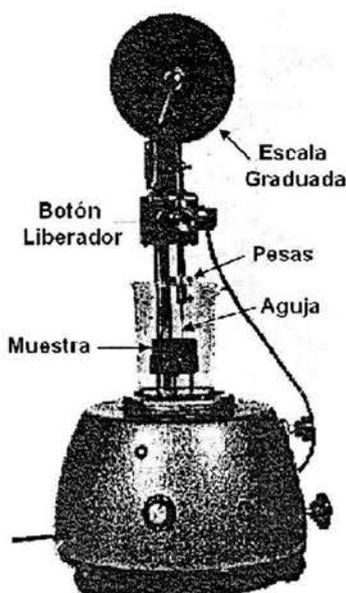


Figura 3.5 La prueba de penetración

3.1.3.2. PRUEBA DEL PUNTO DE ABLANDAMIENTO (IP 58, ASTM D36, BS 2000: PART 58)

En esta prueba, una bola de acero (3.5 g) es colocada en una muestra de asfalto contenida en un anillo de latón, que está suspendido en un baño de agua o glicerol (1, 2, 3 propanotriol o glicerina). El agua se usa con asfaltos con puntos de suavización de 80 °C o menos y el glicerol en asfaltos con puntos de suavización mayores de 80 °C. La temperatura del baño es incrementada gradualmente con una rapidez de 5 °C/min, hasta que el asfalto comienza a suavizarse y, eventualmente, comienza a deformarse lentamente debido a la temperatura y al peso de la bola de acero. Cuando la bola de acero atraviesa la muestra y toca la base de un plato que está localizado 25 mm debajo del anillo, se registra el valor de la temperatura como temperatura de ablandamiento.

La prueba se realiza por duplicado, y si la diferencia entre ambas temperaturas no excede 1.0 °C, se reporta el promedio de ambas temperaturas.

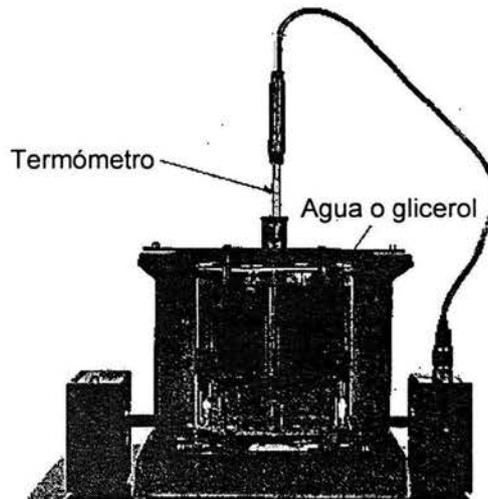


Figura 3.6 La prueba del punto de suavización

3.1.4. PROPIEDADES DEL ASFALTO

Debido a su naturaleza viscoelástica, el comportamiento del asfalto depende de la temperatura del sistema y del tiempo de aplicación y valor de la fuerza a que se le somete. Por ejemplo, al voltear un recipiente con asfalto, la cantidad de asfalto que fluye a 60 °C durante una hora puede ser igual a la cantidad de asfalto que fluye a 25 °C durante 10 horas. En otras palabras, los efectos del tiempo y la temperatura están relacionados: el comportamiento a altas temperaturas sobre periodos de tiempo cortos es equivalente al que tiene a bajas temperaturas y tiempos de duración largos. Esto es comúnmente referido como el concepto de superposición tiempo-temperatura. Este principio se menciona más adelante en el presente trabajo.

A altas temperaturas (clima desértico) o bajo cargas aplicadas por grandes periodos (camiones estacionados o moviéndose lentamente) el asfalto actúa como un líquido viscoso. Bajo estas circunstancias el agregado es la parte que aguanta la carga. Si este flujo lento se pudiera observar al microscopio, se vería que la capa superior trataría de empujar a la capa inferior, mientras que esta última trataría de regresar la capa superior a su posición anterior.

En climas fríos (invierno) o bajo cargas aplicadas rápidamente (movimiento rápido de los camiones) el asfalto actúa como un sólido elástico. Los sólidos elásticos regresan instantáneamente a su posición original al eliminar la carga que los deformó. Pero, si la carga es lo suficientemente grande, el material puede romperse.

A temperaturas intermedias el asfalto exhibe características tanto de líquido viscoso como de sólido elástico. Debido a este comportamiento, el asfalto es un adhesivo excelente para pavimentación. Cuando se calienta, el asfalto actúa como lubricante permitiendo al agregado mezclarse y compactarse, formando así una superficie uniforme y densa. Al enfriarse, el asfalto actúa como el pegamento y forma con el agregado una matriz sólida.

ANTECEDENTES

Debido a que el asfalto está compuesto de moléculas orgánicas, éstas pueden reaccionar con el oxígeno del aire; esta reacción es llamada oxidación y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto. La oxidación causa que el asfalto se vuelva más quebradizo, lo cual se conoce como endurecimiento oxidativo. El endurecimiento oxidativo ocurre lentamente, aunque ocurre más rápido en climas cálidos (verano). Debido a esto, los pavimentos viejos son más susceptibles a fracturarse. Otras formas de endurecimiento incluyen la volatilización y el endurecimiento físico. La volatilización ocurre, durante el mezclado en caliente y construcción, al evaporarse los componentes volátiles del asfalto. El endurecimiento físico ocurre cuando el asfalto ha sido expuesto a bajas temperaturas por periodos largos, siendo más pronunciado a temperaturas menores a 0 °C.

El cuadro siguiente muestra algunos de los equipos utilizados para la obtención de las distintas propiedades del asfalto y asfalto modificado:

Cuadro 3.4 Equipos comúnmente utilizados para obtener propiedades del asfalto (AASHTO, 1993)

<i>Equipo</i>	<i>Propósito</i>
Horno de rodillo de película delgada (Rolling Thin Film Oven; RTFO)	Se utiliza para obtener asfalto envejecido (endurecido), el cual se puede analizar en otro equipo, para obtener sus propiedades físicas. Además, se utiliza para determinar la cantidad de volátiles perdidos durante el proceso.
Recipiente de envejecimiento a presión (Pressure Aging Vessel; PAV)	Mantiene la mezcla a temperaturas y presiones altas durante 20 horas, para simular el efecto del envejecimiento del material en condiciones ambientales y tiempos bastante largos.
Reómetro dinámico-cortante (Dynamic Shear Rheometer; DSR)	Mide las propiedades viscoelásticas de la mezcla a temperaturas altas e intermedias. Utiliza geometría de platos paralelos.
Viscosímetro rotacional (Rotational Viscometer; RV)	Mide la viscosidad de la mezcla a temperaturas altas.
Analizador de tensión directa (Direct Tension Tester; DTT)	Mide las propiedades de la mezcla a bajas temperaturas. En este equipo, la muestra es jalada lentamente (a una rapidez constante), hasta que se rompe. Esta elongación se usa para calcular la deformación de fractura, indicando si la muestra es quebradiza o dúctil.
Reómetro viga-vibratoria (Bending Beam Rheometer; BBR)	También mide las propiedades viscoelásticas de la mezcla a bajas temperaturas. Este equipo mide la deflexión de la muestra al aplicar una carga constante a temperatura constante.
Analizador mecánico-dinámico (Dynamic Mechanical Analyzer; DMA)	Mide las propiedades viscoelásticas de la mezcla a baja temperatura, ya sea en corte, extensión, compresión o flexión.

3.1.4.1. RELACION DE POISSON

Cuando un material incompresible en forma de barra con base rectangular es sometido a una carga axial sufre una elongación, dependiendo del tipo de elongación aplicada ésta puede ser uniaxial, biaxial, planar, etcétera.

La relación de Poisson (ν) es la proporción entre la extensión axial (ϵ_{11}) y la contracción lateral (ϵ_{22}) que sufre una muestra y se define como: $\nu = -\epsilon_{22} / \epsilon_{11}$ (Vacín *et. al.*, 2003). En este caso se supone que el espesor de la muestra no se deforma (no exhibe variación alguna). El cuadro siguiente muestra el comportamiento de la relación de Poisson en varias circunstancias.

Cuadro 3.5 Valores típicos de la relación de Poisson

<i>Valor</i>	<i>Interpretación</i>
0.5	No hay cambio de volumen durante el estiramiento
0.0	No hay contracción lateral
0.49 – 0.499	Valores típicos para elastómeros
0.20 – 0.40	Valores típicos para plásticos

3.1.4.2. EL CONCEPTO DE RIGIDEZ

El asfalto es un material viscoelástico y como tal su deformación bajo un esfuerzo es una función del tiempo de aplicación del esfuerzo. A altas temperaturas o tiempos largos de carga, el asfalto tiene un comportamiento similar al de un líquido viscoso, a muy bajas temperaturas o tiempos cortos de carga se comporta como un sólido elástico y, a temperaturas y tiempos moderados, es decir, a las condiciones de servicio, presenta un comportamiento viscoelástico.

Van der Poel (1954) introdujo el concepto de módulo de rigidez por analogía con el módulo elástico de sólidos. El cual es la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante al tiempo de carga (t). Debido a que el comportamiento del asfalto también depende de la temperatura: $S_{i,T} = \sigma / \epsilon_{i,T}$.

3.1.4.2.1. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE RIGIDEZ DEL ASFALTO

Los métodos para medir el módulo de rigidez del asfalto se basan en la deformación, ya sea cortante o elongacional a que se somete la muestra. En una deformación cortante, el módulo está definido como $G = \tau / \gamma$. El módulo elástico se obtiene usando la razón de Poisson: $E = 2(1 + \nu)G$. Para materiales prácticamente incompresibles: $\nu = 0.5$, mientras que algunas mezclas de asfalto $\nu < 0.5$.

El módulo de rigidez se puede obtener: *i*) mediante una prueba estática, como la de fluencia, que se usa generalmente a bajas temperaturas; *ii*) o mediante pruebas dinámicas como en la aplicación de un esfuerzo senoidal a altas temperaturas.

Combinando ambas pruebas, se pueden obtener módulos de rigidez y tiempos de aplicación del esfuerzo en intervalos de temperatura considerablemente amplios.

La medición del módulo de rigidez se puede hacer en el reómetro de placas paralelas si se desea trabajar a altas temperaturas. En este reómetro se mantiene fija una placa y se aplica un esfuerzo a la otra; el desplazamiento de esta placa es registrado. La deformación que sufre el material es cortante. Conociendo el esfuerzo cortante y el espesor de la muestra se determina el módulo de rigidez típicamente en el intervalo de 10^3 a 10^4 Pa.

A bajas temperaturas, el módulo de rigidez de una muestra de asfalto se puede obtener al utilizar un analizador mecánico dinámico, DMA. La deformación del asfalto es elongacional, normalmente uniaxial.

3.1.4.2.2. CAPACITANCIA CONTRA MÓDULO DE RIGIDEZ

Si el módulo es una medida de la rigidez o dureza de un objeto, su capacitancia es una medida de la suavidad o blandura del material y está definida por: $D = 1/S$.

3.2. ASFALTO MODIFICADO

La razón principal para modificar el asfalto es mejorar las propiedades de desempeño de éste (Martínez *et. al.*, 2001). Los problemas típicos que tratan de resolverse al modificar al asfalto son la formación de surcos, el rompimiento térmico y la ruptura por fatiga.

En el caso del asfalto utilizado en pavimentos, la formación de surcos es la deformación permanente del pavimento, causada por la deformación plástica, que resulta de la aplicación de cargas a temperaturas de servicio altas (40 °C a 65 °C). Esta deformación produce canales paralelos a la dirección del tráfico y constituye un peligro, especialmente en pisos mojados.

El rompimiento térmico es causado cuando el asfalto se expone a un ciclo térmico sencillo, donde la temperatura alcanza una temperatura baja crítica, ya sea por calentamiento o enfriamiento. Las grietas usualmente aparecen perpendiculares a la dirección del tráfico.

La falla asociada con la fatiga ocurre a lo largo del tiempo de vida del pavimento, resultando en daños estructurales severos en el pavimento.

Otros problemas son, el deslavado y el envejecimiento. El primero, es causado por la afinidad entre el agua y el agregado. El envejecimiento es el endurecimiento del asfalto por efectos de tiempo y temperatura.

La modificación polimérica produce cambios importantes en el comportamiento esfuerzo-deformación del material; la capacidad de algunos polímeros para recuperarse elásticamente proporciona durabilidad al asfalto (Blanco *et. al.*, 1996).

En la figura 3.7 se muestra la respuesta de un asfalto en un experimento de fluencia-recuperación. La deformación, producto del esfuerzo aplicado, muestra una respuesta elástica instantánea seguida de una deformación que se incrementa generalmente con el tiempo hasta que se elimina el esfuerzo aplicado. Entonces, la deformación elástica se recupera instantáneamente, seguida de una recuperación adicional (elástico-retrasada) conforme pasa el tiempo. Sin embargo, el material no se recupera completamente, ya que existe una deformación residual permanente que es irrecuperable y que es causada directamente por el comportamiento viscoso del material.

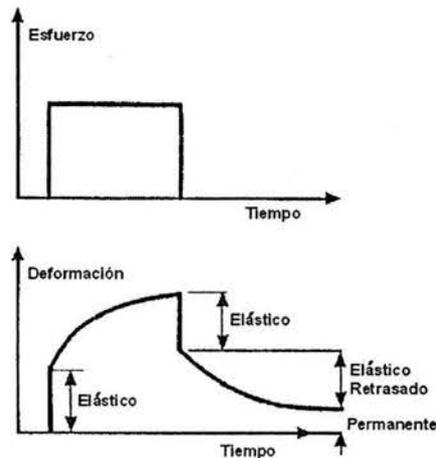


Figura 3.7 Respuesta viscoelástica a la aplicación de un esfuerzo estático (Menard, 1999)

En la figura 3.8 se muestra esquemáticamente la respuesta del asfalto a una carga momentánea (pulso), debida por ejemplo al movimiento del tráfico sobre el pavimento. Aquí no se puede distinguir la respuesta elástica y la respuesta elástico-retardada. Pero se observa la pequeña deformación permanente.

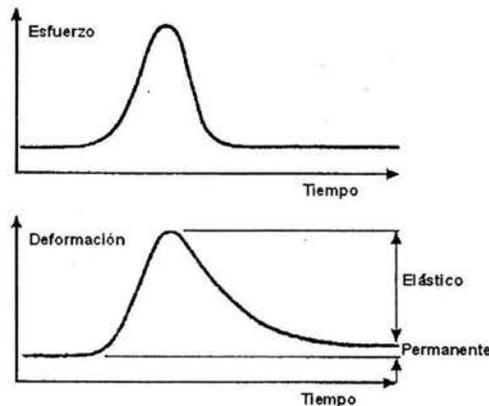


Figura 3.8 Respuesta viscoelástica debida a la fuerza aplicada por una llanta en movimiento

A pesar de que la deformación permanente debida a un pulso es pequeña, cuando varios millones de cargas se aplican en el pavimento, existirá una gran acumulación de deformaciones permanentes, resultando en una deformación permanente de la superficie del pavimento. Es por ello que ocurren mayores deformaciones cuando la temperatura ambiente es alta y cuando el tráfico se mueve lentamente o está estático.

La deformación permanente se minimiza al agregar algunos materiales al asfalto, tales como azufre, polímeros termoplásticos: copolímeros de estireno-butadieno-estireno (SBS), hules de estireno-butadieno (SBR), copolímeros de estireno-etileno-butadieno-estireno (SEBS) y etileno-vinilacetato (EVA), con lo cual se vuelve más rígido o más flexible (Lu *et. al.*, 1999).

Para que el modificador sea efectivo, y sea económico y práctico en su utilización, debe cumplir varios requisitos, tales como:

- Ser fácilmente disponible
- Resistir la degradación a las temperaturas a las que se efectúa el mezclado con el asfalto
- Mezclarse con el asfalto
- Mejorar la resistencia al flujo a temperaturas altas sin que vuelva demasiado viscoso al asfalto o vuelva al material demasiado rígido y quebradizo a bajas temperaturas.

Una vez mezclado con el asfalto, el asfalto modificado debe tener las siguientes características:

- Capacidad de ser procesado con equipos convencionales
- Ser químicamente y físicamente estable durante el almacenamiento, aplicación y en servicio
- Tener mejores propiedades, como las que se mencionan enseguida: módulo de rigidez, capacitancia, porcentaje de deformación, entre otras.

El asfalto puede modificarse con la adición de azufre, hules, compuestos organo-manganesos, polímeros termoplásticos, hules termoplásticos y mezclas termoestables. Sin embargo, los mejores resultados se obtienen utilizando hules termoplásticos del tipo SBS.

Algunas razones para usar polímeros en la modificación del asfalto son:

1. Obtener mezclas más blandas a temperaturas de servicio bajas y reducir su fragilidad
2. Obtener mezclas más rígidas a altas temperaturas y reducir la formación de surcos
3. Reducir la viscosidad a temperaturas de construcción
4. Incrementar la fuerza y la estabilidad del material
5. Mejorar la resistencia a la abrasión y a la fatiga
6. Reducir la temperatura de fractura
7. Permitir películas espesas de asfalto en el agregado
8. Mejorar la adhesión del asfalto al agregado para minimizar el deslave
9. Mejorar la resistencia al envejecimiento (oxidación)
10. Requerir menor espesor estructural de las capas de pavimento para un desempeño determinado
11. Acelerar el endurecimiento anticipado de mezclas blandas
12. Mejorar la capacidad de trabajo y la compactación
13. Reducir el desmoronamiento

3.2.1. MODIFICACIÓN DEL ASFALTO

3.2.1.1. MODIFICACIÓN DEL ASFALTO CON LA ADICIÓN DE AZUFRE

Se puede añadir azufre al asfalto cantidades relativamente pequeñas para endurecerlo. La cantidad de azufre que reacciona con el asfalto depende de la temperatura y la composición del asfalto. El azufre reacciona principalmente con la fracción nafténica-aromática del asfalto, entre 119.3 °C, punto de fusión del azufre monoclinico, y 150 °C. La reacción es principalmente de adición, produciendo un incremento en la fracción aromática polar y un cambio en las propiedades del asfalto. Por arriba de los 150 °C y en presencia de grandes cantidades de oxígeno, la reacción de oxidación se incrementa repentinamente, produciendo un incremento en asfaltenos, afectando las propiedades del asfalto.

Dependiendo de la constitución química del asfalto, aproximadamente del 7% al 15% de azufre se puede dispersar en el asfalto y permanecer estable por un periodo largo. Cuando el asfalto está caliente, el azufre lo hace muy manejable, debido a que el azufre es un líquido de baja viscosidad a temperaturas entre su punto de fusión y 160 °C. Cuando el asfalto se enfría, el azufre cubre parcialmente y se adecua a la forma de los espacios en el material compactado, manteniendo unidas las partículas de agregados, incrementando la fricción interpartícula dentro del asfalto e impartiendo una fortaleza mecánica alta al sistema.

3.2.1.2. MODIFICACIÓN DEL ASFALTO CON LA ADICIÓN DE HULE

El polibutadieno, poliisopreno, hule natural, cloropreno, hule estireno-butadieno en bloque y al azar, han sido usados para incrementar la viscosidad del asfalto. En algunos casos, los hules son utilizados en un estado vulcanizado (entrecruzado) aunque es más difícil dispersarlos en el asfalto, por lo que se necesitan mayores temperaturas y tiempos de mezclado, pudiendo resultar en una mezcla heterogénea.

3.2.1.3. MODIFICACIÓN DEL ASFALTO CON COMPUESTOS ORGANO-MANGANOSOS

Al añadir compuestos organo-manganosos al asfalto, tal como el producto CHEMCRETE (patente E.U.A. No. 4234346), con o sin compuestos de cobre o cobalto, se mejoran sus propiedades físicas: resistencia a la deformación permanente y rigidez. Se cree que el manganeso promueve la formación de un compuesto dicetónico, esta cetona forma compuestos químicamente estables con el manganeso. Estos complejos mantienen juntas las moléculas de asfalto, mejorando así la resistencia y susceptibilidad del material a la temperatura.

3.2.1.4. MODIFICACIÓN DEL ASFALTO CON POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Los polímeros termoplásticos más utilizados en la modificación del asfalto son el polietileno, polipropileno, poli(cloruro de vinilo), poliestireno y etileno-vinilacetato (EVA). Al mezclarlos con el asfalto incrementan la viscosidad del mismo, aunque prácticamente no incrementan su elasticidad y al calentar la mezcla puede ocurrir una separación de fases.

3.2.1.5. MODIFICACIÓN DEL ASFALTO CON HULES TERMOPLÁSTICOS

Los principales grupos de elastómeros son: los poliuretanos, los copolímeros de poliéter-poliéster, los copolímeros olefínicos y los copolímeros de estireno butadieno en bloque. Estos últimos son los que proporcionan los mejores resultados al mezclarlos con el asfalto, los cuales pueden ser lineales, en forma de estrella, radiales o ramificados (Figura 3.9).

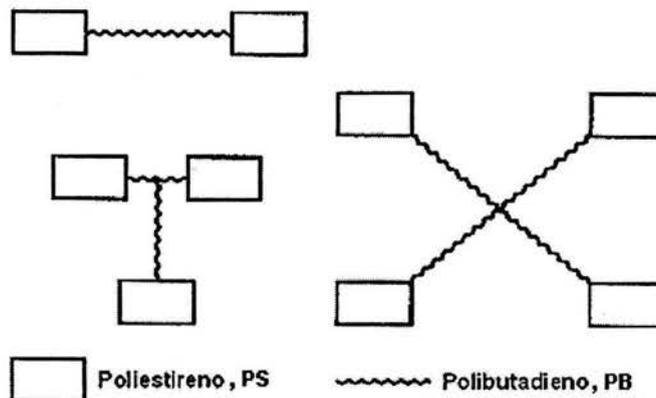


Figura 3.9 Hules termoplásticos lineales y ramificados

Los hules termoplásticos deben su fortaleza y elasticidad al entrecruzamiento físico de las moléculas de poliestireno (PS) en una red tridimensional (Schmidt y Münstedt, 2002). Esto es logrado gracias a la aglomeración de los bloques terminales de poliestireno dentro de dominios separados (Figura 3.10), proporcionando el entrecruzamiento físico a la matriz tridimensional elástica de polibutadieno o poliisopreno. Los bloques terminales de PS le imparten la fortaleza al polímero, mientras que los bloques intermedios de polibutadieno dan al material su elasticidad.

A temperaturas mayores a 100 °C (T_g del poliestireno) los dominios de poliestireno se debilitan, comenzando a disociarse, suavizándose el material facilitando su procesado. Al enfriarse, estos dominios se vuelven a asociar, restableciéndose la fortaleza y elasticidad del material. Es importante que dichos bloques terminales y los bloques intermedios sean incompatibles, ya que cuando esta condición es satisfecha, la molécula resultante es físicamente entrecruzable a través de sus bloques terminales.

Además, para mejorar la estabilidad de estos copolímeros contra la oxidación térmica y los rayos ultravioleta, se puede hidrogenar el dieno, disminuyendo la cantidad de dobles enlaces.

La adición del hule termoplástico al asfalto, cuyo peso molecular es similar o mayor al de los asfaltenos, crea una competencia entre estas dos especies por el poder de solvatación de la fase malténica y, si no hay suficientes maltenos, puede ocurrir una separación de fases.

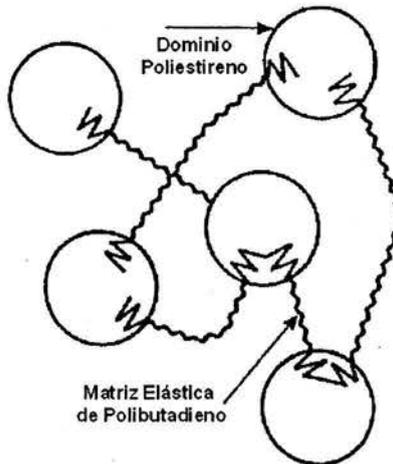


Figura 3.10 Estructura de los hules termoplásticos

Para que el polímero se disperse bien en el asfalto, la agitación aplicada por el mezclador debe ser lo suficientemente alta, de tal manera que el polímero se solvate e hinche.

Una vez preparada la mezcla de asfalto modificado, se debe tener en cuenta a los factores que influyen en la estabilidad de almacenamiento. Algunos de los cuales son:

- La cantidad y peso molecular de los asfaltenos
- La aromaticidad de la fase malténica
- La cantidad de polímero presente
- El peso molecular y estructura del polímero
- La temperatura y tiempo de almacenamiento.

3.2.1.6. MODIFICACIÓN DEL ASFALTO CON MEZCLAS TERMOESTABLES

Los polímeros termoestables se producen mezclando dos componentes líquidos, uno que contiene una resina epóxica y el otro un endurecedor, que reacciona químicamente para formar una estructura tridimensional muy fuerte. Por ejemplo, Shell comercializa una resina epóxica que aumenta la rigidez del asfalto, volviéndolo más frágil a bajas temperaturas.

La mezcla termoestable resultante presentará mayoritariamente las propiedades de las resinas termoestables, tales como: un tiempo limitado de vida útil, el cual se reduce al incrementar la temperatura; poco susceptibles a la temperatura; materiales elásticos que no exhiben flujo viscoso; al curar, las mezclas termoestables son muy resistentes al ataque de compuestos químicos, incluidos los solventes, aceites y combustibles.

3.2.2. TIPOS DE POLIMEROS USADOS PARA MODIFICAR EL ASFALTO

Los tipos de polímeros usados en pavimentación se clasifican en tres grupos: *i*) los copolímeros en bloque y otros termoplásticos, *ii*) los hules sintéticos y naturales, y *iii*) otros polímeros como las fibras (Lewandowski, 1994).

3.2.2.1. POLÍMEROS EN BLOQUE Y OTROS TERMOPLÁSTICOS

Este grupo de modificadores consiste principalmente de copolímeros en bloque que contienen estireno como el bloque terminal y butadieno como el bloque elástico intermedio (Zanzotto y Stastna, 1997); por ejemplo, el estireno-butadieno (SB), estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-isopreno-estireno (SIS), estireno-etileno-butileno-estireno (SEBS) y el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). Para comportarse como elastómeros, algunos polímeros en bloque, como el SB, requieren la adición de azufre. Dentro de este grupo también se tienen termoplásticos como el polietileno de baja densidad (LDPE) y etileno-vinilacetato (EVA).

Cuadro 3.6 Copolímeros en bloque y otros termoplásticos usados en la modificación del asfalto

<i>Tipo Modificador</i>	<i>Productor</i>	<i>Nombre Comercial</i>
SBS y aditivo propietario	Ergon, Dynasol	Sealo-Flex, Solprene
Etileno-vinilacetato	DuPont	ELVAX
Copolímero etileno	DuPont	ELVALOY AM
Copolímero base etileno	ARE, Inc.	STARFLEX
Copolímero base etileno	ARE, Inc.	MODIFLEX
Estireno-butadieno-estireno	EniChem	Europrene Solt
Copolímeros etileno	Exxon Chemical	POLYBILT
Copolímero estireno en bloque	Dexco Polymers	Vector
LDPE	Advance Asphalt Technologies	NOVOPHALT
Estireno-butadieno-estireno	FINA	Finaprene
Copolímeros estireno en bloque	Shell	Kraton D&G

Cuadro 3.7 Influencia de los elastómeros SBS en las propiedades del asfalto

<i>Beneficio</i>	<i>Influencia</i>
Mayor cohesión	Viscosidad y tenacidad Resistencia a la fatiga y formación de surcos Resistencia a la compresión y postcompactación Efectos de hinchazón reducidos en casos de endurecimiento excesivo
Mayor viscosidad	Resistencia a la deformación a altas temperaturas Flexibilidad a bajas temperaturas Resistencia a la ruptura
Mejor recuperación elástica	Resistencia a la formación de surcos y al calado
Mayor adhesión	Adhesión pasiva y activa Arreglo de los agregados Absorción del ruido
Efectos reducidos de envejecimiento	Resistencia a la formación de grietas Mayor tiempo de vida del material

Las propiedades clave que se mejoran al modificar el asfalto son: un mejor desempeño-temperatura, fuerza de tensión, recuperación elástica, cohesión y adhesión, y la habilidad para absorber el ruido.

3.2.2.2. HULES NATURALES Y SINTÉTICOS

Los hules naturales y sintéticos normalmente requieren un agente entrecruzador para formar una red continua que no fluya a altas temperaturas. Como ejemplos de este grupo se tienen homopolímeros como el hule natural (NR), polibutadieno (PBD), poliisopreno (PI) y poli (2-cloro-1,3-butadieno). También copolímeros al azar como el hule estireno-butadieno (SBR).

Cuadro 3.8 Hules naturales y sintéticos usados en la modificación del asfalto

<i>Tipo Modificador</i>	<i>Productor</i>	<i>Nombre Comercial</i>
Látex Estireno-Butadieno	Ultrapave/Goodyear	UP-70, UP-7289, UP-2897, UP-65k
Látex Estireno-Butadieno	Rub-R-Road	R-504, R-550
Látex Estireno-Butadieno	BASF Corp.	Butonal NS
Látex Policloropreno	DuPont	Neoprene

3.2.2.3. OTROS POLÍMEROS

En esta clasificación se tiene a las fibras y a los agentes que reducen el deslave. Las fibras normalmente no interaccionan químicamente con el asfalto, su propósito principal es incrementar la dureza de la mezcla de asfalto, incrementando la energía absorbida durante los procesos de fatiga y fractura. Las fibras pueden estar hechas de celulosa, poliéster, polipropileno, policloruro de vinilo o poliamidas.

Los agentes que disminuyen el deslave pueden ser algunas clases de poliaminas y polibutadieno, aunque la volatilidad de las poliaminas es un problema. El polibutadieno se aplica a la superficie del agregado para formar una capa uniforme. Estos agentes se usan para prevenir el daño del material debido a la humedad, ya que el agua desplaza al asfalto en la superficie del agregado causando la pérdida de adhesión entre el asfalto y el agregado.

Cuadro 3.9 Otros tipos de polímeros usados en la modificación del asfalto

<i>Tipo Modificador</i>	<i>Productor</i>	<i>Nombre Comercial</i>
Poliamina (reduce el deslave)	Morton Int.	Pave Bond
Hule-migaja	GRF-80	Rouse Rubber
Hule-migaja	IGR	Baker
Hule-migaja	EnviroTire, Inc.	Plusride II
Copolímero base estireno	Lubrizol	Ductilad
Polibutadieno (reduce el deslave)	Goodyear / Ultrapave	UP-5000
Fibras de polipropileno	Petro Fibers	PetroFiber
Fibras de polipropileno	FiberPave	Hercules, Inc.
Copolímero base estireno	Ductilad D1002	Lubrizol
Poliéster	Bonifibers	Kapejo
Base celulosa	American Fillers and Abrasives	Kayolec
Poliamina/poliamida	Carstab Products	PaveBond

3.2.3. MORFOLOGÍA DE LOS POLÍMEROS MODIFICADORES

La formación de una red polimérica embebida en la matriz de asfalto homogénea es función de varias variables: concentración del polímero; su estructura química, peso molecular y grado de ramificación; los tipos de interacciones entre el polímero y el asfalto; el contenido de asfaltenos en el asfalto; y la historia termomecánica de la mezcla. Para incrementar la posibilidad de obtener una mezcla compatible se necesita: que el polímero en bloque sea rico en butadieno y contener 30 – 40% de estireno, que éste contenga dos bloques de poliestireno o un punto de ramificación apropiado para que tome una configuración lineal (SBS) o radial (SBx) y que el peso molecular del poliestireno exceda 10,000 para obtener un dominio rico en poliestireno (Lewandowski, 1994).

La morfología de cualquier asfalto modificado analizado se puede describir con alguno de los siguientes sistemas: 1) Fase continua: Asfalto, 2) Fase continua: Polímero, 3) Entrecruzamiento físico y 4) Entrecruzamiento químico. El tipo de morfología del asfalto modificado depende de la concentración, la presencia de un agente entrecruzador y la estructura química del polímero.

- 1) Sistema donde la fase continua es el asfalto: es el más comúnmente usado y consiste de asfalto modificado con una cantidad no mayor a 6% en peso del polímero. En este sistema, el polímero forma una fase separada y dispersa en el asfalto. El dominio del polímero representa al polímero hinchado con la fase solvatante del asfalto. En la fase rica en polímero, el polibutadieno está hinchado por la fracción no asfáltica mientras que el poliestireno permanece en un dominio puro.
- 2) Sistema donde la fase continua es el polímero: en este sistema la cantidad de polímero en la mezcla es mayor de 6% y menor de 12% en peso, de tal forma que el polímero se convierte en la fase dominante, cambiando las propiedades del asfalto modificado.
- 3) Entrecruzamiento físico: los bloques terminales de poliestireno de copolímeros en bloque pueden formar una red en el asfalto a través del dominio del poliestireno, creando entrecruzamientos físicos como, por ejemplo, puentes de hidrógeno.
- 4) Entrecruzamiento químico: en este sistema las moléculas del polímero son unidas químicamente a las moléculas del asfalto. Por ejemplo, la adición de un pequeño porcentaje de azufre permite formar enlaces químicos entre el asfalto y el polímero.

3.2.4. DEFICIENCIAS EN PAVIMENTACIÓN

Las principales deficiencias en el asfalto usado en pavimentación son: la deformación permanente a altas temperaturas, el fracturamiento térmico a baja temperatura y la carga asociada con el rompimiento por fatiga. El envejecimiento y la susceptibilidad a la humedad completan estas deficiencias (Komatsu *et. al.*, 1998).

3.2.4.1. DEFORMACIÓN PERMANENTE A ALTA TEMPERATURA

La formación de surcos y baches es causada por la acumulación de la deformación plástica en el pavimento, y es producida al recibir éstas cargas aplicadas repetidamente a altas temperaturas de servicio, como son las presiones altas que ejercen las llantas de los camiones sobre el pavimento que pueden agravar el problema si el asfalto tiene una calidad deficiente, el uso de grandes cantidades de agregado mineral y la sensibilidad del asfalto al agua. Estos surcos se observan como depresiones formadas en las sendas dejadas por las llantas, en dirección paralela a la del tráfico. Dos indicadores del potencial de formación de surcos son las mezclas con sensibilidad alta a la temperatura, y aquellas mezclas que no se endurecen con la oxidación. La modificación polimérica generalmente proporciona rigidez a la mezcla y reduce su sensibilidad a la temperatura.

3.2.4.2. CARGA ASOCIADA CON EL ROMPIMIENTO POR FATIGA

Este tipo de falla es causada por la aplicación continua de cargas sobre un periodo largo, y un volumen de tráfico que excede al criterio usado en el diseño del pavimento. Además, si la mezcla es muy rígida, sensible al agua y con poca capacidad de orientación de las capas de soporte se facilita (la aparición de surcos y baches en el pavimento) el rompimiento por fatiga.

3.2.4.3. ROMPIMIENTO TÉRMICO A BAJA TEMPERATURA

A bajas temperaturas la mezcla se vuelve rígida, perdiendo la capacidad de deformarse elásticamente. Los materiales no polares del asfalto lo vuelven más ordenado o estructurado, con lo cual la mezcla se vuelve más quebradiza. La rigidez de la mezcla de asfalto depende principalmente, de la viscosidad, el crudo del que proviene y la edad del pavimento (Lu *et. al.*, 2003). Esta es el área donde la modificación polimérica contribuye a mejorar la flexibilidad a bajas temperaturas. Las pruebas tradicionales, que son usadas para evaluar la resistencia de una mezcla asfáltica al rompimiento térmico a baja temperatura, son los métodos de penetración a 4 °C y ductilidad a 4 °C. El programa de desarrollo estratégico de autopistas (SHRP = Strategic Highway Research Program) ha propuesto dos pruebas para estudiar las propiedades a baja temperatura del asfalto: El reómetro viga-vibratoria (AASHTO TP1) y la prueba de tensión directa (AASHTO TP3).

3.2.4.4. ENDURECIMIENTO DEL ASFALTO

El asfalto presenta varios cambios en sus características físicas y químicas cuando es sometido a procesos termooxidativos. Estos procesos originan el endurecimiento del asfalto durante el mezclado, disminuyendo el tiempo de vida del pavimento, causado por la pérdida de componentes de bajo peso molecular o volátiles presentes en el asfalto, y la formación de enlaces de hidrógeno. Los grupos funcionales que se forman al envejecer el asfalto, tales como los ácidos carboxílicos, las cetonas, los sulfóxidos y los anhídridos, tienen interacciones polares lo suficientemente fuertes como para incrementar la viscosidad y alterar consecuentemente las propiedades viscoelásticas del material.

3.3. FUERZA, ESFUERZO Y DEFORMACION

Cuando se aplica un esfuerzo sobre una muestra, ésta se deforma. El esfuerzo (σ) es definido como el cociente de la fuerza que se aplica sobre el área de impacto: $\sigma = F/A$, y normalmente se reporta en psi o Pa. Existen dos métodos de aplicar un esfuerzo: *i*) estático, que consiste en la imposición de un esfuerzo (o deformación) escalón y la observación subsecuente de la deformación (o esfuerzo) en función del tiempo; y *ii*) dinámico, que involucra la aplicación de un esfuerzo senoidal (Barnes *et. al.*, 1997).

La forma en que se aplica un esfuerzo estático sobre una muestra puede dar distintos resultados en la deformación que sufre el material y existen varias pruebas que ejemplifican este comportamiento (Menard, 1999). Por mencionar algunas de ellas, se tienen: 1) Prueba esfuerzo-deformación, 2) Prueba de fluencia y, 3) Prueba relajación de esfuerzos.

- 1) Prueba esfuerzo-deformación: en esta prueba se deforma la muestra a una rapidez de deformación constante ($\dot{\gamma}$) y se mide el esfuerzo resultante, o se puede aumentar el esfuerzo a una rapidez constante ($\dot{\sigma}$) para medir la deformación provocada. En cualquiera de los dos casos, se puede construir una curva de esfuerzo-deformación a partir de los datos experimentales obtenidos (a cada esfuerzo le corresponde una deformación). Cabe aclarar, que esta prueba es realizada a temperatura constante.
- 2) Prueba de fluencia: en esta prueba se aplica un esfuerzo constante durante un tiempo conocido y se observa la deformación provocada por el esfuerzo. Si además, se observa qué sucede cuando el esfuerzo es removido se tiene el experimento fluencia-recuperación. Esta prueba también es realizada a temperatura constante. Más adelante se analizará con detalle este tipo de experimento.
- 3) Prueba relajación de esfuerzos: esta prueba es parecida a la prueba de fluencia, sólo que aquí se aplica una deformación constante y se mide la disminución del esfuerzo en función del tiempo a temperatura constante.

El esfuerzo puede ser aplicado en distintas orientaciones: compresión, extensión/tensión, flexión, cortante. Estas formas de aplicar el esfuerzo dan curvas diferentes de esfuerzo-deformación, dando resultados distintos, inclusive en materiales isotrópicos homogéneos.

3.4. PRUEBA DE FLUENCIA-RECUPERACIÓN

Una forma de realizar la prueba de fluencia-recuperación consiste en someter un material a un esfuerzo constante utilizando una pieza de peso conocido. Además, el ciclo fluencia-recuperación se puede repetir varias veces en forma sucesiva, cada prueba a temperatura distinta, para obtener el comportamiento del material a un mismo esfuerzo y diferentes temperaturas (Figura 3.11).

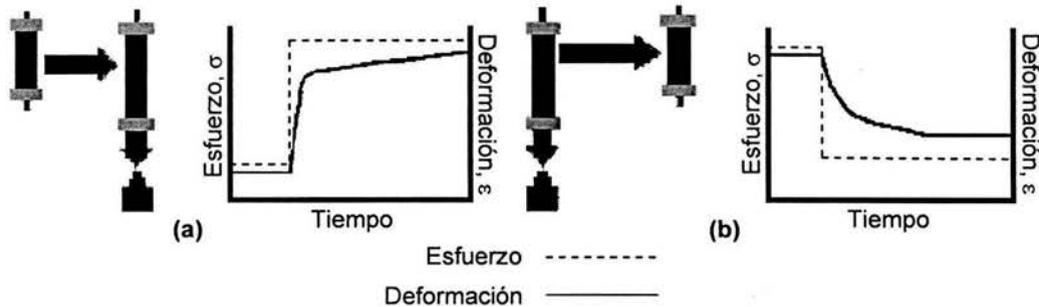


Figura 3.11 Prueba fluencia-recuperación. (a) La prueba de fluencia se realiza aplicando un esfuerzo constante a la muestra, (b) La prueba de recuperación comienza cuando el esfuerzo es removido y el material comienza a recuperarse

La prueba de fluencia es una de las pruebas más simples para caracterizar la respuesta esfuerzo-deformación de un material, donde un esfuerzo de magnitud constante es aplicado al material al tiempo t_0 , y dicho esfuerzo es removido al tiempo t_1 . Las diferencias entre el comportamiento elástico, viscoso y viscoelástico en una prueba de fluencia se muestran en la figura 3.12.

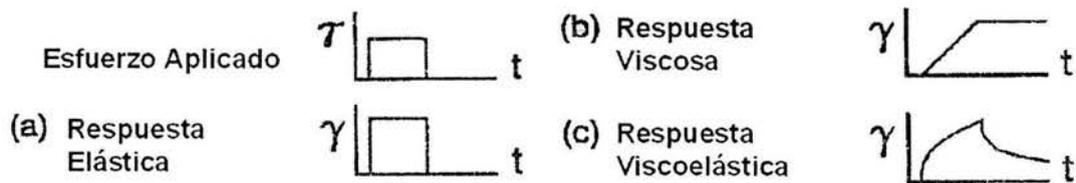


Figura. 3.12 Respuesta elástica, viscosa y viscoelástica en un material sometido a un esfuerzo constante (SHRP-A-369, 1994)

Al aplicar el esfuerzo al sistema un material elástico se deformará inmediatamente, regresando a su forma inicial al eliminar el esfuerzo aplicado. Por el otro lado, un material viscoso se deformará a una rapidez de deformación constante ($\dot{\gamma}$) al verse sometido a un esfuerzo y continuará deformándose hasta que dicho esfuerzo sea removido, sin que exista una recuperación del material.

Un material viscoelástico tiene ambos componentes, elástico y viscoso. Al aplicar un esfuerzo existirá una deformación inmediata, correspondiente a la deformación elástica, seguida de una deformación gradual dependiente del tiempo. Esta última deformación puede ser dividida en un componente puramente viscoso y en un componente elástico de acción retardada. Al remover el esfuerzo, el material no se recupera inmediatamente, y esto se explica considerando que el componente viscoso no se recupera, mientras que el componente elástico de acción retardada se recupera lentamente.

Una prueba de fluencia-recuperación tiene cuatro regiones (Menard, 1999): 1) la región de deformación inicial, 2) la zona de transición, 3) la región de equilibrio y, 4) la zona de recuperación (Figura 3.13).

En teoría se considera que el esfuerzo es aplicado instantáneamente. Esto no es del todo cierto, debido a que el momento de inercia del sistema de medición y el retraso en la transmisión de la señal a través de la muestra son determinadas por la velocidad del sonido. Como regla general, el tiempo requerido para que el sistema de medición comience a registrar datos es muy corto comparado con el tiempo de duración de la prueba.

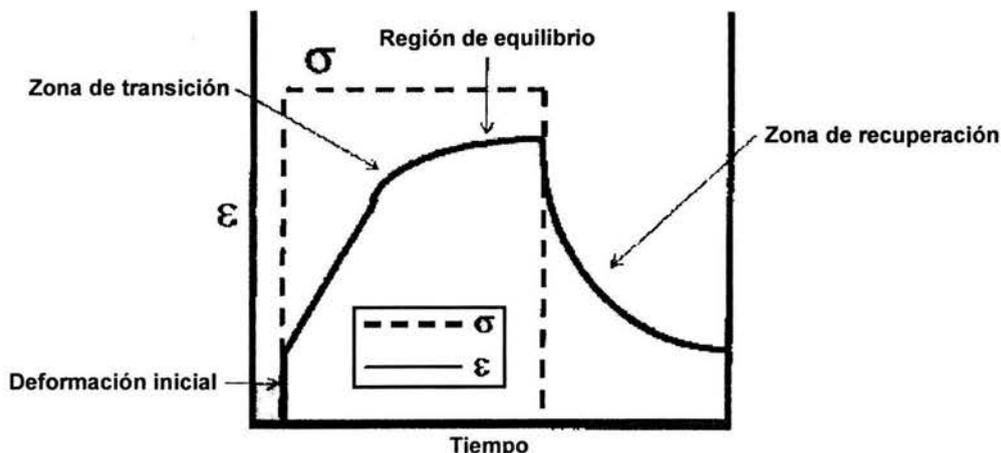


Figura 3.13 Regiones observadas en la curva de la deformación en un experimento de fluencia-recuperación

Entonces el término fluencia, que en inglés significa “creep”, pudiera entenderse como movimiento suave o delicado y describe la deformación que sufre un material en función del tiempo por efecto de la carga (esfuerzo) a que es sometido.

Los polímeros son propensos a deformarse como un resultado de las fuerzas intermoleculares débiles que actúan entre los segmentos del polímero. Esta deformación es el resultado de procesos moleculares complejos que implican movimientos segmentales cooperativos, que provocan cambios conformacionales en la cadena principal del polímero.

Las aplicaciones ingenieriles de sólidos poliméricos requieren que éstos tengan cierto grado de rigidez estructural, y que sea mantenido el tiempo de vida del producto. La capacidad de un material para resistir esfuerzos sin que la deformación sea excesiva es factor primordial en la selección y diseño del material.

Los materiales termoplásticos tienden a ser susceptibles a las pruebas de fluencia, aunque debe tenerse presente que el porcentaje de deformación depende de varios factores, entre los que destacan: el nivel de esfuerzo aplicado; la forma en que se aplica el esfuerzo; la temperatura; el grado de cristalinidad; la historia de vitrificación; el peso molecular; y la concentración del plastificante (Joshi y Leonov, 2001).

En contraste, los materiales termoestables altamente entrecruzados son resistentes a una prueba de fluencia, aunque pueden presentar deformación cuando son sujetos a condiciones extremas, incluyendo altas temperaturas y humedad.

3.4.1. BASES MOLECULARES DE LA PRUEBA DE FLUENCIA

Las bases moleculares de la prueba de fluencia son variadas, pero pueden agruparse en cinco categorías principales (Sperling, 1980):

1. Ruptura de cadenas: Cuando los segmentos del polímero son sometidos a un esfuerzo constante, éstos comienzan a deformarse. Una reducción en el esfuerzo puede provocar que algunos segmentos de las cadenas se rompan. La degradación oxidativa y la hidrólisis son sus principales causas.
2. Intercambio de enlaces: Las interacciones físicas de un segmento con otro se rompen para después formar enlaces físicos con otras porciones de cadena (cambian de “compañeros” moviéndose a otra posición), debido a la eliminación del esfuerzo aplicado.
3. Flujo viscoso: Causado por el deslizamiento de una o varias cadenas poliméricas que pasan cerca de otras, provocando su movimiento.
4. Relajación Thirion: Es una relajación reversible del entrecruzamiento físico o enredamiento de las cadenas en la red polimérica. Usualmente, una red elastomérica se relaja cerca del 5% por este mecanismo, la mayoría en tan sólo unos segundos. Se debe de enfatizar que las cadenas están en movimiento de reptación constante.
5. Relajación molecular: Cerca de la temperatura de transición vítrea las cadenas se relajan aproximadamente a la misma rapidez que el tiempo en que se efectuó el experimento. Las cadenas, bajo un esfuerzo durante el tiempo que duró la prueba, tienden a moverse hacia su posición original al eliminarse dicho esfuerzo.

3.4.2. CAPACITANCIA Y MÓDULO DE RIGIDEZ

El estudio de la viscoelasticidad de los polímeros comprende las interrelaciones entre elasticidad, flujo (la palabra reología se deriva de la palabra griega *rheo* y significa “fluir”) y movimiento molecular (Barnes *et. al.*, 1997). En realidad, no hay líquido que sólo exhiba comportamiento viscoso o newtoniano, y no hay sólido que sólo exhiba comportamiento elástico o hookeano. Sin embargo, es conveniente suponer lo anterior en algunos problemas simples, aunque el movimiento real de los materiales incluye algunos elementos viscosos y otros elásticos.

Durante una prueba de fluencia, un esfuerzo constante es aplicado a la muestra y la deformación resultante es registrada como una función del tiempo. Para analizar los datos de una prueba de fluencia se usa, generalmente, el módulo de rigidez, definido como: $S(t) = \sigma_0 / \epsilon(t)$, donde $S(t)$ es el módulo de rigidez (Pa), t es el tiempo de carga (s), σ_0 es el esfuerzo constante aplicado (Pa) y $\epsilon(t)$ es la deformación resultante al tiempo t (m/m).

El módulo de rigidez es el inverso de la capacitancia, $D(t)$, definida como la facilidad que tiene el material para deformarse. El símbolo usado para la capacitancia depende de la forma en que se aplique el esfuerzo: D para extensión o compresión, J para corte y B para presión hidrostática. Estas funciones son, en general, distintas y no intercambiables. El gráfico típico del módulo de rigidez contra el tiempo para el asfalto se muestra en la figura 3.14 en una escala log-log (SHRP-A-369, 1994).

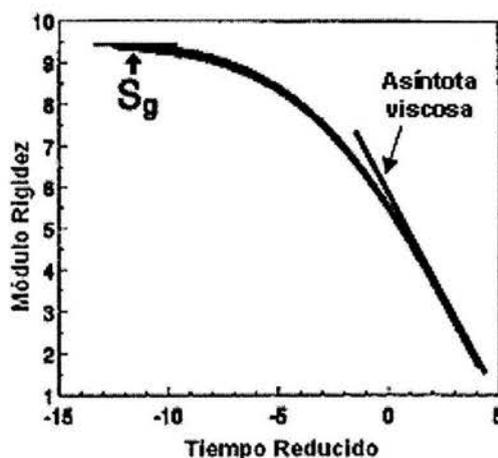


Figura 3.14 Gráfico típico del módulo de rigidez contra el tiempo para el asfalto, en escala logarítmica (SHRP-A-369, 1994)

A tiempos muy cortos de aplicación del esfuerzo, el módulo de rigidez se aproxima a un valor límite, llamado el módulo vítreo (S_g), y que tiene un valor cercano a 3 GPa ($\text{Log}[3\text{GPa}] \approx 9.5$) para todos los tipos de asfalto-cemento. Este valor constante para el módulo vítreo se debe a la rigidez que hay entre los enlaces carbono-carbono de las moléculas de asfalto. Muchos polímeros, los cuales están constituidos principalmente por moléculas de carbono, tienen valores similares para el módulo vítreo.

Al incrementarse el tiempo de aplicación del esfuerzo, el módulo disminuye hasta que el material fluye y se comporta como un fluido newtoniano. La rapidez de deformación es directamente proporcional al esfuerzo aplicado. Por esta razón, la asíntota que existe en esta región de la curva del módulo de rigidez se conoce como la asíntota viscosa.

3.4.3. TEORÍA DE LA VISCOELASTICIDAD LINEAL

La teoría de la viscoelasticidad lineal se emplea cuando el esfuerzo aplicado sobre una muestra es pequeño. A continuación se ejemplifica cómo saber si los datos experimentales caen dentro de la zona donde el material estudiado tiene un comportamiento lineal. Ya se comentó que el experimento de fluencia consiste en aplicar un esfuerzo constante a un material y medir la deformación que sufre en función del tiempo, a temperatura constante. Es necesario realizar por lo menos tres pruebas de fluencia, cada una a distinto esfuerzo, para poder determinar si se puede utilizar esta teoría.

La figura 3.15.a muestra una representación de la historia de esfuerzos para tres experimentos de fluencia; la respuesta del material en términos de la deformación se ilustra en la figura 3.15.b para un comportamiento lineal; y en la figura 3.15.c para un comportamiento no lineal.

Se observa que $\sigma_2 = 2\sigma_1$ y $\sigma_3 = 3\sigma_1$ (Figura 3.15.a). Para que el material estudiado tenga un comportamiento lineal la deformación resultante para cada tiempo escogido (t_1, t_2, t_3 y t_4) debe cumplir lo siguiente: $\varepsilon_2(t_i) = 2\varepsilon_1(t_i)$ y $\varepsilon_3(t_i) = 3\varepsilon_1(t_i)$, donde $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ y ε_3 son las deformaciones de las pruebas 1, 2 y 3 respectivamente ($i \rightarrow 1,2,3,4$). Entonces sólo las curvas de la figura 3.15.b caen dentro del comportamiento lineal.

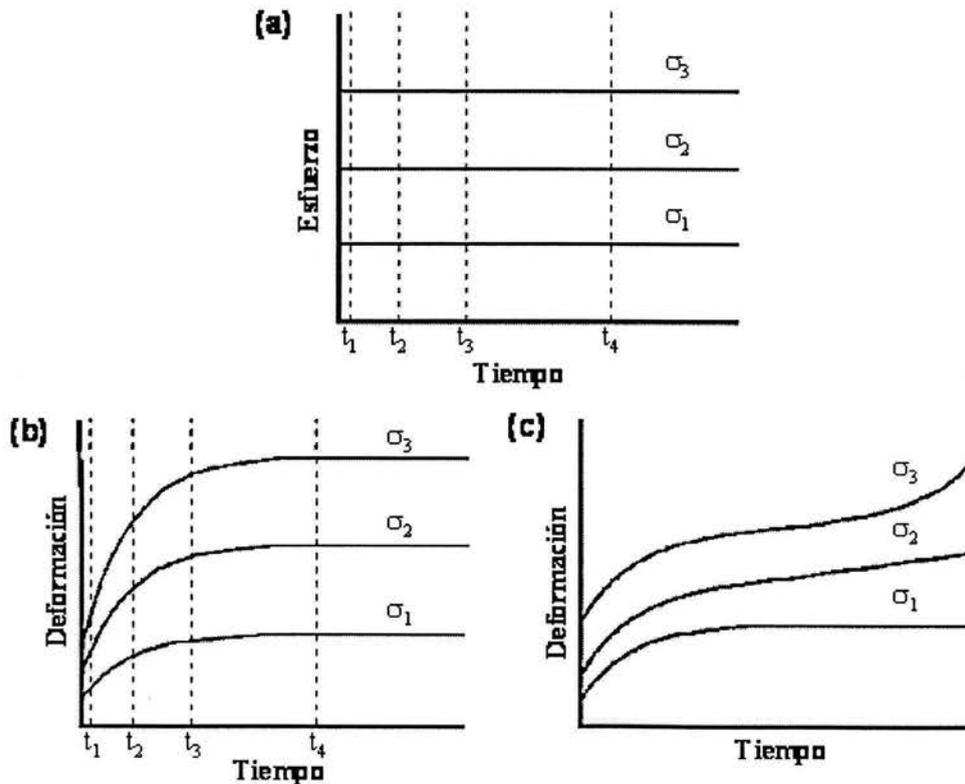


Figura 3.15 (a) Curva esfuerzo en función del tiempo. (b) Respuesta en la deformación de un material viscoelástico lineal. (c) Respuesta a la deformación de un material viscoelástico no lineal

Para comprobar la linealidad del material estudiado se construyen las isócronas, que son curvas a tiempo constante, de los tiempos escogidos (t_1 , t_2 , t_3 y t_4) a partir de los datos de fluencia, trazando la deformación contra el esfuerzo a estos tiempos. Cuando las isócronas son líneas rectas, se dice que los datos de fluencia son “lineales” (Figura 3.16).

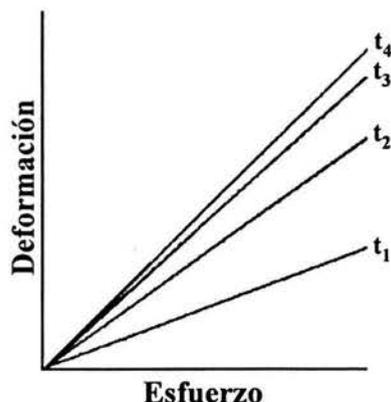


Figura 3.16 Isócronas esfuerzo-deformación para varios tiempos, construidas a partir de los datos de fluencia mostrados en la figura 3.15.b, ilustrando el comportamiento lineal

Se ha establecido (Ferry, 1980) que un conjunto de datos de fluencia cumplen con la condición de viscoelasticidad lineal cuando para el caso lineal, la capacitancia es independiente del esfuerzo por lo que las isócronas son lineales respecto al esfuerzo

En la figura 3.15.c (caso no lineal) se ilustran tres tipos de comportamientos: 1) En la curva con el esfuerzo más pequeño σ_1 , sólo ocurre deformación primaria; 2) A esfuerzo un poco mayor σ_2 , existe deformación primaria y secundaria; y 3) A esfuerzo σ_3 , hay deformación primaria, secundaria y puede haber deformación terciaria.

Los sólidos poliméricos bajo ciertas condiciones de prueba (deformación pequeña, temperatura y esfuerzo constantes) siempre exhiben deformación primaria, como una consecuencia directa de su comportamiento viscoelástico. Los elastómeros ligeramente entrecruzados exhiben deformación primaria; y poseen deformación secundaria, cuando ocurre el rompimiento y reformación de cadenas o entrecruzado, lo cual permite el deslizamiento de las cadenas.

Una diferencia importante entre deformación primaria y secundaria es que; la primera es reversible al remover el esfuerzo, mientras que la deformación secundaria exhibe flujo y no es recuperable.

La capacitancia, $D(t)$, dependiente del tiempo en el que el material responde a una prueba de fluencia está dada por la siguiente ecuación (Mark *et. al.*, 1988b):

$$D(t) = \int_0^{\infty} H(\tau)[1 - e^{(-t/\tau)}]d \ln \tau$$

Donde $H(\tau)$ es una ecuación constitutiva y τ es el tiempo de retraso. Este último se define como el tiempo que tarda la deformación de un material, que obedece el modelo de Kelvin-Voigt, en reducirse $1/e$ de su valor inicial (al finalizar la prueba de fluencia) tras remover el esfuerzo aplicado. La forma más simple de esta ecuación nos da un solo tiempo de retraso, para el cual la capacitancia está dada por:

$$D(t) = K_1 + K_2[1 - e^{(-t/\tau)}], \text{ donde } K_1 \text{ y } K_2 \text{ son constantes.}$$

La deformación se define como $\varepsilon(t) = \sigma(t)D(t) = \sigma(t)K_1 + \sigma(t)K_2[1 - e^{(-t/\tau)}]$, por lo que sustituyendo K_1 y K_2 por $1/E_1$ y $1/E_2$ respectivamente y si se considera un esfuerzo constante (σ_0), se obtiene la ecuación del modelo de tres elementos en serie para una prueba de fluencia: $\varepsilon(t) = (\sigma_0 / E_1) + (\sigma_0 / E_2)[1 - e^{(-t/\tau)}]$. Este modelo y el de Kelvin-Voigt se describen en el capítulo 4 y se puede consultar su desarrollo matemático en el apéndice A.

Existen otros métodos para determinar la región lineal: Se puede realizar una serie de pruebas en distintos especímenes de la muestra y construir las curvas de la capacitancia contra el tiempo. Cuando cada gráfico comience a sobreponerse, ésta será la región viscoelástica lineal. También, se pueden realizar una serie de pruebas de fluencia y observar bajo qué esfuerzo no ocurre flujo en la región de equilibrio respecto al tiempo. Una tercera forma de estimar la región lineal es realizar la prueba de fluencia a dos esfuerzos y sumar las curvas entre sí, usando el principio de superposición de Boltzmann, el cual dice que el efecto de los esfuerzos es aditivo en la región lineal.

Observando la figura 3.17 se nota que la deformación se incrementa linealmente al aumentar el esfuerzo hasta los 100 mN; a partir de este valor ésta comienza a divergir y, a 250 mN la deformación ya no es lineal.

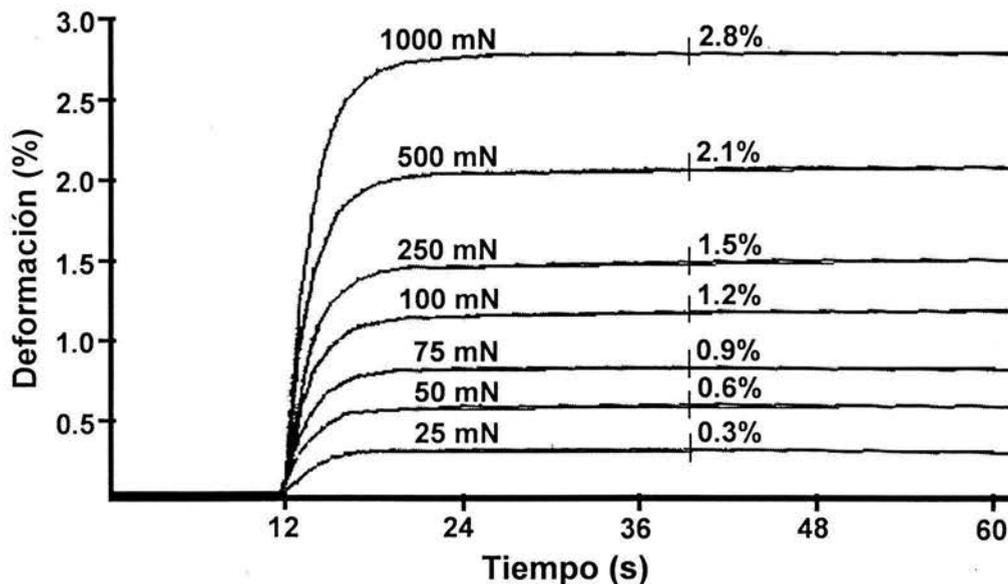


Figura 3.17 Otro método para determinar la región lineal en una prueba de fluencia

3.4.4. LA CURVA MAESTRA (PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN TIEMPO TEMPERATURA: PSTT)

Ha sido observado por varios investigadores, especialmente Ferry (1980), que para los polímeros amorfos, los datos de relajación mecánica obtenidos a varias temperaturas, ya sea en fluencia, relajación de esfuerzos o experimentos dinámicos, pueden superponerse utilizando el factor de corrimiento apropiado a la escala de tiempo de cada tipo de experimento, de esta forma se obtiene una curva maestra a la temperatura de referencia T_r . La validez de aplicar el PSTT para obtener una curva maestra se debe a que los procesos de relajamiento se ven influidos de igual forma con respecto a la temperatura.

Una curva maestra, que es la respuesta del material analizado referida a una sola temperatura en un amplio intervalo de tiempo, se obtiene al multiplicar los datos viscoelásticos obtenidos a diferentes temperaturas por un factor de corrimiento a_T . Es decir, la curva maestra es un gráfico, en escala logarítmica, de la función viscoelástica que se desea analizar, por ejemplo el módulo de rigidez contra el tiempo (t) o frecuencia (ω); o contra un tiempo (t/a_T) o frecuencia (ωa_T) reducidos (Kaufman, 1977). El factor de corrimiento se define como el cociente de un tiempo a una temperatura de referencia seleccionada arbitrariamente, $t(T_r)$, con respecto a un tiempo a cierta temperatura, $t(T)$: $a_T = t(T_r)/t(T)$.

La dependencia de a_T con respecto a la temperatura se representa por la ecuación de Williams-Landel-Ferry (WLF) o por una función del tipo Arrhenius (Ferry, 1980). La ecuación WLF es usada por encima de la temperatura de referencia y dentro de la región newtoniana. Esta ecuación fue desarrollada por Williams, Landel y Ferry; los cuales describieron el efecto del tiempo y la temperatura de los procesos viscoelásticos del asfalto y asfalto modificado:

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T - T_r)}{(C_2 + T - T_r)}$$

El modelo del tipo de Arrhenius también se usa para describir los factores de cambio como una función de la temperatura por debajo de la temperatura de referencia y dentro de la región newtoniana:

$$\log(a_T) = \frac{2.303E_a}{R(1/T - 1/T_r)}$$

Donde a_T es el factor de corrimiento a la temperatura T , en K; C_1 y C_2 son parámetros determinados empíricamente; T_r es la temperatura de referencia, en K; E_a es la energía de activación para el flujo por debajo de T_r ; y R es la constante del gas ideal, 8.34 J/mol K.

Los parámetros C_1 y C_2 de la ecuación WLF pueden tomar diferentes valores, por ejemplo, Schmidt (1966) estudió 52 mezclas de asfalto y encontró que $24.8 \leq C_1 \leq 38.4$ y $92.88 \leq C_2 \leq 555.7$. En 1992 Anderson encontró que, para la mayoría de los asfaltos y asfaltos modificados, C_1 y C_2 eran igual a 19 y 92 respectivamente. Mientras que la energía de activación (E_a) del modelo del tipo de Arrhenius era igual a 261 KJ/mol.

Estas ecuaciones son usadas para obtener curvas maestras, en este caso del asfalto y asfalto modificado, asumiendo que el material tiene un comportamiento viscoelástico lineal en las condiciones de prueba bajo las cuales fue analizado. En general, la curva maestra de un asfalto tiene dos regiones: una meseta vítrea y una asíntota viscosa; al añadir polímero al asfalto se produce un material llamado asfalto modificado (AM). La curva maestra del AM es sustancialmente diferente de la del asfalto solo, ya que presenta cuatro regiones: Vítrea, elástica, viscoelástica y región de flujo.

En la figura 3.18 se observa los pasos a seguir para construir una curva maestra: 1) Se traza en escala logarítmica los datos experimentales del módulo de rigidez contra el tiempo a las temperaturas $T_1, T_2, T_3, T_4,$ y T_5 ; 2) Se selecciona la temperatura de referencia (T_3); 3) Se utiliza la ecuación WLF o la ecuación del tipo de Arrhenius para calcular el valor del factor de corrimiento horizontal correspondiente a cada temperatura; y, 4) se traza en escala logarítmica el módulo de rigidez contra el tiempo reducido, t/a_T .

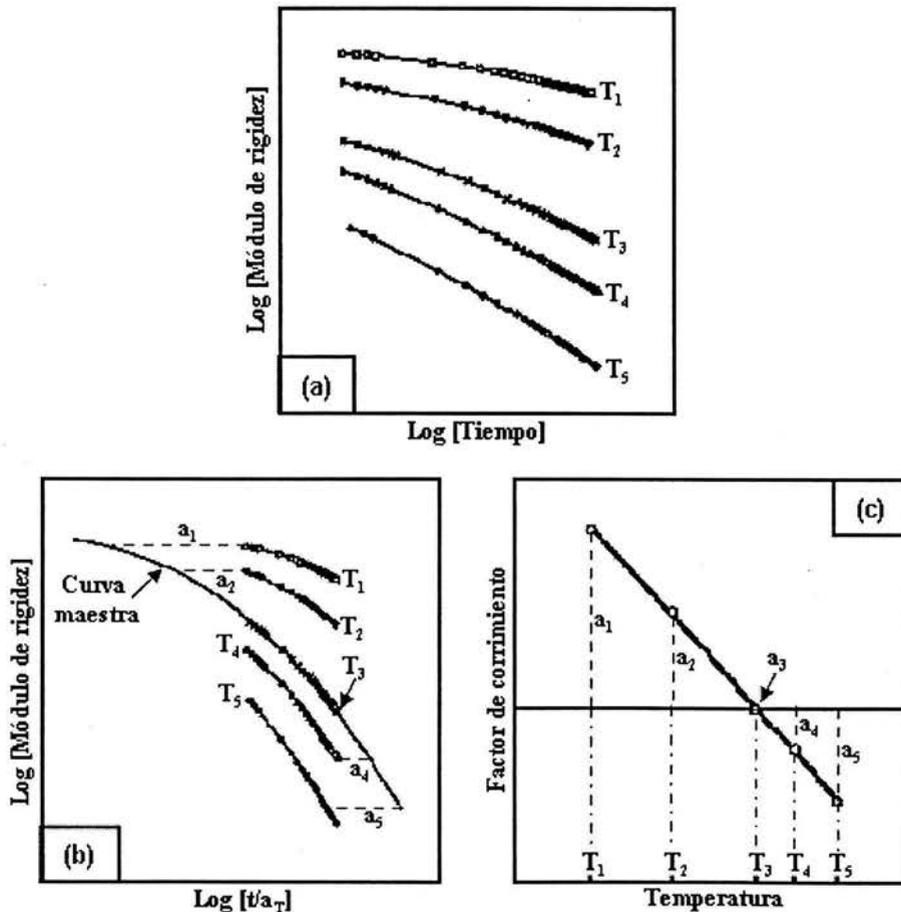


Figura 3.18 (a) Curvas típicas del módulo de rigidez a cinco temperaturas para el asfalto. (b) Aplicación del principio de superposición tiempo-temperatura para obtener una curva maestra a la temperatura deseada. (c) Factores de corrimiento aplicados a los datos de fluencia para obtener la curva maestra

Como se observa en la figura anterior, en lugar de tener cinco curvas a diferentes temperaturas en un intervalo de tiempo relativamente corto (10^{-1} - 10^2), ahora se cuenta con una sola curva, referida a una temperatura, en un intervalo de tiempo mayor (10^{-4} - 10^4).

3.4.5. RELACION ESTRUCTURA-PROPIEDAD

La influencia de algunos parámetros estructurales, tal como el peso molecular y la morfología, y ambientales sobre los resultados de las pruebas de fluencia-recuperación son conocidos (Ferry, 1980). Por ejemplo la temperatura es una variable importante, debido a que muchos materiales muestran diferente comportamiento cuando se prueban por encima o por debajo de su temperatura de transición vítrea, T_g . En general, cuando un polímero está a una temperatura igual a su T_g , cambia de la región vítrea a la elástica, en estas condiciones las cadenas ganan suficiente movilidad para deslizarse una sobre otra. Por debajo de la T_g , el comportamiento del polímero es dominado por el volumen libre, el cual limita la habilidad de las cadenas para moverse.

El hecho de que un material exhiba una disminución en el porcentaje de deformación puede interpretarse como el decremento de la temperatura, lo que causa que el movimiento de las cadenas del polímero se dificulte y su volumen libre disminuya; o como el aumento de la presión, el grado de cristalinidad, y la cantidad de entrecruzamientos.

Cuando la temperatura del polímero se acerca a la temperatura de transición vítrea, el porcentaje de deformación se vuelve más dependiente de la temperatura. Si se excede la T_g , aparece la influencia de otros parámetros estructurales, tales como el peso molecular y la morfología.

El porcentaje de deformación visto en el equilibrio es influido considerablemente por el peso molecular de los polímeros amorfos que no tienen entrecruzamientos. Las ramificaciones cambian el porcentaje de deformación dependiendo de la longitud de las mismas y el grado de ramificación. Los polímeros entrecruzados muestran una curva muy característica con una región plana en el equilibrio porque el entrecruzamiento no permite el flujo (Figura 3.19).

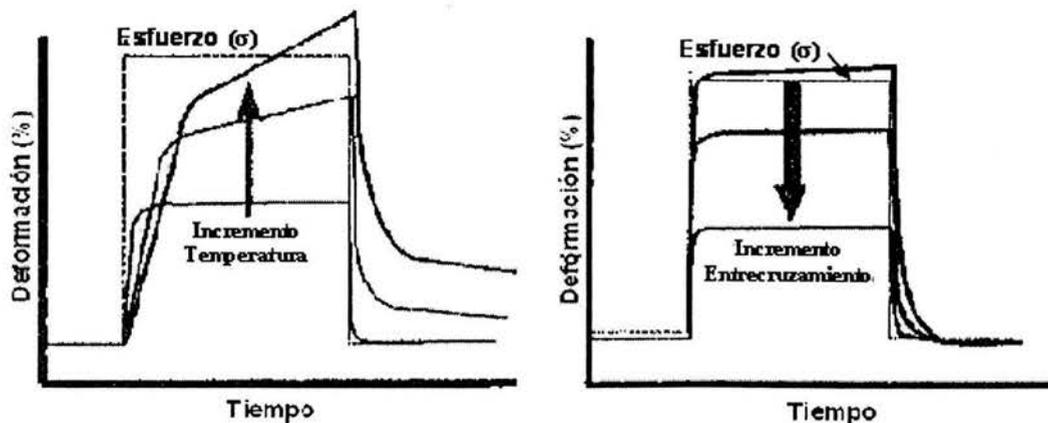


Figura 3.19 Efecto de la temperatura y el entrecruzamiento en la curva de fluencia

MODELOS REOLÓGICOS

4. MODELOS REOLÓGICOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Una manera de representar el comportamiento viscoelástico de los materiales es a través del uso de modelos que reproduzcan los procesos desarrollados por este tipo de materiales. Estos modelos se pueden clasificar en dos tipos: mecánicos y moleculares. En esta ocasión se hablará de los modelos mecánicos más importantes.

Un sólido completamente elástico es regido por la ley de Hooke, mientras que un líquido completamente viscoso lo rige la ley de Newton.

Ley de Hooke: $\sigma = E\varepsilon$	Ley de Newton: $\sigma = \eta_E (d\varepsilon/dt)$
--	---

Donde σ es el esfuerzo aplicado, E es el módulo de Young, η_E es la viscosidad extensional, ε es la deformación y $d\varepsilon/dt$ es la rapidez de deformación. Esta nomenclatura se utiliza cuando se aplica un esfuerzo extensional sobre la muestra que se desea analizar. Cuando el esfuerzo es cortante se utilizan las siguientes letras del alfabeto griego: τ para el esfuerzo, G para el módulo, η para la viscosidad, γ para la deformación y $d\gamma/dt$ para la rapidez de deformación.

Para desarrollar cualquier modelo mecánico, por complejo que sea, se debe partir de las leyes mencionadas anteriormente, donde un resorte representa un sólido elástico y un amortiguador un fluido viscoso (Wang *et. al.*, 2001).

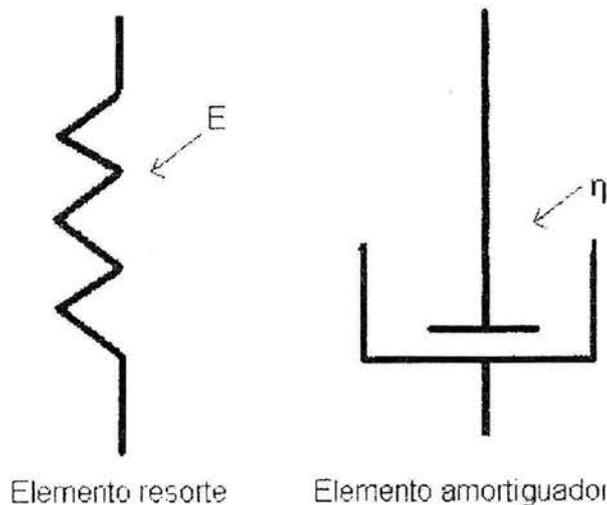


Figura 4.1 Componentes más simples de cualquier modelo mecánico

Debido a que no existen materiales que sean completamente elásticos o completamente viscosos, surgió la necesidad de desarrollar modelos que trataran de reproducir de la mejor forma el comportamiento de los materiales viscoelásticos.

En el capítulo anterior se comentó que la curva de la prueba de fluencia describe la deformación dependiente del tiempo, resultante de la aplicación de un esfuerzo constante. Además, es un proceso fuertemente dependiente de la temperatura y del tipo o forma en la que se aplica el esfuerzo, como por ejemplo extensión, compresión o corte simple.

Los modelos mecánicos más simples son el modelo de Maxwell y el modelo de Kelvin-Voigt. Ambos poseen el mismo número de elementos (un resorte y un amortiguador), pero en distinto arreglo; es decir, el modelo de Maxwell posee estos elementos en serie y el modelo de Kelvin-Voigt en paralelo.

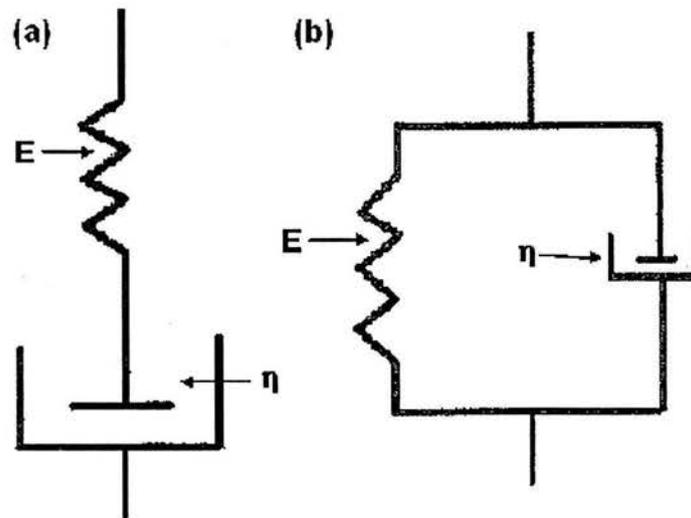


Figura 4.2 (a) Modelo de Maxwell y, (b) Modelo de Kelvin-Voigt

Sin embargo, estos modelos mecánicos no predicen muy bien el comportamiento de los materiales poliméricos estudiados; por lo que es necesario desarrollar otros modelos con mayor número de elementos.

Se efectuaron distintos arreglos, ya sea en serie o paralelo, para un mismo número de elementos con la finalidad de observar qué modelos predecían mejor el comportamiento del asfalto modificado.

En este trabajo se presenta el desarrollo y prueba de los siguientes modelos:

- a) Tres elementos en serie (modelo de un sólido viscoelástico lineal estándar: elemento de Kelvin-voigt en serie con un resorte)
- b) Tres elementos en paralelo (elemento de Maxwell en paralelo con un resorte)
- c) Cuatro elementos en serie (modelo de Burgers: elemento de Kelvin-Voigt en serie con un resorte y con un amortiguador)
- d) Cuatro elementos en paralelo – amortiguador independiente (un amortiguador en serie con el arreglo del modelo de tres elementos en paralelo)
- e) Cuatro elementos en paralelo – resorte independiente (un resorte en serie con el arreglo del modelo de tres elementos en paralelo)
- f) Cinco elementos en serie.

A continuación se presentan los esquemas de cada uno de los modelos anteriores; y en el apéndice A los desarrollos y resultados de estos modelos.

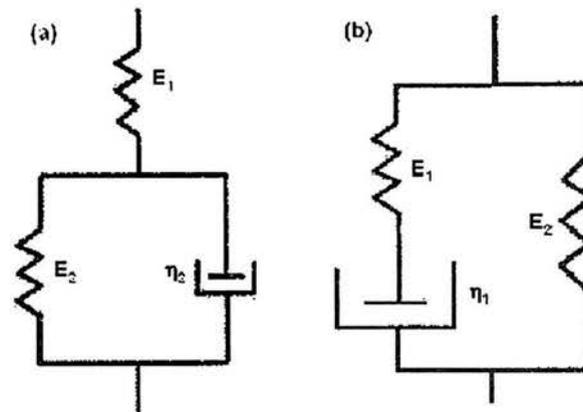


Figura 4.3 Modelos de tres elementos, (a) en serie (Kaufman, 1977), (b) en paralelo

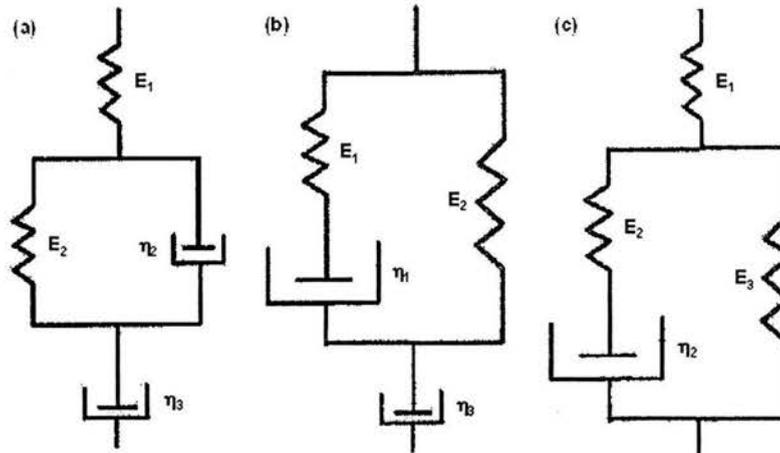


Figura 4.4 Modelos de cuatro elementos, (a) en serie: modelo de Burgers (Grabowski *et. al.*, 2002 y Wang *et. al.*, 2001), (b) en paralelo – amortiguador independiente y, (c) en paralelo – resorte independiente

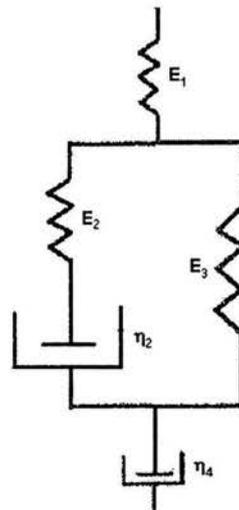


Figura 4.5 Modelo de cinco elementos

4.2. MODELOS MECÁNICOS

En esta sección, sólo se presenta el desarrollo del el modelo de cinco elementos, debido a que todos los modelos estudiados son similares en cuanto a las operaciones matemáticas necesarias para obtener las ecuaciones que los describen y a que el modelo de cinco elementos fue el que mejor representó el comportamiento de los asfaltos modificados analizados. El resto de los modelos mecánicos estudiados se pueden consultar en el apéndice A.

4.2.1. MODELO DE CINCO ELEMENTOS

En este modelo la deformación total es la suma de la deformación del elemento en paralelo, la deformación del amortiguador independiente y la deformación del resorte independiente: $\varepsilon = \varepsilon_{\text{resorte}} + \varepsilon_{\text{paralelo}} + \varepsilon_{\text{amortiguador}}$; mientras que el esfuerzo total es la suma de los esfuerzos individuales del elemento en paralelo, y es igual al esfuerzo en el resorte y amortiguador independientes ($\sigma = \sigma_1 = \sigma_4 = \sigma_2 + \sigma_3$).

Esfuerzo elemento Maxwell	$\left. \vphantom{\begin{matrix} \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_1 \\ \sigma_4 \end{matrix}} \right\} \sigma_2 = \sigma - \sigma_3 = \sigma_1 = \sigma_4 \longrightarrow \sigma_2 = \sigma - E_3 \varepsilon_{\text{paralelo}}$
Deformación resorte Independiente	$\left. \vphantom{\begin{matrix} \sigma \\ \sigma_1 \end{matrix}} \right\} \sigma = \sigma_1 = E_1 \varepsilon_{\text{resorte}} \longrightarrow \varepsilon_{\text{resorte}} = \frac{\sigma}{E_1} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_{\text{resorte}}}{dt} = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt}$
Deformación amortiguador Independiente	$\left. \vphantom{\begin{matrix} \sigma \\ \sigma_4 \end{matrix}} \right\} \sigma = \sigma_4 = \eta_4 \frac{d\varepsilon_{\text{Am}}}{dt} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_{\text{Am}}}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_4} \longrightarrow \varepsilon_{\text{Am}} = \frac{\sigma}{\eta_4} t$
Deformación elemento en paralelo	$\left. \vphantom{\begin{matrix} \varepsilon \\ \varepsilon_{\text{paralelo}} \\ \varepsilon_{\text{resorte}} \\ \varepsilon_{\text{Am}} \end{matrix}} \right\} \varepsilon = \varepsilon_{\text{paralelo}} + \varepsilon_{\text{resorte}} + \varepsilon_{\text{Am}} \longrightarrow \varepsilon_{\text{paralelo}} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E_1} - \frac{\sigma}{\eta_4} t$
Despejando $d\varepsilon_{\text{paralelo}}/dt$ de la ecuación de Maxwell	$\left. \vphantom{\begin{matrix} \sigma_2 \\ \eta_2 \\ d\sigma_2 \\ dt \\ \eta_2 \\ d\varepsilon_{\text{paralelo}} \\ dt \end{matrix}} \right\} \sigma_2 + \frac{\eta_2}{E_2} \frac{d\sigma_2}{dt} = \eta_2 \frac{d\varepsilon_{\text{paralelo}}}{dt} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_{\text{paralelo}}}{dt} = \frac{\sigma_2}{\eta_2} + \frac{1}{E_2} \frac{d\sigma_2}{dt}$

Sust. en: $d\varepsilon/dt = d\varepsilon_{\text{paralelo}}/dt + d\varepsilon_{\text{resorte}}/dt + d\varepsilon_{\text{Am}}/dt$:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \left(\frac{\sigma - E_3(\varepsilon - (\sigma/E_1) - (\sigma/\eta_4)t)}{\eta_2} + \frac{1}{E_2} \frac{d[\sigma - E_3(\varepsilon - (\sigma/E_1) - (\sigma/\eta_4)t)]}{dt} \right) + \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_4}$$

Desarrollando: $\left. \vphantom{\begin{matrix} d\varepsilon \\ dt \\ \sigma \\ \eta_2 \\ E_3 \\ \varepsilon \\ \eta_2 E_1 \\ \eta_2 \eta_4 \\ E_2 \\ dt \\ E_2 \\ dt \\ E_2 E_1 \\ dt \\ E_2 \eta_4 \\ E_1 \\ dt \\ \sigma \\ \eta_4 \end{matrix}} \right\} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_2} - \frac{E_3}{\eta_2} \varepsilon + \frac{E_3 \sigma}{\eta_2 E_1} + \frac{E_3 \sigma}{\eta_2 \eta_4} t + \frac{1}{E_2} \frac{d\sigma}{dt} - \frac{E_3}{E_2} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_3}{E_2 E_1} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_3 \sigma}{E_2 \eta_4} + \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_4}$

Rearreglando: $\left. \vphantom{\begin{matrix} (E_2 + E_3) \\ E_2 \\ dt \\ E_3 \\ \varepsilon \\ (1/E_1 + 1/E_2 + E_3/E_2 E_1) \\ d\sigma \\ dt \\ \sigma \\ \eta_2 \\ E_3 \sigma \\ \eta_2 E_1 \\ E_3 \sigma \\ \eta_2 \eta_4 \\ E_2 \eta_4 \\ \sigma \\ \eta_4 \end{matrix}} \right\} \left(\frac{E_2 + E_3}{E_2} \right) \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_3}{\eta_2} \varepsilon = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{E_3}{E_2 E_1} \right) \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_2} + \frac{E_3 \sigma}{\eta_2 E_1} + \frac{E_3 \sigma}{\eta_2 \eta_4} t + \frac{E_3 \sigma}{E_2 \eta_4} + \frac{\sigma}{\eta_4}$

La ecuación general que describe el modelo de cinco elementos es:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \varepsilon = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{(E_2 + E_3)} \right) \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \left(1 + \frac{E_3}{E_1} \right) \sigma + \frac{\sigma}{\eta_4} \left(1 + \frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} t \right)$$

En el caso particular de la prueba de fluencia se aplica un esfuerzo constante (σ_0), por lo que los pasos necesarios para obtener la ecuación que describe el comportamiento en esta prueba se realiza a continuación:

Como $\sigma = \sigma_0$, la ecuación anterior queda:
$$\left. \begin{array}{l} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} \varepsilon = \frac{E_2}{\eta_2(E_2 + E_3)} \left(1 + \frac{E_3}{E_1}\right) \sigma_0 + \frac{\sigma_0}{\eta_4} \left(1 + \frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t\right) \end{array} \right\}$$

Esta ecuación, es de la forma
$$\left. \begin{array}{l} \frac{dy}{dt} + Py = Q(t) \end{array} \right\}$$

Cuya solución general es
$$\left. \begin{array}{l} y = e^{-\int P dt} \left[\int Q(t) e^{\int P dt} dt + C \right] \end{array} \right\}$$

Sustituyendo $P = E_2 E_3 / \eta_2(E_2 + E_3)$, $y = \varepsilon$, y el valor de $Q(t)$:

$$\varepsilon = e^{-\int \frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} dt} \left[\int \frac{E_2}{\eta_2(E_2 + E_3)} \left(1 + \frac{E_3}{E_1}\right) \sigma_0 e^{\int \frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} dt} dt + \frac{\sigma_0}{\eta_4} \left(1 + \frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t\right) e^{\int \frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} dt} dt + C \right]$$

Integrando la ecuación anterior:

$$\varepsilon = e^{-\frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t} \left[\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \right) \sigma_0 e^{\frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t} + \frac{\sigma_0}{\eta_4} e^{\frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t} + C \right] \longrightarrow \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} + \frac{\sigma_0}{\eta_4} t + C e^{-\frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t}$$

Nota:

$$\int \left(1 + \frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t\right) e^{\frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t} dt = I = t e^{\frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t}$$

$$I = \left(1 + \frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t\right) \frac{\eta_2(E_2 + E_3)}{E_2 E_3} e^{\frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t} - \frac{\eta_2(E_2 + E_3)}{E_2 E_3} \int e^{\frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t} \frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} dt$$

Aplicando la C.I. a $t = 0$, $\varepsilon = \sigma_0 / E_1$
$$\left. \begin{array}{l} \frac{\sigma_0}{E_1} = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} + C \longrightarrow C = -\frac{\sigma_0}{E_3} \end{array} \right\}$$

Sustituyendo el valor de C en la ecuación de la deformación
$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} + \frac{\sigma_0}{\eta_4} - \frac{\sigma_0}{E_3} e^{-\frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t}, \text{ donde } \tau_r = \frac{\eta_2(E_2 + E_3)}{E_2 E_3} \end{array} \right\}$$

Por lo que, la ecuación que describe el modelo es:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-\frac{E_2 E_3}{\eta_2(E_2 + E_3)} t}\right) + \frac{\sigma_0}{\eta_4} t \quad \text{o} \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-t/\tau_r}\right) + \frac{\sigma_0}{\eta_4} t$$

Evaluando la ecuación anterior a $t = 0$ se obtiene la respuesta instantánea
$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} \end{array} \right\}$$

A tiempos cortos se consigue
$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \left(\frac{E_2 \sigma_0}{\eta_2(E_2 + E_3)} + \frac{\sigma_0}{\eta_4} \right) t \end{array} \right\}$$

A tiempos largos se tiene
$$\left. \begin{array}{l} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} + \frac{\sigma_0}{\eta_4} t \end{array} \right\}$$

4.3. PRUEBA DE FLUENCIA

Recapitulando, a continuación se muestran las ecuaciones diferenciales (generales) obtenidas para cada uno de los modelos descritos anteriormente:

Cuadro 4.1. Ecuaciones diferenciales de cada modelo mecánico estudiado

<p>Modelo de Maxwell</p> $\sigma + \frac{\eta}{E} \frac{d\sigma}{dt} = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$
<p>Modelo de Kelvin-Voigt</p> $\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$
<p>Modelo de tres elementos (serie)</p> $\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt} + \left(\frac{E_1 + E_2}{\eta_2 E_1} \right) \sigma$
<p>Modelo de tres elementos (paralelo)</p> $\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \varepsilon = \frac{1}{(E_1 + E_2)} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \sigma$
<p>Modelo de cuatro elementos (serie)</p> $\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt} + \left(\frac{E_1 + E_2}{\eta_2 E_1} \right) \sigma + \frac{\sigma}{\eta_3} \left(1 + \frac{E_2}{\eta_2} t \right)$
<p>Modelo de cuatro elementos (paralelo – amortiguador independiente)</p> $\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \varepsilon = \frac{1}{(E_1 + E_2)} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \sigma + \frac{\sigma}{\eta_3} \left(1 + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t \right)$
<p>Modelo de cuatro elementos (paralelo – resorte independiente)</p> $\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \varepsilon = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{(E_2 + E_3)} \right) \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \left(1 + \frac{E_3}{E_1} \right) \sigma$
<p>Modelo de cinco elementos</p> $\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \varepsilon = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{(E_2 + E_3)} \right) \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \left(1 + \frac{E_3}{E_1} \right) \sigma + \frac{\sigma}{\eta_4} \left(1 + \frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} t \right)$

Las ecuaciones que describen cada modelo mecánico para un experimento de fluencia se muestran en el cuadro 4.2 y se obtienen al sustituir $\sigma = \sigma_0$ en las ecuaciones diferenciales del cuadro 4.1. El desarrollo matemático necesario para llegar a cada ecuación se puede consultar en la sección 4.2.1 de este capítulo para el modelo de cinco elementos y en el apéndice A para los otros modelos mecánicos estudiados.

Cuadro 4.2. Ecuaciones que describen el comportamiento de fluencia de un material viscoelástico

Modelo de Maxwell	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{\eta} t$
Modelo de Kelvin-Voigt	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right), \tau_r = \frac{\eta}{E}$
Modelo de tres elementos (serie)	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right), \tau_r = \frac{\eta_2}{E_2}$
Modelo de tres elementos (paralelo)	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right), \tau_r = \frac{\eta_1(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}$
Modelo de cuatro elementos (serie)	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t, \tau_r = \frac{\eta_2}{E_2}$
Modelo de cuatro elementos (paralelo, amortiguador independiente)	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t, \tau_r = \frac{\eta_1(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}$
Modelo de cuatro elementos (paralelo, resorte independiente)	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right), \tau_r = \frac{\eta_2(E_2 + E_3)}{E_2 E_3}$
Modelo de cinco elementos	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_4} t, \tau_r = \frac{\eta_2(E_2 + E_3)}{E_2 E_3}$

4.4. PRUEBA DE RECUPERACIÓN

Una vez que concluye la prueba de fluencia, el material es sometido a otra prueba, con la finalidad de observar el comportamiento del mismo al eliminar el esfuerzo constante aplicado durante el experimento de fluencia. A esta prueba, se le conoce como prueba de recuperación.

Para predecir el comportamiento del material se ocupan los mismos modelos utilizados para modelar los datos experimentales de la prueba de fluencia. Las constantes calculadas (módulos y viscosidades) a partir de los datos de fluencia son las mismas para esta prueba, ya que se trata del mismo material, pero sometido a otras condiciones.

Como en la prueba de recuperación ya no existe un esfuerzo que actúe sobre el sistema, el lado derecho de las ecuaciones diferenciales del cuadro 4.1 es igual a cero, por lo que las ecuaciones particulares para una prueba de recuperación quedan de la siguiente manera:

Cuadro 4.3. Ecuaciones diferenciales para una prueba de recuperación

Modelo de Maxwell	$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$
Modelo de Kelvin-Voigt	$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E}{\eta} \varepsilon = 0, \tau_r = \frac{\eta}{E}$
Modelo de tres elementos (serie)	$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon = 0, \tau_r = \frac{\eta_2}{E_2}$
Modelo de tres elementos (paralelo)	$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \varepsilon = 0, \tau_r = \frac{\eta_1 (E_1 + E_2)}{E_1 E_2}$
Modelo de cuatro elementos (serie)	$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon = 0, \tau_r = \frac{\eta_2}{E_2}$
Modelo de cuatro elementos (paralelo – amortiguador independiente)	$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \varepsilon = 0, \tau_r = \frac{\eta_1 (E_1 + E_2)}{E_1 E_2}$
Modelo de cuatro elementos (paralelo – resorte independiente)	$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \varepsilon = 0, \tau_r = \frac{\eta_2 (E_2 + E_3)}{E_2 E_3}$
Modelo de cinco elementos	$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \varepsilon = 0, \tau_r = \frac{\eta_2 (E_2 + E_3)}{E_2 E_3}$

La solución de la ecuación del modelo de Maxwell nos da un valor constante de la deformación ($\varepsilon = C$). Este valor se obtiene al aplicar la condición inicial: a tiempo t_1 , la deformación inicial $\varepsilon_1 = -(\sigma_0/E) + (\sigma_0/\eta)t_1 = C$. Por lo que la ecuación que describe la recuperación del elemento de Maxwell es, $\varepsilon = -(\sigma_0/E) + (\sigma_0/\eta)t_1$.

El resto de las ecuaciones son casi idénticas, ya que sólo se diferencian en que el tiempo de retraso es distinto para los modelos en serie y paralelo.

Por lo que la ecuación general es $\left. \vphantom{\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{1}{\tau_r} \varepsilon = 0} \right\} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{1}{\tau_r} \varepsilon = 0$

Esta ecuación es separable, por lo que su solución es $\left. \vphantom{\ln \varepsilon = -\frac{1}{\tau_r} t + C} \right\} \ln \varepsilon = -\frac{1}{\tau_r} t + C$

Donde $\left. \vphantom{C = \ln \varepsilon_1 + \frac{1}{\tau_r} t_1} \right\} C = \ln \varepsilon_1 + \frac{1}{\tau_r} t_1$

Entonces $\left. \vphantom{\varepsilon = \varepsilon_1 e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_r}}} \right\} \varepsilon = \varepsilon_1 e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_r}}$

Para cada modelo en particular, lo único que varía es la deformación inicial y el tiempo de retraso.

A tiempo t_1 la deformación inicial ε_1 para cada modelo es la siguiente:

Cuadro 4.4. Solución inicial para la deformación en una prueba de recuperación

Modelo de Maxwell	$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{\eta} t_1$
Modelo de Kelvin-Voigt	$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-t_1/\tau_r} \right), \tau_r = \frac{\eta}{E}$
Modelo de tres elementos (serie)	$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t_1/\tau_r} \right), \tau_r = \frac{\eta_2}{E_2}$
Modelo de tres elementos (paralelo)	$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t_1/\tau_r} \right), \tau_r = \frac{\eta_1(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}$
Modelo de cuatro elementos (serie)	$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t_1/\tau_r} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t_1, \tau_r = \frac{\eta_2}{E_2}$
Modelo de cuatro elementos (paralelo – amortiguador independiente)	$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t_1/\tau_r} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t_1, \tau_r = \frac{\eta_1(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}$
Modelo de cuatro elementos (paralelo – resorte independiente)	$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-t_1/\tau_r} \right), \tau_r = \frac{\eta_2(E_2 + E_3)}{E_2 E_3}$
Modelo de cinco elementos	$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-t_1/\tau_r} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_4} t_1, \tau_r = \frac{\eta_2(E_2 + E_3)}{E_2 E_3}$

Entonces, considerando que el resorte y el amortiguador independientes (en los modelos que los tienen como parte de su arreglo) actúan a tiempo t_1 , al momento de eliminar el esfuerzo aplicado al sistema y ya no varían al paso del tiempo. Es decir, el resorte independiente regresa inmediatamente a su posición inicial (antes de efectuar la prueba de fluencia), y el amortiguador independiente ya no se recupera, sino que permanece en la posición en que quedó a tiempo t_1 (al finalizar la prueba de fluencia).

Los únicos elementos que presentan recuperación son los que forman el elemento en paralelo del modelo en cuestión. Por lo que las ecuaciones de recuperación quedan de la siguiente manera:

Cuadro 4.5. Ecuaciones que describen el comportamiento de recuperación de un material viscoelástico

Modelo de Maxwell	$\varepsilon = -\frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_0}{\eta} t_1$
Modelo de Kelvin-Voigt	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-t/\tau_r}\right) e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_r}}, \tau_r = \frac{\eta}{E}$
Modelo de tres elementos (serie)	$\varepsilon(t) = -\frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_r}\right) e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_r}}, \tau_r = \frac{\eta_2}{E_2}$
Modelo de tres elementos (paralelo)	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_r}\right) e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_r}}, \tau_r = \frac{\eta_1(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}$
Modelo de cuatro elementos (serie)	$\varepsilon(t) = -\frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_r}\right) e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_r}} + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t_1, \tau_r = \frac{\eta_2}{E_2}$
Modelo de cuatro elementos (paralelo – amortiguador independiente)	$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_r}\right) e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_r}} + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t_1, \tau_r = \frac{\eta_1(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}$
Modelo de cuatro elementos (paralelo – resorte independiente)	$\varepsilon(t) = -\frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-t/\tau_r}\right) e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_r}}, \tau_r = \frac{\eta_2(E_2 + E_3)}{E_2 E_3}$
Modelo de cinco elementos	$\varepsilon(t) = -\frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-t/\tau_r}\right) e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_r}} + \frac{\sigma_0}{\eta_4} t_1, \tau_r = \frac{\eta_2(E_2 + E_3)}{E_2 E_3}$

Se puede observar que el valor de τ_r depende del arreglo del elemento en paralelo, por ejemplo, en el elemento en paralelo constituido por un resorte y un amortiguador $\tau_r = \eta/E$; mientras que en el elemento en paralelo con 2 resortes y un amortiguador $\tau_r = \eta_2(E_2 + E_3)/E_2 E_3$. La deformación instantánea depende del parámetro E_1 , y la deformación que no es recuperable depende de η del amortiguador independiente.

PARTE EXPERIMENTAL

5. PARTE EXPERIMENTAL

5.1. CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO

Se realizó la caracterización de dos tipos de asfalto AC-20, uno proveniente de la planta de asfalto del Ajusco (Distrito Federal), y otro proveniente de Salamanca, Guanajuato. Lo anterior con la finalidad de decidir qué asfalto se utilizaría para su modificación con copolímeros a base de estireno-butadieno.

La separación de los asfaltenos y maltenos está basada en los procedimientos propuestos en los estándares: ASTM D3279-90, ASTM D4124-86. Para ello se diluyó un gramo de cada asfalto en 100 mL de n-heptano dentro de un matraz de bola fondo plano (250 mL). El matraz se colocó en una parrilla de calentamiento con agitación mecánica, y se conectó a un sistema de reflujo. Cuando el sistema llegó a los 90 °C, se mantuvo la temperatura constante durante dos horas. Fue indispensable una buena agitación para favorecer la separación de fases. Transcurridas las dos horas, se obtuvo dos fases: la parte malténica disuelta en n-heptano y la parte asfáltica insoluble en n-heptano. Posteriormente, se enfrió el sistema hasta temperatura ambiente, y se procedió a separar las dos fases mediante un embudo de separación, filtrando a vacío con un matraz Büchner-Kitasato.

Los asfaltenos, retenidos por el papel filtro, fueron lavados varias veces para eliminar rastros de solución malténica. Los matraces utilizados se enjuagaron con n-heptano para recuperar los maltenos que pudieran haberse quedado en las paredes del recipiente. Los asfaltenos fueron secados durante dos días en una estufa a 110 °C, para pesarlos posteriormente y obtener el porcentaje en peso de éstos en el asfalto.

La solución resultante de n-heptano/maltenos se volvió a introducir en el matraz de bola y se conectó a un sistema de destilación. La destilación se realizó aproximadamente a 98 °C y a presión atmosférica. De esta forma se recuperó el n-heptano, quedando en el matraz una solución concentrada de maltenos con restos de n-heptano. También se pesaron los maltenos para obtener su porcentaje en peso en el asfalto.

Cuadro 5.1. Caracterización del asfalto

	<i>Asfalto proveniente del Ajusco</i>	<i>Asfalto proveniente de Salamanca</i>
% Asfaltenos	18.2	16.9
% Maltenos	81.8	83.1

Como resultado se obtuvo que ambos asfaltos tenían casi el mismo contenido de asfaltenos y, basándose en la disponibilidad del material, se decidió ocupar el asfalto proveniente de la planta de asfalto del Ajusco para modificarlo con los polímeros comerciales utilizados en el presente trabajo.

5.2 PROPIEDADES DEL ASFALTO

Las propiedades del asfalto AC-20 utilizado fueron proporcionadas por la Secretaría de Obras y Servicios de la Planta de Asfalto del Ajusco:

Cuadro 5.2. Propiedades del asfalto AC-20 de la planta de asfalto del Ajusco

	<i>Unidad</i>	<i>Método (ASTM)</i>	<i>Valor</i>	<i>Límite</i>
Viscosidad Brookfield a 60 °C	P	D 2171	1600-2400	
Viscosidad Brookfield a 135 °C	cSt	D 2170	300	mínimo
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	1/10 mm	D 5	60	mínimo
Temperatura inflamación (COP)	°C	D 92	232	mínimo
Solubilidad en tricloroetileno	%	D 2042	99.0	mínimo

5.3. COPOLÍMEROS ESTIRENO-BUTADIENO

En el cuadro 5.3 se presentan las características principales de los polímeros modelo (polímeros con características moleculares bien definidas) utilizados en el presente trabajo. En ella se puede observar que se ocuparon polímeros cuya estructura es lineal o radial, y que existen dos distintos arreglos de copolímeros en base a su distribución monomérica: dibloque y tribloque. Los polímeros comerciales utilizados (S-1205, S-411 y S-416) son producidos por la compañía Dynasol y son distribuidos al mercado con el nombre: Solprene®. Por ejemplo, el polímero Solprene®-1205 comúnmente se conoce como S-1205. Mientras que, el polímero funcionalizado y el SBS fueron producidos experimentalmente en el laboratorio. Estos elastómeros termoplásticos, en general, proveen las propiedades mecánicas de los hules en combinación con las propiedades de procesamiento de los plásticos.

Cuadro 5.3. Características de los polímeros utilizados en la modificación del asfalto AC-20

<i>Polímero</i>	<i>S-1205</i>	<i>TXPR-2</i>	<i>S-411</i>	<i>S-416</i>	<i>SBS</i>
Estructura	lineal	lineal	radial	radial	lineal
Copolímero	dibloque estireno-butadieno (SBR)	dibloque estireno-butadieno funcionalizado con un grupo carboxilo	dibloque estireno-butadieno (SBR)	dibloque estireno-butadieno (SBR)	tribloque estireno-butadieno-estireno
% de estireno	25	20	30	30	30
% de polibutadieno (bloque)	17.5	–	28	28	–
Peso molecular, Mw	112,000	285,000	350,000	220,000	82,000
Polidispersidad, Mw/Mn	1.05	1.2	1.25	1.15	1.1

5.4. MODIFICACIÓN DEL ASFALTO

El asfalto y los copolímeros de estireno-butadieno (SBS, SBR) no son micibles, por lo tanto, para producir la mezcla de asfalto modificado se añade el polímero al asfalto caliente (≈ 180 °C); entonces, el polímero es primero solvatado (hinchado) por encima de nueve veces su volumen inicial al absorber algunos de los compuestos aromáticos y resinas ligeras del asfalto. Cuando la mezcla se enfría por debajo de los 100 °C los bloques de poliestireno endurecen y refuerzan la estructura, mientras que los bloques

de polibutadieno dan elasticidad a la misma. Existen dos procesos para obtener un asfalto modificado (Becker *et. al.*, 2001): una de ellas, es el proceso de agitación lenta, donde una propela sencilla agita la mezcla del asfalto y las migajas de polímero. La dispersión completa puede tomar alrededor de tres horas. Sin embargo, este tiempo se puede reducir si se añade el copolímero en polvo. El otro proceso de preparación utiliza un mezclador cuyo agitador se mueve rápidamente en conjunción con el proceso de agitación lento. Esto reduce el tiempo de dispersión a una hora aproximadamente.

Se obtuvieron asfaltos modificados (300 g) con los copolímeros comerciales mencionados anteriormente al 3 y al 8% en peso de polímero. Para ello se utilizó un mezclador de agitación lenta, por lo que para dispersar completamente al polímero (9 y 24 g para obtener un material con 3 y 8% en peso del polímero, respectivamente) en el asfalto se requirió de cuatro a cinco horas y de una velocidad de oscilación de 1000 rpm. Lo anterior contando el tiempo en que se agregó paulatinamente las migajas del polímero (30 min). Debido al hecho de que este tipo de materiales, en general, son sensitivos a la oxidación y degradación térmica, se debe cuidar la temperatura constantemente durante todo el proceso, evitando que ésta exceda de los 180 °C para minimizar la eliminación de los componentes volátiles presentes en el asfalto. Por ello, se utilizó un baño de aceite de motor, un termopar y un controlador para mantener la temperatura.

5.5. MUESTRAS DE ASFALTO MODIFICADO

Las muestras de asfalto modificado que se estudiaron en el presente trabajo se muestran en el cuadro 5.4. De ellas, las muestras de asfalto modificado en las que se analizó el efecto del contenido de azufre y aquéllas en las que se investigó el efecto del grado de saturación, fueron obtenidas en trabajos previos.

Cuadro 5.4. Muestras de asfalto modificado analizadas

<i>Muestra</i>	<i>Descripción</i>	
Phr-0	Asfaltos modificados con 5% en peso de S-1205 (SBR comercial)	No vulcanizado
Phr-3		3% de azufre
Phr-5		5% de azufre
Phr-7		7% de azufre
SBS-0	Asfaltos modificados con copolímero modelo de estireno-butadieno-estireno (SBS)	Sin hidrogenar
SBS-25		25% saturado
SBS-50		50% saturado
SBS-65		65% saturado
S-1205	Asfaltos modificados con 3 y 8% en peso de polímero SBR comercial	
S-411		
S-416		
TXPR-2		

5.6. PENSADO DEL ASFALTO MODIFICADO

La muestra para DMA se preparó utilizando un molde de acero para obtener las muestras rectangulares de 80 mm de longitud, 12 mm de largo y 4 mm de espesor. Cabe mencionar que se utilizó papel teflón para cubrir perfectamente el molde empleado y poder desprender con facilidad el asfalto modificado ya prensado y enfriado.

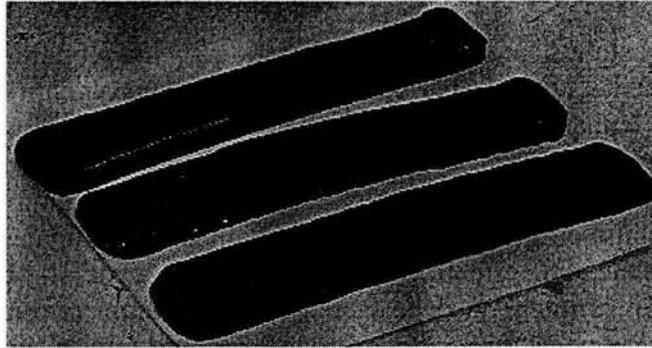


Figura 5.1 Muestras de asfalto

Para ello, primero, se calentó el asfalto modificado hasta que comenzara a fluir y se vertió dentro del molde. Una vez frío, se utilizó una prensa hidráulica (Carver Laboratory Press) a una temperatura de 60 °C y una presión de 2000 libras durante 15 minutos para que el material se amoldara perfectamente a las dimensiones del molde evitando la formación de burbujas de aire. Posteriormente, se enfrió el material durante 30 minutos y se procede a retirar la muestra usando una espátula. Entonces, la muestra queda lista para utilizarla en el analizador dinámico mecánico y obtener los datos de fluencia.

5.7. ANÁLISIS DINÁMICO MECÁNICO

5.7.1. INTRODUCCIÓN

El Analizador Mecánico Dinámico (DMA) 983 de DuPont es un instrumento que ofrece un rápido y sensible medio para obtener, por ejemplo, el módulo elástico (rigidez) y el porcentaje de deformación de un material (Sandler *et. al.*, 1998). El DMA 983 está constituido por cuatro partes principales: 1) la unidad de montaje es el sitio donde se asegura la muestra (en los brazos del equipo), 2) el horno es donde se controla la temperatura; 3) la base del DMA es donde se localiza el sistema electrónico del equipo y, 4) el accesorio para refrigeración de nitrógeno líquido.

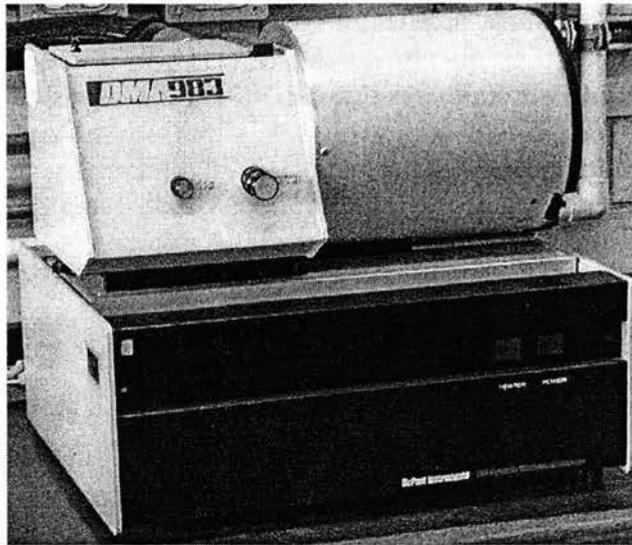


Figura 5.2 Analizador dinámico mecánico (DMA) 983 de DuPont

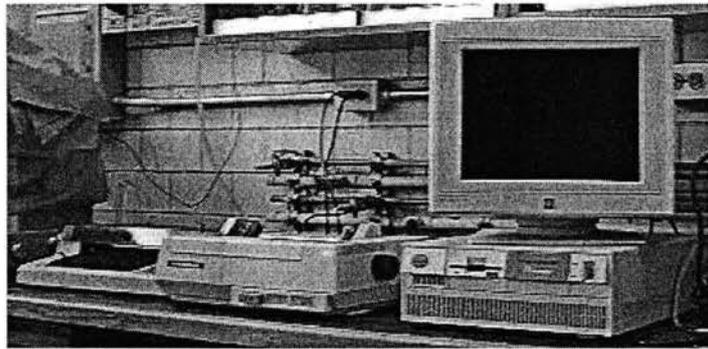


Figura 5.3 Analizador térmico 9900 con accesorios



Figura 5.4 Accesorio para refrigeración de nitrógeno líquido

En la unidad de montaje se localiza el conductor electromagnético, los pivotes de flexión y el transductor de desplazamiento variable (LVDT). El conductor electromagnético desplaza el sistema brazo-muestra mientras que el LVDT mide la posición del brazo.

El horno contiene un calentador por radiación y un sistema para la distribución del fluido refrigerante (nitrógeno líquido). Un termopar colocado cerca de la muestra mide la temperatura y transmite esta información al control electrónico localizado en la base del DMA. La muestra es asegurada en la parte final de los brazos dentro del horno.

5.7.2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN

La muestra es asegurada entre dos brazos paralelos y se le aplica un esfuerzo constante, esfuerzo oscilante o deformación constante, dependiendo del tipo de experimento. El comportamiento de la muestra al ser deformada es guardado en el software del equipo de cómputo (sistema 9900) por medio del transductor de desplazamiento variable.

Para la realización de los experimentos de fluencia-recuperación se ocupó una longitud de 32 mm, 12 mm de ancho y 4 mm de espesor.

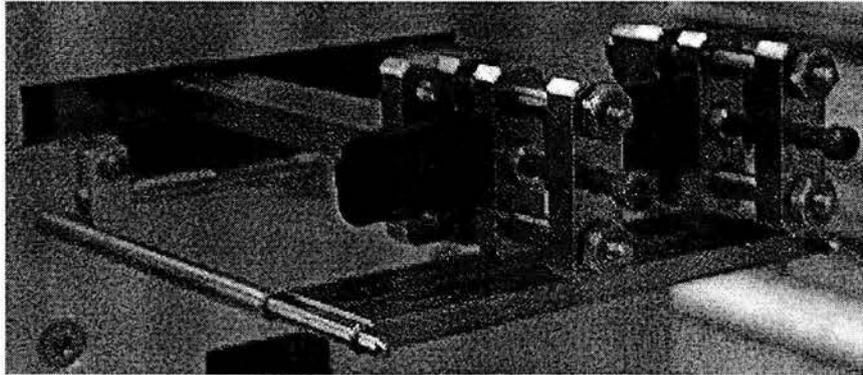


Figura 5.5 Brazos en donde se sujeta la muestra

5.7.3. MODOS DE OPERACIÓN

Este DMA permite medir cambios en las propiedades viscoelásticas de los materiales como resultado de cambios en la temperatura, frecuencia o tiempo. Existen cuatro modos de operación: frecuencia resonante, frecuencia fija, esfuerzo-relajación y fluencia.

5.7.3.1. MODO DE FLUENCIA

Este es el modo que se utilizó para obtener los datos deseados de fluencia-recuperación. En el modo de fluencia la muestra es desplazada bajo la acción de un esfuerzo constante. La posición del brazo es entonces almacenada como una función del tiempo. Posteriormente, se elimina el esfuerzo del sistema y se guarda la recuperación del material.

Los pasos que se siguieron son: 1) Se empieza a bajar la temperatura del horno media hora después de prender el DMA; 2) Se ajusta el brazo del equipo en la posición cero cuando la temperatura inicial, -20 o -15 °C, es alcanzada (aproximadamente en una hora); 3) Se enciende el motor del equipo; 4) El DMA equilibra la temperatura durante diez minutos; después, realiza la prueba de fluencia en cinco minutos; y enseguida, la prueba de recuperación en otros cinco minutos; 5) A continuación, el equipo incrementa la temperatura a -10 °C, y realiza nuevamente el paso 4; 6) Por último, se aumenta la temperatura a 0 °C y después de efectuarse el paso 4 finaliza el experimento. En el apéndice F se puede consultar los pasos previos a la realización de un experimento y el método de fluencia utilizado.

5.7.4. PRUEBAS EFECTUADAS

En cada uno de los asfaltos modificados se realizaron pruebas de fluencia-recuperación a las siguientes temperaturas: -20 o -15 °C, -10 y 0 °C. En todos los materiales estudiados se efectuó un desplazamiento inicial de 0.1 mm y en algunos casos se realizó un desplazamiento inicial de 0.05 mm y de 0.2 mm para demostrar el comportamiento lineal de los materiales analizados.

El DMA registra el desplazamiento en milímetros que sufre la muestra, por lo que para obtener el porcentaje de deformación se utiliza la ecuación (Grabowski *et. al.*, 2002): $\% \varepsilon(t) = 100(\Delta L(t)/L)$. Donde $\Delta L(t)$ es la elongación que sufrió la muestra (mm), L es la longitud inicial (32 mm) y $\varepsilon(t)$ es el porcentaje de deformación. Por ejemplo cuando ΔL es igual a 0.1 mm, el porcentaje de deformación ($\varepsilon(\%) = 100[0.1/32]$) es de 0.31 %.

RESULTADOS

6. RESULTADOS

6.1. Condición de prueba

6.1.1. Comportamiento lineal

Para poder justificar la utilización de la teoría de la viscoelasticidad lineal es necesario comprobar que los datos hayan sido obtenidos a esfuerzos pequeños, para ello se llevaron a cabo tres pruebas de fluencia a distintos esfuerzos y posteriormente se construyeron las isócronas a partir de los datos de las pruebas realizadas.

Para ello, se seleccionó uno de los asfaltos modificados analizados en el presente trabajo. Realizándose una prueba a 0.05 mm de desplazamiento inicial, otra a 0.1 mm y la última a 0.2 mm. Cada una de estas pruebas fue realizada a tres temperaturas: -20, -10 y 0 °C.

En la muestra de asfalto modificado al 3% en peso se aplicó un esfuerzo constante de 0.7701, 1.454 y 3.091 kPa para obtener un desplazamiento inicial de 0.05, 0.1 y 0.2 mm, respectivamente. Mientras que en la muestra de asfalto modificado al 8% en peso, se aplicaron los esfuerzos un esfuerzo de 0.7251, 1.342 y 2.612 kPa (Cuadro 6.1).

Cuadro 6.1. Esfuerzos aplicados sobre los asfaltos modificados con TXPR-2

Conc. polímero (TXPR-2)	3%	8%
	Esfuerzo aplicado (kPa)	
Prueba 1 (0.05 mm de desplazamiento inicial)	0.7701 (σ_1)	0.7251 (σ_1)
Prueba 2 (0.1 mm de desplazamiento inicial)	1.454 (σ_2)	1.342 (σ_2)
Prueba 3 (0.2 mm de desplazamiento inicial)	3.091 (σ_3)	2.612 (σ_3)

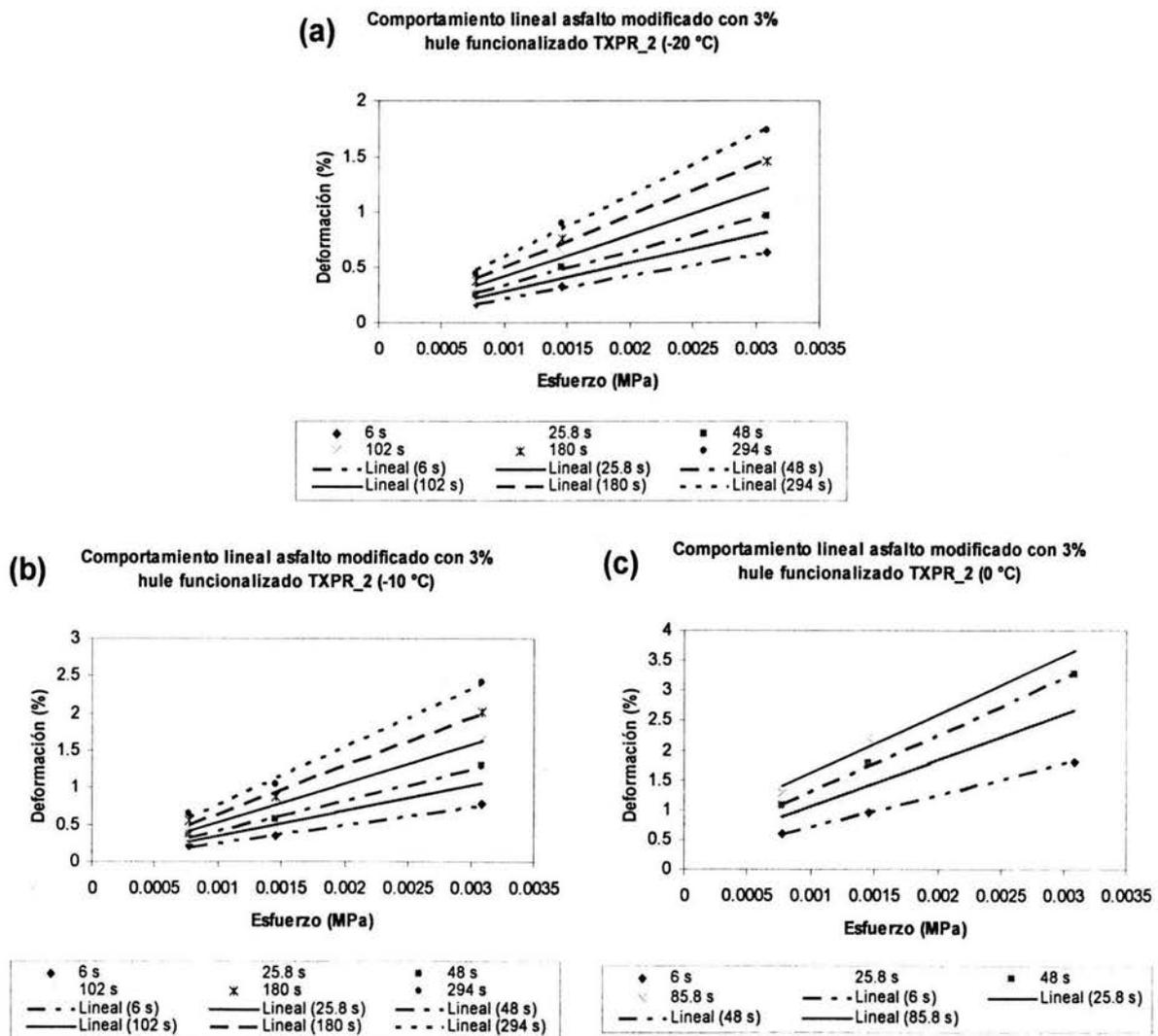
En el cuadro 6.1 se muestran los esfuerzos aplicados en cada una de las pruebas realizadas y se observa que $\sigma_3 \approx 2\sigma_2 \approx 4\sigma_1$. Para que el material estudiado tenga un comportamiento lineal la deformación resultante para cada tiempo escogido ($t_1, t_2, t_3 \dots t_6$) debe cumplir lo siguiente: $\varepsilon_3(t_i) \approx 2\varepsilon_2(t_i) \approx 4\varepsilon_1(t_i)$, donde $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ y ε_3 son las deformaciones de las pruebas 1, 2 y 3 respectivamente ($i \rightarrow 1,2,3,\dots,6$).

Cuadro 6.2. Deformación (%) obtenida a tres esfuerzos distintos para el asfalto modificado con 3% de TXPR-2 a -20 °C

σ (kPa)	0.7701	1.454	3.091
	Deformación (%)		
6 (t_1)	0.1586	0.3166	0.6328
25.8 (t_2)	0.2068	0.4178	0.8225
48 (t_3)	0.2423	0.4947	0.9634
102 (t_4)	0.3034	0.6278	1.2078
180 (t_5)	0.3663	0.7569	1.4550
294 (t_6)	0.4341	0.8956	1.7369

En el cuadro 6.2 se muestran los porcentajes de deformación para cada una de las tres pruebas efectuadas al asfalto modificado con 3% del polímero funcionalizado. Para comprobar la linealidad del material estudiado se construyen las isócronas, que son curvas a tiempo constante, de los tiempos escogidos ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_6$) a partir de los datos de fluencia, trazando la deformación contra el esfuerzo a estos tiempos. Cuando las isócronas son líneas rectas se dice que los datos de fluencia son “lineales”.

Utilizando los datos del cuadro 6.2 se trazan las isócronas, las cuales son líneas rectas, de la figura 6.1.1.a. El resto de los gráficos mostrados en las figuras 6.1.1 y 6.1.2 se construyen como se mencionó en el párrafo anterior. En ellas se muestran las isócronas trazadas para los asfaltos modificados al 3 y 8% de polímero funcionalizado y se puede ver que éstas también son líneas rectas. Por lo tanto, como los asfaltos modificados fueron probados en las mismas condiciones (esfuerzos pequeños: $\sigma_3 \approx 2\sigma_2 \approx 4\sigma_1$), es posible aplicar la teoría de la viscoelasticidad lineal para estudiar el comportamiento mecánico de dichos materiales.



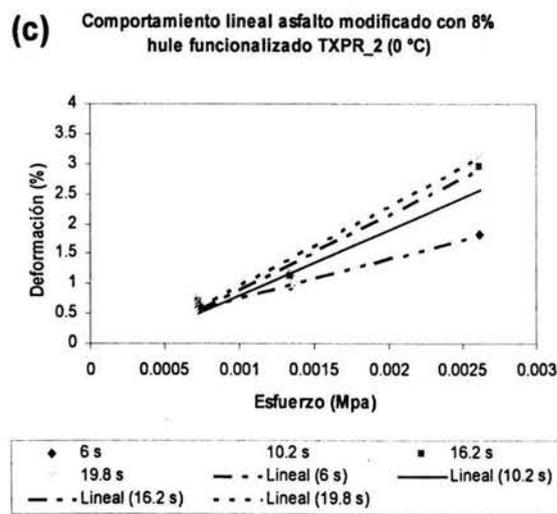
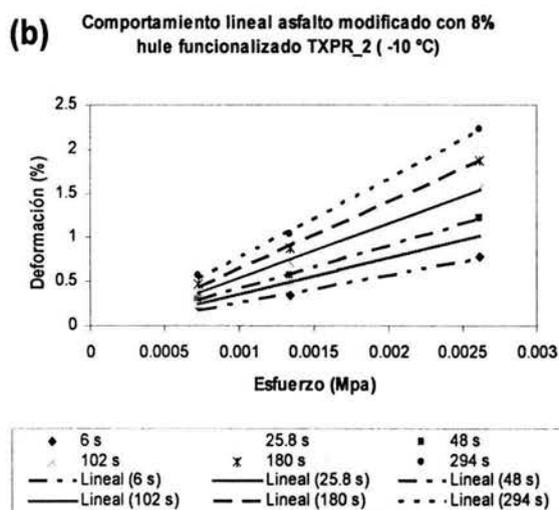
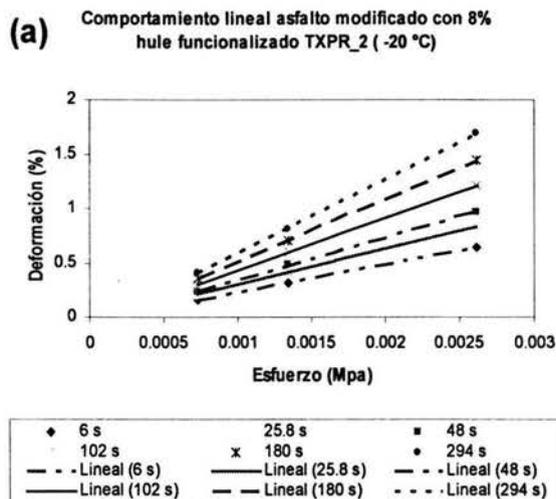


Figura 6.1.2 Isócronas a distintas temperaturas para asfalto modificado TXPR-2 (SBR funcionalizado con un grupo COOH) al 8% en peso: (a) -20 °C, (b) -10 °C y (c) 0 °C

No fue necesario realizar esta prueba a todos los asfaltos modificados, debido a que la comprobación de la viscoelasticidad lineal se hizo en muestras de asfalto modificado con los porcentajes menor (3%) y mayor (8%) de polímero, se consideró innecesario comprobar este requisito en las demás muestras de asfalto modificado, ya que en todas ellas el asfalto, por ser el componente que está en mayor proporción, contribuye mayoritariamente a las propiedades de los materiales estudiados.

6.1.2. Condiciones de prueba

En todos los asfaltos modificados analizados se les determinaron sus propiedades mecánicas (a distintas temperaturas: -15, -10, 0 °C), tales como el módulo de rigidez, la capacitancia, y la deformación (%) debida a la acción del esfuerzo aplicado. Más adelante se analizan los gráficos de cada una de estas propiedades en función del tiempo.

Las pruebas efectuadas a estos asfaltos modificados se hicieron a 0.1 mm de desplazamiento inicial; es decir, cuando comenzaba cada prueba de fluencia, el brazo móvil del DMA se movía instantáneamente 0.1 mm; y en ese momento, el equipo registraba el esfuerzo que tuvo que aplicar para poder realizar dicho desplazamiento inicial. En general, el esfuerzo aplicado sobre la muestra analizada osciló entre 1 y 4 kPa. El valor exacto depende de la rigidez del material estudiado.

Cuadro 6.3. Esfuerzos aplicados por el DMA en cada material estudiado

Asfalto modificado	Comentario	Esfuerzo (kPa)
Phr-0	No vulcanizado	4.14
Phr-3	3% de azufre	3.806
Phr-5	5% de azufre	3.469
Phr-7	7% de azufre	3.125
SBS-0	Sin hidrogenar	0.6629
SBS-25	25% saturado	1.9
SBS-50	50% saturado	1.733
SBS-65	65% saturado	2.531
TXPR-2	Lineal, 3 % de polímero	1.454
S-1205		1.724
S-411	Radial, 3 % de polímero	2.625
S-416		2.275
TXPR-2	Lineal, 8 % de polímero	1.342
S-1205		0.6854
S-411	Radial, 8 % de polímero	1.625
S-416		1.489

En el cuadro 6.3 se muestran los esfuerzos que el DMA aplicó a cada material estudiado para que el desplazamiento inicial del brazo del equipo, a la temperatura inicial (la más baja), fuera de 0.1 mm. En este cuadro se observa que un aumento en el porcentaje de vulcanización disminuye ligeramente el esfuerzo aplicado, por ejemplo en el material con 3% de azufre (Phr-3) fue aplicado un esfuerzo 8% menor que en el asfalto modificado no vulcanizado (Phr-0) y, en el que tenía 7% de azufre (Phr-7) la disminución fue de casi 10% con respecto al material con 5% de azufre (Phr-5). Parece que entre más contenido de azufre haya en el asfalto modificado, se obtiene un material más suave. Por otro lado se visualiza que el aumento en el porcentaje de hidrogenación incrementa el esfuerzo aplicado (el esfuerzo aplicado al asfalto modificado con SBS-65 es casi 2 kPa más grande que el del material no saturado), en otras palabras, al aumentar la hidrogenación del asfalto modificado el material resultante se vuelve más rígido. El efecto de la concentración de polímero comercial indica que, a mayor concentración de polímero, el material es más suave. Más adelante, se apoya esta afirmación al analizar otras propiedades (módulo de rigidez y capacitancia).

6.2. Asfalto modificado con 5% del polímero comercial S-1205, vulcanizado

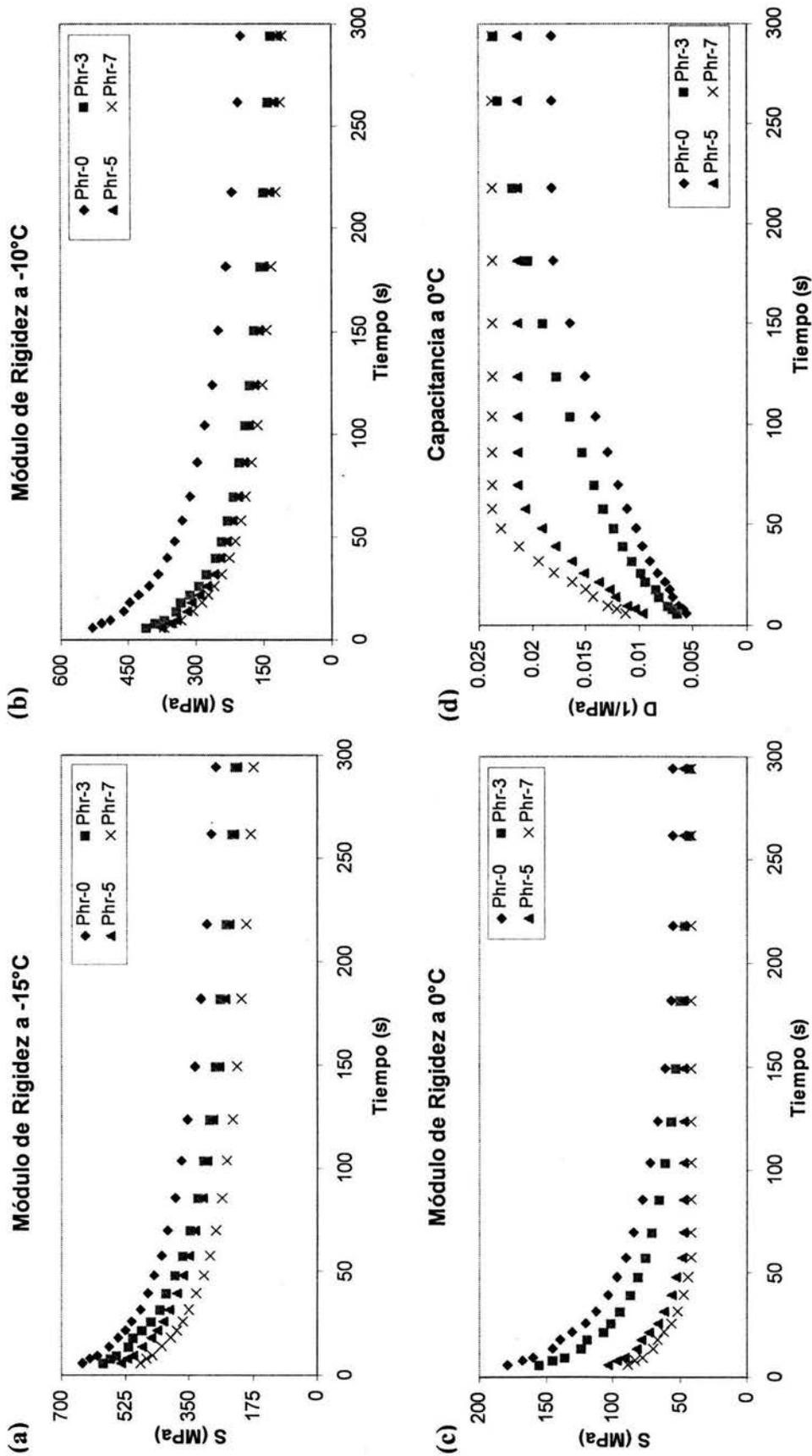


Figura 6.2.1. Módulos de rigidez de asfaltos modificados con S-1205 al 5% en peso y con distintos grados de vulcanización, (a) -15 °C, (b) -10 °C, (c) 0 °C; y (d) capacitancias a 0 °C para los mismos materiales

En la figura 6.2.1 se observa el módulo de rigidez de los asfaltos modificados con 5% del polímero S-1205 y con distintos grados de vulcanización a tres temperaturas: -15, -10 y 0 °C. Además, dado que la capacitancia es el inverso del módulo de rigidez, se muestra como ejemplo los valores de ésta a 0 °C (las curvas de la capacitancia a -15 y -10 °C pueden consultarse en el apéndice B). Estas curvas se asemejan a una función exponencial descendente para el módulo de rigidez y ascendente para la capacitancia. A partir de estos datos, se construyeron las curvas maestras que se muestran en la figura 6.2.2.

En todos los gráficos se puede ver que el material no vulcanizado presentó los módulos de rigidez más grandes al iniciar la prueba de fluencia (casi 700, 600 y 200 MPa a -15, -10 y 0 °C respectivamente). En cambio, el asfalto modificado con la mayor cantidad de azufre (7 %) dio módulos de rigidez (al inicio de la prueba de fluencia) cercanos a 525, 375 y 100 MPa a -15, -10 y 0 °C. Entonces el material no vulcanizado es 25% más rígido, a la temperatura menor (-15 °C) que el asfalto modificado con más azufre. Este mismo análisis dio 35 y 50 % a -10 y 0 °C respectivamente.

Estos módulos comienzan a descender paulatinamente (función exponencial descendente) y al finalizar la prueba de fluencia los módulos de rigidez del material no vulcanizado fueron de 265, 200 y 60 MPa a -15, -10 y 0 °C respectivamente. El asfalto modificado con el mayor contenido de azufre (7%) tuvo módulos de 180, 100 y 40 MPa a -15, -10 y 0 °C. En este caso el material no vulcanizado dio módulos 30, 50 y 35% más grandes que su homólogo con mayor cantidad de azufre.

Se puede deducir que conforme se aumenta la cantidad de azufre, el módulo de rigidez disminuye considerablemente (35 % en promedio entre el material no vulcanizado y el que tiene 7% de azufre), aumentando la capacitancia del material; es posible que la causa de este fenómeno sea la mayor cantidad de interacciones (entrecruzamiento) del azufre con el polímero y el asfalto. Esta disminución del módulo de rigidez se hace más notable a -10 y 0 °C, lo cual se puede deber a la mayor movilidad que hay entre los segmentos del polímero en el asfalto al aumentar la temperatura.

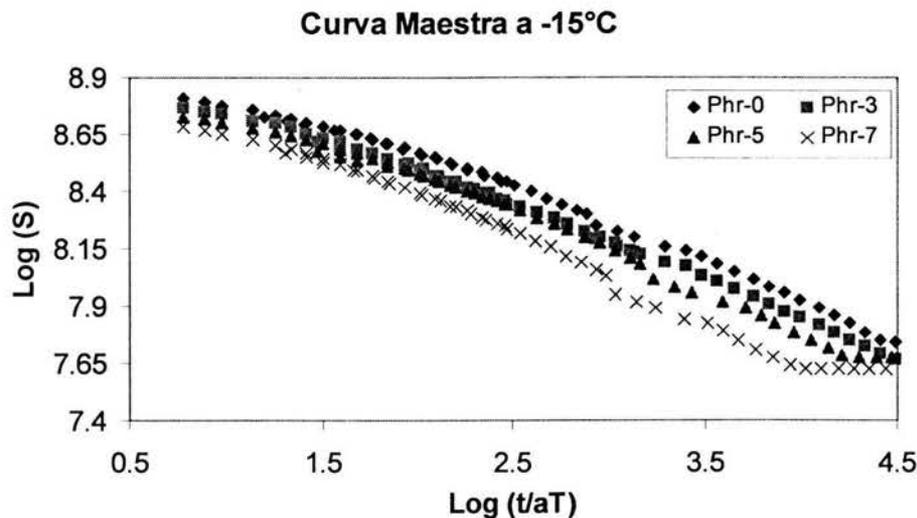


Figura 6.2.2. Curvas maestras de los asfaltos modificados con S-1205 al 5% en peso y distintos grados de vulcanización

De acuerdo con la figura 6.2.1 el material más flexible es el asfalto modificado con 7% de azufre (Phr-7). Por ejemplo, a -15 °C y tiempos cercanos a cero, el asfalto modificado sin vulcanizar tiene módulos de rigidez altos (alrededor de 700 MPa), mientras que el asfalto modificado con 7% de azufre sólo posee módulos de rigidez iniciales de casi 525 MPa. En las pruebas a -10 y 0 °C esta disminución es menos pronunciada.

Para construir la curva maestra del módulo de rigidez de cada material analizado, primero se seleccionó la temperatura menor (-15 °C) como la temperatura de referencia. Después se trazan las curvas del módulo de rigidez (a -15, -10 y 0 °C), en escala logarítmica, en función del tiempo. Posteriormente se realiza el corrimiento horizontal de dichas curvas para obtener el logaritmo del factor de corrimiento ($\text{Log}[a_T]$). A continuación se sustituyeron los valores obtenidos del $\text{Log}[a_T]$, a -10 y 0 °C, en la ecuación WLF (ver sección 3.4.4.), para obtener un sistema de dos ecuaciones: 1) $5C_1 + (\text{Log}[a_{T(-10\text{ °C})}])C_2 + 5\text{Log}[a_{T(-10\text{ °C})}] = 0$ y 2) $15C_1 + (\text{Log}[a_{T(0\text{ °C})}])C_2 + 15\text{Log}[a_{T(0\text{ °C})}] = 0$; y calcular las constantes C_1 y C_2 . Por último, se construyó la curva maestra, la cual es un gráfico del logaritmo de la propiedad analizada (módulo de rigidez) contra el tiempo reducido (t/a_T).

Cuadro 6.4. Factores de corrimiento ($\text{Log}[a_T]$), C_1 y C_2 para los asfaltos modificados vulcanizados

Parámetro	Phr-0	Phr-3	Phr-5	Phr-7
$\text{Log}(a_T)$ a -15 °C	0	0	0	0
$\text{Log}(a_T)$ a -10 °C	-0.420	-0.699	-0.699	-0.523
$\text{Log}(a_T)$ a 0 °C	-2.155	-2.155	-2.456	-2.260
C_1	-2.02	-51.94	-9.56	-3.42
C_2	-29.08	-376.55	-73.41	-37.71

Las curvas maestras de la figura 6.2.2 son curvas del módulo de rigidez, en escala logarítmica, que disminuyen lentamente desde casi 1×10^9 MPa ($\text{Log}[9]$) hasta 5×10^7 MPa ($\text{Log}[7,7]$). Esto nos indica la forma en que el módulo de rigidez disminuye conforme transcurre el tiempo. En la figura se puede predecir el comportamiento que tendría cada material al someterlo a un esfuerzo constante durante tiempos mucho más grandes que los correspondientes a cada prueba realizada. Por ejemplo, para el material con 5% de azufre, la curva termina casi en 84,000 segundos o 23.3 horas ($\text{Log}(t/a_T) \approx 4.9$). En ese tiempo, el módulo de rigidez caería de entre 500 y 700 MPa hasta 50 MPa; lo cual es poco considerando el tiempo que el material estaría sometido a un esfuerzo constante.

En la figura 6.2.3 se muestran el porcentaje de deformación en función del tiempo a las temperaturas (-15, -10 y 0 °C) en las que se realizaron la prueba de fluencia y la prueba de recuperación. Cada una de estas pruebas duraron 300 segundos (ambas 600 s). En la figura 6.2.3.a se puede observar que todos los materiales se deformaron 0.3 % al inicio de la prueba de fluencia, sin embargo el material que se deformó hasta en un 0.9 % fue el asfalto modificado con la mayor cantidad de azufre (7%) y el que se deformó menos (0.7%) fue el material no vulcanizado. Al terminar la prueba de recuperación, todos los materiales tuvieron una deformación irreversible en el intervalo de 0.3 – 0.2%. A esta temperatura, el comportamiento mecánico de estos materiales es semejante debido a que el asfalto se mueve fácilmente ($T_g \approx -30\text{ °C}$), el poliestireno está rígido ($T_g \approx 100\text{ °C}$) y el movimiento del polibutadieno ($T_g \approx -100\text{ °C}$) se ve reducido gracias al impedimento que tiene dentro de la matriz polimérica.

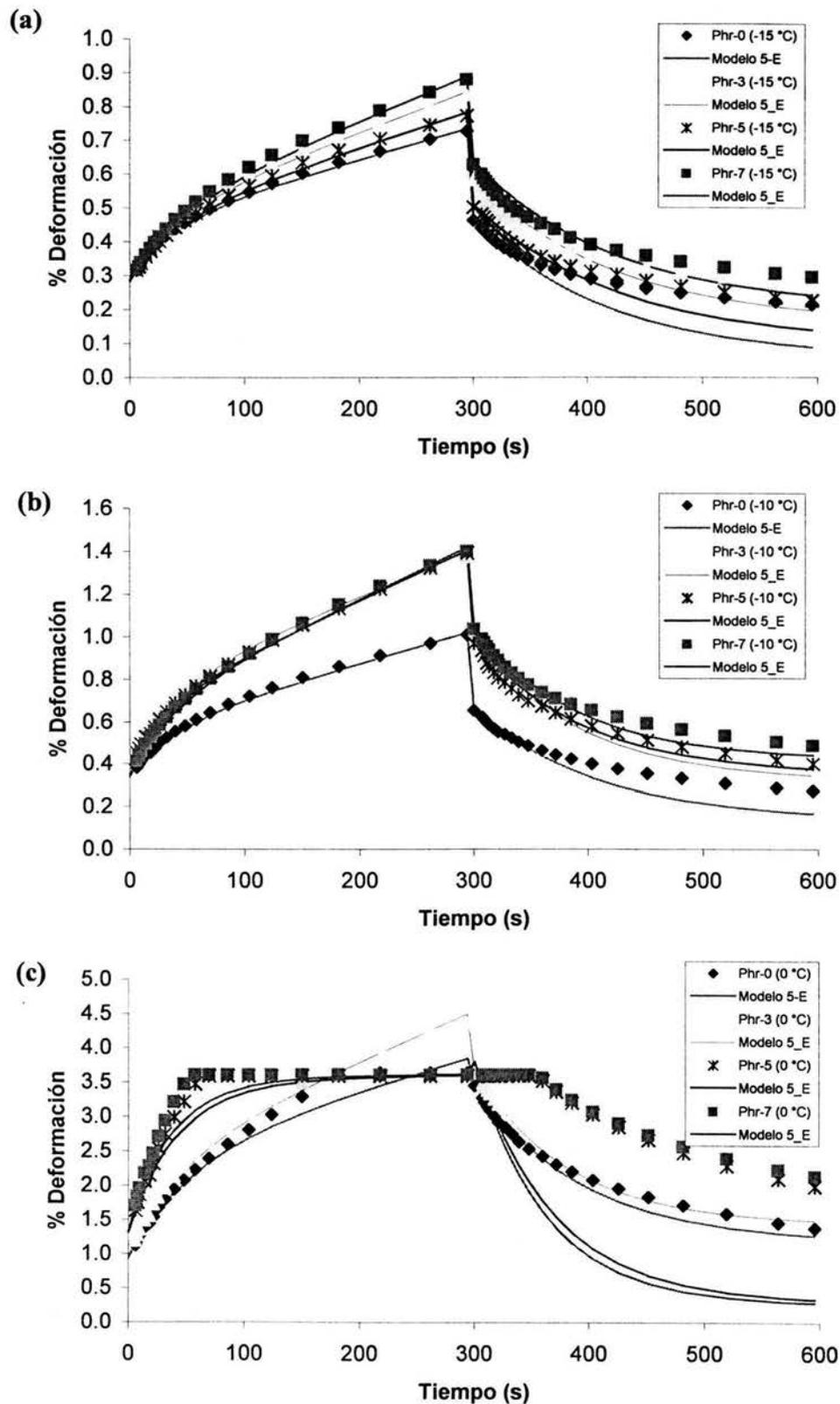


Figura 6.2.3. Porcentaje de deformación en función del tiempo (pruebas de fluencia y recuperación) de los asfaltos modificados con S-1205 al 5% en peso y distintos grados de vulcanización, (a) -15 °C, (b) -10 °C y (c) 0 °C

A $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 6.2.3.b) existe una mayor deformación en los materiales con azufre con respecto al asfalto modificado sin azufre. Este último tuvo una deformación máxima de 1 %, mientras que para el resto de los asfaltos modificados ésta fue de 1.4%. A esta temperatura, la deformación irreversible tuvo una mayor diferencia entre el asfalto modificado con la mayor cantidad de azufre (0.5 %) y el que no tenía este elemento (0.3%). Aquí es más visible la diferencia en la deformación entre los materiales con azufre y el que no está vulcanizado. El azufre aun no se mueve fácilmente a esta temperatura, por lo que no se aprecia una variación en la deformación de los materiales con 3, 5 y 7% de este elemento.

En la figura 6.2.3.c (comportamiento a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) se puede ver que el material con 3% de azufre fue el que presentó la mayor deformación (4.5%) y al finalizar la prueba de recuperación tuvo una deformación irreversible de 2%. El resto de los materiales se deformaron hasta 3.5% y la deformación irreversible para los asfaltos modificados con 5 y 7% de azufre fue 2.2% (estos materiales dejaron de deformarse como a 60 segundos de haber iniciado la prueba de fluencia) y, para el material no vulcanizado fue de 1.5%.

En todos los casos (-15 , -10 y $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) el asfalto modificado no vulcanizado fue el que se deformó menos y por lo mismo, tuvo deformaciones irreversibles más pequeñas. Pero este material y el que tenía 3 % de azufre recuperaron 2% de su máxima deformación a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los asfaltos modificados con 5 y 7% de azufre tienen más entrecruzamientos entre las cadenas del polímero, por lo que después de un tiempo pequeño (60 s) estos materiales alcanzaron la máxima deformación posible al ser sometidos al esfuerzo constante y, tardan alrededor de 60 segundos en comenzar a recuperarse.

De lo visto hasta el momento, se puede decir que el asfalto modificado con 7% de azufre puede ser una buena alternativa para usarlo, por ejemplo, en pavimentación. Al ser un material más flexible que el asfalto, puede resistir cargas más grandes a bajas temperaturas y por ende, ser más resistente a la ruptura.

6.3. Asfalto modificado con SBS, hidrogenado

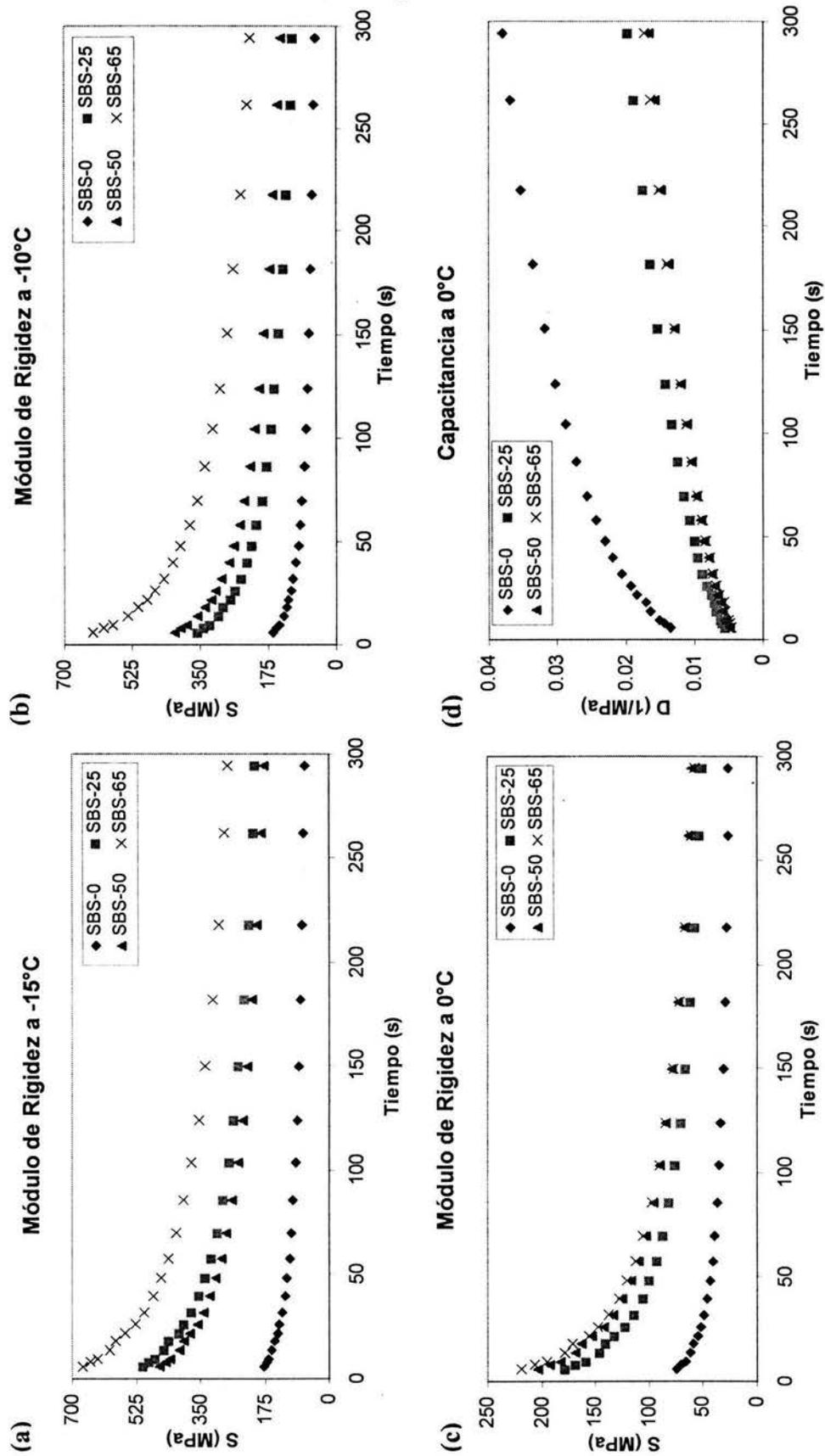


Figura 6.3.1. Módulos de rigidez de asfaltos modificados con SBS y con distintos porcentajes de hidrogenación, (a) -15 °C, (b) -10 °C, (c) 0 °C; y (d) capacitancias a 0 °C para los mismos materiales

En la figura 6.3.1 se muestran los datos (prueba de fluencia), obtenidos a tres temperaturas: -15, -10 y 0 °C, del módulo de rigidez de los asfaltos modificados con SBS y con distintos grados de hidrogenación o saturación. Como ejemplo, también se puede ver la capacitancia de estos materiales a 0°C (los resultados de esta propiedad a -15 y -10 °C se pueden consultar en el apéndice B. Además, a partir de estos datos experimentales se obtuvieron las respectivas curvas maestras (Figura 6.3.2).

La variación en el módulo de rigidez entre -15 y -10 °C apenas es apreciable en la figura 6.3.1, sin embargo, a 0 °C éste disminuye considerablemente. En estos gráficos se puede apreciar que el asfalto modificado con 65% de saturación es el material que posee los mayores módulos de rigidez (700, 640 y 225 MPa a -15, -10 y 0 °C) al iniciar la prueba de fluencia, los asfaltos modificados 25 y 50 % saturados tuvieron módulos semejantes (en los intervalos 525 – 465, 410 – 350, 210 – 185 MPa a -15, -10 y 0 °C) y, el material no hidrogenado presentó los módulos de rigidez más pequeños (175, 175, 80 MPa a -15, -10 y 0 °C respectivamente). Entonces el material 65 % saturado es 75, 73 y 64% más rígido que el asfalto modificado no hidrogenado a .15, .10 y 0 °C, respectivamente; por lo que existe un incremento muy grande en el módulo de rigidez al aumentar el grado de saturación o porcentaje de hidrogenación.

Estos módulos descienden gradualmente (función exponencial descendente) y al concluir la prueba de fluencia éstos descienden, a -15 y -10 °C, hasta 290, 230, 220 y 80 MPa en los materiales 65, 50, 25 y 0% saturados, respectivamente. A 0 °C, el módulo de rigidez de los materiales con algún porcentaje de saturación desciende hasta 50 MPa y, el del material no hidrogenado disminuye hasta 30 MPa.

Entonces conforme se aumenta el porcentaje de saturación, el módulo de rigidez se incrementa considerablemente (70 % en promedio entre el material no saturado y el que está 65% hidrogenado); es posible que la causa de este fenómeno sea la mayor cantidad de interacciones (puentes de hidrógeno) entre el polímero y el asfalto.

Para construir la curva maestra del módulo de rigidez de estos materiales se seleccionó la temperatura menor (-15 °C) como la temperatura de referencia y se utilizó la ecuación WLF (ver sección 3.4.4.), utilizando el logaritmo de los factores de corrimiento ($\text{Log}[a_T]$) a -10 y 0 °C para obtener los valores de C_1 y C_2 resolviendo el sistema de ecuaciones: 1) $5C_1 + (\text{Log}[a_{T(-10^\circ\text{C})}])C_2 + 5\text{Log}[a_{T(-10^\circ\text{C})}] = 0$ y 2) $15C_1 + (\text{Log}[a_{T(0^\circ\text{C})}])C_2 + 15\text{Log}[a_{T(0^\circ\text{C})}] = 0$.

Cuadro 6.5. Factores de corrimiento ($\text{Log}[a_T]$), C_1 y C_2 para los asfaltos modificados hidrogenados

Parámetro	SBS-0	SBS-25	SBS-50	SBS-65
$\text{Log}(a_T)$ a -15 °C	0	0	0	0
$\text{Log}(a_T)$ a -10 °C	-0.268	-0.678	-0.347	-0.292
$\text{Log}(a_T)$ a 0 °C	-1.569	-1.796	-1.523	-1.959
C_1	-1.10	10.23	-2.19	-1.06
C_2	-25.51	70.46	-36.60	-23.09

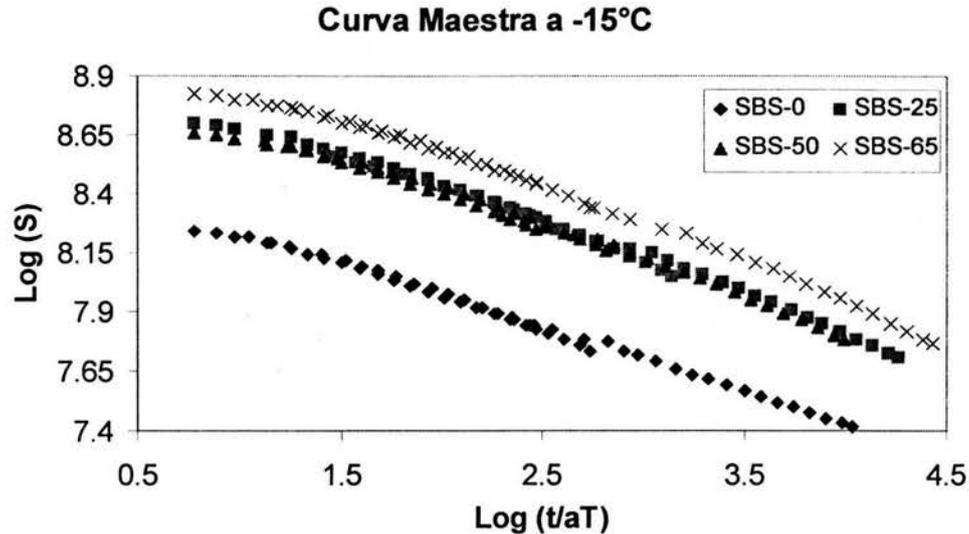


Figura 6.3.2. Curvas maestras de los asfaltos modificados con SBS y distintos porcentajes de hidrogenación

Las curvas maestras de la figura 6.3.2 son curvas del módulo de rigidez, en escala logarítmica, que disminuyen lentamente desde casi 1×10^9 MPa ($\text{Log}[9]$) hasta 2.5×10^7 MPa ($\text{Log}[7.4]$). En la figura se puede predecir el comportamiento que tendría cada material al someterlo a un esfuerzo constante durante tiempos mucho más grandes que los correspondientes a cada prueba realizada. Por ejemplo, la curva maestra del material más rígido (asfalto modificado 65% hidrogenado) es la única que se acerca a valores del tiempo de casi 27,000 segundos o 7.5 horas ($\text{Log}(t/a_T) \approx 4.5$).

A pesar de que las mejores propiedades, dependiendo del tipo de aplicación, las tiene el asfalto modificado 65% hidrogenado, cualquiera de los otros materiales hidrogenados tienen mejores propiedades (para utilizarlos en pavimentación), tal como el módulo de rigidez, que el material sin hidrogenar. Un asfalto modificado e hidrogenado, al estar mucho más saturado que un material sin hidrogenar, posee menor cantidad de dobles enlaces y resiste durante más tiempo la acción oxidante del oxígeno (la cual produce algunos grupos funcionales como las cetonas y los ácidos carboxílicos que favorecen el envejecimiento del material), prolongando el tiempo de vida del mismo.

En la figura 6.3.3 se muestran el porcentaje de deformación en función del tiempo a las temperaturas (-15, -10 y 0 °C) en las que se realizaron la prueba de fluencia y la prueba de recuperación. Cada una de estas pruebas duraron 300 segundos (ambas 600 s). A continuación se trata de explicar el efecto del grado de saturación en estos materiales.

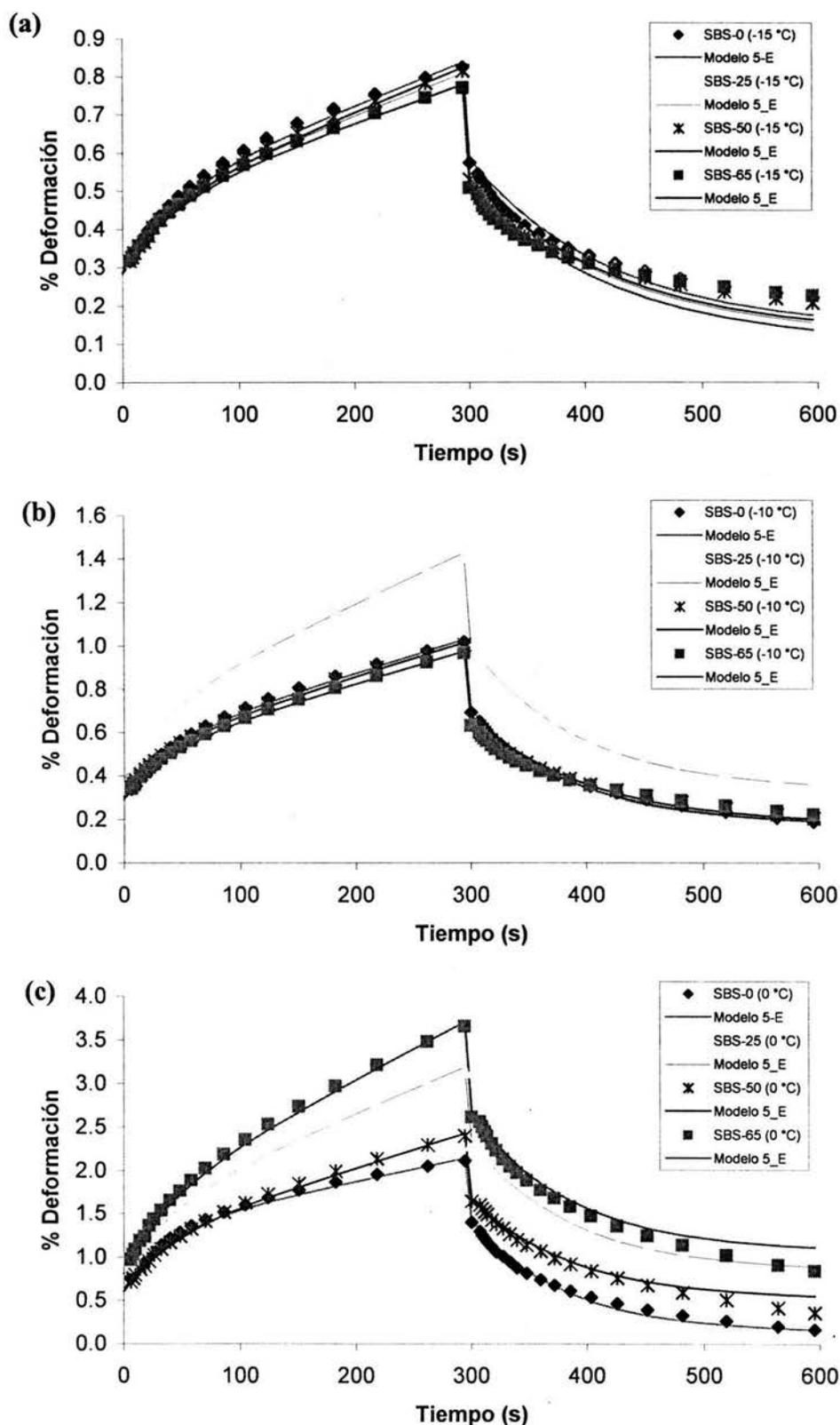


Figura 6.3.3. Porcentaje de deformación en función del tiempo (pruebas de fluencia y recuperación) de los asfaltos modificados con SBS y distintos porcentajes de hidrogenación, (a) -15 °C, (b) -10 °C y (c) 0 °C

En la figura 6.3.3.a se puede observar que todos los materiales se deformaron 0.3 % al inicio de la prueba de fluencia, llegando a deformarse hasta un 0.85%. Al terminar la prueba de recuperación, todos los materiales tuvieron una deformación irreversible de 0.2%. A esta temperatura, el comportamiento mecánico de estos materiales es semejante debido a que el asfalto se mueve fácilmente ($T_g \approx -30 \text{ }^\circ\text{C}$), el poliestireno está rígido ($T_g \approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$) y el movimiento del polibutadieno ($T_g \approx -100 \text{ }^\circ\text{C}$) se ve reducido gracias al impedimento que tiene dentro de la matriz polimérica, entonces son las propiedades del asfalto las que se manifiestan a baja temperatura.

A $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 6.3.3.b) se observa que el material que tuvo las mayor deformación fue el asfalto modificado 25% hidrogenado. Este último tuvo una deformación máxima de 1.2 %, mientras que para el resto de los materiales ésta fue de 1%. Mientras que la deformación irreversible fue de 0.4% para el asfalto modificado 25% hidrogenado y de 0.2% para los otros materiales. A esta temperatura aun no es muy clara la influencia del grado de hidrogenación en las propiedades mecánicas de estos materiales.

En la figura 6.3.3.c (comportamiento a $0 \text{ }^\circ\text{C}$) se muestra que la mayor deformación (3.8%) la tuvo el material 65% hidrogenado y al finalizar la prueba de recuperación éste presentó una deformación irreversible de 0.8%. El resto de los materiales se deformaron hasta 3, 2.4 y 2.1% para los hidrogenados al 25, 50 y 0%, respectivamente. Estos dos últimos materiales (50 y 0% saturados) tuvieron deformaciones irreversibles muy semejantes (menor a 0.3%), y los asfaltos modificados 65 y 25% hidrogenados presentaron deformaciones irreversibles de 0.8%.

El polímero con distintos grados de saturación comienza a influir ligeramente en el módulo de rigidez de los materiales analizados a $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ y, a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ se aprecia mejor el efecto que provoca la hidrogenación del polímero modificador. Entre más saturado esté el polímero, la deformación será mayor. Aunque cuando la parte saturada del polímero constituye el 50% del mismo, el material se deforma un poco más que el asfalto modificado no hidrogenado, pero mucho menos que los otros materiales.

El asfalto modificado con 50% de saturación puede ser un excelente material para utilizarlo en pavimentación, ya que se deforma alrededor de 0.3% más que el material no hidrogenado y tiene módulos de rigidez dos veces más grandes que este último.

6.4. Asfalto modificado con polímeros comerciales o funcionalizados

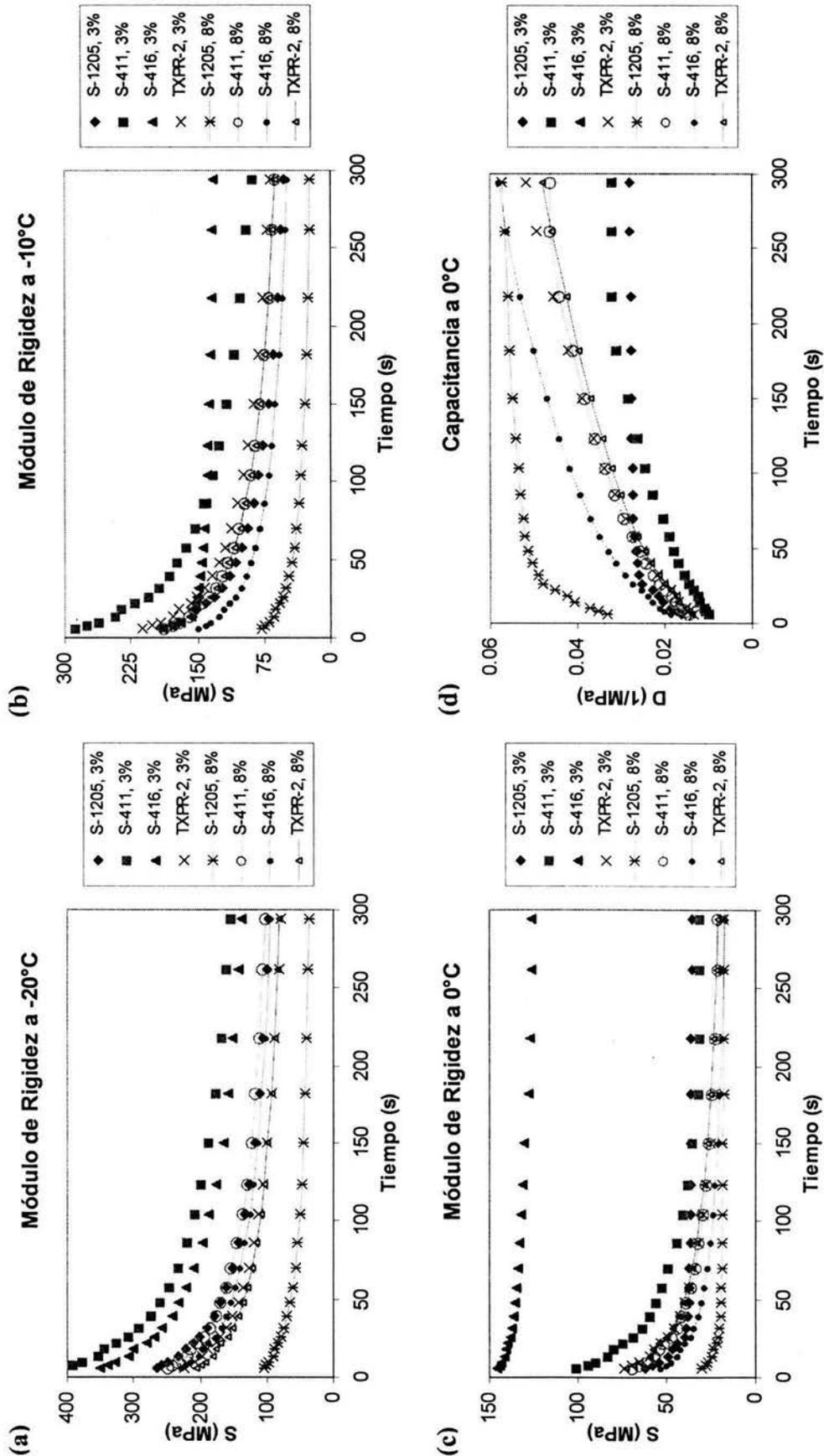


Figura 6.4.1. Módulos de rigidez de asfaltos modificados con 3 u 8% de polímero comercial o funcionalizado, (a) -20 °C, (b) -10 °C, (c) 0 °C; y (d) capacitancias a 0 °C para los mismos materiales

Los módulos de rigidez de los asfaltos modificados con 3 y 8% en peso de polímero SBR comercial o funcionalizado con un grupo COOH (al final de la cadena polimérica) se muestran en la figura 6.4.1. Las pruebas de fluencia fueron efectuadas a tres temperaturas: -20, -10 y 0 °C. En esta figura, a manera de ejemplo, se observa la capacitancia de estos materiales a 0 °C (esta propiedad a -20 y -10 °C puede consultarse en el apéndice B). Las curvas maestras de cada una de las propiedades mecánicas descritas fueron construidas a la temperatura más baja (-20 °C) a partir de los datos experimentales obtenidos en cada prueba de fluencia (Figura 6.4.2).

En general, se puede observar que los asfaltos modificados al 8% en peso de polímero poseen módulos de rigidez menores que los materiales análogos modificados al 3%. Por ejemplo, el asfalto modificado con el polímero S-1205 al 3% posee módulos de rigidez (280, 200 y 70 MPa a -20, -10 y 0 °C) por lo menos dos veces mayores que el asfalto modificado con el mismo polímero pero al 8% (100, 75 y 35 MPa a -20, -10 y 0 °C) al iniciar la prueba de fluencia. En cambio, el material con 3% de polímero funcionalizado tiene propiedades casi idénticas a su homólogo al 8%.

Los materiales con una mayor concentración de polímero tienen módulos de rigidez menores que aquéllos con mínima cantidad de polímero debido, principalmente, a la mayor cantidad de polibutadieno presente en la matriz asfalto-polímero. El polibutadieno le da las propiedades elásticas a la mezcla, volviéndose ésta más flexible.

Los materiales modificados con polímeros SBR radiales poseen módulos de rigidez más grandes que los modificados con SBR lineales, por ejemplo, al inicio de la prueba de fluencia el material más rígido es el asfalto modificado con S-411 al 3% (400, 300 y 100 MPa a -20, -10 y 0 °C), seguido por la mezcla asfalto-polímero S-416 al 3% (350, 220 y 150 MPa a -20, -10 y 0 °C). En cambio, el material más flexible es el asfalto modificado con el polímero lineal S-1205 al 8%. Entonces, los materiales modificados con polímeros lineales son más flexibles gracias a la mayor movilidad existente en los segmentos del polímero. Los materiales modificados con polímeros radiales poseen una mayor cantidad de interacciones entre los segmentos del polímero, por lo que estos asfaltos modificados son más rígidos. El asfalto modificado con el polímero funcionalizado posee propiedades intermedias, no es ni el más rígido, ni el más flexible.

Estos módulos descienden gradualmente (función exponencial descendente) y al concluir la prueba de fluencia éstos descienden hasta 150, 130, 100 y 80 MPa a -15 °C y 100, 125, 55 y 25 MPa a -10 °C, en los materiales con 3% de S-411, S-416, S-1205 y TXPR-2, respectivamente. Al terminar la prueba de fluencia, todos los materiales (excepto el que tiene 3% de S-416: 125 MPa) tuvieron módulos de rigidez dentro del intervalo 40 – 20 MPa a 0 °C.

Para construir la curva maestra del módulo de rigidez de estos materiales se seleccionó la temperatura menor (-20 °C) como la temperatura de referencia y se utilizó la ecuación WLF (ver sección 3.4.4.), utilizando el logaritmo de los factores de corrimiento ($\text{Log}[a_T]$) a -10 y 0 °C para obtener los valores de C_1 y C_2 resolviendo el sistema de ecuaciones: 1) $10C_1 + (\text{Log}[a_{T(-10\text{ °C})}])C_2 + 10\text{Log}[a_{T(-10\text{ °C})}] = 0$ y 2) $20C_1 + (\text{Log}[a_{T(0\text{ °C})}])C_2 + 20\text{Log}[a_{T(0\text{ °C})}] = 0$.

Cuadro 6.6. Factores de corrimiento ($\text{Log}(a_T)$), C_1 y C_2 para los asfaltos modificados con los SBR

Concentración polímero	Parámetro	S-1205	TXPR-2	S-411	S-416
3%	$\text{Log}(a_T)$ a $-20\text{ }^\circ\text{C}$	0	0	0	0
	$\text{Log}(a_T)$ a $-10\text{ }^\circ\text{C}$	-0.658	-0.268	-0.658	-0.854
	$\text{Log}(a_T)$ a $0\text{ }^\circ\text{C}$	-2.097	-1.854	-2.155	-2.222
	C_1	-1.77	-0.38	-1.69	-3.69
	C_2	-36.85	-24.07	-35.69	-53.23
8%	$\text{Log}(a_T)$ a $-20\text{ }^\circ\text{C}$	0	0	0	0
	$\text{Log}(a_T)$ a $-10\text{ }^\circ\text{C}$	-0.569	-0.301	-0.658	-0.854
	$\text{Log}(a_T)$ a $0\text{ }^\circ\text{C}$	-1.854	-1.824	-2.155	-2.398
	C_1	-1.47	-0.46	-1.69	-2.97
	C_2	-35.89	-25.42	-35.69	-44.75

Las curvas maestras de la figura 6.4.2 son curvas del módulo de rigidez, en escala logarítmica, que disminuyen lentamente desde casi 4×10^8 MPa ($\text{Log}[8.6]$) hasta 1.7×10^7 MPa ($\text{Log}[7.23]$), con excepción del asfalto modificado con 3% del polímero S-416 (el módulo de rigidez de este material deja de disminuir a partir de $\text{Log}(t/a_T) \approx 2$). En la figura se puede predecir el comportamiento que tendría cada material al someterlo a un esfuerzo constante durante tiempos mucho más grandes que los correspondientes a cada prueba realizada. Las curvas maestras de la mayoría de los materiales analizados en esta sección nos indican que éstos pueden ser sometidos a la acción de un esfuerzo constante durante tiempos de casi 42,000 segundos o 11.5 horas ($\text{Log}(t/a_T) \approx 4.6$). El material que resiste durante más tiempo (alrededor de 73,500 segundos o 20.4 horas [$\text{Log}(t/a_T) \approx 4.87$]) la aplicación de un esfuerzo es el asfalto modificado con S-416 al 8%. La flexibilidad de este material permite este fenómeno.

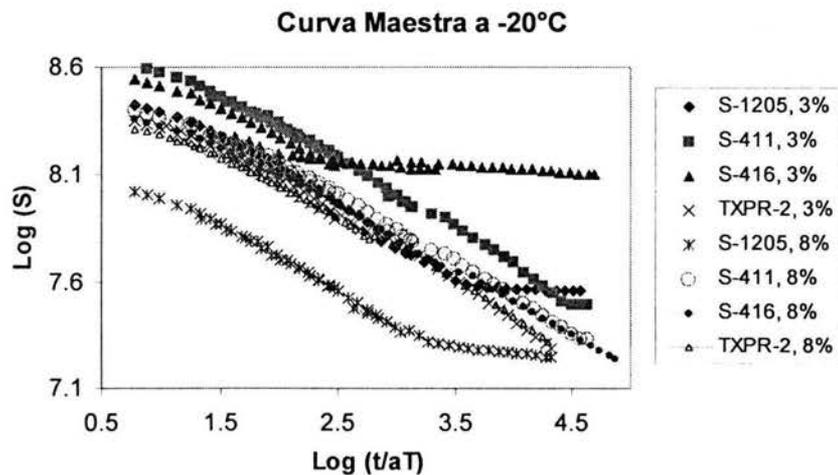


Figura 6.4.2. Curvas maestras de los asfaltos modificados con 3 u 8% de polímero comercial o funcionalizado

En la figura 6.4.3 se muestran el porcentaje de deformación en función del tiempo a las temperaturas (-20 , -10 y $0\text{ }^\circ\text{C}$) en las que se realizaron la prueba de fluencia y la prueba de recuperación para los asfaltos modificados con polímeros lineales. Cada una de estas pruebas duraron 300 segundos (ambas 600 s). A continuación se trata de explicar el efecto del peso molecular en estos materiales.

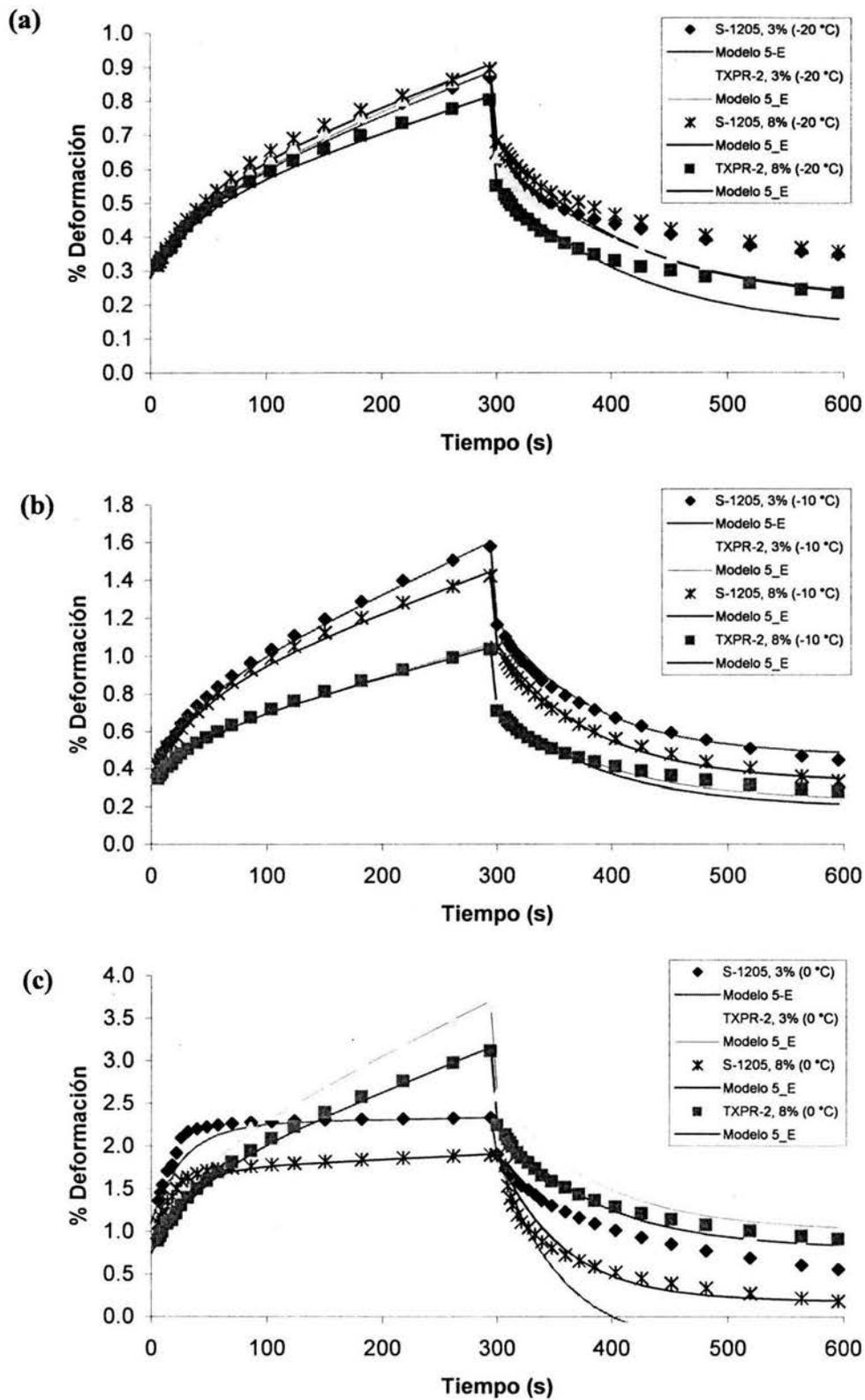


Figura 6.4.3. Efecto del peso molecular en el porcentaje de deformación en función del tiempo (pruebas de fluencia y recuperación) de los asfaltos modificados con 3 u 8% en peso de polímero lineal S-1205 o TXPR-2, (a) $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y (c) $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

En la figura 6.4.3.a se puede observar que todos los materiales se deformaron 0.3 % al inicio de la prueba de fluencia, llegando a deformarse hasta un 0.9%. Al terminar la prueba de recuperación, todos los materiales tuvieron una deformación irreversible entre 0.4 y 0.2%. A esta temperatura (-20 °C), el comportamiento mecánico de estos materiales es semejante debido a que el asfalto se mueve fácilmente ($T_g \approx -30$ °C), el poliestireno está rígido ($T_g \approx 100$ °C) y el movimiento del polibutadieno ($T_g \approx -100$ °C) se ve reducido gracias al impedimento que tiene dentro de la matriz polimérica, entonces son las propiedades del asfalto las que se manifiestan a baja temperatura. Por ello el polímero todavía no influye en el movimiento del material.

A -10 °C (Figura 6.4.3.b) se observa que el material que tuvo las mayor deformación (hasta 1.6%) fue el asfalto modificado con 3% de S-1205 y su homólogo con 8% de polímero se deformó menos (hasta 1%). La deformación irreversible fue de 0.4 y 0.2% para el material modificado con S-1205 al 3 y 8%, respectivamente. El asfalto modificado con menos polímero (3%) se deforma más porque las cadenas poliméricas están más dispersas en el asfalto, mientras que las cadenas del material con 8% de polímero están más cerca unas de otras, habiendo mayor cantidad de interacciones físicas entre ellas, por lo que el material se mueve con mayor dificultad.

En la figura 6.4.3.c (comportamiento a 0 °C) también se puede ver que los materiales con la menor cantidad de polímero (3%) se deforman más que su homólogo con mayor concentración de polímero (8%). A esta temperatura se observa claramente la influencia del peso molecular en las propiedades mecánicas de los materiales modificados con polímeros lineales. El polímero TXPR-2 forma “esferas” más grandes que el polímero S-1205 porque su peso molecular es más grande. Las esferas más pequeñas se mueven con mayor facilidad en el asfalto, es por esto que los asfaltos modificados con S-1205 alcanzan en poco tiempo un porcentaje de deformación prácticamente constante. Es decir, las esferitas ya se movieron hasta su estiramiento máximo al esfuerzo aplicado. En cambio las esferas grandes se deforman lentamente (les cuesta más trabajo moverse dentro del asfalto) y si se hubiera prolongado la prueba de fluencia por más tiempo, probablemente se alcanzaría su estiramiento máximo. El asfalto modificado con 8% de S-1205 fue el material que presentó la menor deformación (1.9%) y la mayor recuperación (deformación irreversible: 0.3%).

En la figura 6.4.4 se muestran el porcentaje de deformación en función del tiempo a las temperaturas (-20, -10 y 0 °C) en las que se realizaron la prueba de fluencia y la prueba de recuperación para los asfaltos modificados con polímeros en forma de estrella (radiales). Cada una de estas pruebas duraron 300 segundos (ambas 600 s). A continuación se trata de explicar el efecto del peso molecular en estos materiales.

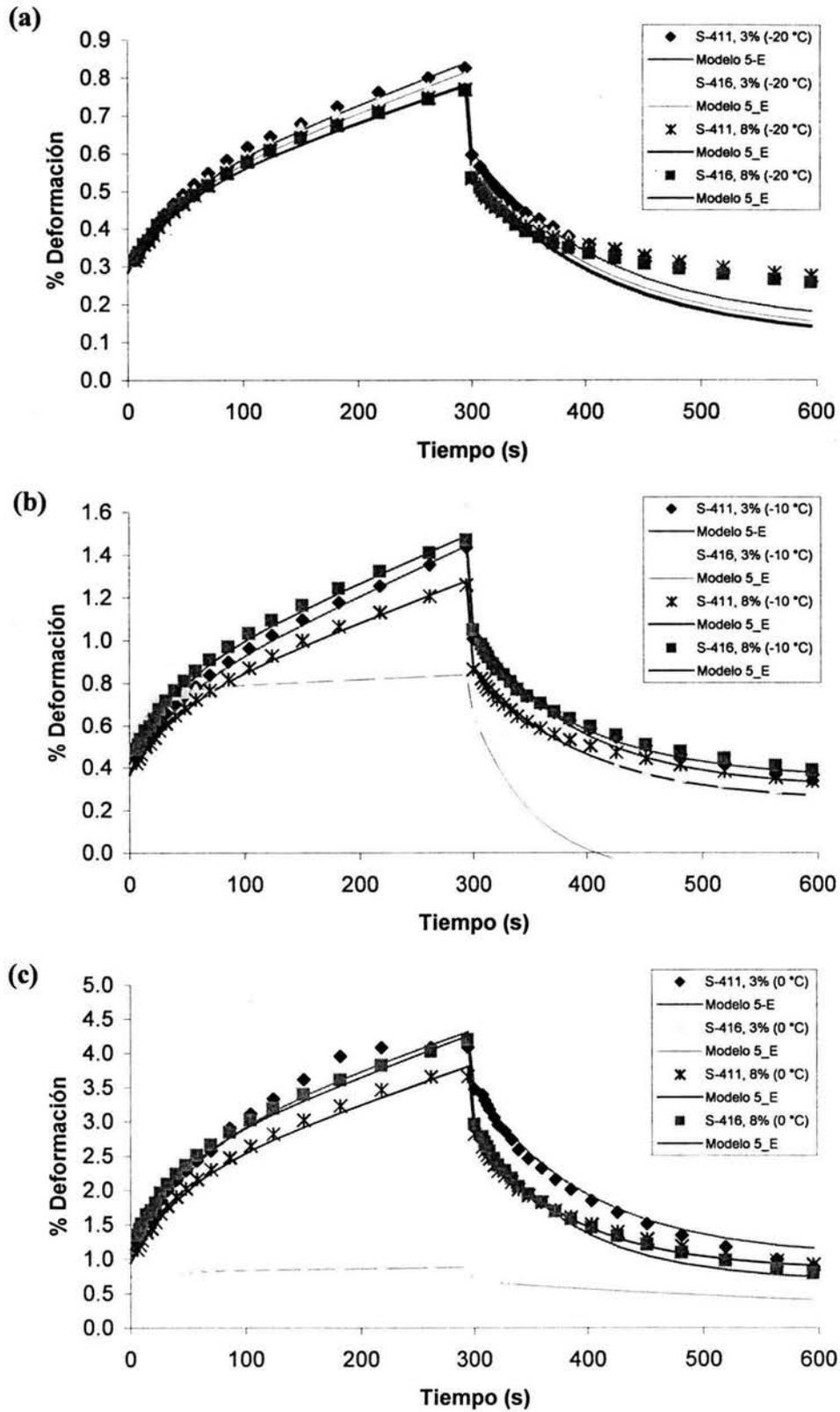


Figura 6.4.4. Efecto del peso molecular en el porcentaje de deformación en función del tiempo (pruebas de fluencia y recuperación) de los asfaltos modificados con 3 u 8% en peso de polímero radial S-411 o S-416, (a) -20°C , (b) -10°C y (c) 0°C

En la figura 6.4.4.a se muestra que todos los materiales se deformaron 0.3 % al inicio de la prueba de fluencia, llegando a deformarse hasta un 0.85%. Al terminar la prueba de recuperación, todos los materiales tuvieron una deformación irreversible de 0.25%. A esta temperatura (-20 °C) son las propiedades del asfalto las que se manifiestan (el poliestireno está rígido y el polibutadieno se casi no puede moverse).

A -10 °C (Figura 6.4.4.b) se observa que los materiales que tuvieron las mayores deformaciones (hasta 1.5%) fueron los asfaltos modificados con 3% de S-411 (su homólogo con 8% de este polímero se deformó hasta 1.3%) y 8% de S-416. La deformación irreversible de estos materiales fue de 0.4%. En los materiales modificados con S-411, el que tiene menos polímero (3%) se deforma más porque las cadenas poliméricas están más dispersas en el asfalto, mientras que las cadenas del material con 8% de polímero están más cerca unas de otras, habiendo mayor cantidad de interacciones físicas entre ellas, por lo que el material se mueve con mayor dificultad.

En la figura 6.4.4.c (comportamiento a 0 °C) también se puede ver que los materiales con la menor cantidad de polímero (3%) se deforman más que su homólogo con mayor concentración de polímero (8%). A esta temperatura se observa claramente la influencia del peso molecular en las propiedades mecánicas de los materiales modificados con polímeros en forma de estrella (radiales). El polímero S-411 forma “esferas” más grandes que el polímero S-416 porque su peso molecular es más grande. Las esferas más pequeñas se mueven con mayor facilidad en el asfalto, es por esto que el asfalto modificado con 8% de S-416 se deforma hasta 0.5% más que el material modificado con 8% de S-411. El asfalto modificado con 3% de S-416 no se toma en cuenta en el análisis porque dio resultados que difieren con lo dicho anteriormente.

Hasta ahora se ha analizado el efecto del peso molecular en los materiales modificados con polímeros lineales o radiales, pero aun no se ha explicado el efecto de la morfología. Por ello en la figura 6.4.5 se muestran el porcentaje de deformación en función del tiempo a las temperaturas (-20, -10 y 0 °C) en las que se realizaron la prueba de fluencia y la prueba de recuperación para los asfaltos modificados con el polímero lineal TXPR-2 y los modificados con el polímero radial S-411 y de pesos moleculares semejantes. Cada una de estas pruebas duraron 300 segundos (ambas 600 s). A continuación se trata de explicar el efecto de la morfología en estos materiales.

En la figura 6.4.5.a se muestra que todos los materiales se deformaron 0.3 % al inicio de la prueba de fluencia, llegando a deformarse hasta un 0.9%. Al terminar la prueba de recuperación, todos los materiales tuvieron una deformación irreversible cercana a 0.25%. Las propiedades del asfalto son las que se manifiestan a -20 °C, es decir, el asfalto es el componente que se está moviendo (el polímero casi no se mueve a esta temperatura).

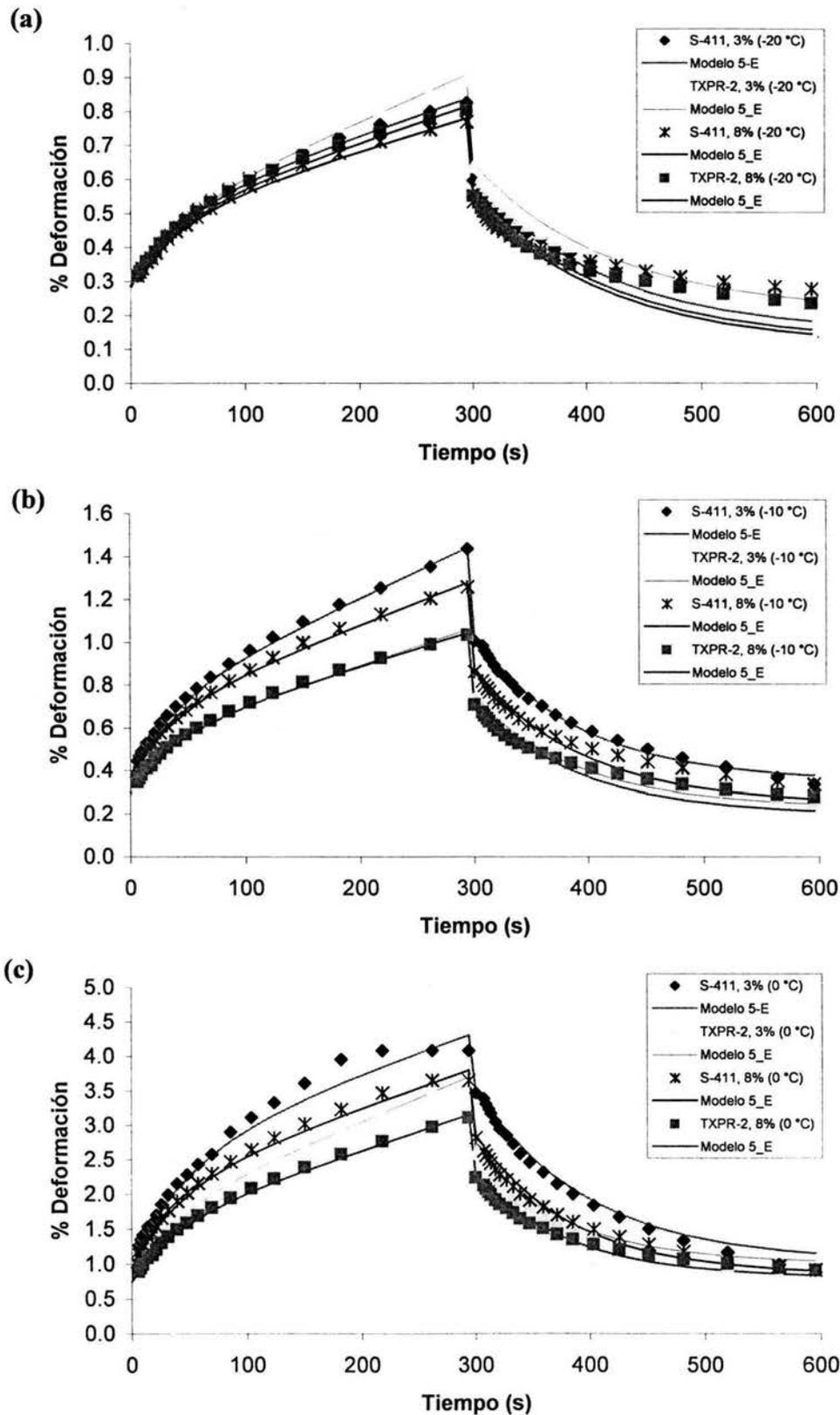


Figura 6.4.5. Efecto de la morfología en el porcentaje de deformación en función del tiempo (pruebas de fluencia y recuperación) de los asfaltos modificados con 3 u 8% en peso de polímero lineal TXPR-2 o radial S-411, (a) -20 °C, (b) -10 °C y (c) 0 °C

El material que tuvo la mayor deformación, 1.5%, a -10 °C (Figura 6.4.5.b) fue el asfalto modificado con 3% del polímero radial (S-411), mientras que los materiales modificados con el polímero lineal (TXPR-2) se deformaron hasta 1%. Sin embargo la deformación irreversible de estos materiales fue cercana a 0.3%. En esta figura se observa que los materiales modificados con el polímero radial se deforman más que los modificados con el polímero lineal. Aunque los primeros presentan mayores deformaciones, estos tienen una recuperación mayor. Esto puede deberse a la mayor cantidad de interacciones del polímero radial en el asfalto, es decir, gracias a que no todos los enlaces físicos se rompen, el material puede recuperarse más fácilmente.

En la figura 6.4.5.c (comportamiento a 0 °C) también se puede ver que los materiales con la menor cantidad de polímero (3%) se deforman más que su homólogo con mayor concentración de polímero (8%). Los materiales modificados con el polímero lineal se deforman 0.5% menos que los modificados con el polímero radial y esta diferencia es mayor a esta temperatura que a -10 °C. La deformación irreversible es de 1% para los materiales modificados con el polímero lineal y los modificados con el polímero radial.

Si se desea obtener materiales flexibles para alguna aplicación en especial, se debe usar el asfalto modificado con el polímero lineal S-1205 al 8% o las mezclas asfalto-polímero funcionalizado a 3 u 8%. Pero si se desea ocupar alguno de los materiales más flexibles, se recomienda el uso de los asfaltos modificados con los polímeros radiales (S-411 o S-416) al 3% en peso. El material con 3% S-411 es una buena opción para utilizarlo en pavimentación porque, aunque presenta los porcentajes de deformación más grandes, tiene la mejor capacidad para recuperarse.

6.5. Análisis de resultados en términos del modelo de cinco elementos

En esta sección sólo se explicarán los resultados obtenidos a partir del modelo de cinco elementos, para ello se escogieron (al azar) los datos experimentales, a una temperatura, de uno de los materiales analizados en este trabajo. En la prueba de fluencia, todos los asfaltos modificados se ajustaron muy bien a los datos experimentales (error menor al 1%). Los datos del modelo para la prueba de recuperación tuvieron un error menor al 5%, a tiempos mayores a 400 segundos, al compararlos con los datos experimentales de algunos materiales estudiados. Las comparaciones de los distintos modelos mencionados en el capítulo 4 con todos los asfaltos modificados analizados pueden ser consultadas en el apéndice B.

En la figura 6.5.1. se muestra el comportamiento del asfalto modificado con 8% de polímero comercial S-1205 a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los datos que se obtuvieron al utilizar el modelo de cinco elementos, cuyo arreglo se dibujó en la figura 6.5.1.b (ver también la figura 4.5 del presente trabajo).

En esta figura se puede ver que al inicio de la prueba de fluencia, el material se deforma casi 0.4% a tiempos muy pequeños (dos o tres segundos). Hasta este momento, el único elemento que se ha deformado, debido a la acción del esfuerzo constante, es el resorte independiente, el cual es representado en el modelo por el parámetro E_1 .

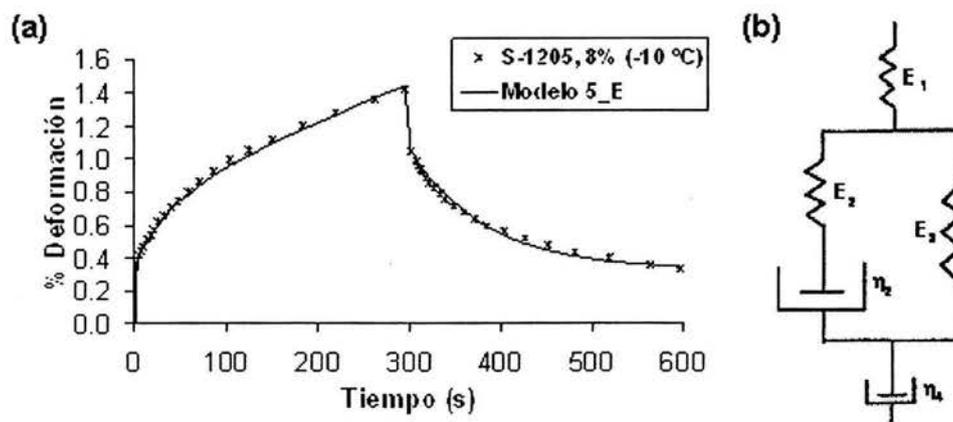


Figura 6.5.1 (a) Comparación del modelo de cinco elementos con los datos experimentales del asfalto modificado con 8% de polímero comercial S-1205 a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) Modelo de cinco elementos

Después de que se estiró completamente el resorte independiente (deformación elástica) comienzan a actuar lentamente el elemento de Maxwell, constituido por un resorte (parámetro E_2) en serie con un amortiguador (parámetro η_2), en paralelo con un resorte (parámetro E_3 del modelo) y el amortiguador independiente (parámetro η_4). Este último es el que sigue deformándose a tiempos muy grandes. La deformación del elemento de Maxwell es exponencial ascendente. Al terminar la prueba de fluencia el material se deformó hasta 1.4%. Ahora comienza la prueba de recuperación (al eliminarse el esfuerzo aplicado). El material recupera en pocos segundos la deformación sufrida por el resorte independiente (0.4%), disminuyendo ésta hasta 1%. A continuación comienza a recuperarse lentamente el elemento de Maxwell (deformación exponencial descendente). Sin embargo,

el amortiguador independiente ya no se recupera, por lo que la deformación irreversible fue de casi 0.3% al concluir la prueba de recuperación. Este porcentaje de deformación inelástico está representado por el valor del parámetro del amortiguador independiente (η_4).

La ecuación del modelo de cinco elementos, obtenida en el capítulo cuatro, para una prueba de fluencia es:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-\frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} t} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_4} t \quad \text{o} \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_4} t \quad \dots (1)$$

Los parámetros del modelo son: E_1 , E_2 , E_3 , η_2 y η_4 , donde E_1 es el módulo elástico del resorte independiente, E_2 es el módulo elástico del resorte que constituye el elemento de Maxwell, E_3 es el módulo elástico del resorte en paralelo con el elemento de Maxwell, η_2 es la viscosidad del amortiguador que forma el elemento de Maxwell y η_4 es la viscosidad del amortiguador independiente.

El tiempo de retraso depende de los valores de los parámetros correspondientes al elemento en paralelo del modelo (Figura 6.5.1): $\tau_r = \eta_2 (E_2 + E_3) / E_2 E_3$. El valor de estos parámetros (E_1 , E_2 , E_3 , η_2 y η_4) se obtienen a partir de los datos experimentales de t , σ_0 y $\varepsilon(t)$, como se explica enseguida:

- 1) Para calcular E_1 se considera el valor de $\varepsilon(t)$ al tiempo $t = 0$, de acuerdo con el modelo $\varepsilon = \sigma_0 / E_1$, de la cual se puede obtener E_1 .
- 2) Para calcular E_3 y η_4 se consideran valores de $\varepsilon(t)$ para tiempos lo suficientemente grandes como para que $1 - e^{-t/\tau_r} \rightarrow 1$ con lo cual la ecuación (1) se reduce $\varepsilon = \sigma_0 / E_1 + \sigma_0 / E_3 + (\sigma_0 / \eta_4) t$. Construyendo la curva de $\varepsilon(t)$ en función del tiempo, se obtiene una línea recta a partir de la cual se pueden calcular E_3 y η_4 con los últimos datos experimentales de la deformación (%), Como se conoce el esfuerzo aplicado y la pendiente de esta recta, se puede calcular fácilmente el valor de η_4 . Además, utilizando el valor de la ordenada al origen se obtiene el valor de E_3 .
- 3) Para calcular τ_r se consideran los datos de $\varepsilon(t)$ a tiempos lo suficientemente pequeños como para que $1 - e^{-t/\tau_r} \rightarrow t/\tau_r$ (expansión de e^{-t/τ_r}) de manera tal que la ecuación (1) se reduce a $\varepsilon = \sigma_0 / E_1 + [\sigma_0 / \tau_r E_3 + \sigma_0 / \eta_4] t$. Construyendo la curva de $\varepsilon(t)$ en función del tiempo con los primeros cuatro o cinco puntos experimentales de la deformación (%), se obtiene una línea recta. Utilizando la pendiente de esta recta, se obtiene el valor de τ_r .

Un análisis semejante se hace a partir de la ecuación del modelo de cinco elementos para la prueba de recuperación. Esta ecuación es la siguiente:

$$\varepsilon(t) = -\frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right) e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_r}} + \frac{\sigma_0}{\eta_4} t_1, \text{ donde } \tau_r = \frac{\eta_4 (E_2 + E_3)}{E_2 E_3}$$

Los parámetros E_1 y η_4 de la prueba de recuperación son iguales a los obtenidos en la prueba de fluencia. El tiempo de retraso τ_r es más grande en la prueba de recuperación, por lo que los módulos elásticos E_2 y E_3 son más pequeños en esta prueba (Consultar el apéndice B).

Ahora se analizarán los parámetros E_1 (del resorte independiente), η_4 (del amortiguador independiente) y τ_r (del elemento en paralelo) obtenidos en los materiales vulcanizados, hidrogenados y aquéllos modificados con los polímeros comerciales.

Se escogieron estos parámetros porque son los que influyen en el comportamiento del material de la siguiente manera: E_1 da una idea de su elasticidad, η_4 da una idea de su capacidad para fluir (comportamiento viscoso) y τ_r da una idea de su comportamiento viscoelástico (recordar el arreglo del elemento en paralelo: un resorte en paralelo con un elemento de Maxwell, los cuales responden de manera conjunta y no por separado).

En la figura 6.5.2 se observan los valores de los parámetros E_1 , η_4 y τ_r para cada uno de los asfaltos modificados vulcanizados. El valor de E_1 decrece (a -15°C) desde 1.45 hasta 1 MPa conforme se aumenta el grado de vulcanización. Esta disminución es menor a -10°C (1.2 a 0.9 MPa) y a 0°C (0.4 a 0.2 MPa). De acuerdo a estos valores, el material no vulcanizado es el más elástico. Además, esta elasticidad se ve disminuida al incrementar la temperatura.

La viscosidad η_4 disminuye bastante conforme se incrementa el grado de vulcanización. Por ejemplo, η_4 disminuye desde 420 hasta 220 MPa*s a -15°C y desde 260 hasta 120 MPa*s a -10°C . Además, la viscosidad disminuye al aumentarse la temperatura. El material sin azufre es el más viscoso.

Al aumentar la cantidad de azufre, el tiempo de retraso (prueba de fluencia), se incrementa desde 40 hasta 50 segundos a -15°C , se mantiene cerca de los 40 segundos a -10°C y disminuye desde 56 hasta 39 segundos a 0°C . En la prueba de recuperación el tiempo de retraso no varía mucho a -15 y -10°C : se mantiene cerca de 120 y 95 segundos, respectivamente. τ_r disminuye desde 90 hasta 60 segundos a 0°C . Además, τ_r disminuye al aumentar la temperatura.

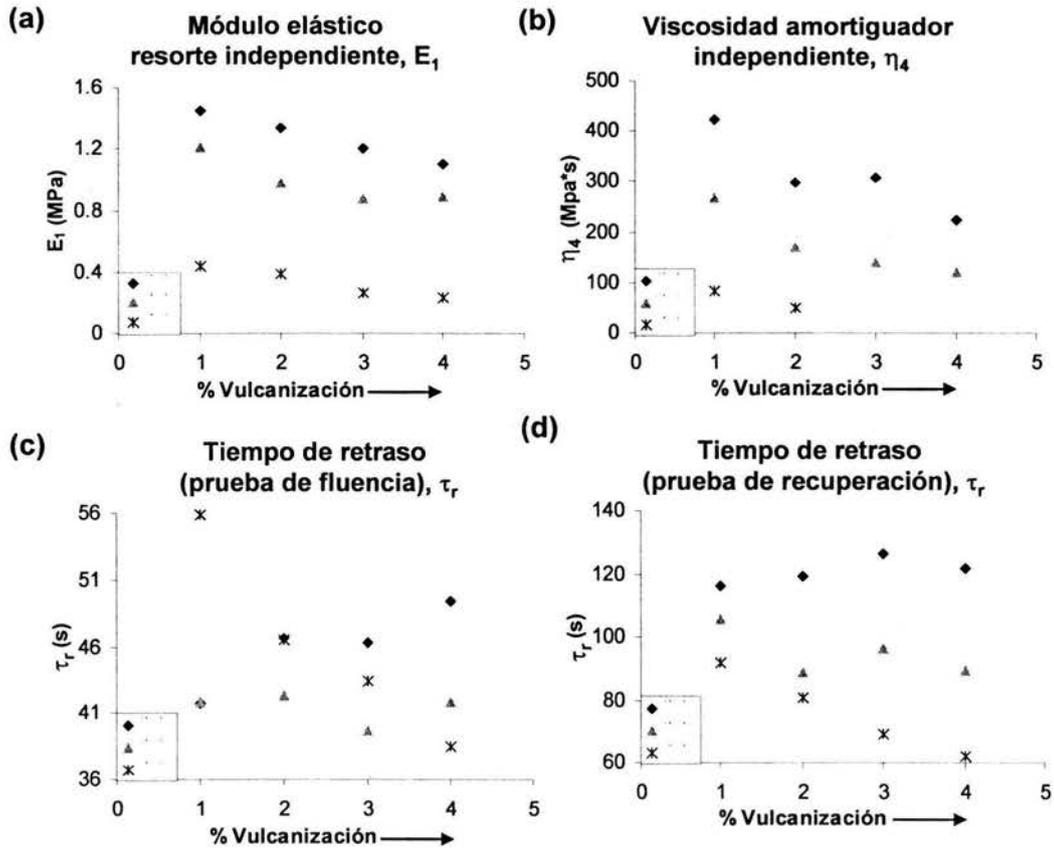


Figura 6.5.2. Parámetros del modelo de cinco elementos para los asfaltos modificados vulcanizados: (a) Módulo elástico del resorte independiente, (b) viscosidad del amortiguador independiente, (c) tiempo de retraso (prueba de fluencia) y, (d) tiempo de retraso (prueba de recuperación)

El tiempo de retraso de cada material en la prueba de recuperación es un poco mayor que el doble del tiempo de retraso en la prueba de fluencia. Es posible que esta variación sea debida a lo siguiente: En la prueba de recuperación el material no está afectado por ninguna fuerza externa, por lo que el material tarda más en recuperarse que si estuviera sometido a un esfuerzo de magnitud contraria (contrayendo al material).

En la figura 6.5.3 se observan los valores de los parámetros E_1 , η_4 y τ_r para cada uno de los asfaltos modificados hidrogenados. El valor de E_1 aumenta, a -15 y a -10 °C, desde 0.25 hasta 0.85 MPa, y a 0 °C desde 0.1 hasta 0.3 MPa. El material más saturado (65%) es el más elástico. Este parámetro disminuye al incrementarse la temperatura, aunque a -15 y -10 °C casi no hay variación en los valores de E_1 .

La viscosidad η_4 aumenta conforme se incrementa el porcentaje de hidrogenación. Por ejemplo, η_4 varía desde 55 hasta 230 MPa*s a -15 °C, desde 40 hasta 160 MPa*s a -10 °C y desde 20 hasta 40 MPa*s a 0 °C. Además, la viscosidad disminuye al aumentarse la temperatura. El material 65% saturado es el más viscoso.

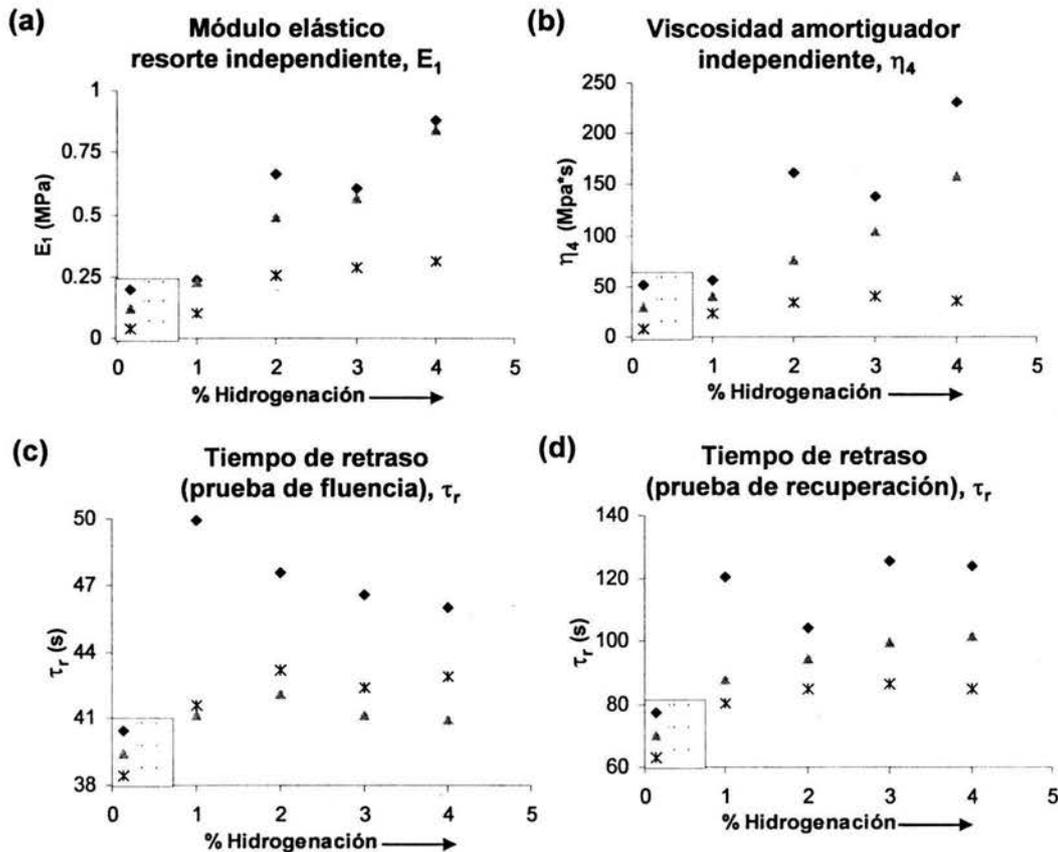


Figura 6.5.3. Parámetros del modelo de cinco elementos para los asfaltos modificados hidrogenados: (a) Módulo elástico del resorte independiente, (b) viscosidad del amortiguador independiente, (c) tiempo de retraso (prueba de fluencia) y, (d) tiempo de retraso (prueba de recuperación)

El tiempo de retraso (prueba de fluencia) no varía en más de un segundo a -10 y 0 °C al aumentar la saturación y éste disminuye desde 50 hasta 46 segundos a -15 °C. En la prueba de recuperación el tiempo de retraso se incrementa ligeramente desde 88 hasta 102 segundos a -10 °C y desde 80 hasta 86 segundos a 0 °C, respectivamente. Además, τ_r disminuye al aumentar la temperatura. El tiempo de retraso de cada material en la prueba de recuperación es un poco mayor que el doble del tiempo de retraso en la prueba de fluencia.

En el cuadro 6.7 se muestran los valores de E_1 , η_4 , τ_r (prueba de fluencia) y τ_r (prueba de recuperación) para los materiales modificados con 3% de polímero comercial o funcionalizado. Se analiza el efecto del peso molecular y el efecto de la morfología en estos parámetros.

El peso molecular influye en los materiales modificados con polímeros lineales de la siguiente manera: los parámetros del modelo son más grandes (10%), a -20 °C, para el asfalto modificado con el polímero lineal con menor peso molecular (S-1205). A -10 °C, el polímero con mayor peso molecular (TXPR-2) favoreció un ligero aumento en los valores de los parámetros del asfalto modificado con este material (con excepción de η_4 , la cual fue 30% más grande). A 0 °C, los tiempos de retraso fueron 30% más grandes y el módulo elástico E_1 fue 15% mayor en el material modificado con TXPR-2.

Cuadro 6.7. Parámetros del modelo de cinco elementos para los asfaltos modificados con 3% de polímero comercial o funcionalizado

3%	Temperatura	TXPR-2	S-1205	S-411	S-416	TXPR-2	S-411
E_1 , MPa	-20 °C	0.514	0.607	0.926	0.797	0.514	0.926
η_4 , MPa*s		100.02	128.75	226.23	200.28	100.02	226.23
τ_r , s (fluencia)		49.44	53.77	50.18	48.32	49.44	50.18
τ_r , s (recupera)		120.27	127.02	116.61	119.25	120.27	116.61
E_1 , MPa	-10 °C	0.508	0.469	0.685	0.455	0.508	0.685
η_4 , MPa*s		82.35	58.71	104.44	951.63	82.35	104.44
τ_r , s (fluencia)		42.04	41.76	42.58	19.24	42.04	42.58
τ_r , s (recupera)		89.4	83.42	93.6	55.12	89.4	93.6
E_1 , MPa	0 °C	0.184	0.156	0.244	0.306	0.184	0.244
η_4 , MPa*s		21.16	703.67	45.01	1058.1	21.16	45.01
τ_r , s (fluencia)		42.72	27.79	57.86	30.89	42.72	57.86
τ_r , s (recupera)		80.85	54.44	98.63	347.07	80.85	98.63

En los asfaltos modificados con polímeros en forma de estrella (radiales), la variación (a -20 °C) en los tiempos de retraso fue menor a 3% y en los parámetros E_1 y η_4 no fue mayor del 15% (el polímero con el mayor peso molecular tuvo los valores más grandes). A -10 °C, el polímero con el mayor peso molecular (S-411) tuvo valores de E_1 , η_4 y τ_r alrededor de 45% mayores que el material modificado con S-416. Mientras que a 0 °C, el asfalto modificado con S-416 (menor peso molecular) presentó los valores de estos parámetros más grandes.

Existe una tendencia más clara en el efecto de la morfología: El material modificado con el polímero radial S-411 presentó valores en los parámetros (a -20, -10 y 0 °C) más grandes que el asfalto modificado con el polímero lineal (TXPR-2): por ejemplo, E_1 y η_4 fueron 50% mayores a -20 °C (los tiempos de retraso no variaron en más de 3%).

En el cuadro 6.8 se muestran los valores de E_1 , η_4 , τ_r (prueba de fluencia) y τ_r (prueba de recuperación) para los materiales modificados con 8% de polímero comercial o funcionalizado. También se analiza el efecto del peso molecular y el efecto de la morfología en estos parámetros.

Los parámetros más grandes se presentaron en el asfalto modificado con el polímero lineal TXPR-2 (mayor peso molecular). E_1 y η_4 son 50 y 60% mayores en este material a -20 y -10 °C, respectivamente y, τ_r (prueba de fluencia) y τ_r (prueba de recuperación) son 40 y 60% más grandes a 0 °C.

En el material modificado con el polímero radial de mayor peso molecular (S-411), se tuvieron los parámetros más grandes. E_1 y η_4 son 8, 20 y 20% mayores en este material a -20, -10 y 0°C. En cambio, los tiempos de retraso no variaron en más de 5%.

RESULTADOS

Cuadro 6.8. Parámetros del modelo de cinco elementos para los asfaltos modificados con 8 % de polímero comercial o funcionalizado

8%	Temperatura	TXPR-2	S-1205	S-411	S-416	TXPR-2	S-411
E₁, MPa	-20 °C	<i>0.471</i>	0.244	<i>0.566</i>	0.521	<i>0.471</i>	<i>0.566</i>
η₄, MPa*s		<i>117.43</i>	52.41	<i>156.11</i>	143.09	<i>117.43</i>	<i>156.11</i>
τ_r, s (fluencia)		<i>48.53</i>	<i>52.21</i>	<i>47.72</i>	<i>45.78</i>	<i>48.53</i>	<i>47.72</i>
τ_r, s (recupera)		<i>119.50</i>	112.43	<i>120.34</i>	115.68	<i>119.50</i>	<i>120.34</i>
E₁, MPa	-10 °C	<i>0.445</i>	0.193	<i>0.442</i>	0.354	<i>0.445</i>	<i>0.442</i>
η₄, MPa*s		<i>79.09</i>	29.10	<i>77.61</i>	62.73	<i>79.09</i>	<i>77.61</i>
τ_r, s (fluencia)		<i>41.42</i>	<i>44.02</i>	<i>41.86</i>	<i>42.58</i>	<i>41.42</i>	<i>41.86</i>
τ_r, s (recupera)		<i>92.12</i>	83.30	<i>94.10</i>	90.82	<i>92.12</i>	<i>94.10</i>
E₁, MPa	0 °C	<i>0.179</i>	0.075	<i>0.170</i>	0.131	<i>0.179</i>	<i>0.170</i>
η₄, MPa*s		<i>24.12</i>	<i>106.57</i>	<i>27.47</i>	23.39	<i>24.12</i>	<i>27.47</i>
τ_r, s (fluencia)		<i>42.23</i>	<i>26.59</i>	<i>45.36</i>	<i>42.33</i>	<i>42.23</i>	<i>45.36</i>
τ_r, s (recupera)		<i>83.32</i>	31.97	<i>84.22</i>	80.98	<i>83.32</i>	<i>84.22</i>

El asfalto modificado con el polímero radial S-411 presentó valores 20% más grandes (a -20 °C) en los parámetros E₁ y η₄ con respecto al material modificado con el polímero lineal TXPR-2. A las otras temperaturas (-10 y 0 °C) no existen variaciones mayores de 5% en E₁ y η₄. Los tiempos de retraso tampoco variaron en más de 2% a -20, -10 y 0 °C.

La resistencia a la deformación y la capacidad de recuperación del asfalto modificado es función del tipo y cantidad de polímero que se utilizó para su preparación; esto se observa claramente a concentraciones altas de polímero (8% en peso) y a alta temperatura de prueba (0 °C).

A bajas concentraciones de polímero (3% en peso) y baja temperatura (-20 °C) el comportamiento del asfalto modificado es muy semejante al del asfalto solo.

Tanto en polímeros lineales (TXPR-2 y S-1205) como en forma de estrella (S-411 y S-416), un incremento en el peso molecular del polímero se traduce en una mayor elasticidad, es decir, el material puede deformarse y recuperarse más fácilmente.

La morfología y la distribución monomérica de las cadenas de polímero son características que tienen un efecto dominante sobre las propiedades del asfalto modificado; el polímero en forma de estrella y con una distribución monomérica del tipo SBR (S-411) resultó ser un mejor modificador del asfalto AC-20 de la planta del Ajusto, que el polímero lineal con una distribución tipo SBR (TXPR-2), ambos con el mismo peso molecular, aproximadamente (≈ 300,000 g/gmol).

**CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES**

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta tesis se determinó el comportamiento del asfalto modificado con algunos copolímeros a base de estireno-butadieno, realizando para ello pruebas de fluencia y de recuperación. Además se desarrollaron algunos modelos mecánicos para describir y entender bien el comportamiento de estos sistemas al compararlos con los datos experimentales, los cuales fueron obtenidos en condiciones del comportamiento viscoelástico lineal. Para tal fin se utilizó el modelo de cinco elementos, ya que fue el que presentó menos de 5% de error al realizar la comparación de los datos obtenidos con éste y los datos experimentales.

En términos generales, el módulo de rigidez aumenta considerablemente al disminuir la temperatura, y disminuye al transcurrir el tiempo en cada prueba de fluencia realizada. Esta disminución es rápida a tiempos cortos y es lenta a tiempos largos. La curva maestra (módulo de rigidez en función de un tiempo reducido) de cada muestra nos da una idea de cómo se comportará el material sometido a un esfuerzo constante durante un tiempo mayor (dos décadas) al de cada prueba efectuada.

En los materiales vulcanizados conforme se incrementa la cantidad de azufre, el módulo de rigidez disminuye y el porcentaje de deformación aumenta (0.8% mayor para el material con 3% de azufre en comparación con el material no vulcanizado). Sin embargo, a 0 °C, los asfaltos modificados con más azufre (5 y 7%) alcanzan un porcentaje de deformación aproximadamente constante 60 segundos después de haber iniciado la prueba de fluencia y tardan también 60 segundos en comenzar a recuperarse (lo cual puede deberse a la mayor cantidad de entrecruzamientos en estos materiales).

Al aumentar el grado de saturación, en los asfaltos modificados con SBS, se incrementan el módulo de rigidez y el porcentaje de deformación. El material con SBS 65% saturado posee un módulo de rigidez (casi tres veces) y una deformación (0.5%) mayor que el asfalto modificado sin hidrogenar. Mientras que el material 50% saturado se deforma 0.3% más y tiene un módulo de rigidez 2.5 veces mayor que la muestra no saturada.

El asfalto modificado con 5% de S-1205, 7% vulcanizado y el modificado con SBS 65% hidrogenado no son ni muy rígidos, ni muy flexibles; por lo que pueden resistir durante mucho tiempo, y a bajas temperaturas, la acción de un esfuerzo sobre ellos.

En los asfaltos modificados con SBR, la muestra modificada con S-411 presenta los módulos de rigidez más altos, le sigue el material modificado con S-416. Los asfaltos modificados con S-1205 y TXPR-2 son las muestras más flexibles. Estos polímeros son lineales, mientras que el S-411 y el S-416 son radiales. Estos últimos presentan una mayor resistencia a fluir gracias a la mayor interacción entre el polímero y el asfalto. Además, los asfaltos modificados al 3% son más rígidos que los modificados al 8%, debido a que estos últimos poseen una mayor cantidad de butadieno y le dan una mayor elasticidad (flexibilidad) al asfalto. Los módulos de rigidez de los materiales con TXPR-2 al 3 y al 8% son semejantes (la diferencia es de casi 20 MPa). Al parecer, el grupo funcional ayuda a que la disminución del módulo de rigidez en el material modificado al 8% no sea tan brusca como en el caso de los otros SBR (S-1205, S-411 y S-416).

Los materiales modificados con SBR se deforman menos (0.5%) cuando la concentración de los SBR es grande (8%), debido a que las cadenas poliméricas forman redes físicas entre ellas (en el material con menos polímero las cadenas están más dispersas unas de otras). A baja temperatura se manifiestan las propiedades mecánicas del asfalto (el polímero aun no influye en éstas), mientras que a la temperatura más alta (0 °C) se observó muy bien el efecto del peso molecular (el polímero con menor peso molecular fluye con mayor facilidad porque tiene “esferas” más pequeñas) y la morfología (polímero lineal o radial) del SBR en las propiedades mecánicas de los materiales estudiados. El material modificado con TXPR-2, polímero lineal de mayor peso molecular (285,000 g/gmol), se deforma más (1.2%) que el asfalto modificado con S-1205. Mientras que la muestra con S-416, polímero en forma de estrella de menor peso molecular (220,000 g/gmol), se deforma más (0.5%) que el material modificado con S-411. La muestra modificada con el polímero radial (S-411) presentó porcentajes de deformación 0.5% mayores que la modificada con el polímero lineal (TXPR-2). El asfalto modificado con 3% de S-411 se deformó hasta 4% y además, recuperó 3% de dicha deformación a la temperatura más alta (0 °C).

En la prueba de fluencia-recuperación, los materiales analizados presentaron una deformación instantánea (elástica), la cual es debida a las cadenas de butadieno que pueden moverse con bastante facilidad. Posteriormente, el material comenzó a fluir, predominando ahora el comportamiento viscoso, hasta que se eliminó el esfuerzo aplicado. Al eliminar el esfuerzo, parte del material se recuperó instantáneamente (las cadenas relativamente libres de butadieno regresan a su posición original), seguida de una lenta recuperación; sin embargo, existe una pequeña parte del material deformado que ya no regresó a su posición inicial (comportamiento netamente viscoso).

Los parámetros del modelo de cinco elementos, principalmente E_1 y η_4 , disminuyen al aumentar el grado de vulcanización, aumentan al incrementar el porcentaje de saturación y, son mayores en las muestras con los polímeros de mayor peso molecular (TXPR-2 y S-411). Estos parámetros son mayores en el asfalto modificado con el polímero radial (S-411). En todos los materiales analizados, el tiempo de retraso (τ_r) en la prueba de recuperación es mayor (más de la mitad) que el tiempo de retraso en la prueba de fluencia. Esto es debido a que en la prueba de recuperación, el material no está sometido a ninguna fuerza externa; por ello, tarda mucho más en recuperarse, aunque no lo hace totalmente (deformación irreversible).

Conviene aclarar que todos los resultados obtenidos fueron realizados a bajas temperaturas, por lo que sólo se obtuvo el comportamiento de los materiales analizados bajo estas condiciones. Es por esto que es necesario realizar, en proyectos futuros, pruebas reológicas a temperaturas altas y moderadas de los materiales analizados, para completar todo el espectro del comportamiento del asfalto, y determinar qué materiales son los más adecuados para utilizarlos en pavimentación y en otras aplicaciones del asfalto.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO DESIGNATION: TP1-93, June 1997. *Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR)*. Edition 1C.
- AASHTO PROVISIONAL STANDARDS, 1993. Performance graded asphalt binder specification and testing. *Superpave Series No. 1 (SP-1)*. Washington, D.C. Asphalt Institute.
- ADEDEJI, A., GRÜNFELDER, T., BATES, F. S., MACOSKO, C. W., 1996. Asphalt modified by SBS triblock copolymer: Structures and properties. *Polymer Engineering and Science*, 36, 1707-1723.
- AL-SABAGH, A. M., ZAKI, N. N., A. BADAWI, F. M., 1997. Effect of binary surfactant mixtures on the stability of asphalt emulsions. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 69, 350-356.
- ANDERSON, D. A., CHRISTENSEN, D. W., BAHIA, H., 1992. Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specification. *Preprint of the 204th American Chemical Society National Meeting, Division of Fuel Chemistry*, 37 (3 y 4).
- APICELLA, A., CALIENDO, C., FESTA, B., GIANNATASIO, P., 1990. Influence of polymer modifications on the viscoelastic behaviour of bitumens and on mechanical properties of bituminous mixtures: Evaluation tests. *Mech. Test. Bitumen Mixes Proc. Int. Symp. 4th*, 57-67.
- ASTM D3279-90, 1990. *Standard Test Method for n-heptane Insolubles*.
- ASTM D4124-86, 1987. *Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions*.
- ATOFINA, 2000. *Finaprene® SBS elastomers for roads*. Belgium.
- BARNES, H. A., HUTTON, J. F., WALTERS, K., 1997. *An introduction to rheology*. Rheology series Vol. 3. 5^a impresión. Amsterdam: Elsevier.
- BECKER, M. Y., MÉNDEZ, M. P., RODRÍGUEZ, Y., 2001. Polymer modified asphalt. *Visión Tecnológica*, 9, 39-50.
- BECKER, M. Y., MÜLLER, A. J., RODRIGUEZ, Y., 2003. Use of rheological compatibility criteria to study SBS modified asphalts. *Journal of Applied Polymer Science*, 90, 1772-1782.
- BLANCO, R., RODRÍGUEZ, R., GARDUÑO, M. G., CASTAÑO, V. M., 1996. Rheological properties of styrene-butadiene copolymer-reinforced asphalt. *Journal of Applied Polymer Science*, 61, 1493-1501.
- BOFFETTA, P., BURSTYN, I., 2003. Studies of carcinogenicity of bitumen fume in humans. *American Journal of Industrial Medicine*, 43, 1-2.
- BONNOT, J., 1996. Rheologische Eigenschaften von Bitumen – Interpretation der Prüfergebnisse. *Europäischer Workshop „Rheologie von Bitumen“ (Brüssel)*, 162-172.
- BUTTLAR, W. G., ROQUE, R., REID, B., 1997. Automated procedure for generation of creep compliance master curve for asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1630, 28-36.
- DANIELS, D. R., MCLEISH, T. C. B., KANT, R., CROSBY, B. J., YOUNG, R. N., PRYKE, A., ALLGAIER, J., GROVES, D. J., HAWKINS, R. J., 2001. Linear rheology of diluted linear, star and model long chain branched polymer melts. *Rheologica Acta*, 40, 403-415.

- DEALY, J. M., 1993. Official nomenclature for material functions describing the response of a viscoelastic fluid to various shearing and extensional deformations. *Journal of Rheology*, 37, 136-148.
- FERRY J., 1980. *Viscoelastic properties of polymers*. 3rd Ed. New York: Wiley.
- GABRIEL, C., KASCHTA, J., 1998. Comparison of different shear rheometers with regard to creep and creep recovery measurements. *Rheologica Acta*, 37, 358-364.
- GRABOWSKI, W., KUCZMA, M. S., SLOWIK, M., 2002. Mathematical modeling of rheological properties of polymer modified bitumens. *Foundations of Civil and Environmental Engineering*, 2, 27-42.
- JOSHI, P. G., LEONOV, A. I., 2001. Modelling of steady and time-dependent responses in filled, uncured, and crosslinked rubbers. *Rheologica Acta*, 40, 350-365.
- KAUFMAN, H. S., 1977. *Introduction to polymer science and technology*. 1^a ed. New York: Wiley.
- KING, G., KING, H., BRULE, B., 1990. Preparation and evaluation of polymer-modified asphalt binders, *Presented at a meeting of the Rubber Division, American Chemical Society, 29 May – 1 June 1990, Las Vegas, Nevada*, 1-28.
- KIRK, OTHMER, 1977. *Encyclopedia of Chemical Technology*. 2^a ed. Vol. 3, 689-720, New York: Wiley.
- KOMATSU, T., KIKUTA, H., TUJI, Y., MURAMATSU, E., 1998. Durability assessment of geogrid-reinforced asphalt concrete. *Geotextiles and Geomembranes*, 16, 257-271.
- LESUEUR, D., GÉRARD, J. F., 1996. A structure-related model to describe asphalt linear viscoelasticity. *Journal of Rheology*, 40, 813-835.
- LESUEUR, D., GERARD, J. F., 1998. Polymer modified asphalts as viscoelastic emulsions. *Journal of Rheology*, 42, 1059-1073.
- LEWANDOWSKI, L. H., 1994. Polymer modification on paving asphalt binders. *Rubber Chemistry & Technology: Rubber Reviews*, 67 (3), 447-480.
- LU, X., ISACSSON, U., 1997a. Rheological characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. *Construction and building materials*, 11, 23-32.
- LU, X., ISACSSON, U., 1997b. Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens. *Fuel*, 76, 1-19.
- LU, X., ISACSSON, U., 1997c. Compatibility and storage stability of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens. *Materials and structures*, 30, 618-626.
- LU, X., ISACSSON, U., EKBLAD, J., 1999. Rheological properties of SEBS, EVA and EBA polymer modified bitumens. *Materials and structures*, 32, 131-139.
- LU, X., ISACSSON, U., 2001. Modification of road bitumens with thermoplastic polymers. *Polymer Testing*, 20, 77-86.
- LU, X., ISACSSON, U., EKBLAD, J., 2003. Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures. *6th RILEM Symposium Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials (PTEBM) Zurich 2003*, 435-441.
- MANRÍQUEZ, O. L., HEREDIA, V. A., MORENO, T. A., RAMOS, T. M. J., TENORIO, L. E. R, CENTENO, N. G., 1996, Tendencias hacia el año 2000 de los asfaltos en México. *XXXVI Convención Nacional de Ingenieros Químicos 2, 3, 4 de Octubre de 1996 Monterrey, N.L. México*.

- MARK, H. F., BIKALES, N. M., OVERBERGER, C. G., Menges, G., 1988a. *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*. 2^a ed. Vol. 5, 299-326, New York: Wiley.
- MARK, H. F., BIKALES, N. M., OVERBERGER, C. G., Menges, G., 1988b. *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*. 2^a ed. Vol. 12, 470-485, New York: Wiley.
- MARTÍNEZ, B. F., PARTAL, P., NAVARRO, F. J., GALLEGOS, C., 2001. Rheology and microstructure of asphalt binders. *Rheologica Acta*, 40, 135-141.
- MENARD, K. P., 1999. *Dynamic mechanical analysis: A practical introduction*. Boca Raton: CRC Press.
- MICKELSEN, L., MEAD, K. R., SHULMAN, S. A., BRUMAGIN T. E., 1999. Evaluating engineering controls during asphalt paving using a portable tracer gas method. *American Journal of Industrial Medicine*, 1, 77-79.
- OLARD, F., BENEDETTO, H., DONY, A., VANISCOTE, J. C., 2003. Properties of bituminous mixtures at low temperatures and relations with binder characteristics. 6th *RILEM Symposium Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials (PTEBM) Zurich 2003*, 450-457.
- PALADE, L. I., ATTANÉ, P., CAMARO, S., 2000, Linear viscoelastic behavior of asphalt and asphalt based mastic. *Rheologica Acta*, 39, 180-190.
- POLACCO, G., VACIN, O. J., BIONDI, D., STASTNA, J., ZANZOTTO, L., Dynamic master curves of polymer modified asphalt from three different geometries. 1-7.
- READ, J., WHITEOAK, D., HUNTER, R., 1995. *The Shell bitumen handbook*. 3^a ed. Surrey, UK: Shell Bitumen UK.
- REES, D. W. A., 2003. Nutting creep in polymer composites. *Journal of Materials Processing Technology*, Artículo en imprenta.
- REVILLA, J., ROJAS, J. M., MANERO, O., Synthesis and rheological studies of functionalized rubber-modified asphalt. Rheology and microstructure of functionalized rubber/asphalt blends. *Centro de Investigación y Desarrollo, DESC; Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM*, Manuscrito no publicado.
- ROZEVELD, S., SHIN, E. E., BHURKE, A., FRANCE, L., DRZAL, L. T., 1997. Network morphology of straight and polymer modified asphalt cements. *Microscopy research and technique*, 38, 529-543.
- SANDLER, R. S., KARO, W., BONESTEEL, J., PEARCE, E. M., 1998. *Polymer synthesis and characterization: A laboratory manual*. Academic Press.
- SCHMIDT, M., MÜNSTEDT, H., 2002. On the elastic properties of model suspensions as investigated by creep recovery measurements in shear. *Rheologica Acta*, 41, 205-210.
- SCHMIDT, R. J., SANTUCCI, L. E., 1966. A practical method for determining the glass transition temperature of asphalts and calculation of their low temperature viscosities. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 35, 61.
- SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS, 1999. *Especificaciones que deben cumplir las mezclas asfálticas para la pavimentación y bacheo de calles y avenidas de la ciudad de México*. Planta de Asfalto.
- SHENOY, A., 2000. Developing unified rheological curves for polymer-modified asphalts – Part 1. Theoretical analysis. *Materials and structures*, 33, 225-229.

- SHENOY, A., 2002. Estimating the unrecovered strain during a creep recovery test from the material's volumetric-flow rate (MVR). *The International Journal of Pavement Engineering*, 3, 1-13.
- SHRP-A-367 REPORT, 1994. *Binder characterization and evaluation – volume 1: Project summary*.
- SHRP-A-369 REPORT, 1994. *Binder characterization and evaluation – volume 3: Physical characterization*.
- SOUTHWICK, J. G., VONK, W., 2002. For rigidity plus elasticity: Styrenic block copolymers. *Chemical Engineering*, October 2002, 50-53.
- SPERLING, L. H., 1980. *Introduction to physical polymer science*. 2^a Ed. New York: Wiley.
- SRIVASTAVA, A., HOPMAN, P. C., MOLENAAR, A. A. A., 1992. SBS polymer modified asphalt binder and its implications on overlay design. *Polymer modified asphalt binders*, ASTM STP 1108, 309-329.
- STASTNA, J., ZANZOTTO, L., VACIN, O. J., 2003. Viscosity function in polymer-modified asphalts. *Journal of Colloid and Interface Science*, 259, 200-207.
- STASTNA, J., ZANZOTTO, L., 1999. Response to "Letter to the editor: 'On the thermorheological complexity and relaxation modes of asphalt cements'". *Journal of Rheology*, 43, 1705-1707.
- TOBOLSKY, A., 1964. *Properties and structure of polymers*. New York: Wiley.
- VACIN, O., STASTNA, J., ZANZOTTO, L., 2003. Creep compliance of polymer modified asphalt, asphalt mastic and hot mix asphalt. *TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM*, 1-25.
- VAKILI J., 1983. An experimental study of asphalt concrete based on a multiple-integral representation of constitutive equation of a nonlinear viscoelastic solid. *Journal of Rheology*, 27(3), 211-222.
- VAN DER POEL, C., 1954. A general system describing the viscoelastic properties of bitumens and its relation to routine test data. *Journal of Applied Chemistry*. 4, 221.
- WANG, H., THOMPSON, D. G., SCHOONOVER, J. R., AUBUCHON, S. R., PALMER, R. A., 2001. DMA-FTIR creep-recovery study of a poly(ester urethane) elastomer with molecular-level viscoelastic modeling. *Macromolecules*, 34, 7084-7090.
- WLOCZYSAK, P., VIDAL, A., PAPIRER, E., 1997. Relationships between rheological properties, morphological characteristics, and composition of bitumen – styrene butadiene styrene copolymers mixes. I. A three-phase system. *Journal of Applied Polymer Science*, 65, 1595-1607.
- WLOCZYSAK, P., VIDAL, A., PAPIRER, E., 1997. Relationships between rheological properties, morphological characteristics, and composition of bitumen – styrene butadiene styrene copolymers mixes. II. A thermodynamical interpretation. *Journal of Applied Polymer Science*, 65, 1609-1618.
- ZANZOTTO, L., STASTNA, J., 1997. Dynamic master curves from the stretched exponential relaxation modulus. *Journal of Polymer Science B: Polymer Physics*, 35, 1225-1232.
- ZHU H., 2001. A contact mechanism based theory of Maxwell matrix composites. *International Journal of Solids and Structures*, 38, 4477-4488.

APÉNDICES

A.1. MODELO DE MAXWELL

Es el modelo más simple que puede describir a los materiales viscoelásticos. Consiste de un resorte (que representa al elemento elástico) en serie con un amortiguador (que representa al elemento viscoso).

La relación entre la viscosidad y el módulo elástico está dada a través de un tiempo característico del material. Para el experimento de fluencia (deformación lenta) el tiempo característico es un tiempo de retraso $\tau_r = \eta/E$.

La ecuación que describe el modelo es $\left. \begin{array}{l} \sigma + \tau_r \frac{d\sigma}{dt} = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \end{array} \right\}$

Rearreglándola se llega a $\left. \begin{array}{l} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \end{array} \right\}$

En el experimento de fluencia el esfuerzo es constante (σ_0), por lo que $d\sigma/dt = 0$ y la ecuación queda: $\left. \begin{array}{l} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta} \end{array} \right\} \longrightarrow d\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta} dt$

Integrando la ecuación anterior aplicando las C.F: a $t = 0, \varepsilon = \varepsilon_0$ y a $t = t \varepsilon = \varepsilon(t)$ $\left. \begin{array}{l} \varepsilon(t) - \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{\eta} t \end{array} \right\}$

La ecuación del modelo queda: $\left. \begin{array}{l} \varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \frac{\sigma_0}{\eta} t \end{array} \right\}$

Donde ε_0 representa a la deformación inicial (a $t = 0$) debida al resorte y η a la deformación lenta en el amortiguador.

A.2. MODELO DE KELVIN-VOIGT

Posee los mismos elementos que el modelo de Maxwell, sólo que éstos están en paralelo en lugar de estar en serie.

La restricción de este modelo es que la deformación debe ser la misma en ambos elementos. El esfuerzo debe ser entonces la suma de los esfuerzos en los dos elementos individuales.

Por lo tanto, la ecuación de movimiento para un elemento de Kelvin-Voigt es $\left. \begin{array}{l} \sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \end{array} \right\}$

Como $\sigma = \sigma_0$ la ecuación queda $\left. \begin{array}{l} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E}{\eta} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta} \end{array} \right\}$

Esta ecuación es de la forma $\left. \begin{array}{l} \frac{dy}{dt} + Py = Q \end{array} \right\}$

Cuya solución general es $\left. \begin{array}{l} y = e^{-\int P dt} \left[\int Q e^{\int P dt} dt + C \right] \end{array} \right\}$

Sustituyendo $y = \varepsilon$, $P = E/\eta$ y $Q = \sigma_0/\eta$ }
$$\varepsilon = e^{-\int \frac{E}{\eta} dt} \left[\int \frac{\sigma_0}{\eta} e^{\int \frac{E}{\eta} dt} dt + C \right]$$

Integrando la ecuación anterior }
$$\varepsilon = e^{-\frac{E}{\eta} t} \left[\frac{\sigma_0}{E} e^{\frac{E}{\eta} t} + C \right] \longrightarrow \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} + C e^{-\frac{E}{\eta} t}$$

Aplicando las C.I. a $t = 0$, $\varepsilon = 0$ }
$$0 = \frac{\sigma_0}{E} + C \longrightarrow C = -\frac{\sigma_0}{E}$$

La ecuación del modelo queda: }
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta} t} \right) \longrightarrow \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right)$$

Evaluando la ecuación anterior a tiempos cortos }
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta} t$$

Evaluando la ecuación anterior a tiempos largos }
$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E}$$

A.3. MODELO DE TRES ELEMENTOS EN SERIE

El modelo de tres elementos en serie o sólido viscoelástico lineal estándar es usado muy a menudo. Este modelo consiste de un resorte en serie con un elemento de Kelvin-Voigt. En este modelo E_1 representa la respuesta elástica instantánea, η_2 representa la viscosidad del amortiguador y E_2 representa el elemento elástico en paralelo con el amortiguador.

Dado que el resorte se considera como lineal o hookeano, la deformación elástica está dada por: $\sigma = E_1 \varepsilon_e$; y la deformación inelástica asociada con el elemento de Kelvin-Voigt es ε_a , y está dada por $\sigma = E_2 \varepsilon_a + \eta_2 d\varepsilon_a/dt$. La deformación total es la suma de la deformación elástica e inelástica ($\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_a$).

Deformación elástica }
$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E_1} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_e}{dt} = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt}$$

Deformación inelástica }
$$\sigma = E_2 \varepsilon_a + \eta_2 \frac{d\varepsilon_a}{dt} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_a}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_2} - \frac{E_2 \varepsilon_a}{\eta_2} = \frac{\sigma}{\eta_2} - \frac{E_2}{\eta_2} \left(\varepsilon - \frac{\sigma}{E_1} \right)$$

Deformación total }
$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_a \longrightarrow \varepsilon_a = \varepsilon - \varepsilon_e = \varepsilon - \frac{\sigma}{E_1}$$

Sustituyendo en: $\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_e}{dt} + \frac{d\varepsilon_a}{dt}$ }
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_2} + \frac{E_2 \sigma}{\eta_2 E_1} - \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon$$

La ecuación que describe el modelo de tres elementos es: }
$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt} + \left(\frac{E_1 + E_2}{\eta_2 E_1} \right) \sigma$$

Como $\sigma = \sigma_0$, la ecuación anterior queda: }
$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon = \left(\frac{E_1 + E_2}{\eta_2 E_1} \right) \sigma_0$$

Esta ecuación es de la forma $\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \frac{dy}{dt} + Py = Q$

Cuya solución general es $\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} y = e^{-\int P dt} \left[\int Q e^{\int P dt} dt + C \right]$

Sustituyendo $y = \varepsilon$, $P = E_2/\eta_2$, y el valor de Q $\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \varepsilon = e^{-\int \frac{E_2}{\eta_2} dt} \left[\int \left(\frac{E_1 + E_2}{\eta_2 E_1} \right) \sigma_0 e^{\int \frac{E_2}{\eta_2} dt} dt + C \right]$

Integrando la ecuación anterior $\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \varepsilon = e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \left[\left(\frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} \right) \sigma_0 e^{\frac{E_2 t}{\eta_2}} + C \right] \rightarrow \varepsilon = \left(\frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} \right) \sigma_0 + C e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}$

Aplicando la C.I. a $t = 0$, $\varepsilon = \varepsilon_0 = \sigma_0/E_1$ $\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \frac{\sigma_0}{E_1} = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} + C \rightarrow C = -\frac{\sigma_0}{E_2}$

Sustituyendo el valor de C en la ecuación de la deformación $\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} - \frac{\sigma_0}{E_2} e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}$

Por lo tanto la ecuación del modelo queda de la siguiente manera: $\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \rightarrow \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$

Evaluando la ecuación anterior a $t = 0$ se obtiene la respuesta instantánea $\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1}$

A tiempos cortos se tiene $\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_2} t$

A tiempos largos se alcanza un valor constante de la deformación $\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \varepsilon = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)$

A.4. MODELO DE TRES ELEMENTOS EN PARALELO

Este modelo de tres elementos también representa a un sólido viscoelástico lineal, y consiste de un resorte en paralelo con un elemento de Maxwell (un resorte y un amortiguador en serie). En este modelo E_1 representa la respuesta elástica y η_1 la viscosidad del amortiguador, asociados al elemento de Maxwell, y E_2 representa el elemento elástico en paralelo con el elemento de Maxwell.

La deformación total es igual a la deformación en el elemento de Maxwell y a la deformación sufrida por el resorte en paralelo con el elemento de Maxwell ($\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$). El esfuerzo total es la suma de los esfuerzos individuales ($\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$). Dado que el resorte se considera como lineal o hookeano, la deformación elástica está dada por $\sigma_2 = E_2 \varepsilon$ y la deformación del elemento de Maxwell está dada por $\sigma_1 + (\eta_1/E_1)d\sigma/dt = \eta_1 d\varepsilon/dt$.

Esfuerzo elemento Maxwell	} $\sigma_1 = \sigma - \sigma_2 \longrightarrow \sigma_1 = \sigma - E_2 \varepsilon$
Despejando $d\sigma_1/dt$ de la ecuación de Maxwell	} $\frac{d\sigma_1}{dt} = E_1 \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{E_1}{\eta_1} \sigma_1 \longrightarrow \frac{d(\sigma - E_2 \varepsilon)}{dt} = E_1 \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{E_1}{\eta_1} (\sigma - E_2 \varepsilon)$
Desarrollando términos	} $\frac{d\sigma}{dt} - E_2 \frac{d\varepsilon}{dt} = E_1 \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{E_1}{\eta_1} \sigma + \frac{E_1 E_2}{\eta_1} \varepsilon$
Rearreglando términos	} $(E_1 + E_2) \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1} \varepsilon = \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1} \sigma$
La ecuación que describe el modelo De tres elementos en paralelo es:	} $\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \varepsilon = \frac{1}{(E_1 + E_2)} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \sigma$
Como $\sigma = \sigma_0$, la ecuación anterior queda:	} $\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \varepsilon = \frac{E_1}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \sigma$
Esta ecuación es de la forma	} $\frac{dy}{dt} + Py = Q$
Cuya solución general es	} $y = e^{-\int P dt} \left[\int Q e^{\int P dt} dt + C \right]$
Sustituyendo $P = E_1 E_2 / \eta_1 (E_1 + E_2)$, $y = \varepsilon$, y el valor de Q	} $\varepsilon = e^{-\int \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} dt} \left[\int \left(\frac{E_1}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \right) \sigma_0 e^{\int \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} dt} dt + C \right]$
Integrando la ecuación anterior	} $\varepsilon = e^{-\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t} \left[\frac{\sigma_0}{E_2} e^{\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t} + C \right] \longrightarrow \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_2} + C e^{-\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t}$
Aplicando la C.I. a $t = 0$, $\varepsilon = 0$	} $0 = \frac{\sigma_0}{E_2} + C \longrightarrow C = -\frac{\sigma_0}{E_2}$
Sustituyendo el valor de C en la ecuación de la deformación	} $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_2} - \frac{\sigma_0}{E_2} e^{-\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t}$, donde $\tau_r = \frac{\eta_1 (E_1 + E_2)}{E_1 E_2}$
Por lo tanto la ecuación del modelo queda de la siguiente manera:	} $\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t} \right) \longrightarrow \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right)$
A tiempos cortos se tiene	} $\varepsilon = \frac{E_1 \sigma_0}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t$
A tiempos largos se alcanza un valor constante de la deformación	} $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_2}$

A.5. MODELO DE CUATRO ELEMENTOS EN SERIE

Dado que el modelo de tres elementos en serie no puede representar en su totalidad el comportamiento de los materiales estudiados en un experimento de fluencia al compararlos con los datos experimentales obtenidos, es necesario añadir un término que permita reproducir esta contribución de deformación viscosa. De esta idea surge el modelo de cuatro elementos en serie al añadir un amortiguador lineal con viscosidad η_3 al modelo de tres elementos mencionado.

Si se observa bien el sistema, uno se da cuenta que este modelo combina los elementos del modelo de Maxwell con los del modelo de Kelvin-Voigt. Por lo que, hay que seguir el mismo desarrollo que para el modelo de 3 elementos, agregando al sistema de ecuaciones, la ecuación que describe al amortiguador independiente.

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l} \text{Deformación elástica} \\ \text{Deformación amortiguador} \\ \text{independiente} \\ \text{Deformación inelástica} \\ \text{Deformación total} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \varepsilon_e = \frac{\sigma}{E_1} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_e}{dt} = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt} \\ \sigma = \eta_3 \frac{d\varepsilon_{Am}}{dt} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_{Am}}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_3} \longrightarrow \varepsilon_{Am} = \frac{\sigma}{\eta_3} t \\ \sigma = E_2 \varepsilon_a + \eta_2 \frac{d\varepsilon_a}{dt} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_a}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_2} - \frac{E_2 \varepsilon_a}{\eta_2} \\ \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_a + \varepsilon_{Am} \longrightarrow \varepsilon_a = \varepsilon - \varepsilon_e - \varepsilon_{Am} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E_1} - \frac{\sigma}{\eta_3} t \end{array} \\
 \\
 \left. \begin{array}{l} \text{Sustituyendo en: } \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_e}{dt} + \frac{d\varepsilon_a}{dt} \\ \text{La ecuación que describe el modelo} \\ \text{de cuatro elementos es:} \\ \text{Como } \sigma = \sigma_0, \text{ la ecuación anterior} \\ \text{queda:} \\ \text{Esta ecuación es de la forma} \\ \text{Cuya solución general es} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt} + \left[\frac{\sigma}{\eta_2} - \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon + \frac{E_2 \sigma}{\eta_2 E_1} + \frac{E_2 \sigma}{\eta_2 \eta_3} t \right] + \frac{\sigma}{\eta_3} \\ \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt} + \left(\frac{E_1 + E_2}{\eta_2 E_1} \right) \sigma + \frac{\sigma}{\eta_3} \left(1 + \frac{E_2}{\eta_2} t \right) \\ \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon = \left(\frac{E_1 + E_2}{\eta_2 E_1} \right) \sigma_0 + \frac{\sigma_0}{\eta_3} \left(1 + \frac{E_2}{\eta_2} t \right) \\ \frac{dy}{dt} + Py = Q(t) \\ y = e^{-\int P dt} \left[\int Q(t) e^{\int P dt} dt + C \right] \end{array} \\
 \\
 \left. \begin{array}{l} \text{Sustituyendo } y = \varepsilon, P = E_2/\eta_2, \text{ y el} \\ \text{valor de } Q \\ \text{Integrando la ecuación anterior} \\ \text{Nota: } \int \left(1 + \frac{E_2}{\eta_2} t \right) e^{\frac{E_2}{\eta_2} t} dt = \\ = \left(1 + \frac{E_2}{\eta_2} t \right) \frac{E_2}{\eta_2} e^{\frac{E_2}{\eta_2} t} - \frac{\eta_2}{E_2} \int e^{\frac{E_2}{\eta_2} t} \frac{E_2}{\eta_2} dt \end{array} \right\} \begin{array}{l} \varepsilon = e^{-\int \frac{E_2}{\eta_2} dt} \left[\int \left(\frac{E_1 + E_2}{\eta_2 E_1} \right) \sigma_0 e^{\int \frac{E_2}{\eta_2} dt} dt + \int \frac{\sigma_0}{\eta_3} \left(1 + \frac{E_2}{\eta_2} t \right) e^{\int \frac{E_2}{\eta_2} dt} dt + C \right] \\ \varepsilon = e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \left[\left(\frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} \right) \sigma_0 e^{\frac{E_2}{\eta_2} t} + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t e^{\frac{E_2}{\eta_2} t} + C \right] \\ \varepsilon = \left(\frac{E_1 + E_2}{E_1 E_2} \right) \sigma_0 + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t + C e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \end{array}
 \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Aplicando la C.I. a } t = 0, \varepsilon = \varepsilon_0 = \sigma_0/E_1 \\ \text{Sustituyendo el valor de C en la ecuación de la deformación} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{\sigma_0}{E_1} = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} + C \longrightarrow C = -\frac{\sigma_0}{E_2} \\ \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t - \frac{\sigma_0}{E_2} e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \end{array}$$

Por lo que la ecuación que describe el modelo es:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}\right) + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t \quad \text{o} \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_r}\right) + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Evaluando la ecuación anterior a } t = 0 \text{ se obtiene la respuesta instantánea} \\ \text{A tiempos cortos se tiene} \\ \text{A tiempos largos se obtiene} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} \\ \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \left(\frac{\sigma_0}{\eta_2} + \frac{\sigma_0}{\eta_3}\right) t \\ \varepsilon = \sigma_0 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right) + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t \end{array}$$

A.6. MODELO DE CUATRO ELEMENTOS EN PARALELO CON AMORTIGUADOR INDEPENDIENTE

Dado que el modelo de tres elementos en paralelo no puede representar en su totalidad el comportamiento de los materiales estudiados en un experimento de fluencia al compararlos con los datos experimentales obtenidos, es necesario añadir un término que permita reproducir esta contribución de deformación viscosa. De esta idea surge el modelo de cuatro elementos en paralelo con amortiguador independiente al añadir un amortiguador lineal con viscosidad η_3 al modelo de tres elementos descrito anteriormente.

Si se observa bien el sistema, se puede apreciar que la deformación total es la suma de la deformación del elemento en paralelo y la deformación del amortiguador independiente ($\varepsilon = \varepsilon_{\text{paralelo}} + \varepsilon_{\text{amortiguador}}$). El esfuerzo total es la suma de los esfuerzos individuales del elemento en paralelo y es igual al esfuerzo en el amortiguador independiente ($\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_3$).

$$\left. \begin{array}{l} \text{Esfuerzo elemento Maxwell} \\ \text{Deformación amortiguador independiente} \\ \text{Deformación elemento en paralelo} \\ \text{Despejando } d\varepsilon_{\text{paralelo}}/dt \text{ de la ecuación de Maxwell} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \sigma_1 = \sigma - \sigma_2 = \sigma_3 \longrightarrow \sigma_1 = \sigma - E_2 \varepsilon_{\text{paralelo}} \\ \sigma = \sigma_3 = \eta_3 \frac{d\varepsilon_{Am}}{dt} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_{Am}}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_3} \longrightarrow \varepsilon_{Am} = \frac{\sigma}{\eta_3} t \\ \varepsilon = \varepsilon_{\text{paralelo}} + \varepsilon_{Am} \longrightarrow \varepsilon_{\text{paralelo}} = \varepsilon - \varepsilon_{Am} = \varepsilon - \frac{\sigma}{\eta_3} t \\ \sigma_1 + \frac{\eta_1}{E_1} \frac{d\sigma_1}{dt} = \eta_1 \frac{d\varepsilon_{\text{paralelo}}}{dt} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_{\text{paralelo}}}{dt} = \frac{\sigma_1}{\eta_1} + \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma_1}{dt} \end{array}$$

Sustituir en: $\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_{paralelo}}{dt} + \frac{d\varepsilon_{Am}}{dt}$ } $\frac{d\varepsilon}{dt} = \left(\frac{\sigma - E_2(\varepsilon - (\sigma/\eta_3)t)}{\eta_1} + \frac{1}{E_1} \frac{d[\sigma - E_2(\varepsilon - (\sigma/\eta_3)t)]}{dt} \right) + \frac{\sigma}{\eta_3}$

Desarrollando: } $\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_1} - \frac{E_2}{\eta_1} \varepsilon + \frac{E_2\sigma}{\eta_1\eta_3} t + \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt} - \frac{E_2}{E_1} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2\sigma}{E_1\eta_3} + \frac{\sigma}{\eta_3}$

Rearreglando: } $\left(\frac{E_1 + E_2}{E_1} \right) \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2}{\eta_1} \varepsilon = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_1} + \frac{\sigma}{\eta_3} \left(1 + \frac{E_2}{E_1} + \frac{E_2}{\eta_1} t \right)$

La ecuación que describe el modelo de cuatro elementos en paralelo es:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \varepsilon = \frac{1}{(E_1 + E_2)} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \sigma + \frac{\sigma}{\eta_3} \left(1 + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t \right)$$

Como $\sigma = \sigma_0$, la ecuación anterior queda: } $\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \varepsilon = \frac{E_1}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \sigma_0 + \frac{\sigma_0}{\eta_3} \left(1 + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t \right)$

Esta ecuación es de la forma } $\frac{dy}{dt} + Py = Q(t)$

Cuya solución general es } $y = e^{-\int P dt} \left[\int Q(t) e^{\int P dt} dt + C \right]$

Sustituyendo $P = E_1 E_2 / \eta_1 (E_1 + E_2)$, $y = \varepsilon$, y el valor de Q :

$$\varepsilon = e^{-\int \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} dt} \left[\int \left(\frac{E_1}{\eta_1 (E_1 + E_2)} \right) \sigma_0 e^{\int \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} dt} dt + \frac{\sigma_0}{\eta_3} \left(1 + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t \right) e^{\int \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} dt} dt + C \right]$$

Integrando la ecuación anterior:

$$\varepsilon = e^{-\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t} \left[\frac{\sigma_0}{E_2} e^{\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t} + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t e^{\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t} + C \right] \longrightarrow \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t + C e^{-\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t}$$

Nota:

$$\int \left(1 + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t \right) e^{\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t} dt = I = t e^{\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t}$$

$$I = \left(1 + \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t \right) \frac{\eta_1 (E_1 + E_2)}{E_1 E_2} e^{\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t} - \frac{\eta_1 (E_1 + E_2)}{E_1 E_2} \int e^{\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t} \frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} dt$$

Aplicando la C.I. a $t = 0$, $\varepsilon = 0$ } $0 = \frac{\sigma_0}{E_2} + C \longrightarrow C = -\frac{\sigma_0}{E_2}$

Sustituyendo el valor de C en la ecuación de la deformación } $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma_0}{\eta_3} - \frac{\sigma_0}{E_2} e^{-\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t}$, donde $\tau_r = \frac{\eta_1 (E_1 + E_2)}{E_1 E_2}$

Por lo que la ecuación que describe el modelo es:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_1 E_2}{\eta_1 (E_1 + E_2)} t} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t \quad \text{o} \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau_r} \right) + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t$$

A tiempos cortos se tiene

$$\left. \vphantom{\varepsilon(t)} \right\} \varepsilon = \left(\frac{E_1 \sigma_0}{\eta_1 (E_1 + E_2)} + \frac{\sigma_0}{\eta_3} \right) t$$

A tiempos largos se obtiene

$$\left. \vphantom{\varepsilon(t)} \right\} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma_0}{\eta_3} t$$

A.7 MODELO DE CUATRO ELEMENTOS EN PARALELO CON RESORTE INDEPENDIENTE

Otro posible arreglo se obtiene al agregar un resorte (independiente) al modelo de tres elementos en paralelo, con la finalidad de comparar (representar lo mejor posible) los datos de este modelo con los datos experimentales de los materiales estudiados en la prueba de fluencia.

Si se observa bien el sistema, uno puede apreciar que la deformación total es la suma de la deformación del elemento en paralelo y la deformación del resorte independiente ($\varepsilon = \varepsilon_{\text{paralelo}} + \varepsilon_{\text{resorte}}$). El esfuerzo total es la suma de los esfuerzos individuales del elemento en paralelo, y es igual al esfuerzo en el resorte independiente ($\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_3$).

Esfuerzo elemento Maxwell

$$\left. \vphantom{\sigma_2} \right\} \sigma_2 = \sigma - \sigma_3 = \sigma_1 \longrightarrow \sigma_2 = \sigma - E_3 \varepsilon_{\text{paralelo}}$$

Deformación resorte independiente

$$\left. \vphantom{\sigma} \right\} \sigma = \sigma_1 = E_1 \varepsilon_{\text{resorte}} \longrightarrow \varepsilon_{\text{resorte}} = \frac{\sigma}{E_1} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_{\text{resorte}}}{dt} = \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt}$$

Deformación elemento en paralelo

$$\left. \vphantom{\varepsilon} \right\} \varepsilon = \varepsilon_{\text{paralelo}} + \varepsilon_{\text{resorte}} \longrightarrow \varepsilon_{\text{paralelo}} = \varepsilon - \varepsilon_{\text{resorte}} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E_1}$$

Despejando $d\varepsilon_{\text{paralelo}}/dt$ de la ecuación de Maxwell

$$\left. \vphantom{\sigma_2} \right\} \sigma_2 + \frac{\eta_2}{E_2} \frac{d\sigma_2}{dt} = \eta_2 \frac{d\varepsilon_{\text{paralelo}}}{dt} \longrightarrow \frac{d\varepsilon_{\text{paralelo}}}{dt} = \frac{\sigma_2}{\eta_2} + \frac{1}{E_2} \frac{d\sigma_2}{dt}$$

Sust. en: $\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_{\text{paralelo}}}{dt} + \frac{d\varepsilon_{\text{resorte}}}{dt}$

$$\left. \vphantom{\frac{d\varepsilon}{dt}} \right\} \frac{d\varepsilon}{dt} = \left(\frac{\sigma - E_3(\varepsilon - (\sigma/E_1))}{\eta_2} + \frac{1}{E_2} \frac{d[\sigma - E_3(\varepsilon - (\sigma/E_1))]}{dt} \right) + \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt}$$

Desarrollando:

$$\left. \vphantom{\frac{d\varepsilon}{dt}} \right\} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta_2} - \frac{E_3}{\eta_2} \varepsilon + \frac{E_3 \sigma}{\eta_2 E_1} + \frac{1}{E_2} \frac{d\sigma}{dt} - \frac{E_3}{E_2} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_3}{E_2 E_1} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{E_1} \frac{d\sigma}{dt}$$

Rearreglando:

$$\left. \vphantom{\frac{d\varepsilon}{dt}} \right\} \left(\frac{E_2 + E_3}{E_2} \right) \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_3}{\eta_2} \varepsilon = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{E_3}{E_2 E_1} \right) \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta_2} + \frac{E_3 \sigma}{\eta_2 E_1}$$

La ecuación que describe el modelo de cuatro elementos en paralelo con resorte independiente es:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \varepsilon = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{(E_2 + E_3)} \right) \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \left(1 + \frac{E_3}{E_1} \right) \sigma$$

Como $\sigma = \sigma_0$, la ecuación anterior queda:
$$\left. \begin{array}{l} \text{Como } \sigma = \sigma_0, \text{ la ecuación anterior} \\ \text{queda:} \end{array} \right\} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \varepsilon = \frac{E_2}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \left(1 + \frac{E_3}{E_1}\right) \sigma_0$$

Esta ecuación es de la forma
$$\left. \begin{array}{l} \text{Esta ecuación es de la forma} \end{array} \right\} \frac{dy}{dt} + Py = Q(t)$$

Cuya solución general es
$$\left. \begin{array}{l} \text{Cuya solución general es} \end{array} \right\} y = e^{-\int P dt} \left[\int Q(t) e^{\int P dt} dt + C \right]$$

Sustituyendo $P = E_2 E_3 / \eta_2 (E_2 + E_3)$, $y = \varepsilon$, y el valor de Q :

$$\varepsilon = e^{-\int \frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} dt} \left[\int \frac{E_2}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \left(1 + \frac{E_3}{E_1}\right) \sigma_0 e^{\int \frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} dt} dt + C \right]$$

Integrando la ecuación anterior:

$$\varepsilon = e^{-\frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} t} \left[\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \right) \sigma_0 e^{\frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} t} + C \right] \longrightarrow \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} + C e^{-\frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} t}$$

Aplicando la C.I. a $t = 0$, $\varepsilon = \sigma_0 / E_1$
$$\left. \begin{array}{l} \text{Aplicando la C.I. a } t = 0, \varepsilon = \sigma_0 / E_1 \end{array} \right\} \frac{\sigma_0}{E_1} = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} + C \longrightarrow C = -\frac{\sigma_0}{E_3}$$

Sustituyendo el valor de C en la ecuación de la deformación
$$\left. \begin{array}{l} \text{Sustituyendo el valor de } C \text{ en la} \\ \text{ecuación de la deformación} \end{array} \right\} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} - \frac{\sigma_0}{E_3} e^{-\frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} t}, \text{ donde } \tau_r = \frac{\eta_2 (E_2 + E_3)}{E_2 E_3}$$

Por lo que la ecuación que describe el modelo es:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-\frac{E_2 E_3}{\eta_2 (E_2 + E_3)} t}\right) \quad \text{o} \quad \varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3} \left(1 - e^{-t/\tau_r}\right)$$

Evaluando la ecuación anterior a $t = 0$ se obtiene la respuesta instantánea
$$\left. \begin{array}{l} \text{Evaluando la ecuación anterior} \\ \text{a } t = 0 \text{ se obtiene la respuesta instantánea} \end{array} \right\} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1}$$

A tiempos cortos se tiene
$$\left. \begin{array}{l} \text{A tiempos cortos se tiene} \end{array} \right\} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \left(\frac{E_2 \sigma_0}{\eta_2 (E_2 + E_3)} \right) t$$

A tiempos largos se alcanza un valor constante de la deformación
$$\left. \begin{array}{l} \text{A tiempos largos se alcanza un valor} \\ \text{constante de la deformación} \end{array} \right\} \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{E_3}$$

Este apéndice contiene los datos experimentales no utilizados en el capítulo de resultados y las comparaciones entre los porcentajes de deformaciones y los datos obtenidos con los modelos (modelos de tres y cuatro elementos en serie, cuatro elementos –resorte independiente y cinco elementos) que se ajustaron mejor a los datos experimentales. Además se muestran los valores que tomaron los parámetros de cada uno de los modelos anteriores. Estos resultados se muestran en tres secciones: 1) asfaltos modificados con distinto contenido de azufre, 2) asfaltos modificados con diferente grado de hidrogenación y 3) asfaltos modificados con los polímeros comerciales.

B.1. Asfaltos modificados (S-1205 al 5% en peso) y vulcanizados.

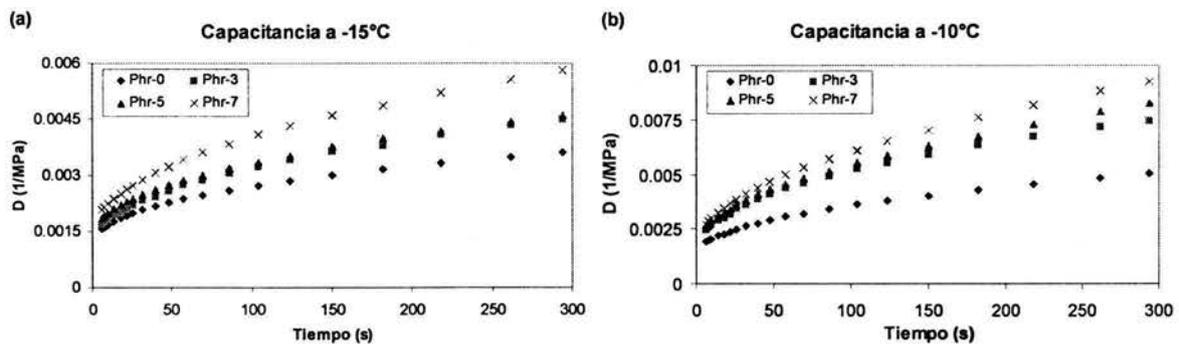
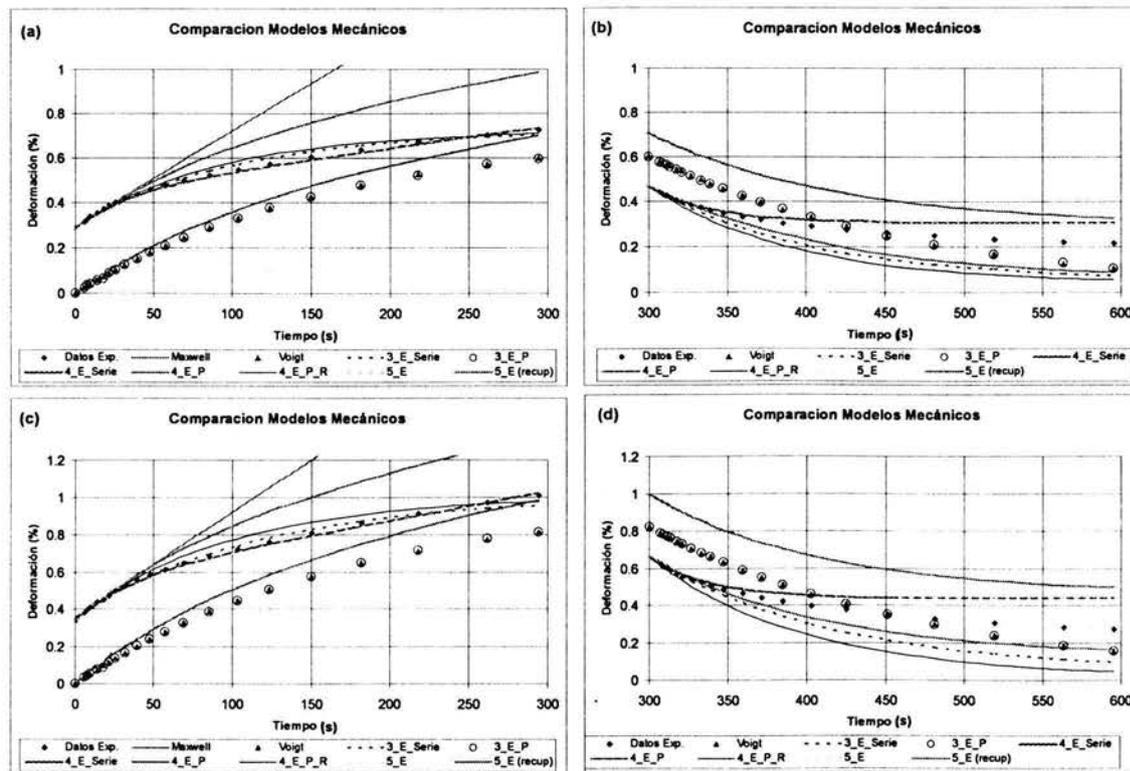


Figura B.1. Capacitancias de los asfaltos modificados con 5% de S-1205 con distintos grados de vulcanización (a) a -15 °C y (b) a -10 °C



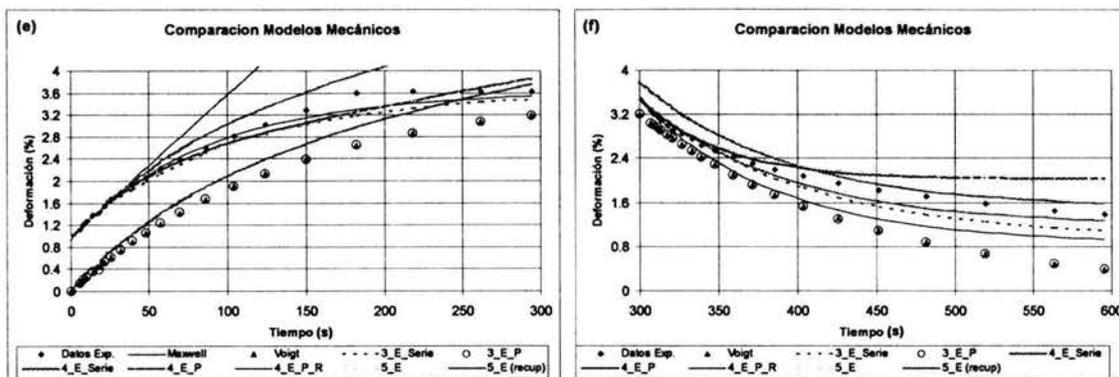


Figura B.1.1. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con Phr-0.

Cuadro B.1.1.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Phr-0, -15 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	1.408499	1.446814	1.443922	1.443922	1.443922
$E_{(p)}$	MPa	0.954863	2.552842	0.841320	1.016050	0.070866
$\eta_{(p)}$	MPa*s	96.81	99.84	40.49	30.45	7.65
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.939242	2.572727	0.924855
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		422.18		421.64	421.64
τ_r	s	101.39	422.18	91.23	41.80	116.28

Cuadro B.1.1.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Phr-0, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	1.170919	1.218020	1.215749	1.215749	1.215749
$E_{(p)}$	MPa	0.631585	1.835974	5.353762	1.618093	0.214988
$\eta_{(p)}$	MPa*s	73.19	72.10	53.84	36.18	17.58
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.619268	1.849995	0.733632
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		266.67		266.34	266.34
τ_r	s	115.89	39.27	96.99	41.92	105.71

Cuadro B.1.1.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Phr-0, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.415948	0.441257	0.439912	0.439912	0.439912
$E_{(p)}$	MPa	0.157060	0.283212	8.370383	8.290423	102.509801
$\eta_{(p)}$	MPa*s	15.99	14.87	13.12	15.38	15.88
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.153895	0.284471	0.172757
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		83.71		83.57	83.57
τ_r	s	101.84	52.49	86.82	55.91	92.06

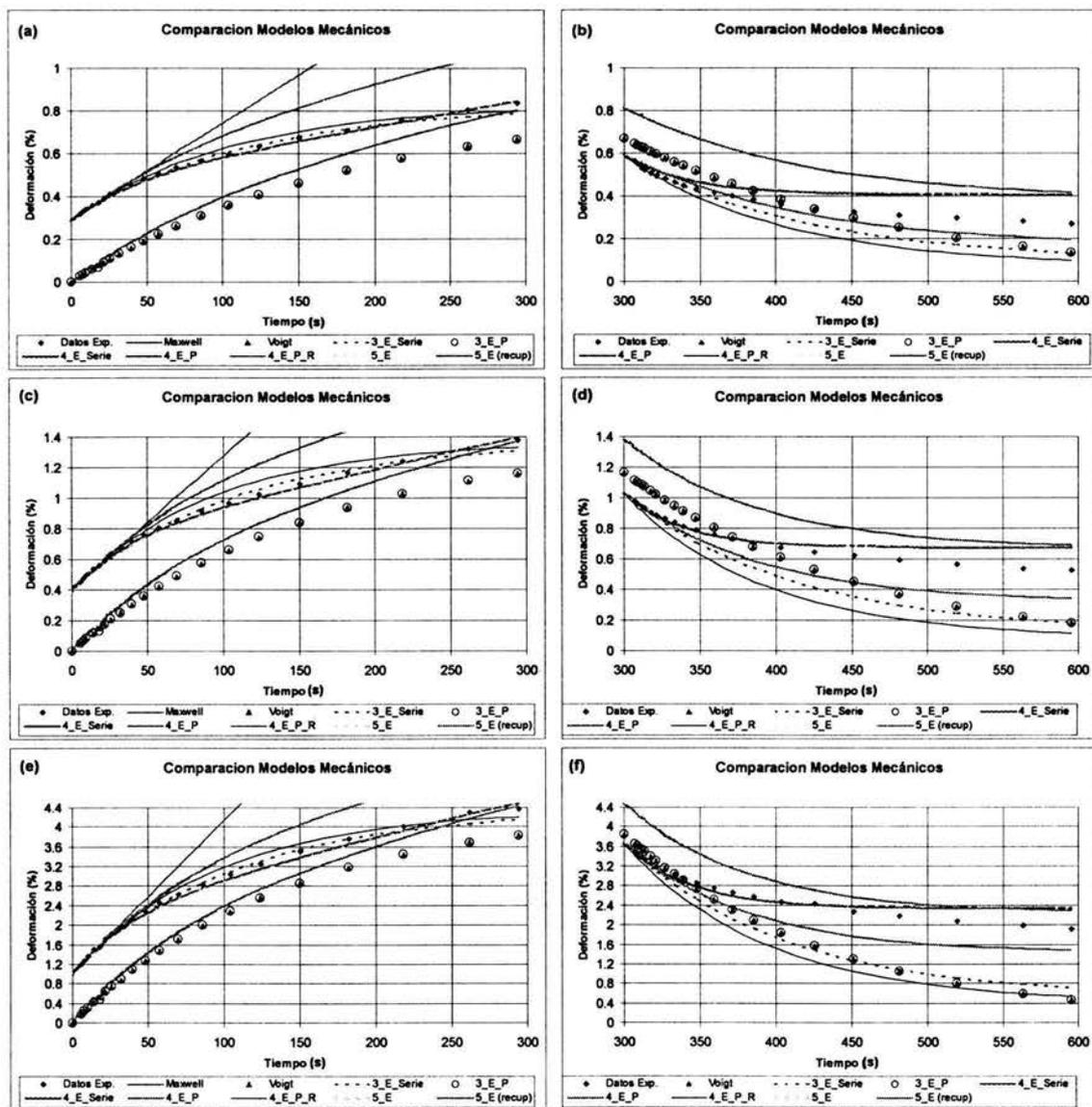


Figura B.1.2. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con Phr-3.

Cuadro B.1.2.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Phr-3. -15 °C)

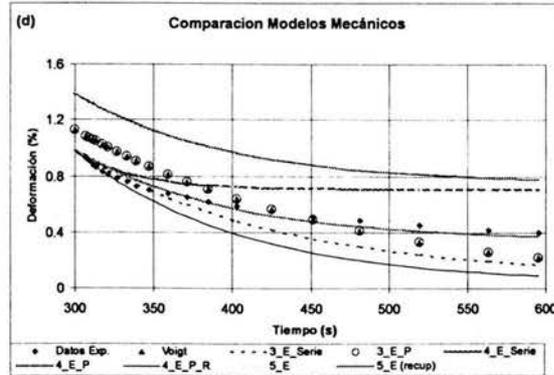
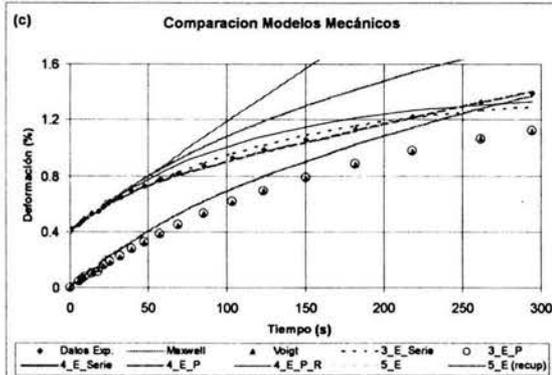
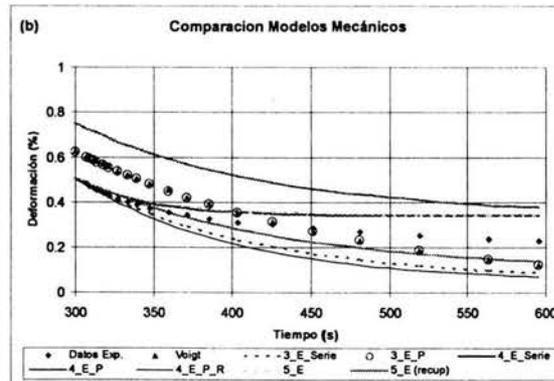
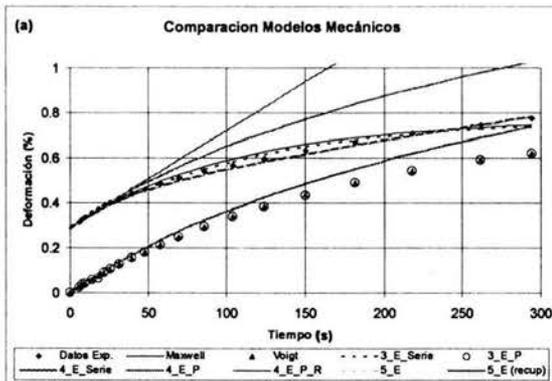
	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	1.295395	1.333976	1.331318	1.331318	1.331318
$E_{(p)}$	MPa	0.703265	2.047041	0.866097	0.953514	0.069838
$\eta_{(p)}$	MPa*s	84.68	89.21	40.49	30.45	7.65
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.693112	2.063016	0.809151
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		299.83		299.46	299.46
τ_r	s	120.41	43.58	105.16	46.69	119.05

Cuadro B.1.2.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Phr-3, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.931299	0.982326	0.979917	0.979917	0.979917
$E_{(p)}$	MPa	0.393737	1.068416	17.937628	3.158715	0.212897
$\eta_{(p)}$	MPa*s	43.97	42.41	35.21	33.97	13.36
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.385647	1.075963	0.512848
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		171.34		171.10	171.10
τ_r	s	111.69	39.70	93.28	42.33	88.81

Cuadro B.1.2.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Phr-3, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.368025	0.389838	0.388461	0.388461	0.388461
$E_{(p)}$	MPa	0.114567	0.285223	8.425734	8.442005	102.510430
$\eta_{(p)}$	MPa*s	12.25	12.45	10.46	12.93	13.35
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.112721	0.287106	0.165090
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		51.23		51.15	51.15
τ_r	s	106.91	43.64	94.06	46.58	81.01



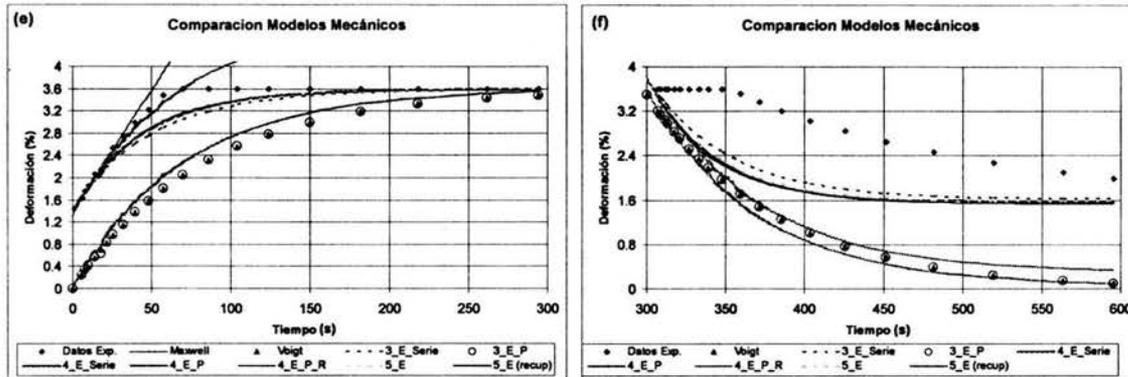


Figura B.1.3. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con Phr-5.

Cuadro B.1.3.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Phr-5, -15 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	1.182042	1.208799	1.206489	1.206489	1.206489
$E_{(p)}$	MPa	0.722295	2.077782	0.870410	0.960086	0.065670
$\eta_{(p)}$	MPa*s	80.88	89.65	40.49	30.45	7.65
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.713461	2.094376	0.765509
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		308.01		307.59	307.59
τ_r	s	111.98	43.15	103.26	46.25	126.55

Cuadro B.1.3.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Phr-5, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.841912	0.883001	0.881073	0.881073	0.881073
$E_{(p)}$	MPa	0.354151	1.239248	11.261638	3.21174406	0.223547
$\eta_{(p)}$	MPa*s	44.92	46.08	35.55	35.80	15.02
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.347652	1.250766	0.516932
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		139.39		139.19	139.19
τ_r	s	126.85	37.19	105.42	39.77	96.23

Cuadro B.1.3.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Phr-5, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.245907	0.263114	0.262152	0.262152	0.262152
$E_{(p)}$	MPa	0.159362	0.155639	8.553087	8.589055	102.511145
$\eta_{(p)}$	MPa*s	8.04	6.40	6.64	6.66	6.77
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.153209	0.155987	0.097796
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		1871.97		1871.97	1871.97
τ_r	s	50.44	41.14	44.08	43.46	69.31

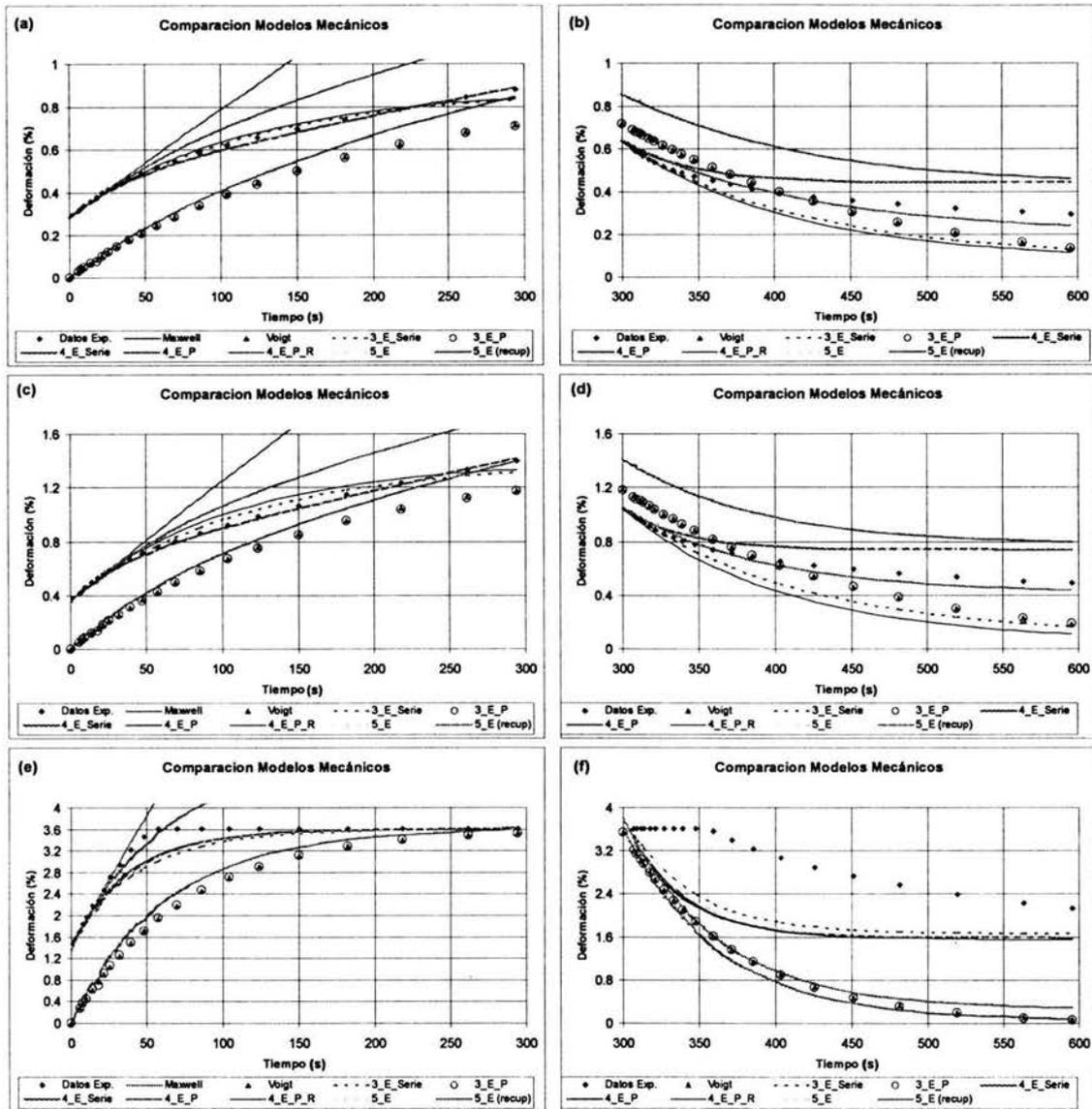


Figura B.1.4. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con Phr-7.

Cuadro B.1.4.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Ph-7, -15 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	1.081440	1.104362	1.101823	1.101823	1.101823
$E_{(p)}$	MPa	0.528176	1.602610	1.023179	0.996040	0.069456
$\eta_{(p)}$	MPa*s	62.63	73.65	38.88	30.45	7.65
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.523447	1.615968	0.655132
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		222.87		222.57	222.57
τ_r	s	118.58	45.96	112.26	49.41	121.88

Cuadro B.1.4.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Phr-7, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.854145	0.893788	0.891207	0.891207	0.891207
$E_{(p)}$	MPa	0.302550	1.000717	17.582774	4.78685524	0.210563
$\eta_{(p)}$	MPa*s	35.54	39.08	30.79	34.87	13.00
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.298158	1.009771	0.473396
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		121.27		121.11	121.11
τ_r	s	117.48	39.05	105.00	41.81	89.19

Cuadro B.1.4.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (Phr-7, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.214033	0.230831	0.229921	0.229921	0.229921
$E_{(p)}$	MPa	0.145819	0.141429	8.569627	8.602512	102.511182
$\eta_{(p)}$	MPa*s	6.52	5.16	5.35	5.37	5.45
$E_{(p,ind)}$	MPa			0.139263	0.141788	0.087703
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		1663.89		1652.89	1652.89
τ_r	s	44.69	36.45	39.06	38.49	62.23

B.2. Asfaltos modificados (SBS) e hidrogenados

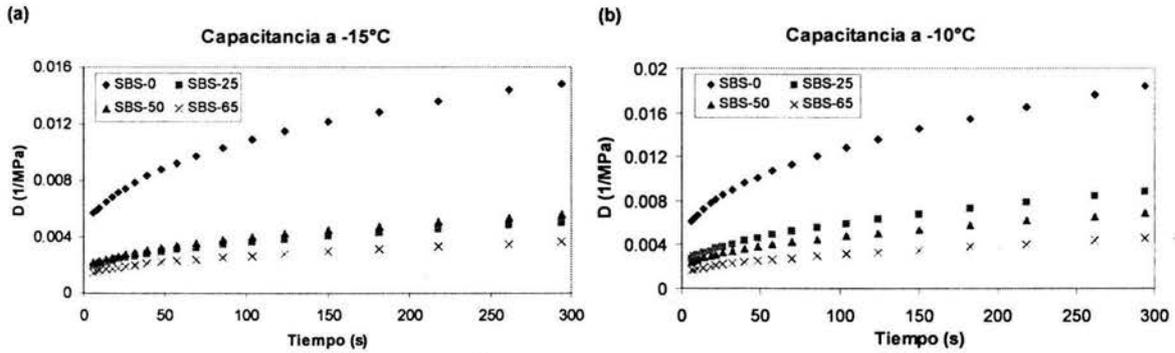
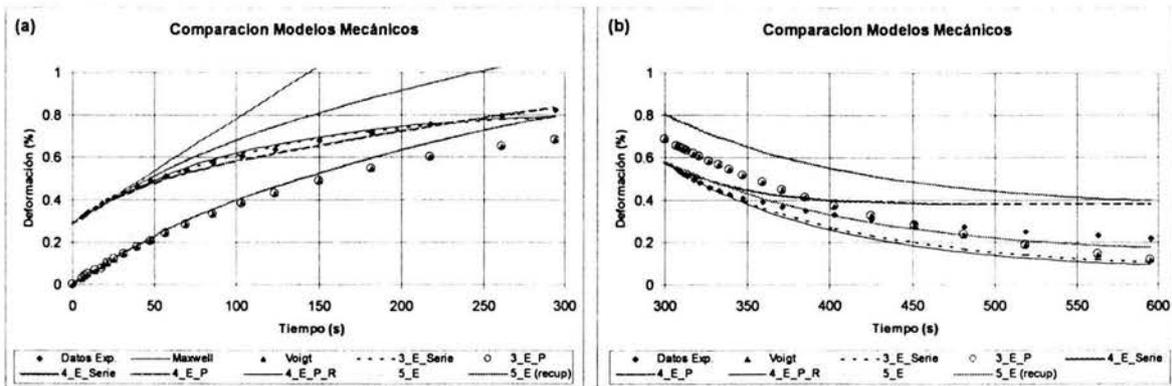


Figura B.2. Capacitancias de los asfaltos modificados con SBS y distintos porcentajes de hidrogenación (a) a -15 °C y (b) a -10 °C



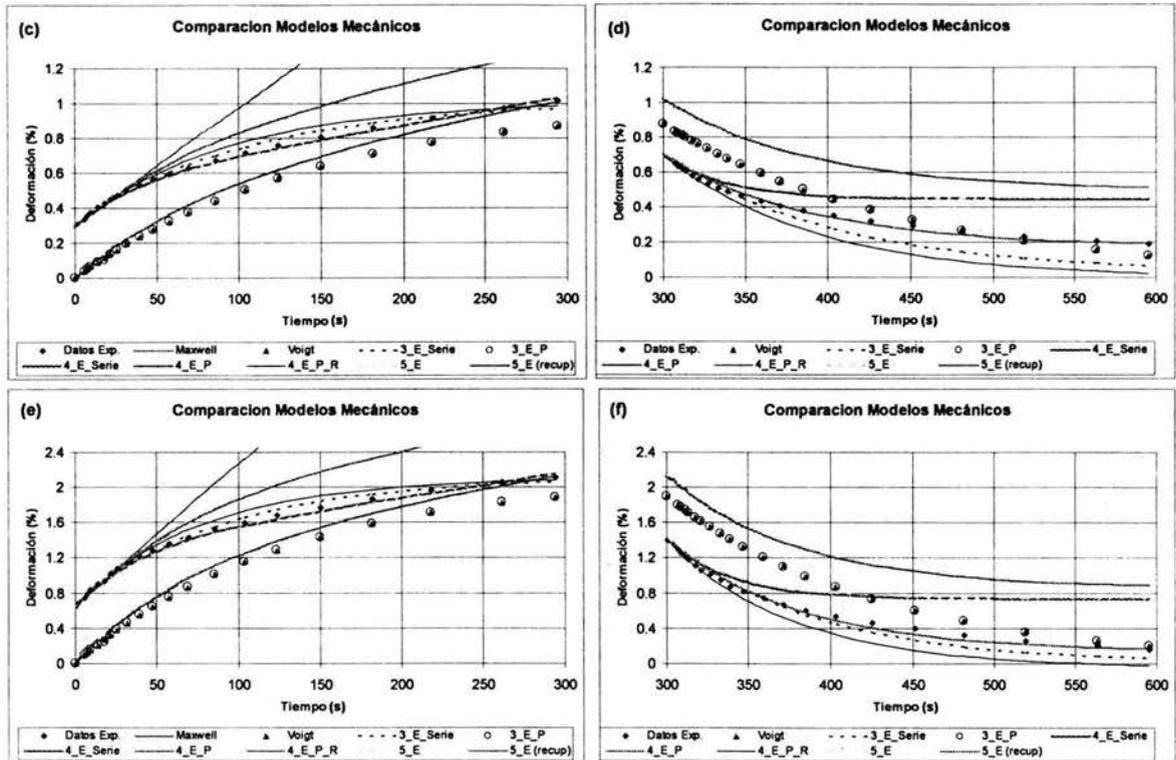


Figura B.2.1. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con SBS-0.

Cuadro B.2.1.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-0, -15 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.229402	0.234008	0.233460	0.233460	0.233460
$E_{(p)}$	MPa	0.123740	0.325359	8.412143	9.597748	0.119662
$\eta_{(p)}$	MPa*s	13.38	15.15	12.46	15.83	7.65
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.122591	0.327758	0.136344
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		55.52		55.44	55.44
τ_r	s	108.16	46.56	103.11	49.95	120.09

Cuadro B.2.1.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-0, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.217964	0.229039	0.228399	0.228399	0.228399
$E_{(p)}$	MPa	0.092966	0.257482	8.434496	8.484177	4.025253
$\eta_{(p)}$	MPa*s	9.88	9.93	8.35	10.37	10.37
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.091189	0.259446	0.121467
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		40.26		40.21	40.21
τ_r	s	106.30	38.58	92.58	41.19	87.97

Cuadro B.2.1.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-0, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.099193	0.104884	0.104600	0.104600	0.104600
$E_{(p)}$	MPa	0.045881	0.097242	8.441040	8.437965	102.510633
$\eta_{(p)}$	MPa*s	4.15	3.80	3.44	4.02	4.06
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.044809	0.097772	0.050535
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		23.28		23.25	23.25
τ_r	s	90.40	39.13	77.22	41.57	80.44

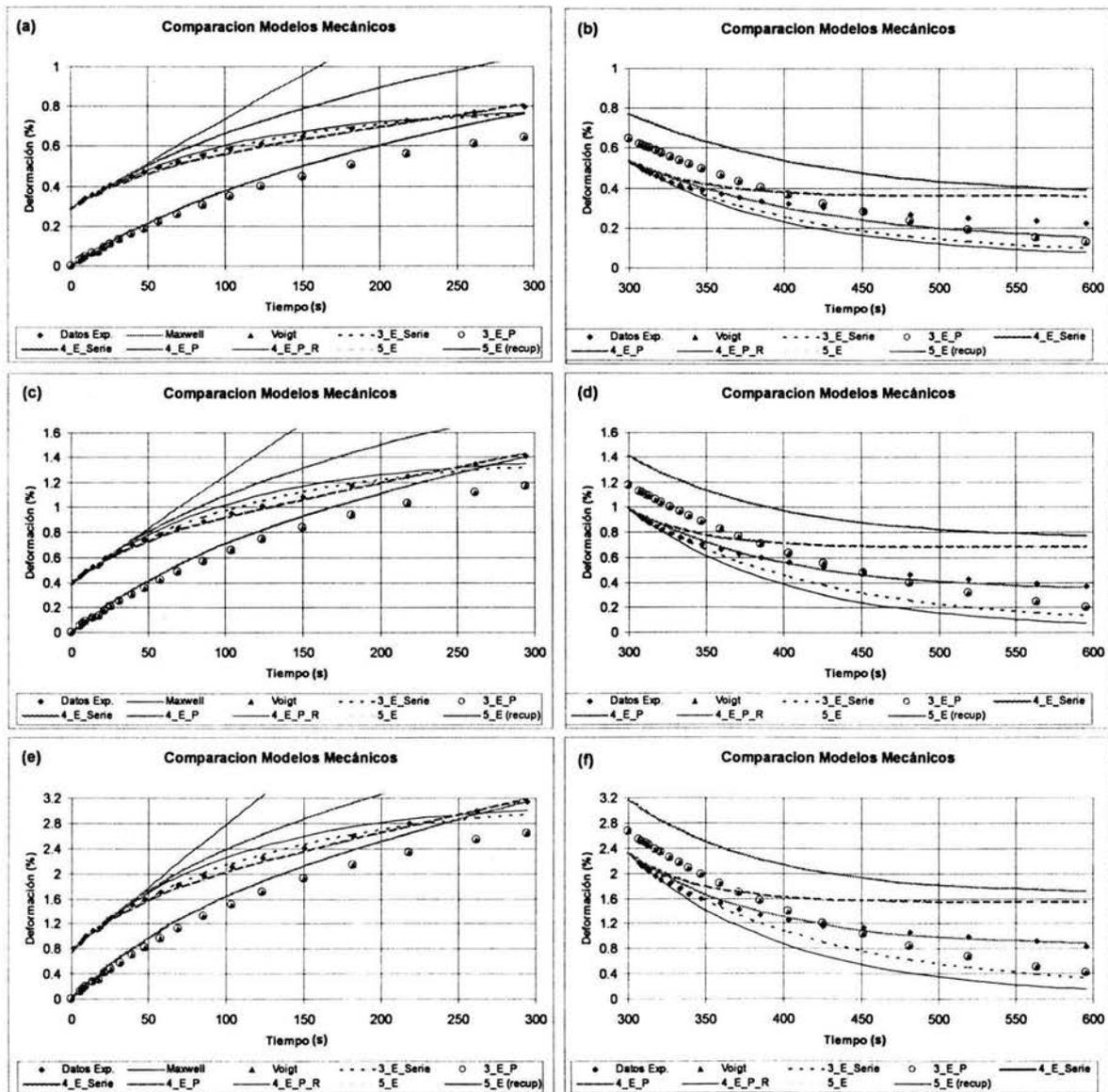


Figura B.2.2. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con SBS-25.

Cuadro B.2.2.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-25, -15 °C)

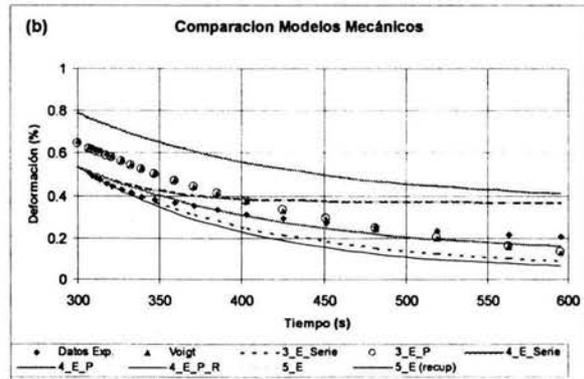
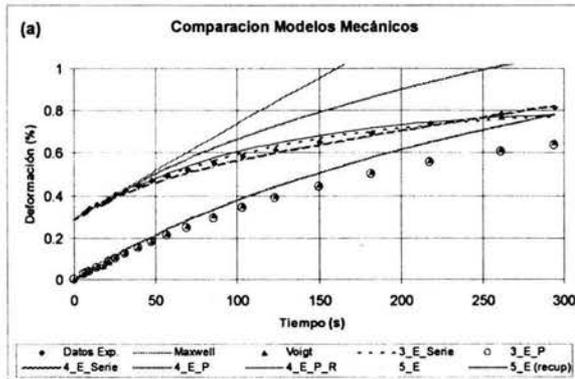
	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.651522	0.662794	0.662794	0.662794	0.662794
$E_{(p)}$	MPa	0.375587	1.071494	6.886980	4.890393	0.072388
$\eta_{(p)}$	MPa*s	43.00	50.95	36.78	41.79	7.65
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.371940	1.071494	0.409494
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		162.09		162.09	162.09
τ_r	s	114.49	47.55	104.23	47.55	104.23

Cuadro B.2.2.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-25, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.475610	0.492894	0.492894	0.492894	0.492894
$E_{(p)}$	MPa	0.188373	0.612838	8.210371	7.378276	0.981133
$\eta_{(p)}$	MPa*s	22.46	25.78	18.85	23.80	20.16
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.185792	0.612838	0.273180
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		76.49		76.49	76.49
τ_r	s	119.21	42.06	103.77	42.06	94.36

Cuadro B.2.2.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-25, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.238945	0.252654	0.252654	0.252654	0.252654
$E_{(p)}$	MPa	0.081116	0.242273	8.423985	8.356291	102.510328
$\eta_{(p)}$	MPa*s	9.64	10.46	7.92	10.16	10.45
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.079648	0.242273	0.123677
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		33.89		33.89	33.89
τ_r	s	118.87	43.16	100.33	43.16	84.56



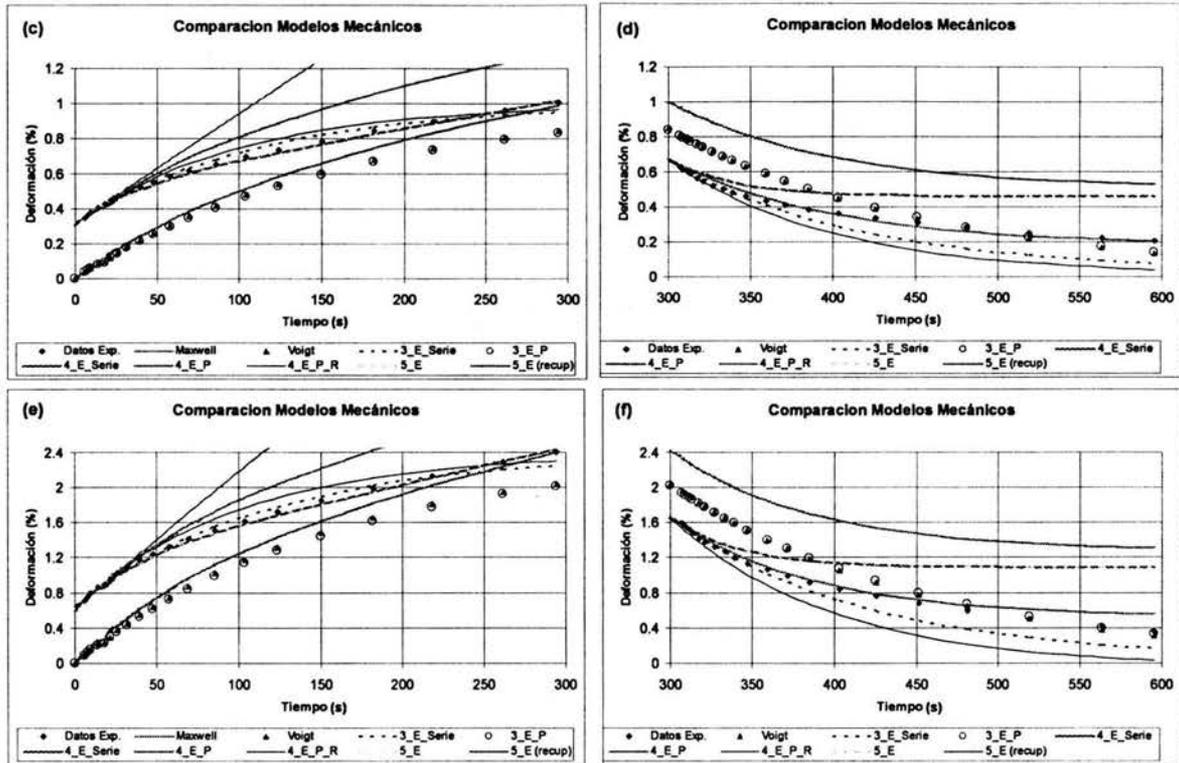


Figura B.2.3. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con SBS-50.

Cuadro B.2.3.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-50, -15 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.593850	0.603879	0.603879	0.603879	0.603879
$E_{(p)}$	MPa	0.331444	1.018944	7.588851	6.295290	0.072922
$\eta_{(p)}$	MPa*s	39.09	47.45	33.89	40.84	7.65
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.328400	1.018944	0.379166
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		138.74		138.74	138.74
τ_r	s	117.93	46.57	107.67	46.57	125.15

Cuadro B.2.3.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-50, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.546090	0.565062	0.565062	0.565062	0.565062
$E_{(p)}$	MPa	0.252246	0.798357	7.851760	5.778449	0.529581
$\eta_{(p)}$	MPa*s	28.75	32.87	24.17	28.88	20.23
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.248394	0.798357	0.330875
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		103.31		103.31	103.31
τ_r	s	113.96	41.17	100.39	41.17	99.34

Cuadro B.2.3.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-50, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recua)
$E_{(ind)}$	MPa	0.270818	0.285925	0.285925	0.285925	0.285925
$E_{(p)}$	MPa	0.098409	0.298271	8.406675	8.270974	102.510013
$\eta_{(p)}$	MPa*s	11.75	12.64	9.54	12.20	12.62
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.096555	0.298271	0.145984
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		40.84		40.84	40.84
τ_r	s	119.41	42.37	99.96	42.37	86.57

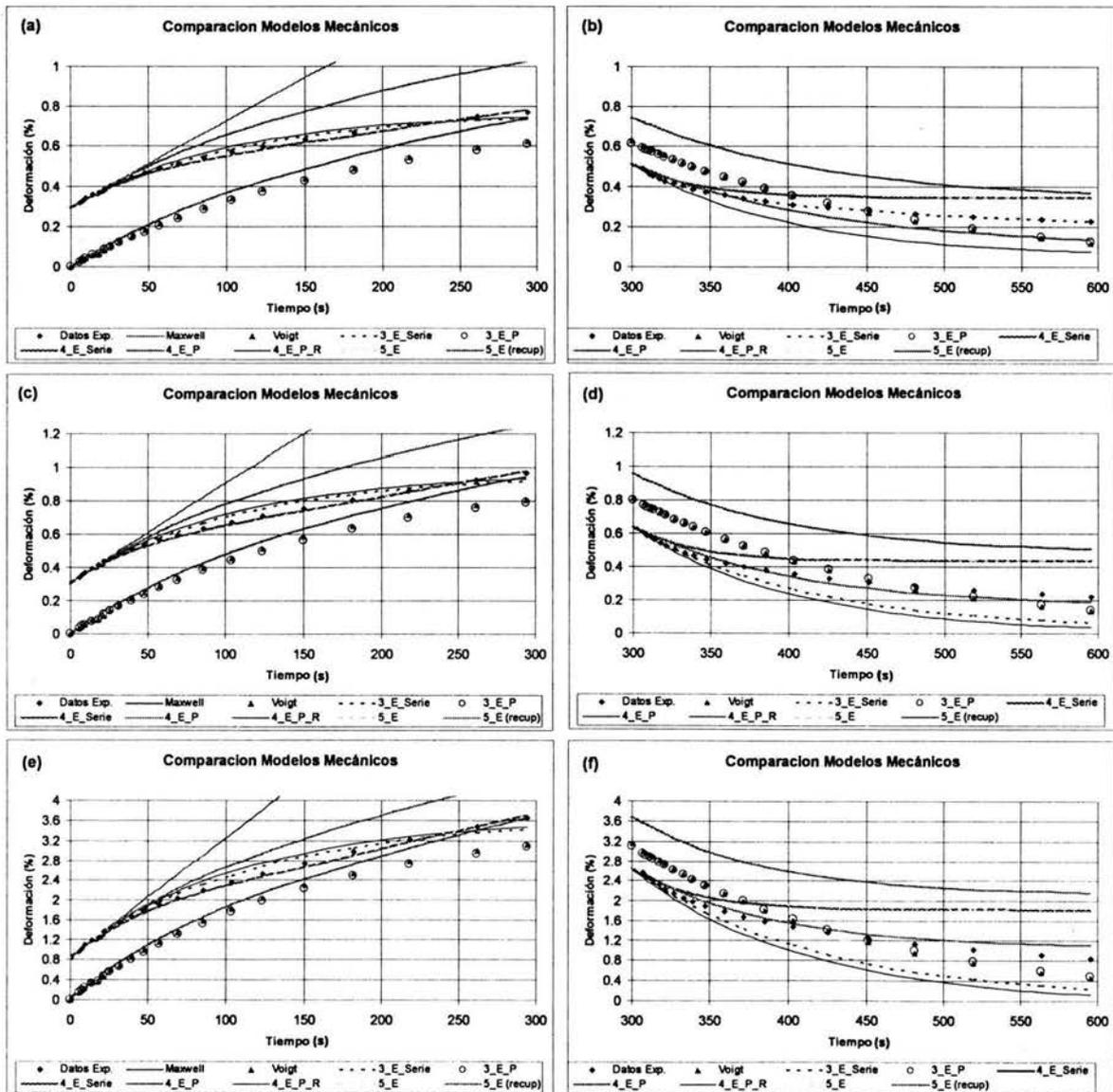


Figura B.2.4. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -15 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con SBS-65.

Cuadro B.2.4.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-65, -15 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.857705	0.879551	0.878027	0.878027	0.878027
$E_{(p)}$	MPa	0.532592	1.472563	2.977752	2.612968	0.069684
$\eta_{(p)}$	MPa*s	58.52	63.35	44.81	43.52	7.65
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.525047	1.485882	0.551901
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		231.60		231.21	231.21
τ_r	s	109.87	43.02	100.39	45.95	123.70

Cuadro B.2.4.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-65, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.810831	0.841913	0.840103	0.840103	0.840103
$E_{(p)}$	MPa	0.386943	1.232916	6.128199	2.151490	0.330204
$\eta_{(p)}$	MPa*s	42.64	47.28	36.28	32.29	20.24
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.380614	1.245996	0.501781
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		157.94		157.69	157.69
τ_r	s	110.20	38.35	101.24	40.93	101.63

Cuadro B.2.4.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (SBS-65, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.297950	0.312309	0.311319	0.311319	0.311319
$E_{(p)}$	MPa	0.090074	0.302380	8.407020	8.247272	102.509924
$\eta_{(p)}$	MPa*s	10.54	12.14	9.51	12.65	13.10
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.088920	0.305752	0.154255
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		36.04		35.98	35.98
τ_r	s	117.02	40.13	108.11	42.90	85.04

B.3. Asfalto modificado con polímeros comerciales o funcionarizados

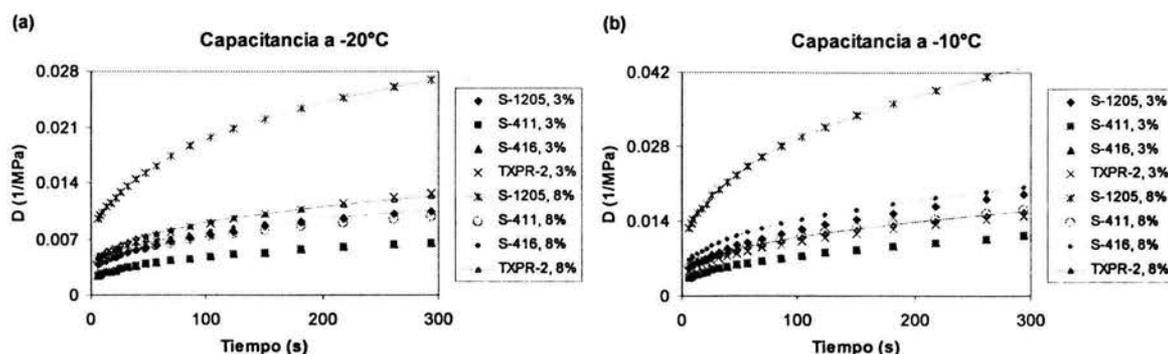


Figura B.3. Capacitancias de los asfaltos modificados con 3 u 8% de polímeros comerciales (a) a -20°C y (b) a -10°C

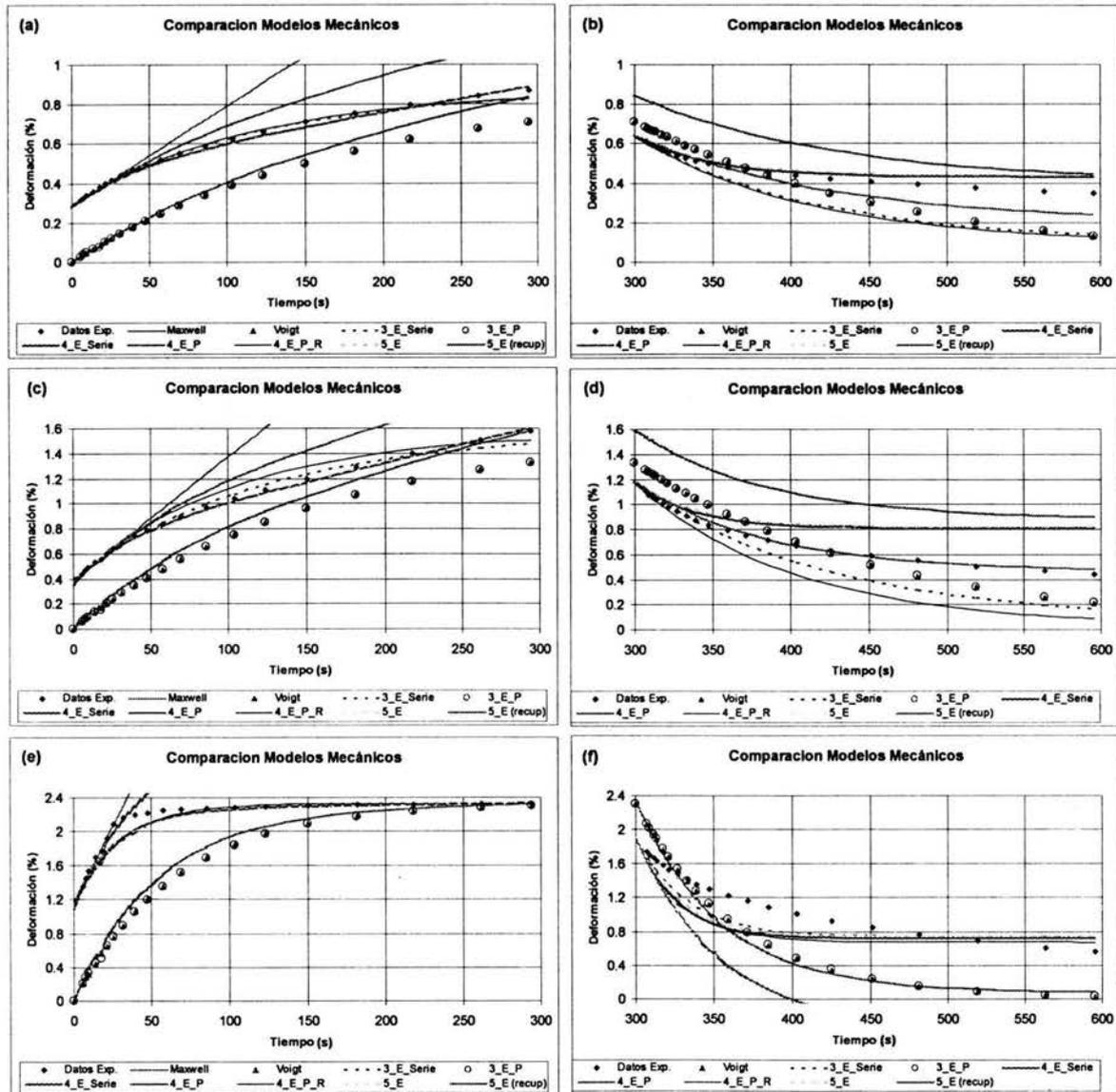


Figura B.3.1. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-1205 al 3%.

Cuadro B.3.1.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205,3%,-20 °C)

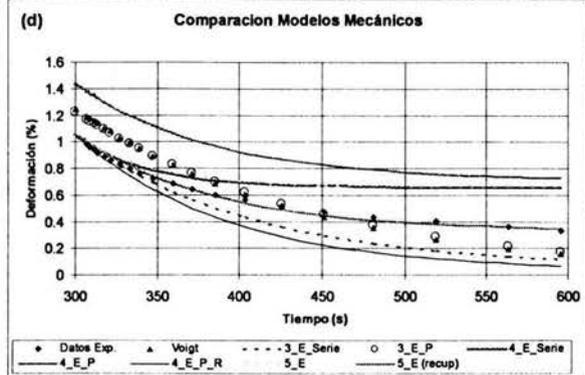
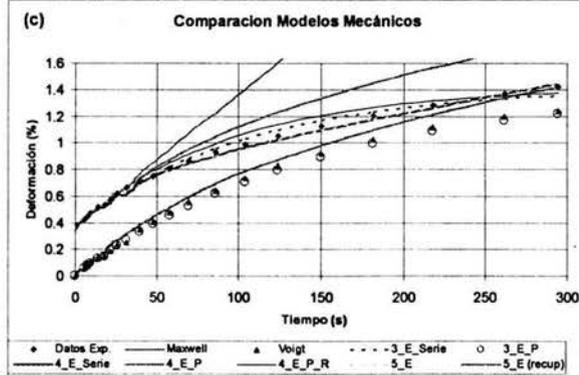
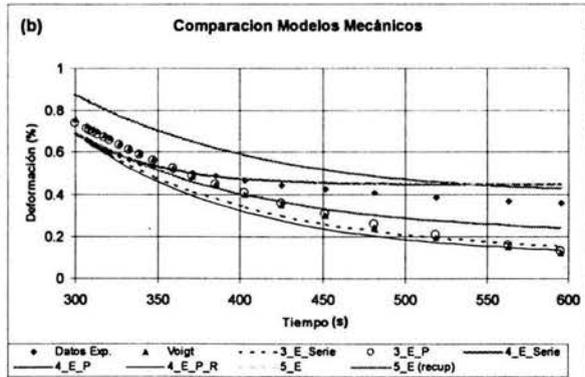
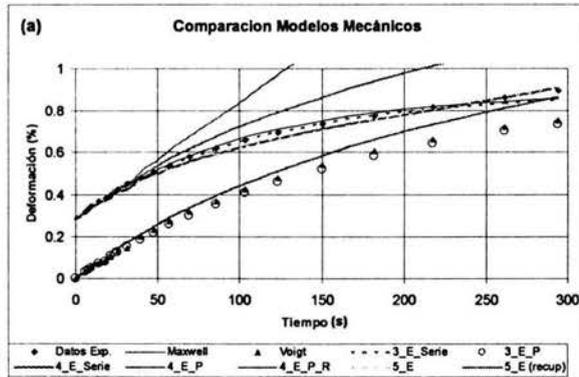
	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.600068	0.612248	0.606923	0.606923	0.606923
$E_{(p)}$	MPa	0.295864	0.813543	15.201736	27.879848	0.060142
$\eta_{(p)}$	MPa*s	34.29	40.03	32.42	43.17	6.52
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.294226	0.826757	0.349993
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		128.90		128.75	128.75
τ_r	s	115.89	49.21	112.31	53.77	127.02

Cuadro B.3.1.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205,3%,-10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.446197	0.475880	0.468680	0.468680	0.468680
$E_{(p)}$	MPa	0.144775	0.457961	9.469969	27.773292	4.370574
$\eta_{(p)}$	MPa*s	17.40	17.60	14.43	19.20	18.53
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.142556	0.467405	0.234021
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		58.79		58.71	58.71
τ_r	s	120.22	38.42	102.77	41.76	83.42

Cuadro B.3.1.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205, 3%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.147198	0.158551	0.155742	0.155742	0.155742
$E_{(p)}$	MPa	0.148856	0.146808	8.445992	8.457112	102.510721
$\eta_{(p)}$	MPa*s	4.88	3.84	4.06	4.08	4.15
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.141032	0.149323	0.076232
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		704.57		703.67	703.67
τ_r	s	32.79	26.13	29.25	27.79	54.44



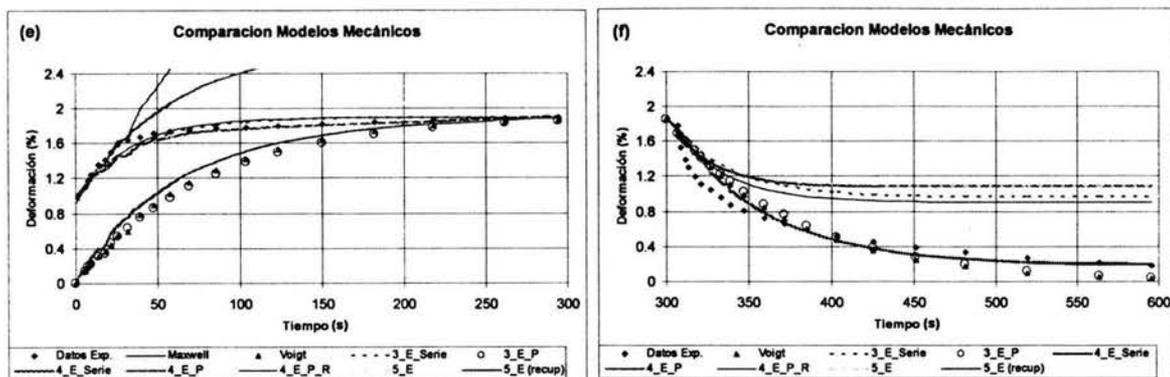


Figura B.3.2. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-1205 al 8%.

Cuadro B.3.2.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205,8%,-20 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.239099	0.245173	0.244168	0.244168	0.244168
$E_{(p)}$	MPa	0.112609	0.279386	15.528116	28.323014	0.080096
$\eta_{(p)}$	MPa*s	12.39	13.78	11.40	14.56	5.58
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.111519	0.281643	0.130785
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		52.51		52.41	52.41
τ_r	s	109.98	49.31	102.97	52.21	112.43

Cuadro B.3.2.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205,8%,-10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.184605	0.194454	0.193306	0.193306	0.193306
$E_{(p)}$	MPa	0.065162	0.170947	9.556625	27.823000	5.328773
$\eta_{(p)}$	MPa*s	6.88	7.13	5.98	7.55	7.47
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.064143	0.172478	0.091150
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		29.15		29.10	29.10
τ_r	s	105.51	41.70	93.88	44.02	83.30

Cuadro B.3.2.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205, 8%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.069981	0.075197	0.074736	0.074736	0.074736
$E_{(p)}$	MPa	0.074629	0.085182	8.453255	8.465922	102.510750
$\eta_{(p)}$	MPa*s	2.72	2.17	2.22	2.26	2.28
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.069888	0.085825	0.039949
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		106.73		106.57	106.57
τ_r	s	36.49	25.46	31.97	26.59	31.97

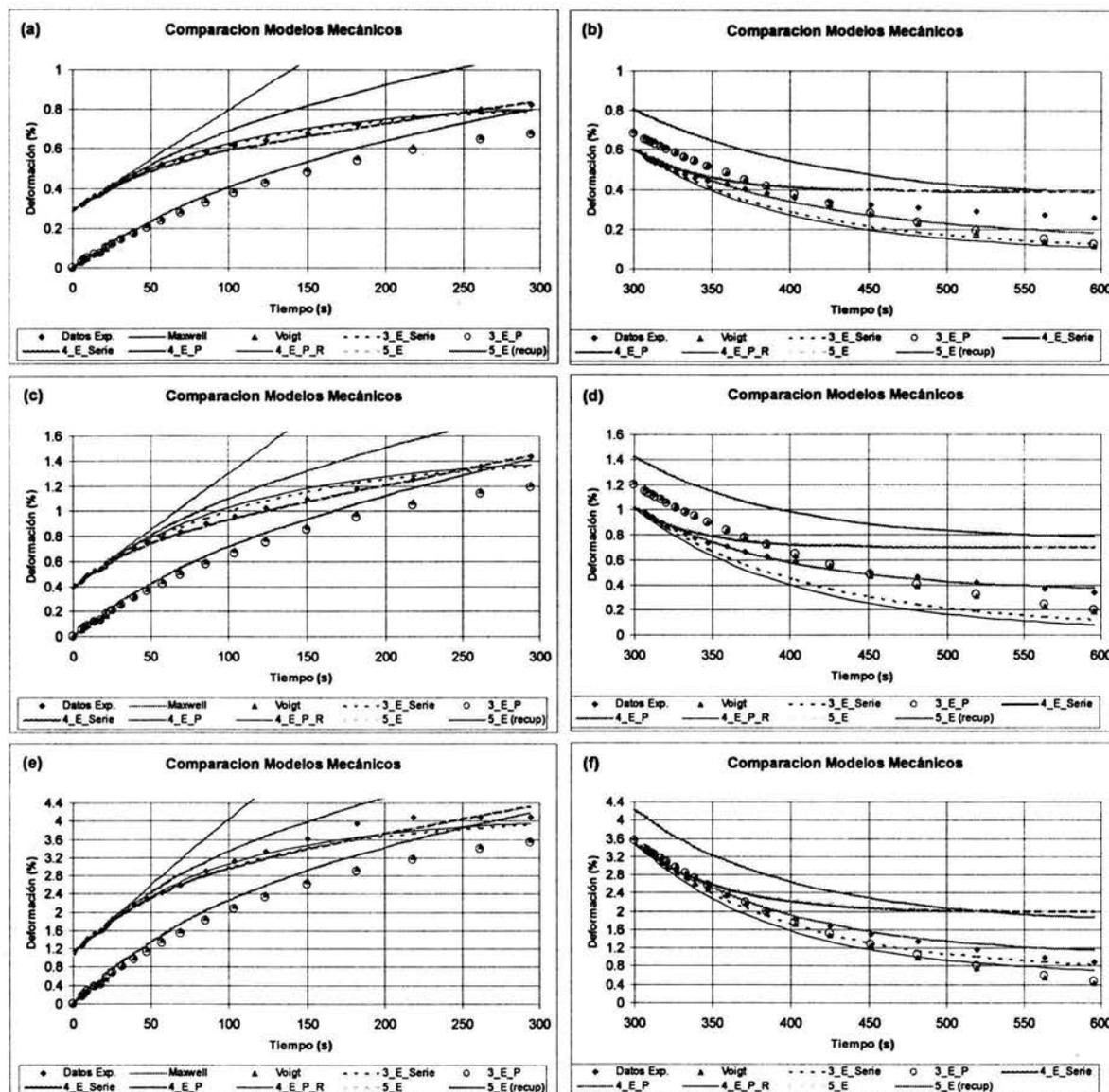


Figura B.3.3. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-411 al 3%.

Cuadro B.3.3.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411,3%, -20 °C)

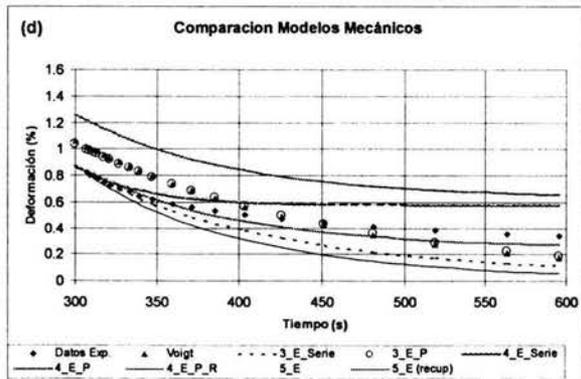
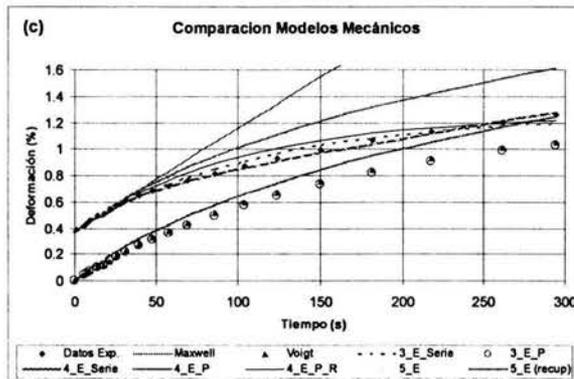
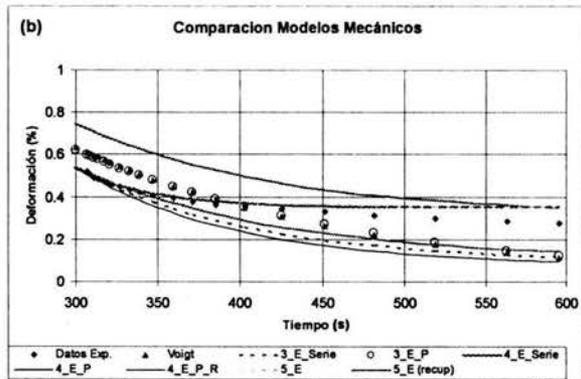
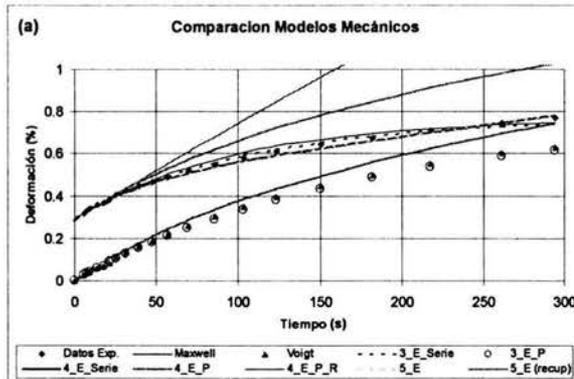
	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.905968	0.927664	0.925521	0.925521	0.925521
$E_{(p)}$	MPa	0.490135	1.216966	14.257118	26.860991	0.062532
$\eta_{(p)}$	MPa*s	51.77	57.01	46.76	58.80	6.52
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.484596	1.225324	0.527264
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		226.54		226.23	226.23
τ_r	s	105.62	46.85	99.76	50.18	116.61

Cuadro B.3.3.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411,3%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.661236	0.686836	0.685248	0.685248	0.685248
$E_{(p)}$	MPa	0.252734	0.814542	9.037525	27.480476	1.010477
$\eta_{(p)}$	MPa*s	29.04	32.44	25.49	33.95	25.53
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.249394	0.821146	0.373534
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		104.58		104.44	104.44
τ_r	s	114.89	39.83	105.03	42.58	93.60

Cuadro B.3.3.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411, 3%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.233981	0.244068	0.243505	0.243505	0.243505
$E_{(p)}$	MPa	0.088701	0.170838	8.426344	8.402919	102.510492
$\eta_{(p)}$	MPa*s	9.00	9.28	8.05	9.73	9.92
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.087406	0.171597	0.100661
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		45.09		45.01	45.01
τ_r	s	101.49	54.34	93.06	57.86	98.63



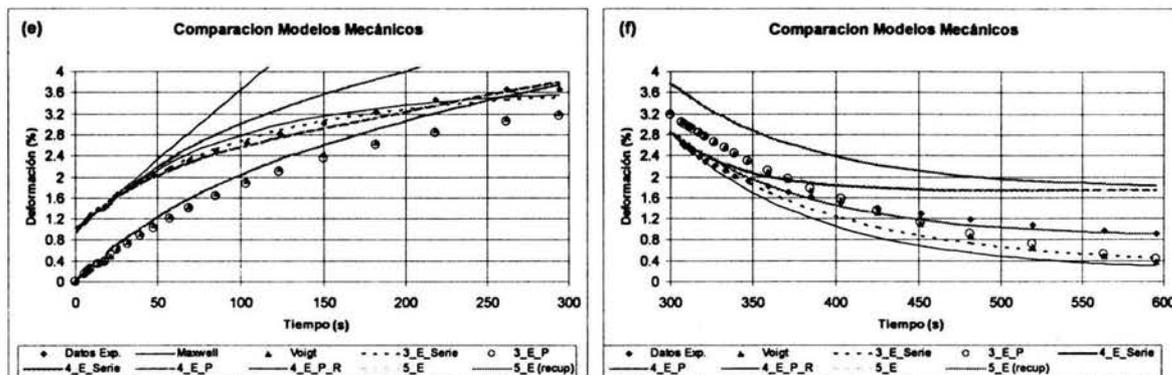


Figura B.3.4. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-411 al 8%.

Cuadro B.3.4.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411,8%, -20 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.551836	0.567067	0.566035	0.566035	0.566035
$E_{(p)}$	MPa	0.342400	0.854289	15.228818	28.032793	0.064379
$\eta_{(p)}$	MPa*s	36.32	38.21	31.83	39.88	6.52
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.337152	0.861259	0.341557
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		156.39		156.11	156.11
τ_r	s	106.08	44.72	96.50	47.72	120.34

Cuadro B.3.4.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411,8%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.422371	0.443245	0.442268	0.442268	0.442268
$E_{(p)}$	MPa	0.185990	0.546796	9.382617	27.726705	3.665305
$\eta_{(p)}$	MPa*s	20.95	21.48	17.47	22.66	21.66
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.182377	0.552049	0.245549
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		77.74		77.61	77.61
τ_r	s	112.66	39.29	97.63	41.86	94.10

Cuadro B.3.4.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411, 8%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.161234	0.170716	0.170234	0.170234	0.170234
$E_{(p)}$	MPa	0.061430	0.144698	8.441787	8.437284	102.510645
$\eta_{(p)}$	MPa*s	6.17	6.17	5.29	6.50	6.61
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.060217	0.145851	0.078551
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		27.53		27.47	27.47
τ_r	s	100.36	42.64	88.54	45.36	84.22

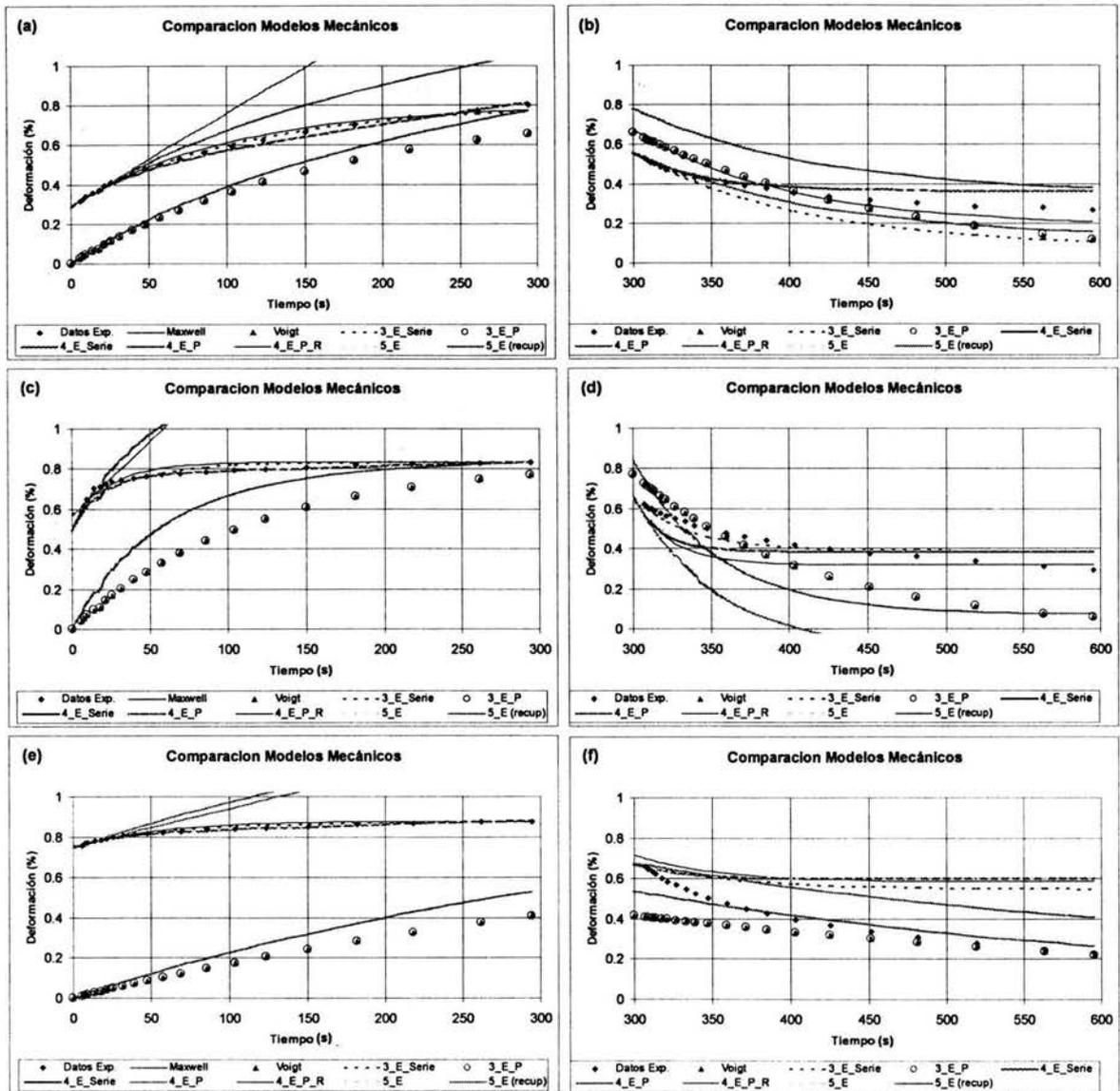


Figura B.3.5. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-416 al 3%.

Cuadro B.3.5.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416,3%, -20 °C)

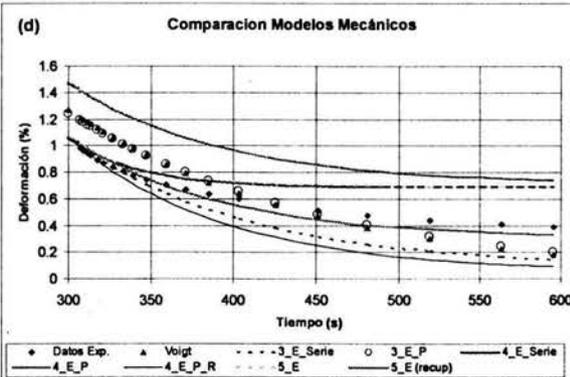
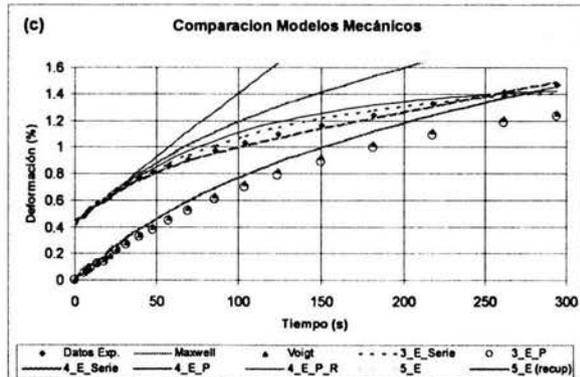
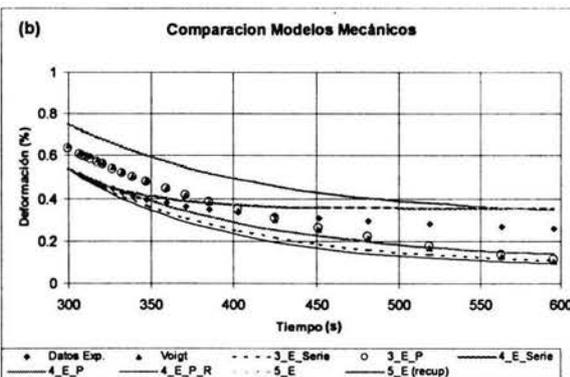
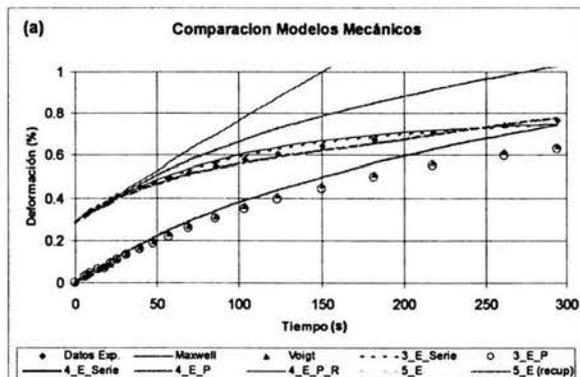
	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.780667	0.799875	0.797142	0.797142	0.797142
$E_{(p)}$	MPa	0.447047	1.159906	14.647266	27.280527	0.061792
$\eta_{(p)}$	MPa*s	48.65	53.00	42.80	54.21	6.52
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.441818	1.169897	0.474100
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		200.61		200.28	200.28
τ_r	s	108.83	45.69	99.79	48.32	119.25

Cuadro B.3.5.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416,3%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.400232	0.457591	0.455156	0.455156	0.455156
$E_{(p)}$	MPa	0.860465	0.840244	11.092372	28.150471	52.197066
$\eta_{(p)}$	MPa*s	31.20	15.52	15.13	15.85	16.24
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.683217	0.849098	0.296316
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		954.13		951.63	951.63
τ_r	s	36.25	18.47	23.50	19.24	55.12

Cuadro B.3.5.2.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416, 3%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.302748	0.305792	0.305600	0.305600	0.305600
$E_{(p)}$	MPa	1.827497	3.101728	1.108448	1.035585	102.487840
$\eta_{(p)}$	MPa*s	120.45	91.52	34.56	24.03	96.32
$E_{(p, ind)}$	MPa			1.729568	3.128035	0.278400
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		1059.52		1058.14	1058.24
τ_r	s	65.91	29.51	51.19	30.89	347.07



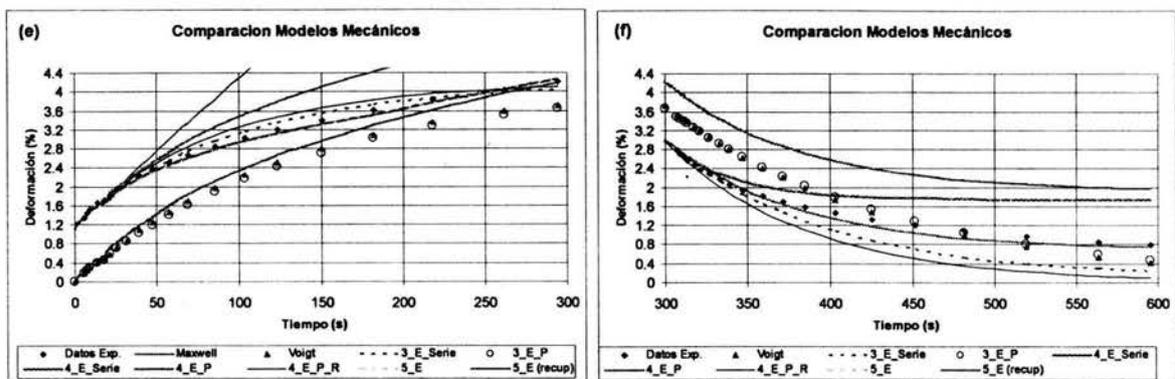


Figura. B.3.6. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-416 al 8%.

Cuadro B.3.6.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416,8%, -20 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.511248	0.522830	0.521038	0.521038	0.521038
$E_{(p)}$	MPa	0.313266	0.787534	15.532460	28.332974	0.068633
$\eta_{(p)}$	MPa*s	31.57	34.18	28.46	35.43	6.52
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.309701	0.795597	0.314845
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		143.39		143.09	143.09
τ_r	s	100.79	43.40	93.74	45.78	115.68

Cuadro B.3.6.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416,8%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.340912	0.356109	0.354356	0.354356	0.354356
$E_{(p)}$	MPa	0.144198	0.396934	9.571938	27.784616	26.530887
$\eta_{(p)}$	MPa*s	15.39	16.03	13.24	16.85	16.97
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.141921	0.401408	0.188209
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		62.85		62.73	62.73
τ_r	s	106.74	40.39	94.65	42.58	90.82

Cuadro B.3.6.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416, 8%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.124800	0.131776	0.131008	0.131008	0.131008
$E_{(p)}$	MPa	0.049632	0.118432	8.447808	8.479889	102.510784
$\eta_{(p)}$	MPa*s	4.80	4.80	4.16	4.99	5.12
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.048704	0.119617	0.062528
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		23.36		23.39	23.36
τ_r	s	97.06	40.22	85.46	42.33	80.98

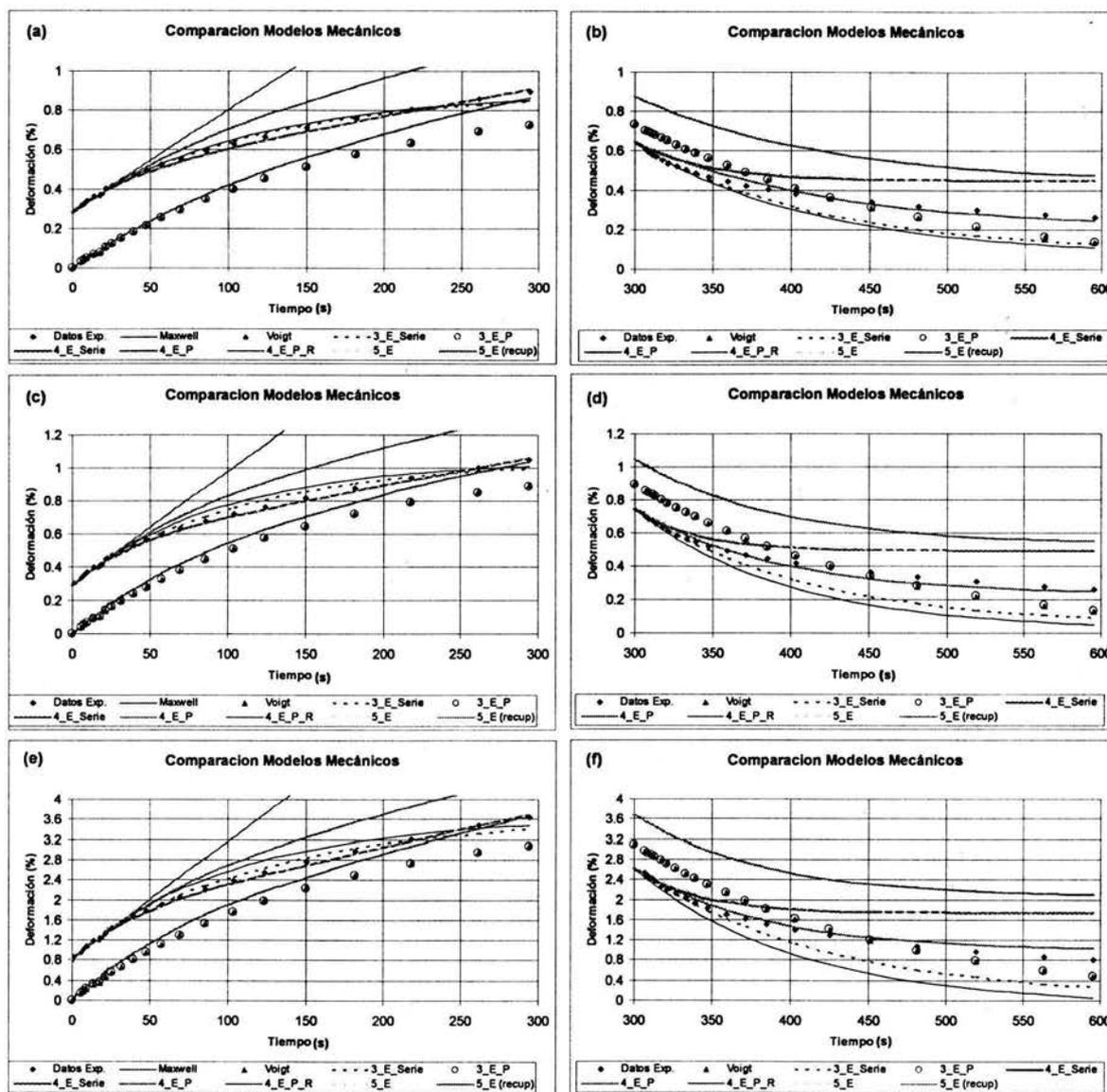


Figura B.3.7. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con TXPR-2 al 3%.

Cuadro B.3.7.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 3%, -20 °C)

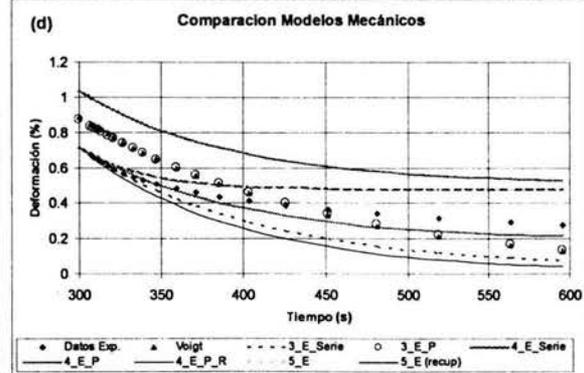
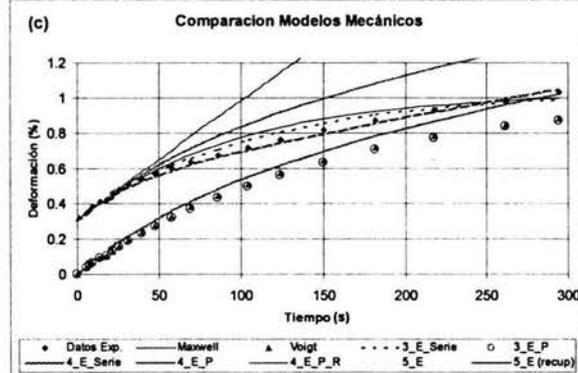
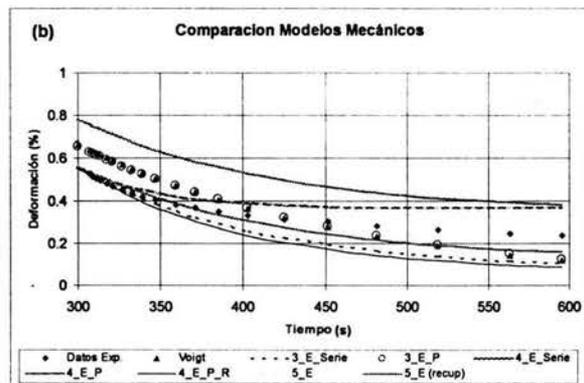
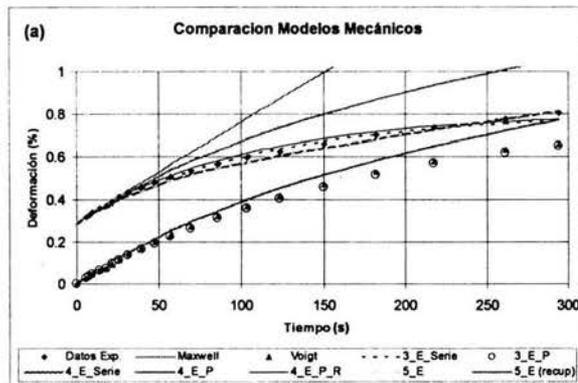
	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.504107	0.515260	0.513971	0.513971	0.513971
$E_{(p)}$	MPa	0.239462	0.729865	15.400195	28.156168	0.066026
$\eta_{(p)}$	MPa*s	28.25	33.53	26.28	35.47	6.52
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.237299	0.736201	0.302667
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		100.17		100.02	100.02
τ_r	s	117.98	45.94	112.47	49.44	120.27

Cuadro B.3.7.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 3%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.485897	0.509617	0.508256	0.508256	0.508256
$E_{(p)}$	MPa	0.194643	0.568068	9.358707	27.715399	1.120056
$\eta_{(p)}$	MPa*s	21.40	22.36	18.25	23.58	19.41
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.191272	0.572508	0.269236
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		82.47		82.35	82.35
τ_r	s	109.92	39.36	97.38	42.04	89.40

Cuadro B.3.7.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 3%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.171938	0.184172	0.183590	0.183590	0.183590
$E_{(p)}$	MPa	0.051848	0.162556	8.436180	8.420062	102.510583
$\eta_{(p)}$	MPa*s	6.27	6.50	5.23	6.87	6.99
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.050874	0.163884	0.086589
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		21.18		21.16	21.16
τ_r	s	120.98	39.96	103.40	42.72	80.85



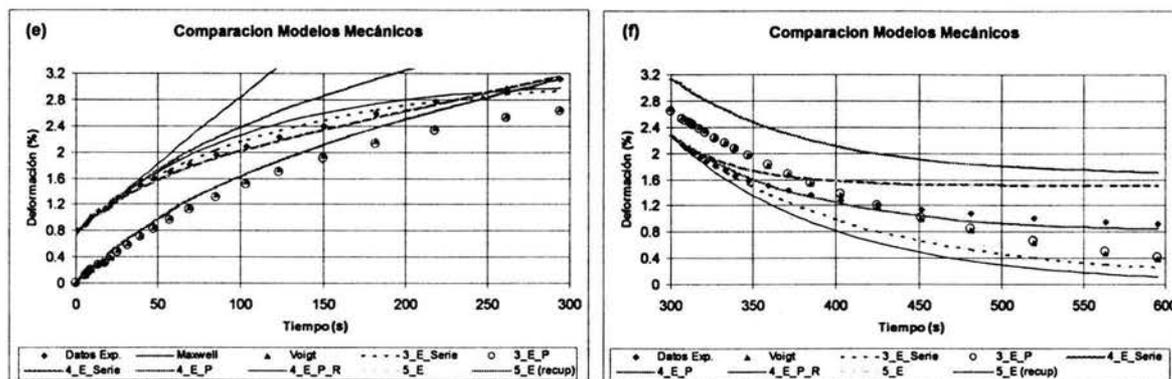


Figura B.3.8. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con TXPR-2 al 8%.

Cuadro B.3.8.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 8%, -20 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.463186	0.470741	0.470741	0.470741	0.470741
$E_{(p)}$	MPa	0.260922	0.688345	15.420044	28.242218	0.067777
$\eta_{(p)}$	MPa*s	28.46	33.41	25.58	32.61	6.52
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.258584	0.688345	0.279559
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		117.43		117.43	117.43
τ_r	s	109.08	48.53	100.58	48.53	119.50

Cuadro B.3.8.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 8%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.430886	0.445022	0.445022	0.445022	0.445022
$E_{(p)}$	MPa	0.185796	0.544791	9.397452	27.739264	1.309781
$\eta_{(p)}$	MPa*s	19.96	22.56	17.22	22.13	19.01
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.183285	0.544791	0.244939
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		79.09		79.09	79.09
τ_r	s	107.43	41.42	95.78	41.42	92.12

Cuadro B.3.8.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 8%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recua)
$E_{(ind)}$	MPa	0.171179	0.178961	0.178961	0.178961	0.178961
$E_{(p)}$	MPa	0.057602	0.174087	8.434655	8.414511	102.510562
$\eta_{(p)}$	MPa*s	6.57	7.35	5.60	7.20	7.35
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.056771	0.174087	0.088245
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		24.12		24.12	24.12
τ_r	s	113.98	42.23	99.25	42.23	83.32

En este apéndice se muestran los datos experimentales obtenidos en las pruebas de fluencia realizadas a un desplazamiento inicial de 0.05 y 0.2 mm (con la finalidad de comprobar el comportamiento lineal en los materiales estudiados) y su comparación con los datos de los modelos estudiados.

C.1. Asfalto modificado con SBR's. Desplazamiento inicial 0.2 mm

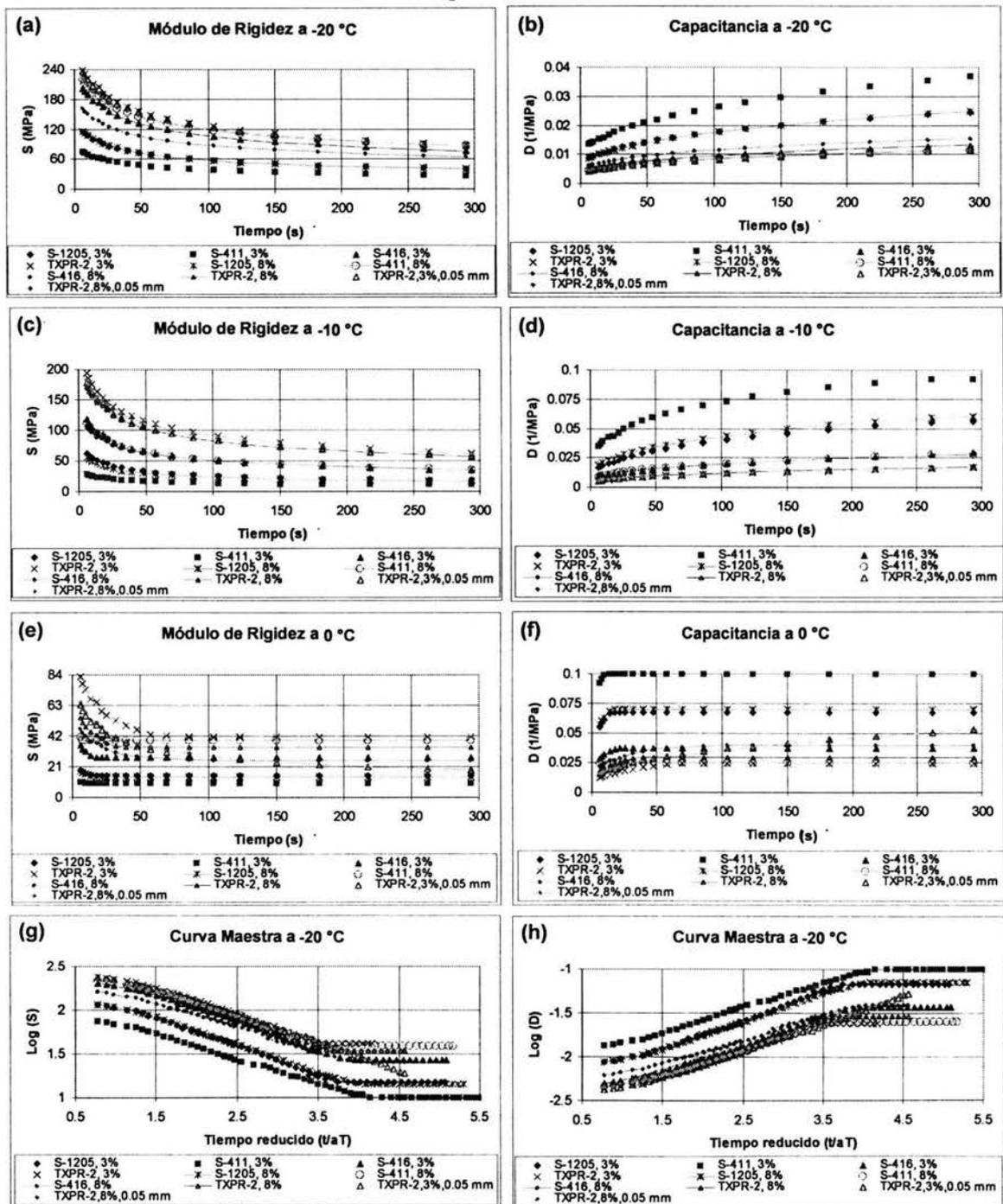


Figura C.1. Módulos de rigidez y capacitancias de asfaltos modificados con SBR comerciales o funcionalizados, (a) y (b) -20 °C, (c) y (d) -10 °C, (e) y (f) 0 °C; y, (g) y (h) Curvas maestras de dichas propiedades a -20 °C.

C.2. Datos obtenidos de los distintos modelos mecánicos desarrollados

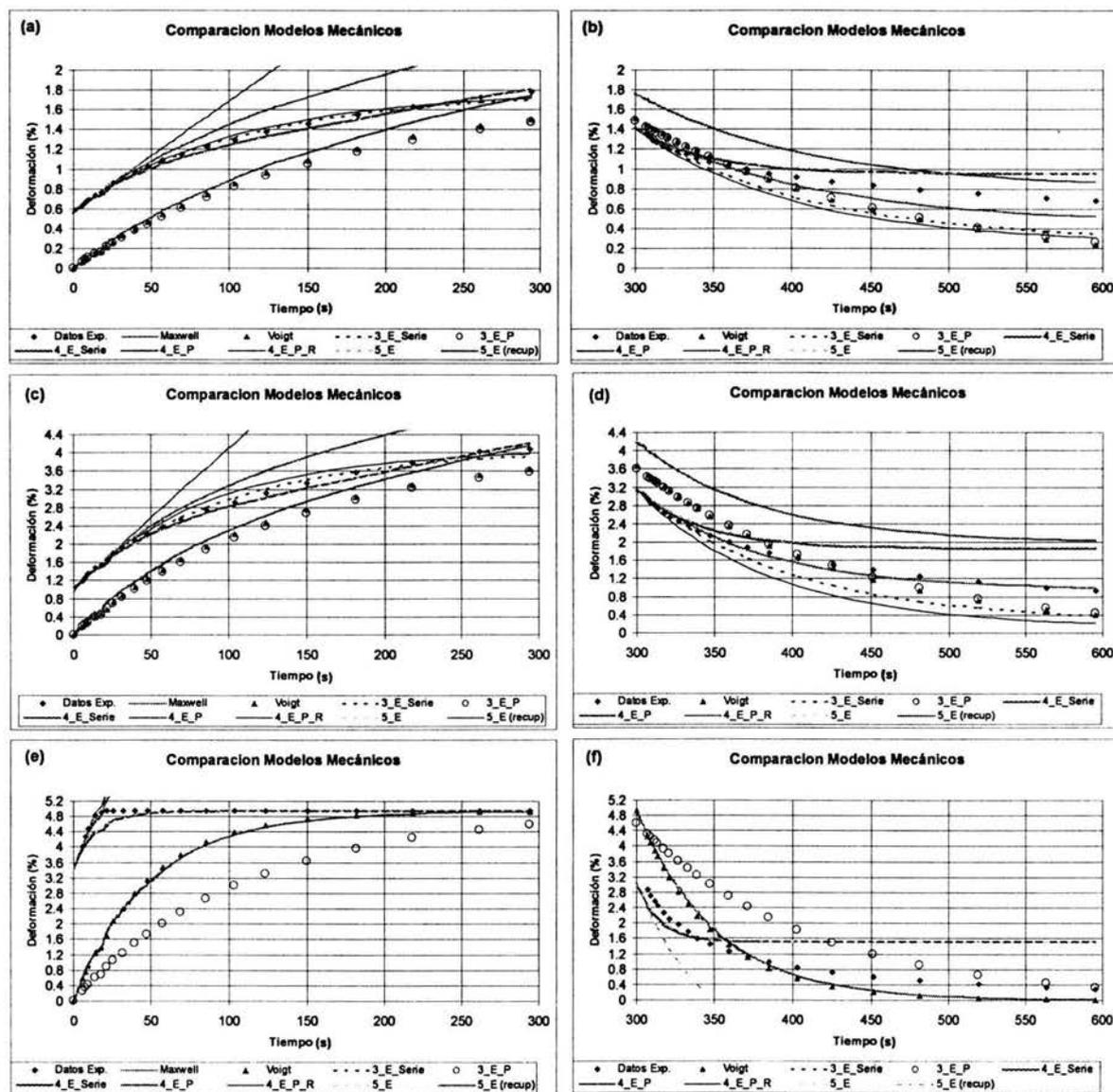


Figura C.2.1. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-1205 al 3%.

Cuadro C.2.1.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205,3%,-20 °C)

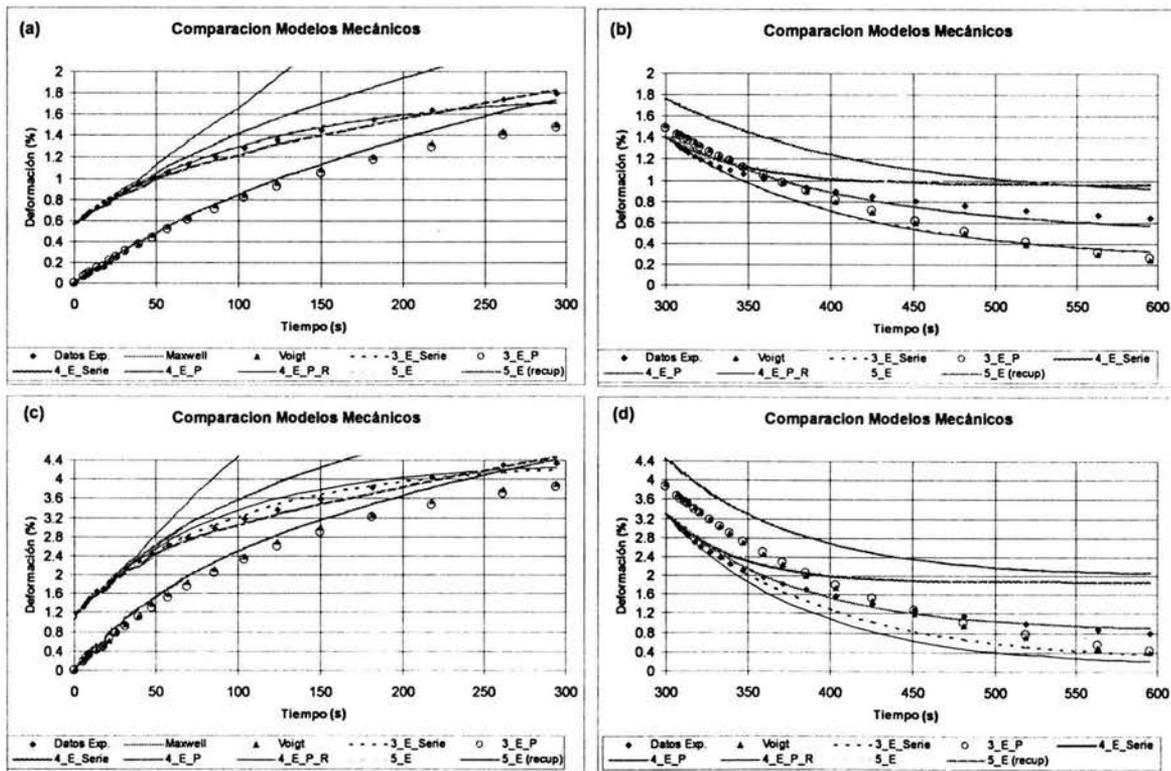
	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.261828	0.269132	0.268418	0.268418	0.268418
$E_{(p)}$	MPa	0.124540	0.318962	15.522145	28.315139	0.077694
$\eta_{(p)}$	MPa*s	13.53	14.91	12.43	15.92	5.58
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.123102	0.321743	0.146335
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		56.61		56.52	56.52
τ_r	s	108.64	46.76	101.81	50.05	110.05

Cuadro C.2.1.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205,3%,-10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.145217	0.155020	0.154515	0.154515	0.154515
$E_{(p)}$	MPa	0.049414	0.116373	9.562185	27.825678	5.368819
$\eta_{(p)}$	MPa*s	4.91	4.87	4.22	5.19	5.15
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.048422	0.117274	0.066672
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		22.72		22.68	22.68
τ_r	s	99.36	41.82	87.58	44.48	78.23

Cuadro C.2.1.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205, 3%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.043913	0.043913	0.043816	0.043816	0.043816
$E_{(p)}$	MPa	0.100084	0.100388	8.455415	8.468260	102.510755
$\eta_{(p)}$	MPa*s	1.45	1.45	1.52	1.52	1.53
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.100591	0.100900	0.030550
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		6262.86		6182.56	6182.56
τ_r	s	14.50	14.46	15.24	15.20	50.20



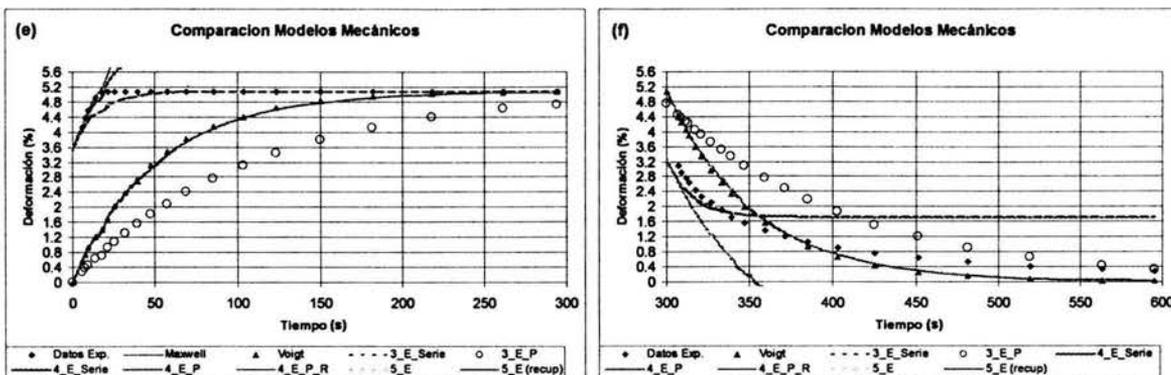


Figura C.2.2. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-1205 al 8%.

Cuadro C.2.2.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205,8%,-20 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.262345	0.266558	0.265527	0.265527	0.265527
$E_{(p)}$	MPa	0.122053	0.335496	15.516259	28.302225	0.066773
$\eta_{(p)}$	MPa*s	13.50	16.85	13.38	17.85	5.59
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.121376	0.340820	0.149249
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		53.46		53.17	53.17
τ_r	s	110.62	50.23	111.11	53.02	121.07

Cuadro C.2.2.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205,8%,-10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.130762	0.138628	0.137690	0.137690	0.137690
$E_{(p)}$	MPa	0.046892	0.103174	9.563005	27.826073	5.374665
$\eta_{(p)}$	MPa*s	4.40	4.37	3.83	4.63	4.60
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.046061	0.104526	0.059419
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		22.61		22.48	22.48
τ_r	s	93.90	42.34	83.59	44.45	78.19

Cuadro C.2.2.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-1205, 8%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.042167	0.042167	0.041960	0.041960	0.041960
$E_{(p)}$	MPa	0.097759	0.097933	8.455359	8.468204	102.510755
$\eta_{(p)}$	MPa*s	1.48	1.48	1.54	1.54	1.56
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.098890	0.099070	0.029476
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		10406.96		10185.53	10185.53
τ_r	s	15.19	15.16	15.78	15.75	52.95

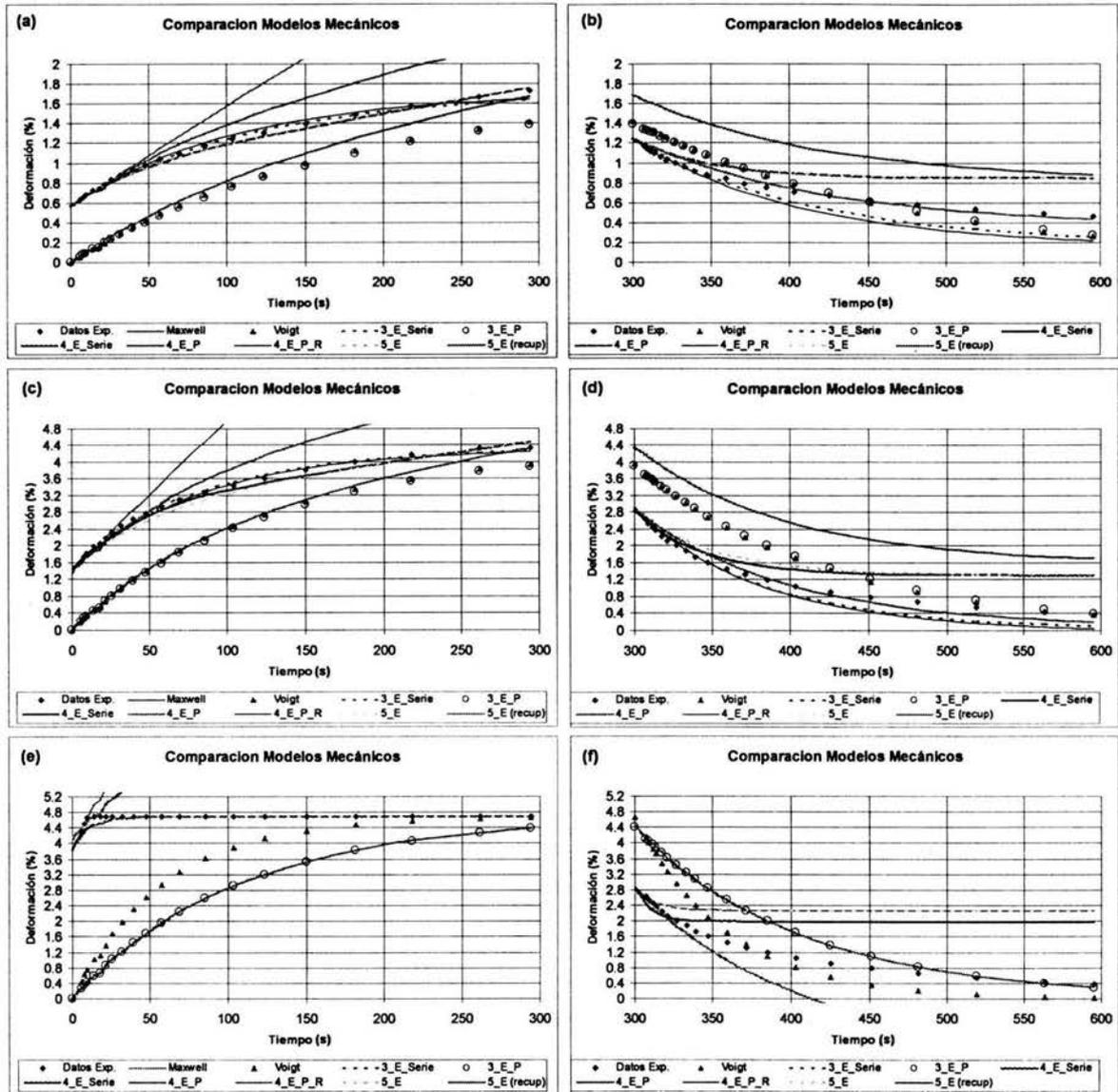


Figura C.2.3. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-411 al 3%.

Cuadro C.2.3.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411, 3%, -20 °C)

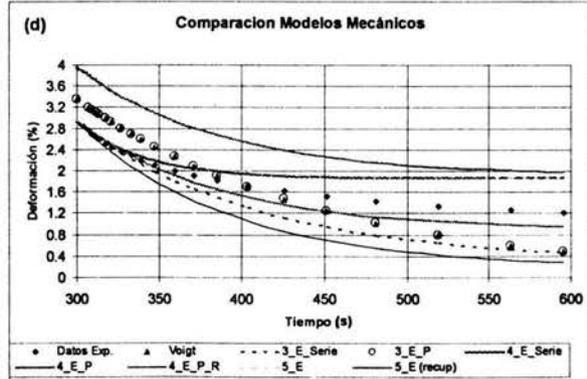
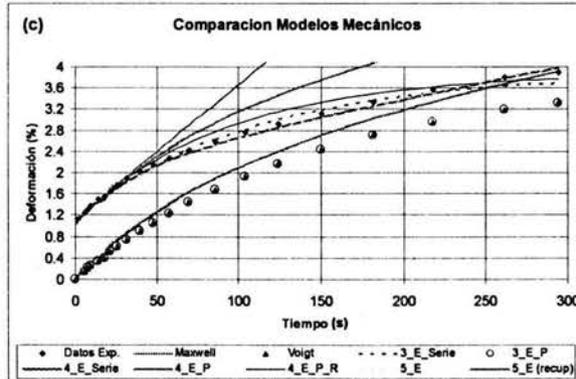
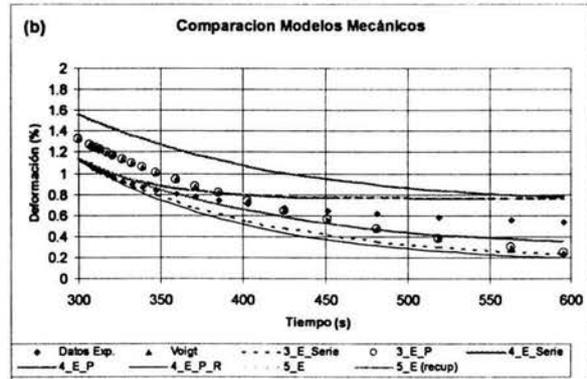
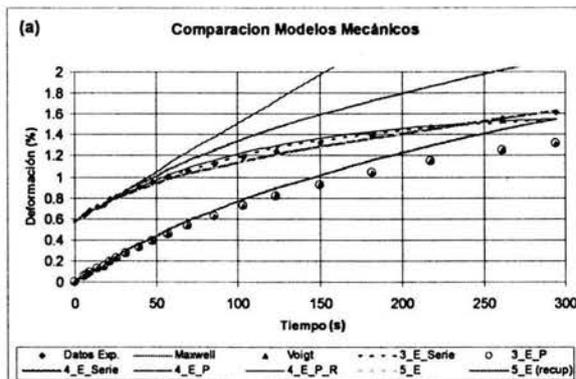
	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.168734	0.171331	0.171331	0.171331	0.171331
$E_{(p)}$	MPa	0.084012	0.240454	15.536997	28.334144	0.086944
$\eta_{(p)}$	MPa*s	9.76	12.01	8.96	11.91	5.58
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.083383	0.240454	0.100045
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		36.11		36.11	36.11
τ_r	s	116.17	49.95	108.09	49.95	120.06

Cuadro C.2.3.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411, 3%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.066899	0.070355	0.070355	0.070355	0.070355
$E_{(p)}$	MPa	0.033572	0.061762	9.564445	27.826505	5.380340
$\eta_{(p)}$	MPa*s	2.75	2.61	2.72	3.19	3.18
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.032764	0.061762	0.032890
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		18.55		18.55	18.55
τ_r	s	81.91	42.27	83.29	51.80	97.28

Cuadro C.2.3.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411, 3%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.025216	0.025216	0.023512	0.023512	0.023512
$E_{(p)}$	MPa	0.113770	0.114368	8.453048	8.465879	102.510753
$\eta_{(p)}$	MPa*s	1.22	1.22	2.19	2.19	2.23
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.169049	0.170375	0.020661
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		4023.69		3972.10	3972.10
τ_r	s	10.72	10.67	13.21	13.11	108.14



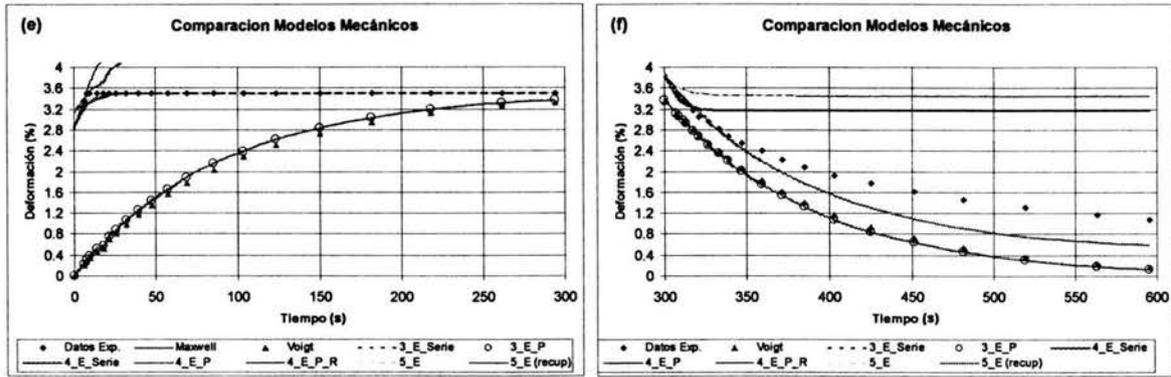


Figura C.2.4. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-411 al 8%.

Cuadro C.2.4.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411, 8%, -20 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.489755	0.500472	0.498806	0.498806	0.498806
$E_{(p)}$	MPa	0.276812	0.751384	15.308516	28.023138	0.053818
$\eta_{(p)}$	MPa*s	30.81	34.47	27.81	35.84	5.59
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.274002	0.758040	0.300844
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		122.79		122.55	122.55
τ_r	s	111.29	45.87	103.31	48.56	122.35

Cuadro C.2.4.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411, 8%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.257301	0.272654	0.271162	0.271162	0.271162
$E_{(p)}$	MPa	0.102473	0.266846	9.539629	27.814334	5.222760
$\eta_{(p)}$	MPa*s	11.12	10.93	9.14	11.53	11.35
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.100429	0.269305	0.135115
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		44.67		44.59	44.59
τ_r	s	108.53	40.96	91.95	43.24	86.19

Cuadro C.2.4.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-411, 8%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.099968	0.099965	0.090854	0.090854	0.090854
$E_{(p)}$	MPa	0.434144	0.434580	8.376972	8.389894	102.510688
$\eta_{(p)}$	MPa*s	3.52	3.42	6.77	6.77	7.36
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.769087	0.770489	0.081280
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		75973.33		75973.33	75973.44
τ_r	s	7.87	7.87	9.60	9.59	90.90

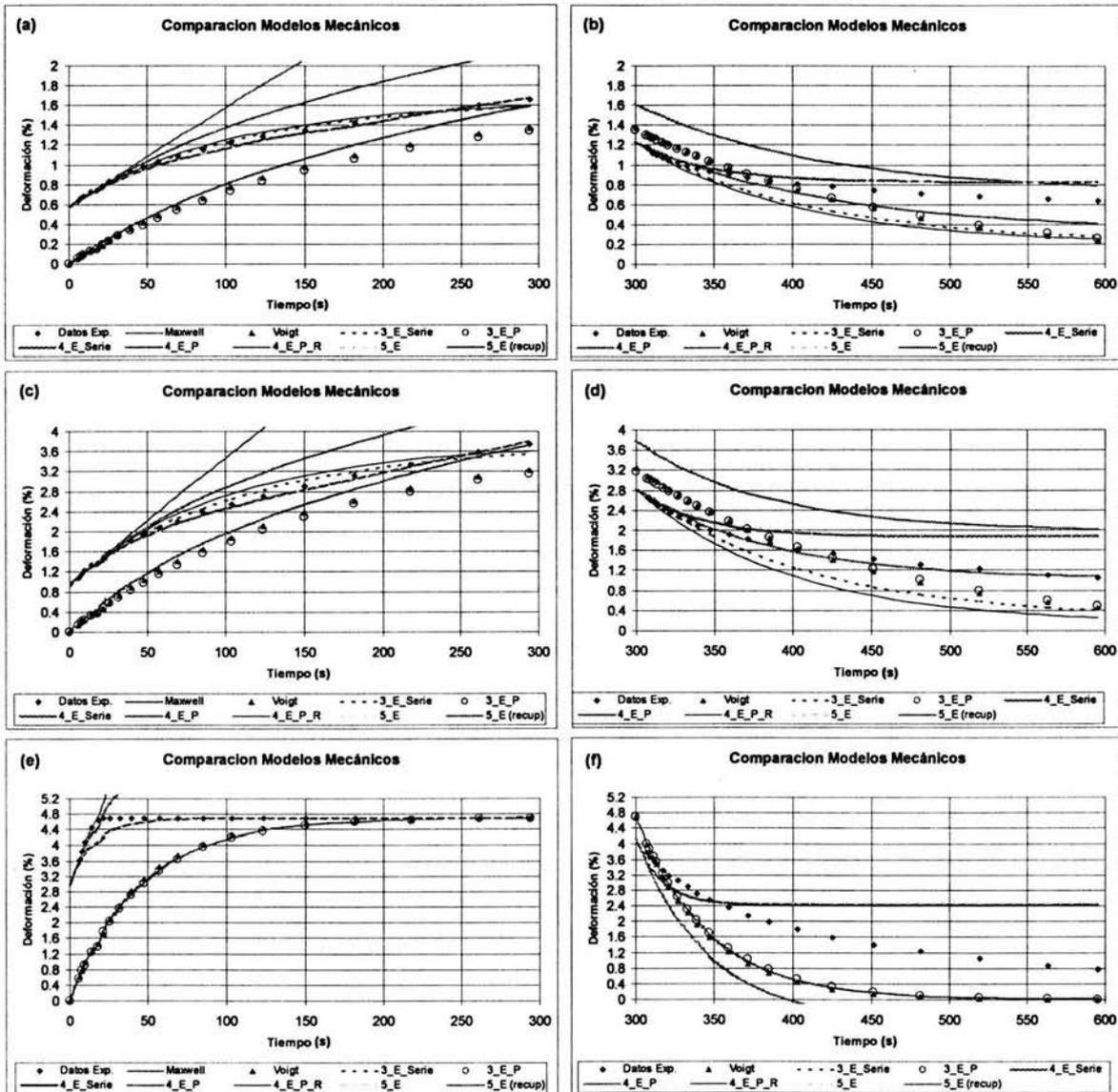


Figura C.2.5. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-416 al 3%.

Cuadro C.2.5.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416, 3%, -20 °C)

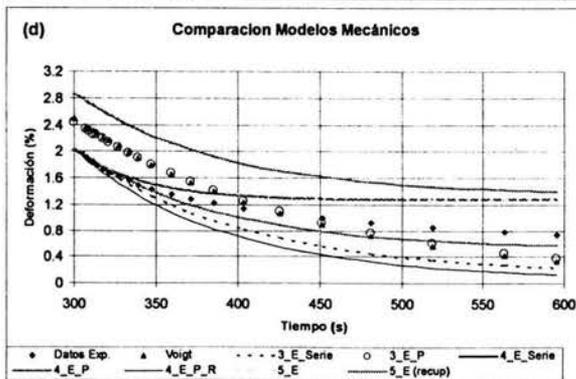
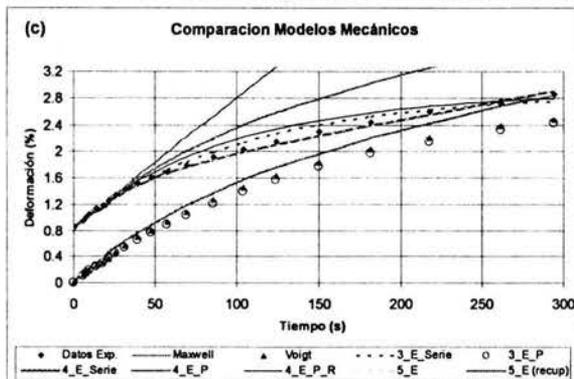
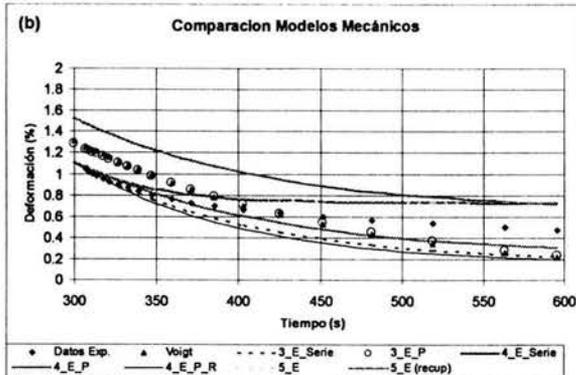
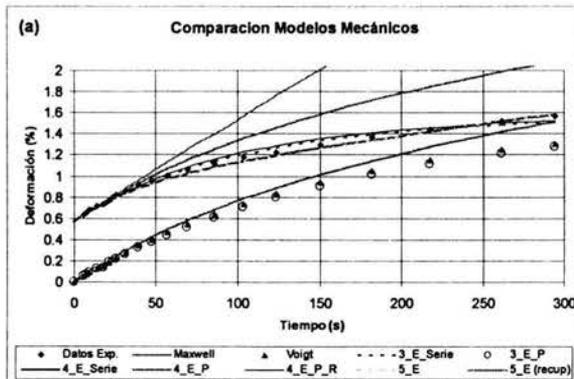
	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.455020	0.464532	0.462898	0.462898	0.462898
$E_{(p)}$	MPa	0.245911	0.643507	15.373368	28.121204	0.057135
$\eta_{(p)}$	MPa*s	26.61	30.00	24.45	31.29	5.59
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.243670	0.649979	0.270357
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		111.03		110.81	110.81
τ_r	s	108.21	46.62	101.93	49.25	118.42

Cuadro C.2.5.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416, 3%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.274498	0.288644	0.286995	0.286995	0.286995
$E_{(p)}$	MPa	0.094906	0.273832	9.541198	27.813451	5.209484
$\eta_{(p)}$	MPa*s	10.52	11.21	9.13	11.84	11.64
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.093498	0.277026	0.140961
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		40.37		40.29	40.29
τ_r	s	110.89	40.92	98.62	43.16	84.83

Cuadro C.2.5.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416, 3%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.088416	0.088416	0.087872	0.087872	0.087872
$E_{(p)}$	MPa	0.154240	0.155072	8.452096	8.464928	102.510752
$\eta_{(p)}$	MPa*s	2.56	2.56	2.56	2.56	2.56
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.155968	0.156832	0.056320
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		5481.60		5446.08	5446.08
τ_r	s	15.94	15.86	16.57	16.49	45.92



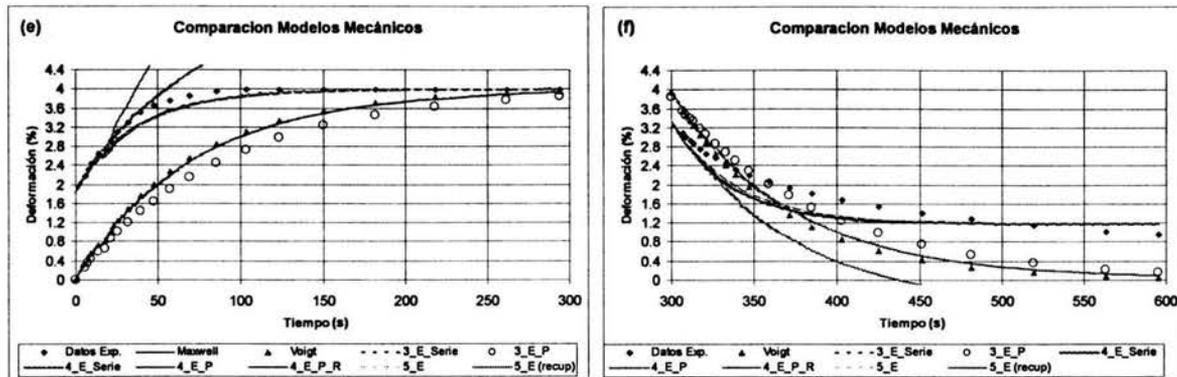


Figura C.2.6. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado con S-416 al 8%.

Cuadro C.2.6.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416, 8%, -20 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.360994	0.368604	0.367325	0.367325	0.367325
$E_{(p)}$	MPa	0.212817	0.541953	15.439104	28.214126	0.060407
$\eta_{(p)}$	MPa*s	22.02	24.28	20.18	25.41	5.59
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.210676	0.546671	0.219701
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		97.41		97.22	97.22
τ_r	s	103.48	44.80	97.07	47.38	117.88

Cuadro C.2.6.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416, 8%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.244863	0.256333	0.255036	0.255036	0.255036
$E_{(p)}$	MPa	0.104645	0.273384	9.538482	27.813942	5.223848
$\eta_{(p)}$	MPa*s	10.76	11.00	9.27	11.60	11.42
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.102891	0.275887	0.132526
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		46.81		46.73	46.73
τ_r	s	102.85	40.24	91.02	42.46	88.38

Cuadro C.2.6.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (S-416, 8%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.113888	0.113888	0.113280	0.113280	0.113280
$E_{(p)}$	MPa	0.097408	0.098400	8.450784	8.463585	102.510752
$\eta_{(p)}$	MPa*s	3.52	3.52	3.84	3.78	3.84
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.097888	0.098881	0.052800
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		2244.16		2244.28	2244.16
τ_r	s	37.27	36.95	38.99	38.66	72.41

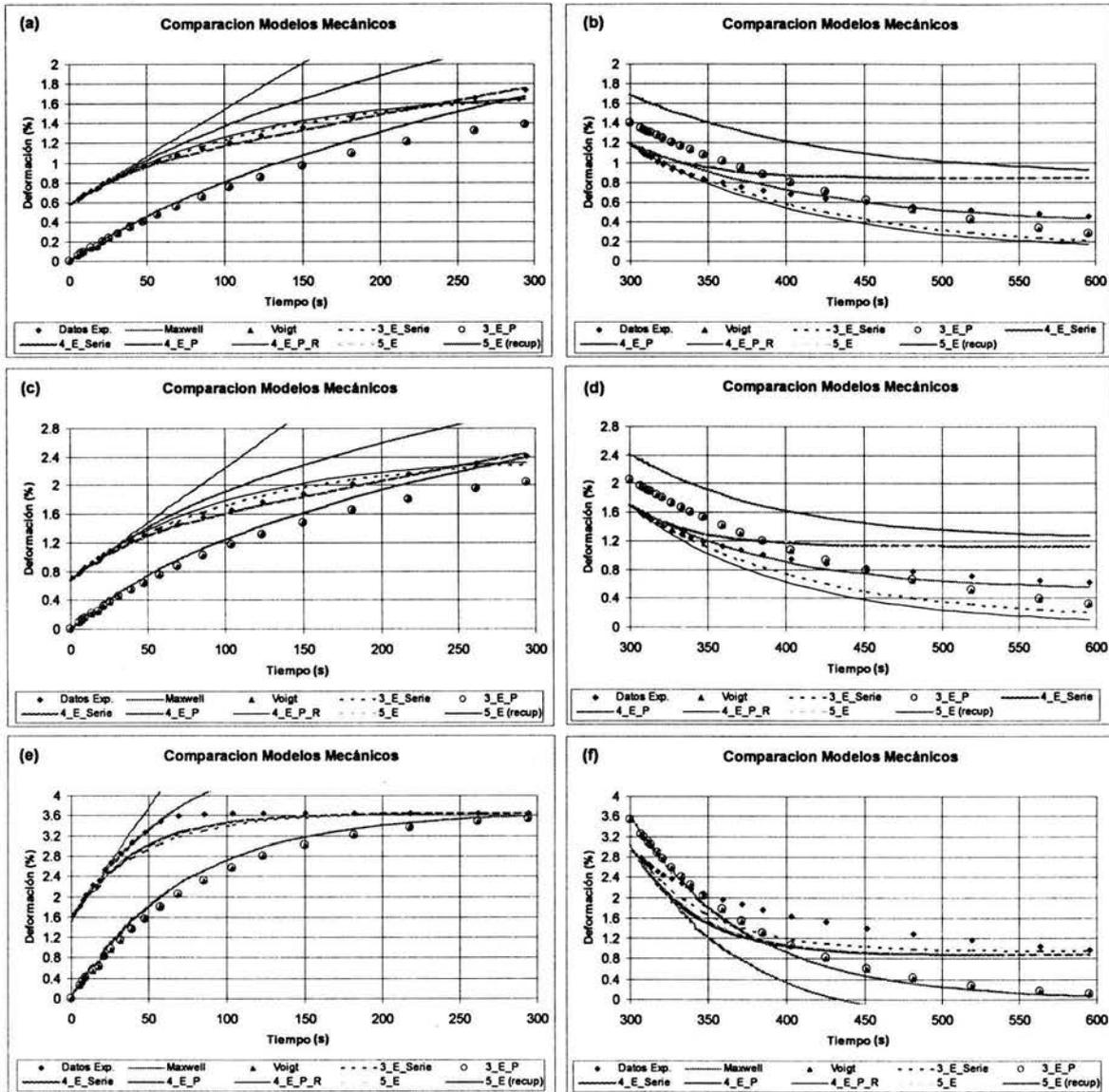


Figura C.2.7. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado (funcionalizado con un grupo COOH) con TXPR-2 al 3%.

Cuadro C.2.7.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 3%, -20 °C)

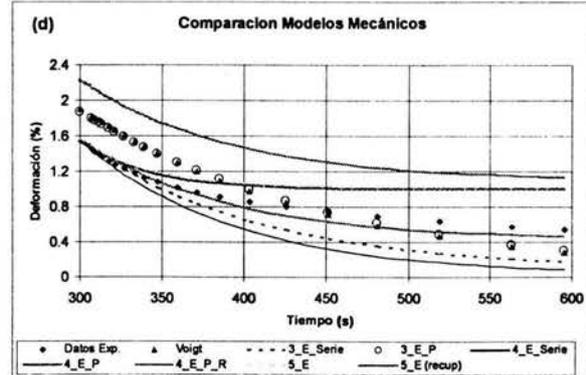
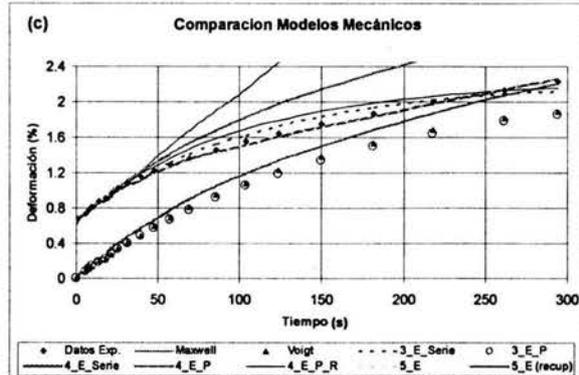
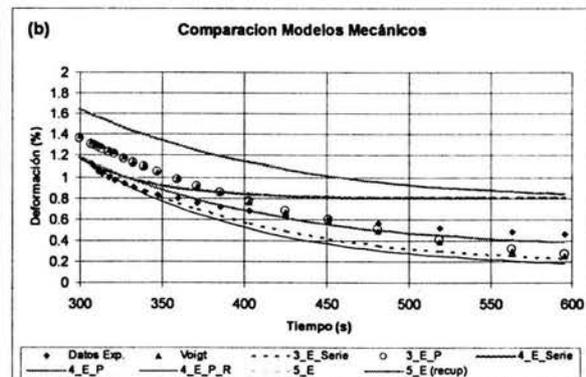
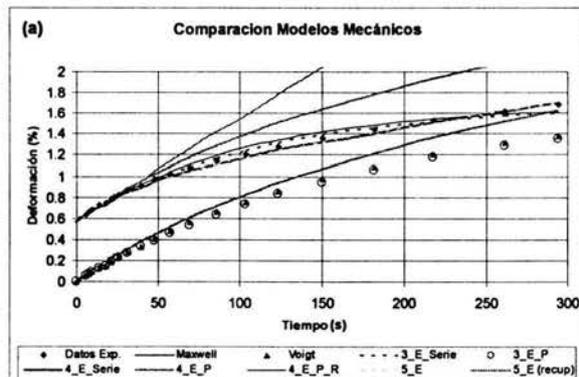
	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.533355	0.544946	0.543037	0.543037	0.543037
$E_{(p)}$	MPa	0.267079	0.876885	15.310794	27.989767	0.063328
$\eta_{(p)}$	MPa*s	32.34	38.40	29.37	39.92	6.52
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.264716	0.886346	0.336732
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		109.03		108.84	108.84
τ_r	s	121.10	43.79	112.86	46.46	122.30

Cuadro C.2.7.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 3%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.442622	0.465022	0.462689	0.462689	0.462689
$E_{(p)}$	MPa	0.180190	0.532300	9.400125	27.734863	3.210775
$\eta_{(p)}$	MPa*s	20.00	21.11	17.04	22.11	20.92
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.177064	0.537758	0.248704
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		75.71		75.57	75.57
τ_r	s	110.98	39.66	98.05	41.91	90.63

Cuadro C.2.7.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 3%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.194337	0.205414	0.204166	0.204166	0.204166
$E_{(p)}$	MPa	0.150315	0.144974	8.425658	8.430148	102.510624
$\eta_{(p)}$	MPa*s	7.22	5.94	6.13	6.14	6.24
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.144920	0.145603	0.084991
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		7167.54		7167.54	7167.54
τ_r	s	48.00	40.96	43.05	42.89	73.47



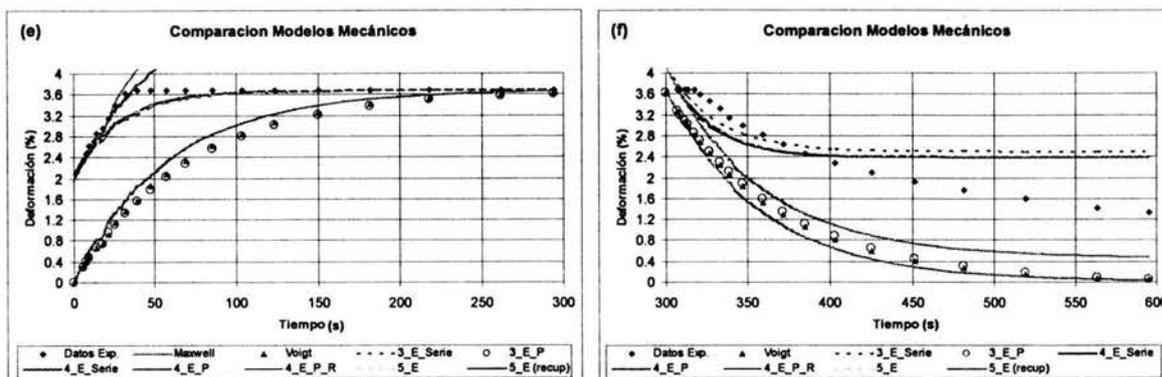


Figura C.2.8. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado (funcionalizado con un grupo COOH) con TXPR-2 al 8%.

Cuadro C.2.8.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 8%, -20 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.447188	0.459001	0.458057	0.458057	0.458057
$E_{(p)}$	MPa	0.237935	0.684114	15.457347	28.276492	0.069414
$\eta_{(p)}$	MPa*s	26.89	30.00	24.20	31.66	6.52
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.234968	0.694357	0.275990
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		101.71		101.23	101.23
τ_r	s	113.03	43.86	104.55	46.72	117.53

Cuadro C.2.8.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 8%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.391972	0.411372	0.410381	0.410381	0.410381
$E_{(p)}$	MPa	0.167684	0.471819	9.454601	27.769331	4.136083
$\eta_{(p)}$	MPa*s	18.08	18.50	15.31	19.56	18.89
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.164527	0.478660	0.220949
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		72.02		71.68	71.68
τ_r	s	107.79	39.20	94.66	41.57	90.06

Cuadro C.2.8.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 8%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.126203	0.134067	0.133704	0.133704	0.133704
$E_{(p)}$	MPa	0.162709	0.152375	8.446227	8.457486	102.510713
$\eta_{(p)}$	MPa*s	4.89	3.95	4.10	4.10	4.17
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.151734	0.152856	0.071320
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		4179.20		4158.41	4158.41
τ_r	s	30.04	25.91	27.49	27.31	58.54

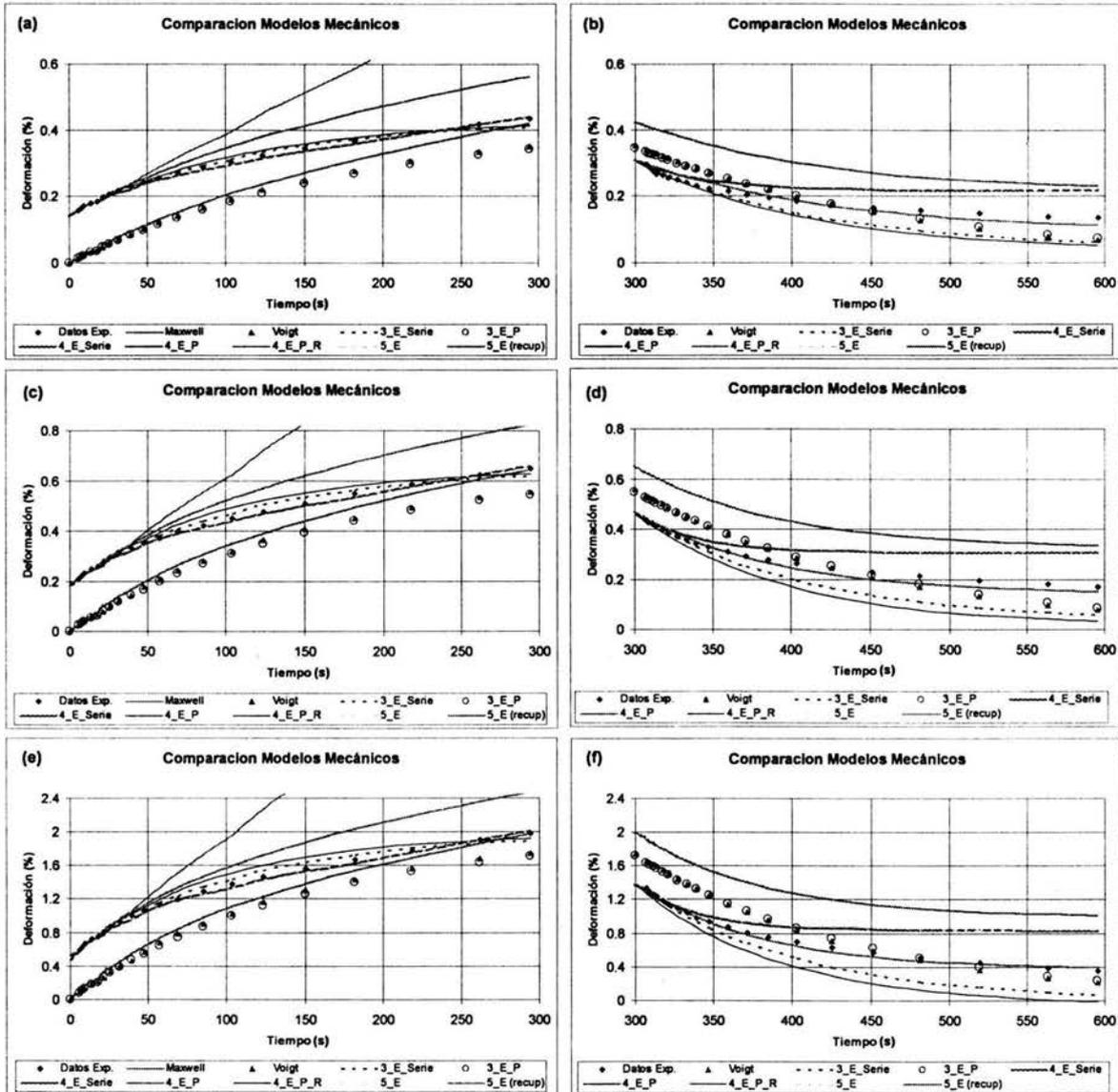


Figura C.2.9. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado (funcionalizado con un grupo COOH) con TXPR-2 al 3%. Desplazamiento inicial 0.05 mm

Cuadro C.2.9.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 3%, -20 °C)

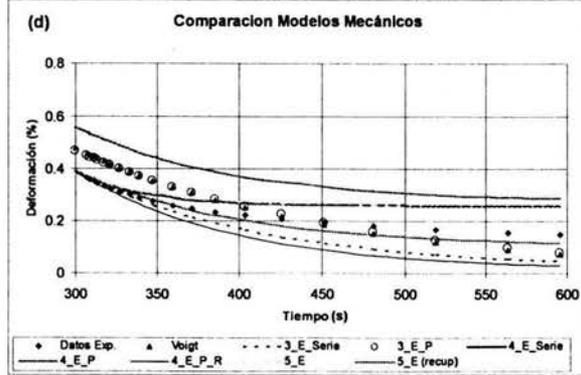
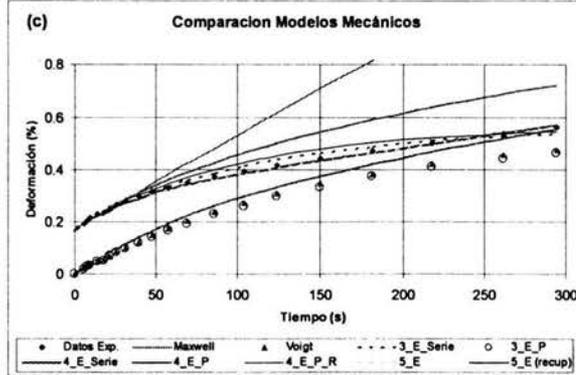
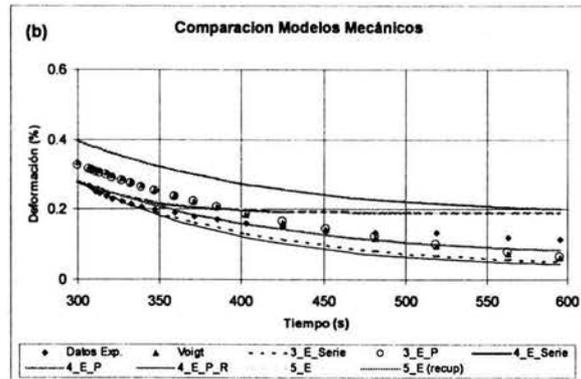
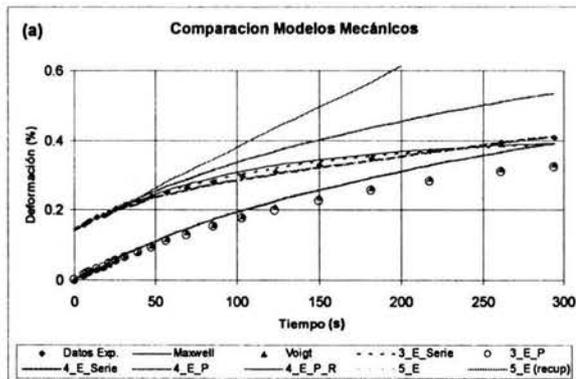
	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.530896	0.542021	0.540186	0.540186	0.540186
$E_{(p)}$	MPa	0.266465	0.833126	15.326115	28.035042	0.064232
$\eta_{(p)}$	MPa*s	31.42	37.33	28.80	38.84	6.52
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.264185	0.848245	0.330020
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		110.01		109.43	109.43
τ_r	s	117.93	44.81	110.90	47.17	121.24

Cuadro C.2.9.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 3%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.410408	0.429324	0.427190	0.427190	0.427190
$E_{(p)}$	MPa	0.166559	0.474137	9.449241	3.746010	27.766216
$\eta_{(p)}$	MPa*s	17.99	18.86	15.42	18.98	19.79
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.163946	0.226525	0.482242
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		71.47		71.08	71.08
τ_r	s	107.99	39.79	95.69	88.87	41.75

Cuadro C.2.9.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 3%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.148752	0.157624	0.156651	0.156651	0.156651
$E_{(p)}$	MPa	0.052585	0.138726	8.438300	8.434296	102.510638
$\eta_{(p)}$	MPa*s	5.45	5.53	4.67	5.79	5.89
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.051664	0.140902	0.074180
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		23.41		23.28	23.28
τ_r	s	103.67	39.84	90.99	41.80	79.41



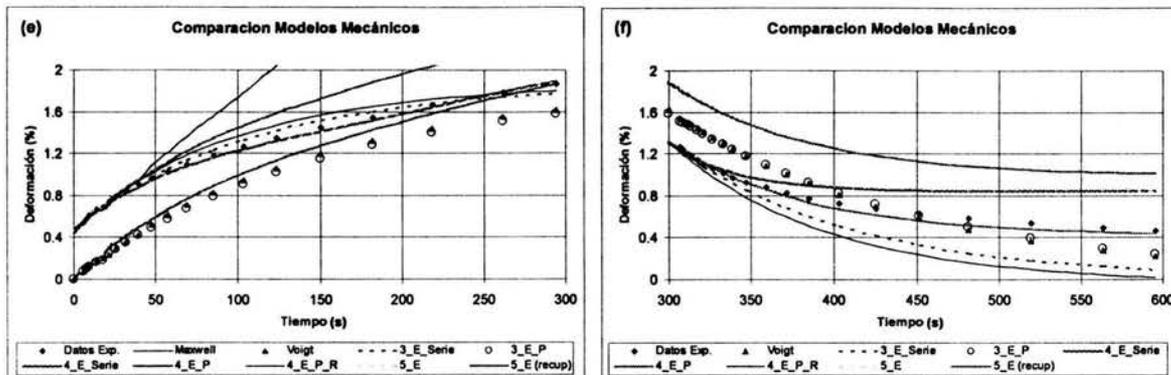


Figura C.2.10. Comparación de los modelos mecánicos desarrollados en la deformación (%) ocurrida en las pruebas de (a, c, e) Fluencia y (b, d, f) Recuperación a (a, b) -20 °C, (c, d) -10 °C y, (e, f) 0 °C para el asfalto modificado (funcionalizado con un grupo COOH) con TXPR-2 al 3%. Desplazamiento inicial 0.05 mm

Cuadro C.2.10.1. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2,8%, -20 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.497733	0.509058	0.507356	0.507356	0.507356
$E_{(p)}$	MPa	0.277278	0.785904	15.356551	28.136884	0.065809
$\eta_{(p)}$	MPa*s	30.95	34.82	27.88	36.17	6.52
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.274378	0.794565	0.309640
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		119.98		119.79	119.79
τ_r	s	111.61	44.31	103.43	46.81	120.11

Cuadro C.2.10.2. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 8%, -10 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recup)
$E_{(ind)}$	MPa	0.416185	0.433174	0.431192	0.431192	0.431192
$E_{(p)}$	MPa	0.186599	0.538417	9.386507	27.730280	3.071427
$\eta_{(p)}$	MPa*s	20.34	21.41	17.44	22.41	21.19
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.183732	0.544711	0.240675
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		80.26		80.09	80.09
τ_r	s	109.02	39.77	96.76	41.95	94.94

Cuadro C.2.10.3. Parámetros de los modelos que concuerdan con los datos experimentales (TXPR-2, 8%, 0 °C)

	Unidades	3 – E – S	4 – E – S	4 – E – P, R	5 – E	5 – E (recua)
$E_{(ind)}$	MPa	0.152066	0.160532	0.159589	0.159589	0.159589
$E_{(p)}$	MPa	0.052117	0.151746	8.437363	8.427803	102.510614
$\eta_{(p)}$	MPa*s	5.74	6.04	4.95	6.32	6.43
$E_{(p, ind)}$	MPa			0.051288	0.153525	0.078249
$\eta_{(ind)}$	MPa*s		22.08		22.04	22.04
τ_r	s	110.23	39.77	97.14	41.93	82.27

CALCULOS USANDO EL DMA 983

El DMA 983 proporciona cálculos a tiempo real de los parámetros viscoelásticos. Estos valores son enviados al “software” del equipo de cómputo (sistema 9900) conectado al DMA para ver, almacenar y utilizar los datos para, por ejemplo, trazar alguna propiedad con respecto al tiempo o la temperatura. Algunos de estas propiedades son:

1. E' (módulo de almacenamiento en flexión)
2. E'' (módulo de pérdida en flexión)
3. Tan delta
4. G' (módulo de almacenamiento en corte)
5. G'' (módulo de pérdida en corte)
6. Frecuencia
7. Señal del conductor electromagnético
8. Ángulo de fase
9. Capacitancia

PARÁMETROS EXPERIMENTALES

Existen tres tipos de parámetros experimentales: 1) Parámetros dependientes del modo utilizado; 2) Parámetros de calibración del equipo; y 3) Parámetros de la muestra. Los parámetros dependientes del modo son requeridos para ejecutar o controlar la operación del instrumento en un modo particular. Los parámetros de calibración del equipo son usados en las rutinas de calibración para compensar la contribución del equipo en las mediciones. Los parámetros de la muestra son parámetros descriptivos que ayudan en la identificación del experimento.

PARÁMETROS DEPENDIENTES DEL MODO UTILIZADO

- Data Factor: Número de datos que son integrados para producir un dato experimental (data point).
- Displacement: Valor de la deflexión inicial del brazo usada en los modos esfuerzo-relajación y fluencia.
- Equilibrate Criteria: Selecciona la rapidez del tiempo de equilibrio en los experimentos esfuerzo-relajación y fluencia.
- Equilibrate Cycles: El número de oscilaciones a las que es sujeta la muestra, a una frecuencia nueva para lograr el equilibrio mecánico.
- Equilibrate Rate: La rapidez máxima en el cambio en las dimensiones de la muestra relativo al desplazamiento permitido antes del inicio del experimento esfuerzo-relajación o fluencia.
- Equilibrate Time: Periodo de tiempo en el que se equilibra la muestra antes del inicio del experimento esfuerzo-relajación o fluencia.
- Frequency: Número de ciclos de oscilación completados en un segundo. Esta es la frecuencia a la cual es mantenida la muestra en el experimento a frecuencia fija.

- Log Factor: La razón de tiempo entre los puntos (datos) salvados en el experimento esfuerzo-relajación y fluencia. Estos puntos son usados para adquirir datos en escala logarítmica.
- Measurement Points: Número de puntos o datos adquiridos durante la medición a una frecuencia.
- Number of Runs: Número máximo de corridas que pueden almacenarse en la memoria local del módulo.
- Temperature Dependent Load: Cada vez que finaliza una prueba de fluencia a una temperatura, y antes del comienzo de la prueba a otra temperatura, la dirección del desplazamiento es ajustada para mantener el brazo lo más cerca del cero y el esfuerzo también se corrige para mantener constante el desplazamiento inicial. Si no se selecciona esta opción, el esfuerzo y la dirección del desplazamiento de la primera prueba son usados para todas las pruebas restantes.
- Threshold: Límites en la desviación de la señal (razón señal-ruido) usada para controlar la función de compresión de los datos.

PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

- Clamping Distance: Distancia desde el eje del brazo hasta la cara interior de las abrazaderas.
- Drive Signal Constant (C'): Factor de conversión de la señal del conductor electromagnético.
- Length Correction: Corrección empírica añadida a la longitud de la muestra para considerar el efecto del movimiento de la sección de la muestra más allá de las caras de la abrazadera.
- Moment of Inertia: Medida de la efectividad de la masa en movimiento.
- Parallel Stiffness: Constante usada para corregir la contribución del instrumento al módulo de una muestra extremadamente blanda y delgada.
- Poisson's Ratio: La razón de la contracción transversal por unidad de dimensión a la elongación por unidad de longitud, cuando la muestra es sujeta a un esfuerzo (tensión).
- Series Compliance: Constante usada para corregir la contribución del instrumento al módulo de una muestra extremadamente rígida.
- Shear Distortion: Distorsión en el plano cuando una muestra está sometida a una deformación cortante.

PARÁMETROS DE LA MUESTRA

- Comment: Usualmente una descripción de la muestra o un comentario relacionado con el experimento.
- File Name: Nombre del archivo en el cual se almacenarán los datos.
- Operator: Nombre de la persona que realizará el experimento
- Run Number: Número de identificación asociado con los datos. Este número es aumentado automáticamente al final de cada corrida.
- Sample ID: Identificación de la muestra usada para describir la muestra y que aparece en los reportes y gráficos.
- Sample Size: Longitud (determinada por la distancia de un brazo al otro), anchura y espesor de la muestra.

SEGMENTOS DISPONIBLES PARA ELABORAR UN MÉTODO

1. Jump to Temperature (Saltar a la temperatura ...)
2. Equilibrate at Temperature (Equilibrar a la temperatura ...)
3. Initial Temperature (Temperatura Inicial)
4. Ramp (Rampa ... °C/min)
5. Isothermal Time (Isotérmico por... min.)
6. Increment Temperature (Incrementar la Temperatura ...)
7. Measure at Frequency (Medir a la Frecuencia ...)
8. Displace/Recover (Desplazar ...min./Recuperar ...min.)
9. Motor Drive (Motor apagado o encendido)
10. Repeat (Repetir el paso ...)
11. Repeat till Temperature (Repetir el paso ... hasta la temperatura ...)
12. Data Factor (Permite la modificación del Data Factor)
13. Event (Controla la sincronización del hardware con el método)
14. Data Storage (Iniciar el almacenamiento de los datos)

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DMA 983

Cuadro E.1 Guía para montar una muestra

<i>Muestra</i>	<i>Abrazadera</i>	<i>Longitud</i>	<i>Espesor (mm)</i>	<i>Amplitud (mm)</i>
Metales o compuestos con módulos altos	Lisa (Vertical)	Long/Esp > 10	0.2 a 1.0	0.2
Termoplásticos, Termoestables (<T _g)	Lisa, Dentada (Vertical)	Long/Esp > 10	1.5 a 3.5	0.2
	Dentada (Vertical, Horizontal)	Long/Esp ≤ 5	3.5 a 15	0.2 a 0.4
Cerámicos	Dentada (Vertical)	Long/Esp > 10	0.5 a 1.5	0.05 a 0.1
Elastómeros (> T _g)	Dentada (Vertical, horizontal)	Long/Esp ≤ 5	3.5 a 15	0.2 a 0.4
Películas	Horizontal	10 a 15 mm	0.1 a 0.5	0.1
Pinturas, barnices	Horizontal	10 a 15 mm	0.2 a 0.5	0.1
Adhesivos	Dentada (Vertical, horizontal)	Long/Esp > 10	0.2 a 1.0	0.2

Cuadro E.2 Intervalos de medición

Intervalo del Módulo	1 MPa a 200 GPa
Precisión del Módulo (5-30 Hz resonancia)	5 %
Tan delta:	
Frecuencia Resonante	0.002 a 1.0
Frecuencia Fija	0.002 a 10
Intervalo de Amplitud (pico a pico)	0.1 a 2.0 mm
Frecuencia Resonante	2 a 85 Hz
Intervalo Frecuencia Fija	0.001 a 10 Hz
Intervalo Angulo de Fase	0.0 a 2.8 rad
Precisión Angulo de Fase	0.001 rad (0.06 deg)
Corriente Esfuerzo-Relajación (a 300 °C por 1 h)	< 5 %
Corriente Fluencia (a 300 °C por 1 h)	< 5 %
Intervalo Temperatura Con LNCA	Ambiente a 500 °C -150 a 500 °C

Cuadro E.3 Dimensiones de la muestra

Intervalo Longitud	6 a 65 mm
Espesor Máximo	12 mm
Anchura Máxima	15 mm

Cuadro E.4 Control de la temperatura

Rapidez Calentamiento	0.01 a 50 °C/min
Estabilidad Isotérmica A 100 °C por 1 h Subambiente	± 0.1 °C ± 1.0 °C
Precisión de la Temperatura	± 0.1 °C
Rapidez de enfriamiento con LNCA	1 a 5 °C/min hasta -150 °C
Tiempo de enfriamiento (Ambiente a -120 °C con LNCA)	15 min
Gas de Purgado	N ₂ o aire

Cuadro E.5 Requerimiento de energía

DMA 983	115 V ac 50/60 Hz
Sin LNCA	900 W
Con LNCA	1250 W

PASOS A SEGUIR PARA REALIZAR UN EXPERIMENTO EN EL DMA 983

1. Retirar el horno.
2. Montar la muestra (debe estar paralela a la base del equipo), y aplicar un ligero torque con los dedos para materiales suaves como el asfalto modificado.
3. Medir las dimensiones de la muestra (longitud, equivalente a la distancia entre brazo y brazo <mayor a 25 mm>, ancho y espesor).
4. Usar el torquímetro y aplicar 10 lb/in² para muestras rígidas (duras) o 4 lb/in² para muestras blandas. Para algunos materiales como el asfalto modificado, es preferible aplicar el torque a baja temperatura (la temperatura inicial del experimento).
5. Revisar la posición del termopar (1 mm separado de la muestra).
6. Colocar la bandeja bajo la muestra y el dispositivo que evita las pérdidas por radiación.
7. Volver a colocar el horno.
8. Retirar las pinzas que aseguran los brazos del equipo (primero la pinza frontal y después la trasera).
9. Dar de alta las condiciones experimentales (tipo de experimento, información de la muestra, método,...) en el "software" del equipo.
10. Si los brazos no están ajustados en el cero del equipo, usar el tornillo de ajuste del LVDT. La posición del brazo debe ser de ± 0.005 mm
11. Comenzar el experimento.

METODO DE FLUENCIA UTILIZADO

1. Motor Drive OFF (Motor Apagado)
2. Inicial Temperature -20 °C (Temperatura Inicial -20 °C)
3. Isothermal for 30.00 min (Isotérmico por 30 min)
4. Motor Drive ON (Motor Encendido)
5. Displace 5.00 min, Recover 5.00 min (Desplazar 5 min, Recuperar 5 min)
6. Increment 10 °C (Incrementar 10 °C)
7. Repeat segment 5 till 10 °C (Repetir el segmento 5 hasta 10 °C)

CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

Para realizar el análisis cuantitativo de la viscoelasticidad de muestras, se deben calibrar los siguientes parámetros:

- Momento de inercia de los brazos (J)
- Constante resorte-pivote (rigidez de almacenamiento paralela, K'')
- Constante señal del conductor electromagnético
- Rigidez de pérdida paralela (K_n'')
- Capacitancia de almacenamiento serial (J_C')
- Capacitancia de pérdida serial (J_{Cm}'')
- Fase cero
- Corrección por longitud, (ΔL).

El momento de inercia es una medida de cómo resiste los cambios en movimiento el brazo del equipo, o la cantidad de energía que puede ser almacenada en el movimiento de la masa. Es determinado por la masa de los brazos. En este procedimiento, se mide la frecuencia resonante con la muestra delgada de acero, y después se pone de lado el equipo aplicando una fuerza conocida (peso de 50 a 100 g) al orificio de la muestra de acero usando un clip. La deflexión resultante de los brazos se mide para obtener la rigidez del sistema. Entonces, utilizando la rigidez de la muestra y la frecuencia resonante se obtiene el momento de inercia.

La constante resorte-pivote es una medida de la flexibilidad (elasticidad) de los pivotes; y es significativa cada vez que se estudia una muestra blanda, especialmente a bajas frecuencias (< 10 Hz). En este procedimiento, se debe usar una muestra de papel para obtener la frecuencia resonante del equipo sin muestra, y con el momento de inercia se puede calcular la constante resorte-pivote.

La constante del conductor electromagnético convierte el nivel conductor medido en torque del motor para determinar qué tanta energía está siendo aplicada al sistema. La rigidez de pérdida paralela también es medida en este procedimiento, y es usada en los cálculos de los módulos para compensar la fricción mecánica del instrumento. En este procedimiento, primero se mide la frecuencia resonante con la muestra delgada de acero; después se enciende el motor, generándose una deformación extensional de los brazos, midiéndose el voltaje requerido para desplazar los brazos una cantidad conocida. Estos valores se utilizan para calcular la constante del conductor electromagnético. En un segundo paso, se asume que la muestra de acero tiene pérdidas despreciables comparadas con la contribución del equipo. De esta forma se obtiene la rigidez de pérdida paralela.

Las capacitancias seriales (almacenamiento y pérdida) son usadas para corregir la respuesta no rígida del instrumento que ocurre con muestras muy duras. Este procedimiento ocupa una muestra de acero muy rígida de módulo y dimensiones conocidas para obtener su frecuencia resonante y señal del conductor electromecánico. Estos últimos datos son utilizados para calcular ambas capacitancias.

En pruebas a frecuencia fija, el DMA mide el retraso entre la señal del conductor electromagnético y la señal de la posición del brazo. La fase cero corrige la contribución del equipo a las mediciones del ángulo de fase de la muestra. En este procedimiento, el equipo realiza una medición interna para calibrar el retraso de fases: después, comienza el movimiento de los brazos y mide el ángulo de fase de la muestra delgada de acero a dos longitudes distintas y en un rango de frecuencias; finalmente, calcula la desviación estándar de los datos obtenidos.

La corrección por longitud, enmienda los efectos finales en los dientes de la abrazadera, y depende de la dureza de la muestra y el torque aplicado a los tornillos de la abrazadera. Durante este procedimiento, se mide el módulo de la muestra a una variedad de longitudes; posteriormente, se extrapola los valores obtenidos a una longitud infinita. El módulo obtenido se usa para calcular la corrección por longitud necesaria para obtener el mismo módulo a la longitud real de la muestra.

Con excepción del momento de inercia, fase cero y corrección por longitud, todos los procedimientos de calibración deben realizarse cada mes o cada vez que se use una serie de muestras completamente distintas entre sí. La calibración del momento de inercia sólo se necesita hacer cuando se instala por primera vez el equipo o los brazos son reemplazados. La corrección por longitud debe realizarse cada vez que se use una muestra distinta o se cambie la configuración de la abrazadera.

Estos procedimientos deben realizarse en el orden sugerido en el cuadro G.1 y, obtener resultados dentro del intervalo especificado en el cuadro G.2.

Cuadro G.1 Dependencia de los procedimientos de calibración

Procedimiento	Se usan cálculos de:
Momento de Inercia	_____
Constante Resorte	Momento de Inercia
Constante Conductor Electromagnético	Momento de Inercia
Capacitancia Serial	Momento de Inercia Constante Resorte Constante Conductor Electromagnético
Fase Cero	Momento de Inercia Constante Resorte Constante Conductor Electromagnético Capacitancia Serial
Corrección por Longitud	Momento de Inercia Constante Resorte Constante Conductor Electromagnético Capacitancia Serial

Cuadro G.2 Valores típicos de los parámetros de calibración

<i>Símbolo</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Intervalo</i>
J	Momento de Inercia	2.4 a 2.7 g m ²
K'	Constante Resorte (Rigidez Almacenamiento Paralela)	0.30 a 0.40 N m
K _n ''	Rigidez Perdida Paralela (Frecuencia entre 15 y 20 Hz)	0.05 a 0.25 N m
C'	Constante Conductor Electromagnético	0.015 a 0.026 mm/(mV s ²)
J _C '	Capacitancia Almacenamiento Serial	0.5 a 1.5 μm/N
J _{Cm} '	Capacitancia Pérdida Serial (Frecuencia < 98 Hz)	0.005 a 0.05 μm/N
	Ángulo Fase (Desviación Estándar)	< 0.0010 rad
ΔL	Corrección Longitud	0 a 5.0 mm

ECUACIONES USADAS POR EL DMA

Todos los instrumentos mecánico dinámicos operan variaciones específicas de la siguiente ecuación:

$$2J \left[\frac{d^2\phi}{dt^2} + D \frac{d\phi}{dt} + k^2\phi \right] = M(t) \dots (1)$$

Donde, J es el momento de inercia de un brazo, ϕ es el ángulo de deformación, D es el coeficiente de amortiguación, k^2 es la constante del resorte y M(t) es el momento opuesto.

Cada término representa un momento de fuerza necesario para superar, respectivamente, la resistencia a la aceleración ofrecida por el momento de inercia del sistema (2J), las fuerzas de impedimento de disipación de energía que dependen de la rapidez de cambio de la variable de posición angular y fuerzas elásticas que dependen linealmente de la variable de posición por sí mismas. En un sistema mecánico que usa un marco de referencia estático se deben balancear, las fuerzas mencionadas, con un momento opuesto que es suministrado por el motor del DMA.

Los coeficientes D y k^2 están relacionados con las constantes deseadas del material viscoelástico por la resolución de la ecuación diferencial para las condiciones particulares impuestas por el DMA, las cuales son: el movimiento es en estado estacionario, el momento conductor es una onda sinusoidal de amplitud M_0 y frecuencia angular ω , y el desplazamiento máximo es fijado a $\pm \phi_0$ por el momento conductor.

La solución de la ecuación anterior da las siguientes expresiones para M_0 y el retraso de fases (δ) de la posición sinusoidal como función de la frecuencia:

$$M_0 = 2J\phi_0 \left[(k^2 - \omega^2)^2 + (\omega D)^2 \right]^{1/2} \dots (2), \quad \delta = \text{Arcsen} \frac{\omega D}{\left[(k^2 - \omega^2)^2 + (\omega D)^2 \right]^{1/2}} \dots (3)$$

Estas ecuaciones proveen los conceptos teóricos básicos para entender la operación del instrumento. Sin embargo los factores de corrección del equipo y geometría de la muestra, necesarios para relacionar estas señales con las constantes viscoelásticas del material estudiado, aún no están contemplados en los parámetros M_0 , ϕ y ω .

Estas constantes están relacionadas con parámetros del sistema expresando la deformación de la muestra en términos de ϕ y el esfuerzo en términos de M. El desplazamiento del brazo (Figura H.1) posee tres contribuciones:

1. La deformación de la muestra por flexión (X_f), donde el desplazamiento del brazo se debe a la inclinación inicial en el empalme entre la abrazadera y la muestra.
2. La deformación cortante de la muestra (X_s), donde el plano del material es desplazado uniformemente en dirección paralela a los brazos.

3. Un desplazamiento extra (X_C) linealmente proporcional a la fuerza F y que se debe a la distorsión (flexión) del pivote.

$$X_f = \frac{FL^3}{12EI} \dots (4), \quad X_s = \frac{\alpha FL}{AG} \dots (5), \quad X_c = FJ_c \dots (6)$$

Donde F es la fuerza que actúa paralela a la longitud de los brazos, I es el momento de inercia de la sección transversal de la muestra, E es el módulo en tensión, G es el módulo cortante, α es el factor de distorsión cortante y A es la sección transversal de la muestra. La relación entre $X = (X_f + X_s + X_c)$ y el ángulo ϕ se obtiene por simple geometría: $X = L\text{sen}(\theta) = B\text{sen}(\phi) \approx B\phi$ (B es la distancia entre los brazos en el centro de éstos, y los ángulos θ y ϕ son pequeños).

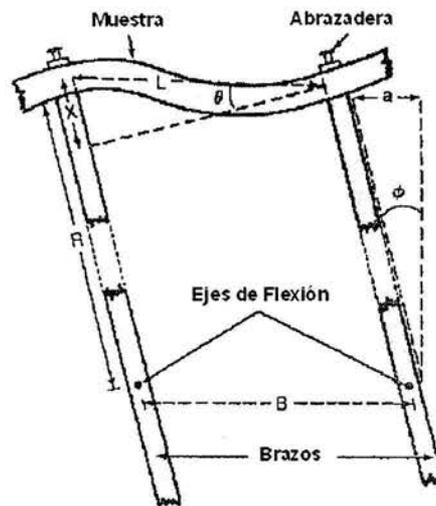


Figura H.1. Deformación de la muestra

Las propiedades viscoelásticas de la muestra y el equipo están relacionadas con el uso del principio de correspondencia, el cual permite formular una respuesta viscoelástica del esfuerzo en términos del módulo elástico lineal simple, permitiendo cualquier manipulación matemática deseada para después sustituir el módulo complejo y deducir una respuesta viscoelástica. En este caso, la ecuación de movimiento elástico lineal es:

$$2J \frac{d^2\phi}{dt^2} + f(\phi) = M(t) \dots (7)$$

Donde $f(\phi)$ es el momento elástico resultado del desplazamiento. Usando la relación entre X y ϕ e incluyendo la constante resorte pivote (K) en flexión, $f(\phi)$ queda:

$$f(\phi) = \left[\frac{L^3}{12EI} + \frac{\alpha L}{AG} + J_c \right]^{-1} B^2\phi + 2K\phi \dots (8)$$

Esta expresión contiene cuatro constantes elásticas las cuales son redefinidas como cantidades complejas:

E = Módulo en flexión	$E^* = E' + iE'' \dots (a)$
G = Módulo cortante	$G^* = G' + iG'' \dots (b)$
J_C = Capacitancia del equipo	$J_C^* = J_C' + iJ_C'' \dots (c)$
K = constante resorte pivote en flexión	$K^* = K' + iK'' \dots (d)$

Donde (') y (') define el componente de almacenamiento y pérdida respectivamente. La Figura H.2 muestra los elementos en serie y paralelo de este modelo.

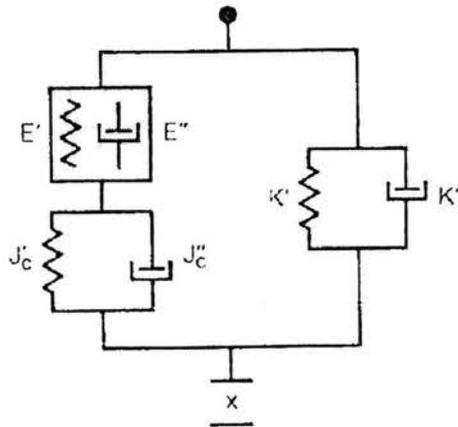


Figura H.2. Modelo mecánico utilizado en el DMA 983

La razón de Poisson es usada para relacionar E^* con G^* : $E^* = 2(1 + \sigma)G^*$; y sustituyendo las ecuaciones que definen G^* , J_C^* y K^* y $f(\phi)$ en la ecuación diferencial, se obtiene la siguiente ecuación:

$$2J \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \frac{B^2 A}{L} \left[\frac{(G' \beta + G'' \gamma) + i(G'' \beta - G' \gamma)}{\beta^2 + \gamma^2} \right] \phi + 2(K' + iK'') \phi = M(t) \dots (9)$$

$$\beta = \alpha + \frac{L^2 A}{24(1 + \sigma)I} + \frac{A}{L} (J_C' G' + J_C'' G'') \dots (10), \quad \gamma = \frac{A}{L} (J_C' G'' - J_C'' G') \dots (11)$$

En el movimiento armónico $\phi = \phi_0 e^{i\omega t}$, y $d\phi/dt = i\omega \phi_0 e^{i\omega t} = i\omega \phi$. Entonces, la parte imaginaria de la ecuación es $i\phi = \omega^{-1} d\phi/dt$. Efectuando esta sustitución y el valor de $M(t)$ de la ecuación 1 en la ecuación 9 (factorizando la ecuación en función de la parte real y la imaginaria) se obtiene:

$$2J\omega D = \frac{B^2 A}{L} \left[\frac{G'' \beta - G' \gamma}{\beta^2 + \gamma^2} \right] + 2K'' \dots (12), \quad 2Jk^2 = \frac{B^2 A}{L} \left[\frac{G' \beta + G'' \gamma}{\beta^2 + \gamma^2} \right] + 2K' \dots (13)$$

Considerando los siguientes casos límite:

1. $G', G'' = 0$ (sin muestra)

$$J(\omega D)_0 = K'' \text{ (rigidez de pérdida paralela)}$$

$$Jk^2_0 = K' \text{ (rigidez de almacenamiento paralela)}$$

2. $G' = \infty, G'' = 0$ (muestra muy rígida, sin disipación; Ej. acero)

$$2J(\omega D)_\infty = \frac{J_c'' B^2}{|J_c'|^2} + 2K'' \text{ (Capacitancia de perdida serial)}$$

$$2JK_\infty^2 = \frac{J_c' B^2}{|J_c'|^2} + 2K' \text{ (Capacitancia de almacenamiento serial)}$$

En el modo resonante, ϕ es fijada en a/R (a = amplitud de oscilación, R = distancia entre el centro del pivote flexionado al punto en el que la calibración del equipo midió el valor de la amplitud de oscilación) y δ en $\pi/2$ radianes. Entonces, las ecuaciones de movimiento requieren que $k = \omega = 2\pi f$ donde f es la frecuencia medida. Si este es el caso, $\omega D = M_0/2J$ y $\phi_0 = 4\pi^2 C'V/a$ (V = señal del conductor electromagnético). Las ecuaciones del módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida son:

$$G' = (2Jk^2 - 2K') \frac{\beta^2 + \gamma^2}{\beta} \frac{L}{B^2 A} - \frac{\gamma G''}{\beta} \dots (14), \quad E' = 2(1 + \sigma)G' \dots (16)$$

$$G'' = (2J(\omega D) - 2K'') \frac{\beta^2 + \gamma^2}{\beta} \frac{L}{B^2 A} - \frac{\gamma G'}{\beta} \dots (15), \quad E'' = 2(1 + \sigma)G'' \dots (17)$$

Otras relaciones:

$$M_0 = (2J/R)4\pi^2 C'V \dots (18), \quad k^2 = \frac{M_0 \text{Cos} \delta}{2J\theta_0} + \omega^2 \dots (19),$$

$$(\omega D) = \frac{M_0}{2J\theta_0} \text{Sen} \delta \dots (20), \quad \theta_0 = a/R \dots (21)$$

El "software" del equipo (en el modo frecuencia fija y frecuencia de resonancia), empleando los parámetros de la calibración del modo usado y de la muestra, realiza un procedimiento iterativo aplicando estas ecuaciones que termina cuando el cambio en el módulo entre una iteración y la otra es menor al 1%.

En los modos esfuerzo-relajación y fluencia, el instrumento realiza una compensación en la fuerza de restauración aplicada a la muestra en los pivotes flexionados (K'). Aún con esta compensación, en muestras muy blandas, los resultados deben interpretarse cualitativamente.

Las ecuaciones de G (módulo cortante de la muestra, GPa), b, g y k² en los modos esfuerzo-relajación y fluencia difieren ligeramente de las ocupadas en los modos oscilantes:

$$G = (2Jk^2) \frac{\beta^2 + \gamma^2}{\beta} \frac{L}{B^2 A} \dots (22), \quad \beta = \alpha + \frac{L^2 A}{24(1 + \sigma)I} + \frac{A}{L} J'_C G \dots (23)$$

$$\gamma = \left(-\frac{A}{L} \right) J''_C G \dots (24), \quad k^2 = 4\pi^2 C'(V/P) \dots (25)$$

La ecuación del módulo (G) se resuelve iterativamente, similarmente a la forma de resolver las ecuaciones de los módulos en los modos oscilatorios. Una vez obtenido el módulo, se pueden obtener el esfuerzo, el esfuerzo relativo, el porcentaje de recuperación y el porcentaje de fluencia, usando alguna de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \frac{1000M_0}{RA} \dots (26), \quad \sigma \text{ relativo} = V / V_i \dots (27)$$

$$\% \text{ Recuperación} = \left[1 - \frac{Pp(f)}{P_{\max} p(f_{\max})} \right] 100 \dots (28), \quad \% \text{ Fluencia} = \left[\frac{Pp(f)}{P_i p(f_i)} - 1 \right] 100 \dots (29)$$

Donde P es la posición del brazo (en milímetros). V_i es la señal del conductor electromagnético cuando el desplazamiento es aplicado al inicio de la prueba, p(f) es el factor de corrección de la posición del brazo, P_{max} es el desplazamiento máximo, p(f_{max}) es el factor de corrección a la frecuencia equivalente en el desplazamiento máximo, P_i es la posición del brazo después de la aplicación inicial de la carga, y p(f_i) es el factor de corrección a la frecuencia equivalente en el desplazamiento inicial.

Cuadro H.1 Propiedades medidas con el DMA 983 (DuPont)

<i>Señal</i>	<i>Fuente o Ecuación</i>
Tiempo (min)	Archivo de Datos
Temperatura (°C)	Archivo de Datos
Frecuencia (Hz)	Archivo de Datos
Conducción o Voltaje (mV)	Archivo de Datos
Ángulo de Fase (radianes)	Archivo de Datos
Posición del Brazo (mm)	Archivo de Datos
Tiempo del Segmento del Método (min)	Archivo de Datos
Módulo Almacenamiento Flexión (E', GPa)	$2(1+\nu)G'$
Módulo Pérdida Flexión (E'', GPa)	$2(1+\nu)G''$
Tan Delta	G''/G'
Módulo Almacenamiento Cortante (G', GPa)	G' (Ver Ecuación 14)
Módulo Pérdida Cortante (G'', GPa)	G'' (Ver Ecuación 15)
Capacitancia Almacenamiento Flexión (S', $\mu\text{m}_2/\text{N}$)	$\frac{1000G'}{2(1+\nu)(G'^2+G''^2)}$
Capacitancia Pérdida Flexión (S'', $\mu\text{m}_2/\text{N}$)	$\frac{1000G''}{2(1+\nu)(G'^2+G''^2)}$
Capacitancia Almacenamiento Cortante (J', $\mu\text{m}_2/\text{N}$)	$\frac{1000G'}{(G'^2+G''^2)}$
Capacitancia Pérdida Cortante (J'', $\mu\text{m}_2/\text{N}$)	$\frac{1000G''}{(G'^2+G''^2)}$
Viscosidad Dinámica (η' , GPa*s)	G''/ω
Viscosidad Compleja (η^* , GPa*s)	$\sqrt{\left[G'/\omega\right]^2 + \left[G''/\omega\right]^2}$
Módulo Relajación Flexión (E, GPa)	$2(1+\nu)G$
Capacitancia Relajación Flexión (1/E, $\mu\text{m}_2/\text{N}$)	$\frac{1000}{2(1+\nu)G}$
Módulo Relajación Cortante (G, GPa)	G (Ver ecuación 22)
Capacitancia Relajación Cortante (1/G, $\mu\text{m}_2/\text{N}$)	$\frac{1000}{G}$
Capacitancia Fluencia Flexión (S, $\mu\text{m}_2/\text{N}$)	$\frac{1000}{2(1+\nu)G}$
Módulo Fluencia Flexión (1/S, GPa)	$2(1+\nu)G$
Capacitancia Fluencia Cortante (J, $\mu\text{m}_2/\text{N}$)	$\frac{1000}{G}$
Módulo Fluencia Cortante (1/J, GPa)	G (Ver ecuación 22)
Esfuerzo (kPa)	σ (Ver ecuación 26)
Esfuerzo Relativo (%)	(Ver ecuación 27)
Recuperación (%)	(Ver ecuación 28)
Fluencia (%)	(Ver ecuación 29)