

# Capítulo 4

## *Estudio en los asfaltos de las propiedades reológicas vinculadas a las deformaciones permanentes*

### **4.1. Introducción**

En este capítulo se estudian las propiedades reológicas  $G^*/\sin\delta$ , ZSV y LSV de los diferentes ligantes que serán posteriormente empleados en la elaboración de concretos asfálticos. Como fue presentado en el capítulo 3, ocho asfaltos de producción comercial en Argentina fueron seleccionados para este estudio, incluyendo cuatro asfaltos convencionales (C1, C2, C3 y C4), un asfalto multigrado (M) y tres asfaltos modificados con polímeros (MP1, MP2 y MP3).

Sobre los diferentes asfaltos se estudió, en primer lugar los resultados del parámetro de la especificación SHRP para un rango de temperaturas dentro del cual se producen las deformaciones permanentes y se discute sobre los valores obtenidos. Luego se vuelcan los resultados obtenidos de ZSV y LSV y se comparan los diferentes métodos de medición para definir un protocolo de ensayo para las condiciones de estas tesis definiéndose cuál de ellos es el más conveniente en cuanto a tiempos de ensayo, repetitividad y reproductibilidad así como para una adecuada caracterización de los diferentes asfaltos. Finalmente se concluye con una comparación entre las propiedades reológicas estudiadas.

### **4.2. Parámetro $G^*/\sin\delta$**

El parámetro  $G^*/\sin\delta$  se midió en el DSR para dos frecuencias de ensayo, la especificada en la norma ASTM D 6373 de 10 rad/s, correspondiente a un vehículo circulando a 80 km/h, y otra de 0,6 rad/s similar a la velocidad de la rueda en el ensayo de rueda cargada.

La elección de la frecuencia de ensayo de 0,6 rad/s se tomó en cuenta debido a que la frecuencia propuesta por SHRP de 10 rad/s no representa bien el comportamiento de todos los tipos de asfalto (Bahia et al. 2001) y además es una frecuencia asociada a

velocidades de carga rápida que no son las que de hecho ocasionan los problemas de deformaciones permanentes en los pavimentos.

Por su parte la velocidad de la rueda del equipo de pista se puede asimilar a una frecuencia de 0,1 rad/s a aproximadamente. Si bien se pretendió estudiar los valores de  $G^*/\sin\delta$  a una frecuencia igual a la de la velocidad de la rueda, esto no fue posible debido a la resolución del reómetro. La frecuencia de 0,6 rad/s fue la menor frecuencia que se pudo aplicar en el DSR de manera que los datos medidos sean confiables y estén dentro de los valores admisibles para el equipo.

En las tablas 4.1 y 4.2 se volcaron los valores obtenidos del  $G^*/\sin\delta$  para el rango de temperatura entre 50 y 80 °C a las frecuencias mencionadas respectivamente. Se presenta aquí los resultados para los asfaltos en estado original y luego de envejecido en RTFOT.

Tabla 4.1. Resultados de  $G^*/\sin\delta$  [Pa] a  $\omega = 10$  rad/s.

T [°C]	C1	C2	C3	C4	M	MP1	MP2	MP3
<i>Original</i>								
50	5366	8652	11807	59715	21571	13062	9438	13333
60	1513	2142	2829	11540	6906	4465	3194	4821
70	519	658	845	2875	2637	1802	1278	2040
80	-	-	-	862	1145	821	578	968
a*	-6,945	-7,658	-7,838	-9,545	-6,247	-5,887	-5,943	-5,580
b*	12,529	13,948	14,388	18,135	11,947	11,118	11,071	10,605
R <sup>2</sup>	0,996	0,997	0,997	0,996	0,995	0,980	0,999	0,999
<i>Envejecido en RTFOT</i>								
50	9724	16166	23538	119937	38460	25298	17463	19234
60	2568	3948	5496	21602	12371	7470	6124	6197
70	833	1199	1607	5071	4742	2663	2525	2378
80	-	-	-	1445	2066	1090	1172	1037
a	-7,303	-7,733	-7,979	-9,402	-6,221	-6,690	-5,747	-6,213
b	13,396	14,346	14,927	18,053	12,154	12,770	11,006	11,839
R <sup>2</sup>	0,992	0,998	0,999	0,996	0,995	0,996	0,994	0,999

\*Parámetros de ajuste de datos al modelo  $\log(G^*/\sin\delta) = a \cdot \log(T) + b$

Tabla 4.2. Resultados de  $G^*/\text{sen}\delta$  [Pa] a  $\omega = 0,6$  rad/s.

T [°C]	C1	C2	C3	C4	M	MP1	MP2	MP3
<i>Original</i>								
50	575	1044	1314	5946	2619	1952	1746	1802
60	199	329	496	1091	765	471	988	891
70	82	127	217	260	270	141	610	344
80	-	-	-	-	110	-	403	178
a	-5,832	-6,333	-4,565	-9,301	-6,066	-7,799	-3,125	-4,923
b	9,669	10,779	7,903	16,577	10,726	13,541	5,552	8,619
R <sup>2</sup>	0,995	0,995	0,931	0,999	0,999	0,999	0,916	0,985
<i>Envejecido en RTFOT</i>								
50	972	1648	2140	9818	7674	3282	1837	2590
60	272	453	631	1829	2230	1243	550	979
70	92	152	189	442	784	547	199	430
80	-	-	-	-	317	269	-	211
a	-7,001	-7,087	-7,219	-9,219	-6,778	-5,326	-6,613	-5,334
b	11,883	12,257	12,596	16,654	12,401	9,565	11,500	9,476
R <sup>2</sup>	0,992	0,994	0,994	0,997	0,998	0,996	0,999	0,983

Al realizar un análisis simplificado de los resultados obtenidos tomando valores individuales de diferentes ligantes en estado original se observa que a la temperatura de 60 °C los ligantes C3 y MP2 presentan valores similares de  $G^*/\text{sen}\delta$  para la frecuencia de 10 rad/s, iguales a 2829 y 3124 Pa respectivamente. Esto indicaría que ambos asfaltos tendrían un comportamiento similar frente a las deformaciones permanentes en una mezcla asfáltica. Sin embargo la realidad marca que el asfalto MP2 es de mejores prestaciones en un pavimento colocado; en consecuencia es posible afirmar que a priori el parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$  a 10 rad/s no brinda una buena (o a lo menos completa) caracterización de los asfaltos modificados. Por el contrario, al considerar los valores de  $G^*/\text{sen}\delta$  para los mismos asfaltos y a la misma temperatura (C3 y MP2 a 60 °C) pero a la frecuencia de 0,6 rad/s se observa que ahora sí el ligante MP2 tendría un mejor comportamiento ya que el valor de  $G^*/\text{sen}\delta$  duplica al del ligante C3, 988 Pa contra 496 Pa respectivamente.

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestra la variación del parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$  para la frecuencia de 10 rad/s en función de la temperatura de los diferentes asfaltos estudiados en estado original y luego de envejecidos en RTFOT respectivamente. En primera instancia surge como los asfaltos modificados presentan menor susceptibilidad térmica que los asfaltos convencionales. Tomando los límites de la especificación SHRP de 1 y

2,2 k Pa para el estado original y en vejecido respectivamente ( figuras 4 .1 y 4 .2) se observa que los asfaltos modificados presentan un rango de temperaturas más amplio que los asfaltos convencionales en donde tienen buenas prestaciones frente a las deformaciones permanentes como es de esperarse salvo el caso del asfalto C4. Este hecho se refleja en los valores de temperatura de alta de los asfaltos en el grado de desempeño (PG), tabla 3.1 de la capítulo 3, en donde los asfaltos modificados tienen valores de temperatura de alta de 70 °C o mayores mientras que los convencionales, salvo el caso del C4, presentan temperaturas de alta por debajo de 64 °C.

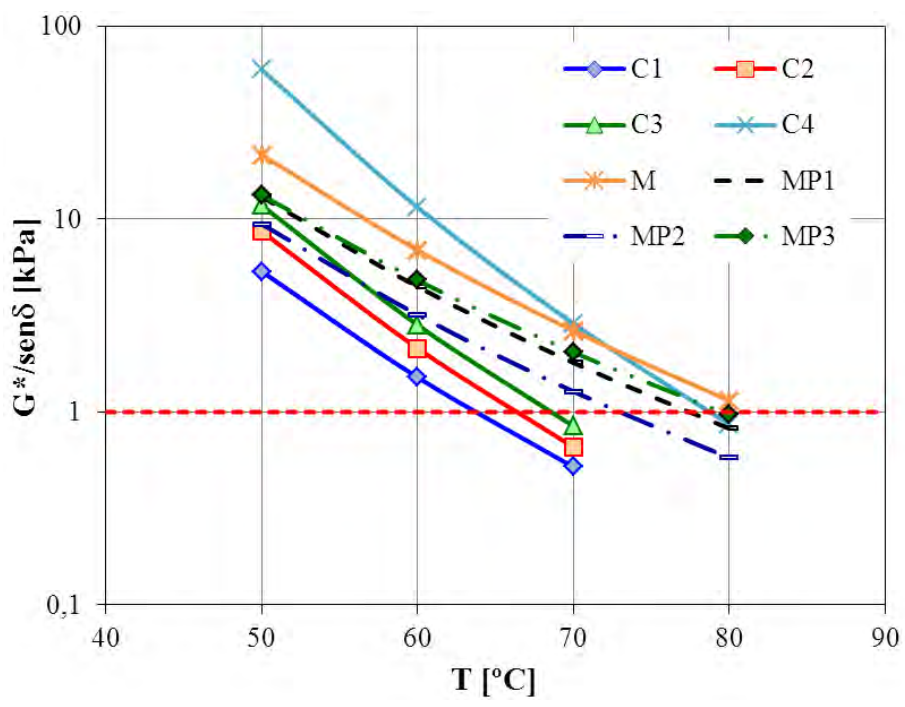


Figura 4.1.  $G^*/sen\delta$  vs  $T - \omega_1 = 10$  rad/s. Asfaltos en estado original.

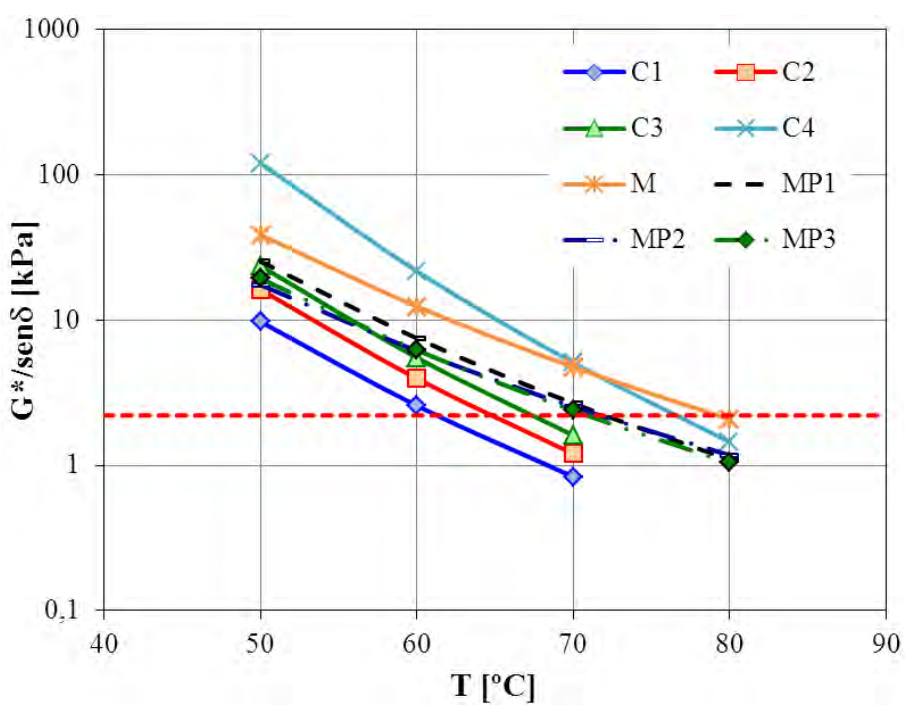


Figura 4.2.  $G^*/sen\delta$  vs  $T - \omega_1 = 10$  rad/s. Asfaltos envejecidos en RTFOT.

Las figuras 4.3 y 4.4 muestran los datos de  $G^*/\text{sen}\delta$  para la frecuencia de 0,6 rad/s en función de la temperatura de los diferentes asfaltos estudiados en estado original y luego de envejecidos en RTFOT respectivamente. Se observa que los valores medidos son menores que los valores para la frecuencia de 10 rad/s. Esto se debe a la naturaleza visco-elástica de los asfaltos. Al imponer una menor velocidad de carga el material tiene la posibilidad de relajar las tensiones y por tanto presenta una menor rigidez, un menor módulo  $G^*$ . En definitiva esto es lo que se buscaba al usar una menor frecuencia de carga, poner de manifiesto la respuesta del asfalto bajo velocidades de carga lenta donde el problema de las deformaciones permanentes es importante.

Se observa en la figura 4.3 como la menor frecuencia de carga mejora la respuesta de los ligantes MP2 y MP3, a los modificados con polímero SBS, respecto a los convencionales debido a su menor susceptibilidad térmica. La menor velocidad de carga permite que la gran recuperación visco-elástica retardada que poseen estos ligantes se manifieste y sea tenida en cuenta dentro del parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$  ya sea por un aumento en el valor de  $G^*$  o en la disminución de  $\delta$ . En el caso del MP1 (modificado con EVA), figura 4.3, se observa que la susceptibilidad térmica aumenta siendo aún mayor que la de los ligantes convencionales. Este es un comportamiento indeseable de un asfalto, más si es modificado con polímero.

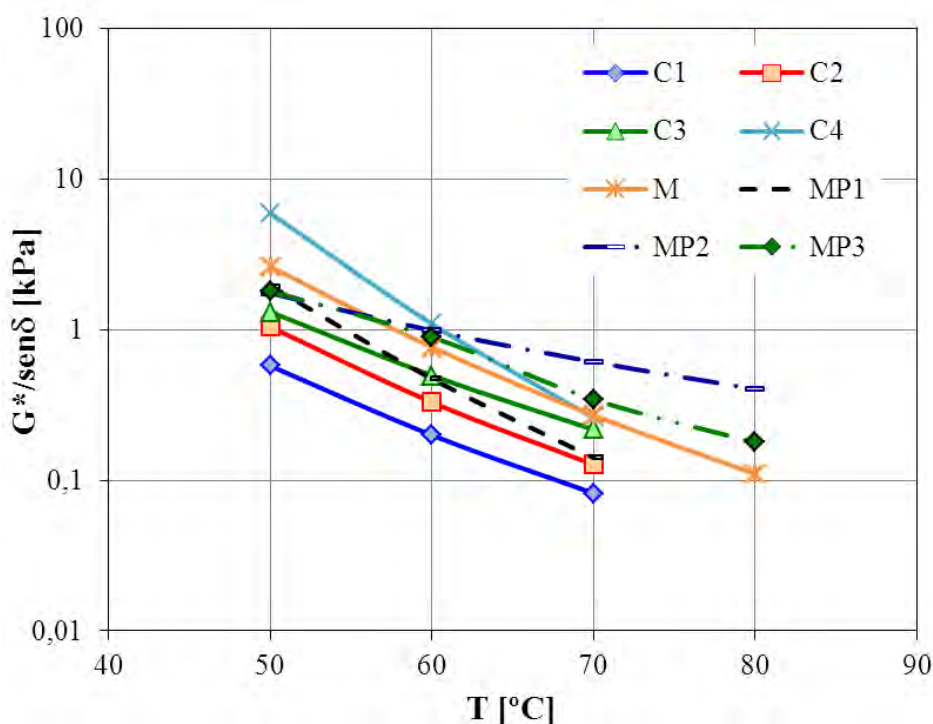


Figura 4.3.  $G^*/\text{sen}\delta$  vs T -  $\omega_2 = 0,6$  1/s. Asfaltos en estado original.

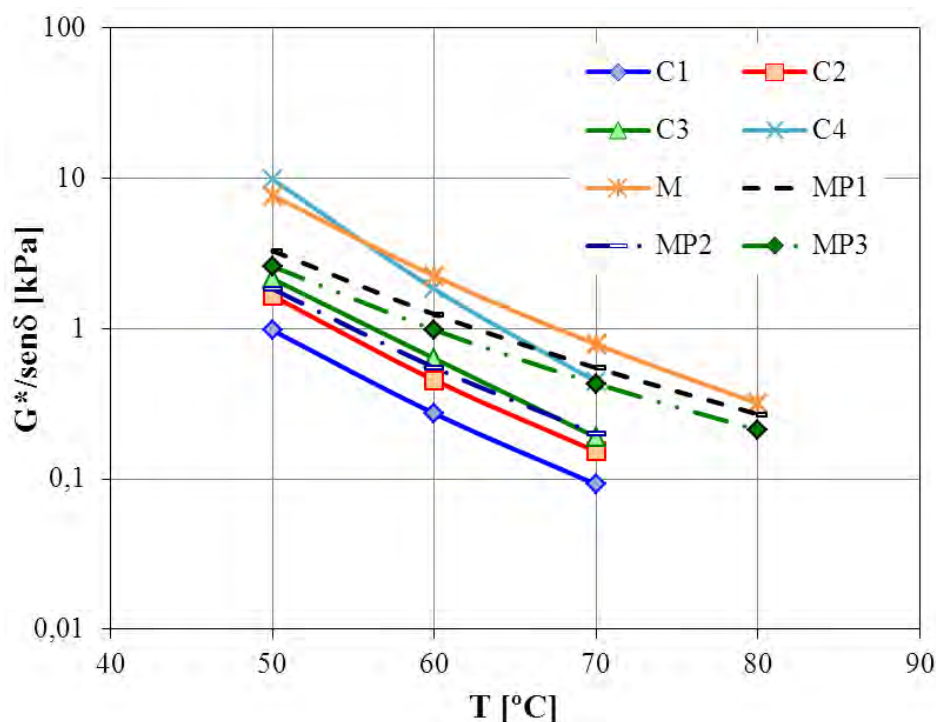


Figura 4.4.  $G^*/\text{sen}\delta$  vs  $T$  -  $\omega_2 = 0,6$  1/s. Asfaltos envejecidos en RTFOT.

Un hecho interesante es el que se observó en el caso de MP2 (modificado con polímero SBS). Este asfalto en estado original para la frecuencia de 0,6 rad/s presentó uno de los mejores comportamientos para todo el rango de temperaturas con valores altos de  $G^*/\text{sen}\delta$ . Sin embargo luego de envejecido en RTFOT su comportamiento decayó notablemente en comparación con los demás ligantes, siendo similar al de C3. Este hecho no se vió reflejado en este asfalto a la frecuencia de 10 rad/s. De manera opuesta el ligante MP1 (modificado con polímero EVA) mostró una mejora en el comportamiento con el envejecimiento en RTFOT respecto al estado original para la frecuencia de 0,6 rad/s.

Como conclusión preliminar la frecuencia de 0,6 rad/s se presenta como una mejor alternativa para la caracterización de los asfaltos al representar una velocidad de carga lenta y permite manifestar las diferencias en el comportamiento de los distintos ligantes. La frecuencia de 10 rad/s representa una velocidad de carga rápida que, si la tuviere, no permite que se manifieste la recuperación visco-elástica retardada del ligante como es el caso de los asfaltos modificados con polímero.

### 4.3. Medición de la ZSV y la LSV

Uno de los objetivos específicos de la tesis era comparar los resultados de ZSV y LSV medidos respectivamente por medio de los métodos de creep y de labrado de frecuencias sobre diferentes ligantes de producción comercial en Argentina. Por tal motivo sobre cada ligante se repitieron 7 ensayos para cada método para poder realizar un análisis estadístico. En dicha comparación se utilizaron seis asfaltos; tres convencionales (C1, C2 y C3), uno multigrado (M) y dos modificados con polímeros (MP1 y MP2 con polímeros EVA y SBS respectivamente). En todos los ensayos se tomó 60 °C como temperatura de referencia por ser una de las más altas temperaturas

que se pueden suscitar en un pavimento, y por ser la más comúnmente empleada en ensayos de caracterización de ligantes asfálticos.

Previo a los ensayos de barrido de frecuencias y siguiendo la propuesta de Airey (2002), se llevaron a cabo sobre todos los ligantes ensayos de barridos de deformaciones para las frecuencias de 1 y 10 Hz (figura 4.5) con el propósito de definir las deformaciones límites del régimen visco-elástico de cada ligante. La tabla 4.3 muestra los límites de deformación máxima obtenidos.

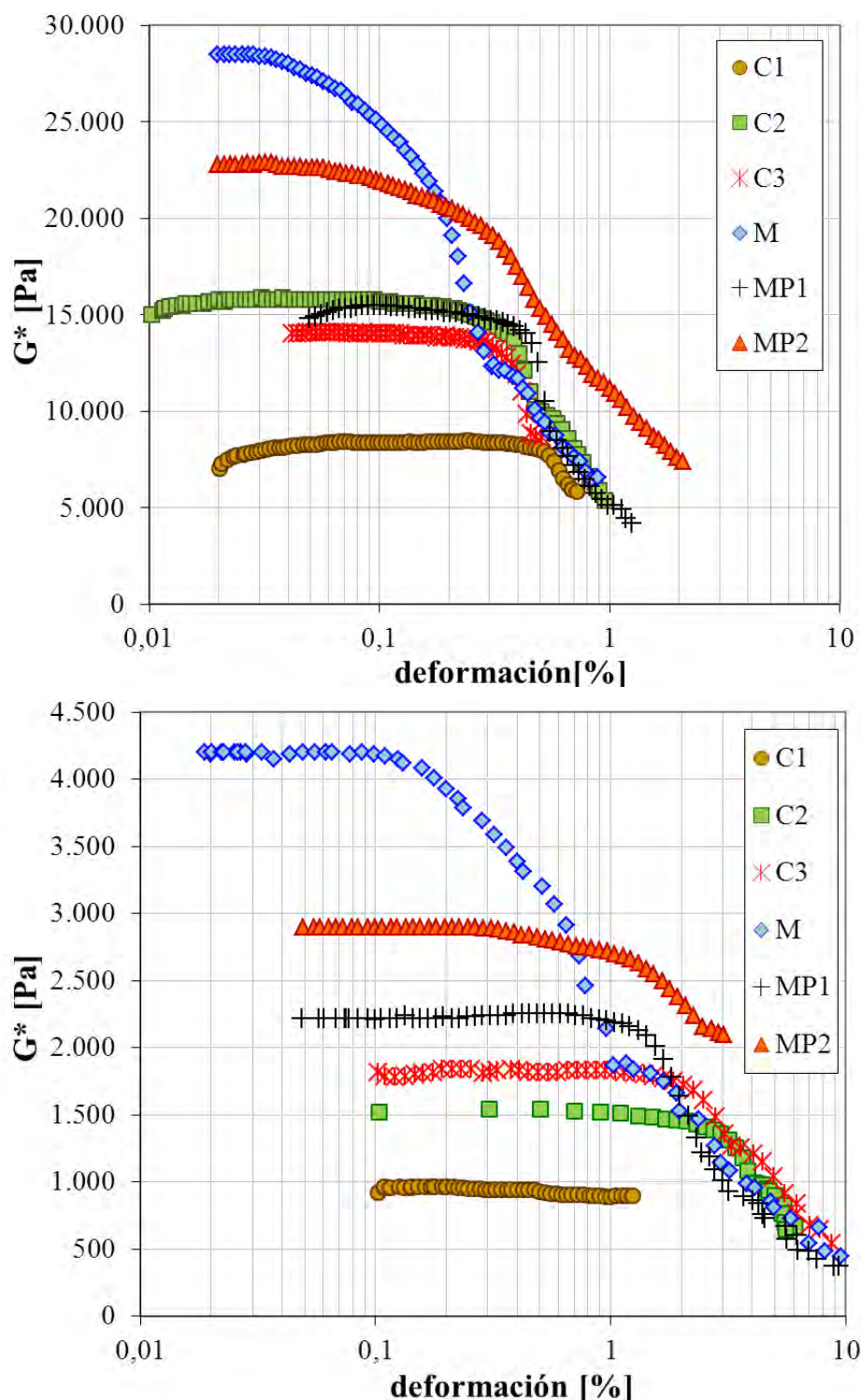


Figura 4.5.  $G^*$  versus deformaciones.  $f = 10$  Hz (arriba);  $f = 1$  Hz (abajo).

Tabla 4.3. Límites de deformación máxima.

Asfalto	Límite de deformación[%]					
	C1	C2	C3	M	MP1	MP2
$f=1$ Hz	55,7	191,0	185,0	20,0	112,0	56,7
$f=10$ Hz	47,3	23,5	17,7	5,7	32,3	11,5

La tabla 4.4 muestra los valores medios de ZSV y LSV obtenidos por los métodos de creep y barrido de frecuencias (BF). También incluyen los valores de los respectivos coeficientes de variación (CV) de cada método para los diferentes asfaltos. Los ensayos de creep sobre el asfalto MP2 (modificado con polímero SBS) fueron descartados del análisis debido a que no fue posible obtener una medida confiable de ZSV. Sobre tres ensayos realizados sobre MP2 se obtuvieron valores de ZSV muy disimiles entre si e irrealmente altos. En este caso la principal causa para no obtener una medida confiable se debió a la resolución del DSR.

Tabla 4.4. Resultados de ensayo y análisis de varianza (ANOVA).

Asfalto	ensayo	Nº de ensayos	Media [Pa.s]	DS [Pa.s]	CV [%]	TN	TVI	P
C1	Creep	7	140,3	12,59	8,9	Pasó	Pasó	0,717
	BF	7	142,5	9,66	6,7	(P = 0,195)	(P = 0,480)	
C2	Creep	7	226,0	19,04	8,4	Pasó	Pasó	0,740
	BF	7	229,0	11,60	5,1	(P = 0,468)	(P = 0,130)	
C3	Creep	7	290,0	26,92	9,3	Pasó	Pasó	0,389
	BF	7	279,5	15,95	5,7	(P = 0,837)	(P = 0,232)	
M	Creep	7	1463,0	280,75	16,5	Pasó	Pasó	0,993
	BF	7	1461,7	216,94	14,7	(P = 0,453)	(P = 0,353)	
MP1	Creep	7	570,2	93,95	19,1	Pasó	Pasó	0,426
	BF	7	610,7	89,81	14,8	(P = 0,326)	(P = 0,642)	
MP2	Creep*	-	-	-	-	-	-	-
	BF	7	1485,3	114,37	7,7			

DS: Desviación Standard. CV: Coeficiente de variación. TN: Test de Normalidad. TVI: Test varianzas iguales. P: Probabilidad de estar en un error en concluir que existe diferencias significativas entre las medias de los grupos. (P-value > 0.05)

\*La resolución del DSR no permitió obtener una medición apropiada.



En la tabla 4.4 se observa que, exceptuando al asfalto MP2, ambos métodos de ensayo dan resultados similares, como muestran los gráficos de caja presentados en la figura 4.6. Es importante destacar que los gráficos de caja no presentan valores extremos atípicos.

Excluyendo los resultados de los ensayos de creep sobre el asfalto MP2, la repetitividad de ensayo fue buena. Los CV para los asfaltos convencionales fueron menores al 10% y entre 15 y 20% en el caso de los asfaltos M y MP1 para ambos métodos. Por su parte para el método de barrido de frecuencias los resultados del ligante MP2 fueron comparables a los obtenidos para los asfaltos convencionales.

Las mediciones para asfaltos convencionales presentaron menores CV que en los asfaltos M y MP1. Este hecho se puede explicar a partir de considerar que los ligantes modificados tienen un comportamiento complejo. La medición es muy sensible a la concentración y distribución de polímero en la muestra, afectando los valores obtenidos. El arreglo de la red de polímero juega un papel importante en la variabilidad de los resultados de ensayo. Sin embargo, la presencia del polímero SBS no tuvo un gran efecto sobre la repetitividad de ensayo en el barrido de frecuencias en el ligante MP2. Los CVs obtenidos fueron similares a aquellos reportados por otros autores (Rouand Robin CE N prE N 15325 2006; Dezmanes et al. 2002; Nigen Cha idron 2007). Los barridos de frecuencia muestran menores CV que los ensayos de creep en los casos donde ambos métodos pudieron realizarse.

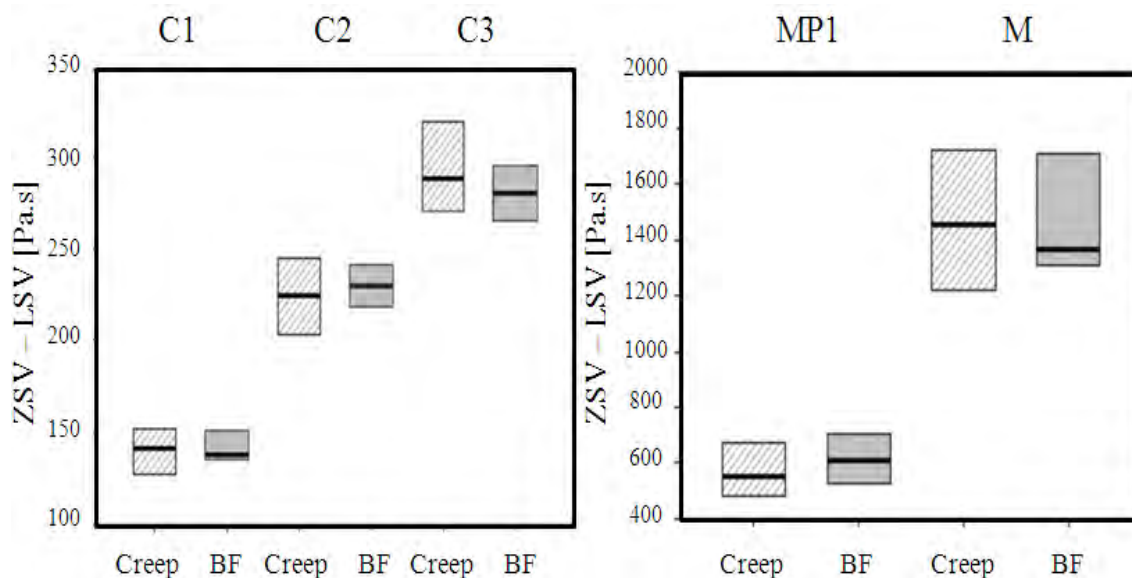


Figura 4.6. Análisis comparativo de los resultados de los ensayos de Creep y Barrido de frecuencias (BF). Izquierda: asfaltos convencionales; derecha: asfaltos modificados.

Los resultados de los ensayos de barrido de frecuencia para el asfalto MP2 muestran muy buena repetitividad. Sin embargo, debido a que no se obtuvo la región de meseta durante el procedimiento de ensayo (valores de viscosidad constante), no es apropiado asumir que el valor obtenido de LSV en el ensayo es comparable a la ZSV del asfalto. En la figura 4.7 se muestran los datos de los siete ensayos realizados en el ligante MP2 al igual que los respectivos ajustes realizados con el modelo de Cross. Se observa allí

que los diferentes barridos arrojan resultados similares, pero lejos de presentar una región de valores asintóticos o de meseta. Se observa también en la figura 4.7 que el modelo de Cross ajusta eficientemente los datos pero los valores de ZSV del ajuste son muy dispares entre sí, efecto de que los datos obtenidos no presentan una tendencia a valores asintóticos de viscosidad, por tanto en esas condiciones se puede generar valores erróneos de ZSV a partir del ajuste con el modelo de Cross. En consecuencia no se puede definir que la LSV sea similar a la ZSV al menos bajo las condiciones de resultados descritos. Es importante destacar que al calcular la LSV a una frecuencia cercana a las frecuencias de los barridos se obtiene una buena repetitividad en los resultados cosa que no se observa entre los valores de ZSV obtenidos del ajuste al modelo de Cross.

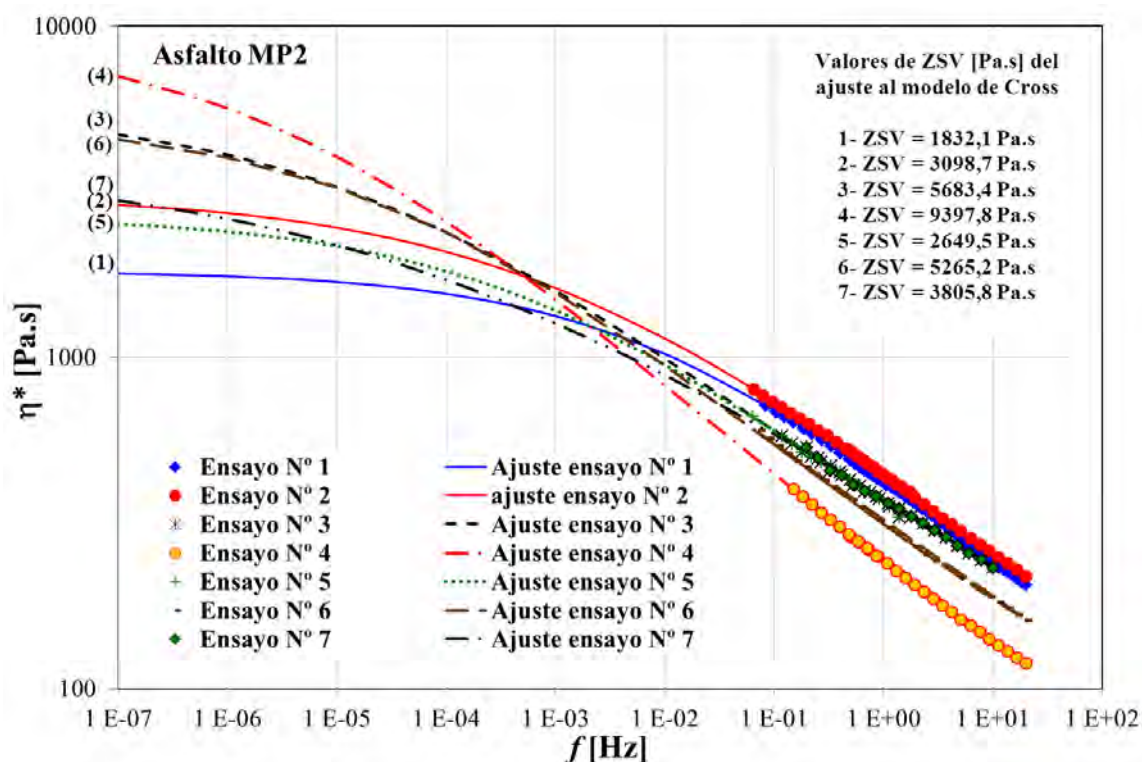


Figura 4.7. Viscosidad en función de la frecuencia para las muestras del asfalto MP2.

En la figura 4.8 y 4.9 se muestran los datos de los siete ensayos realizados en los ligantes C2 y C3 respectivamente junto con los ajustes realizados con el modelo de Cross de cada ensayo. Se observa en las figuras como los diferentes barridos arrojan resultados similares presentándose una tendencia clara hacia la región de valores asintóticos o de meseta para las bajas frecuencias. Al igual que en el ligante MP2 el modelo de Cross ajusta eficientemente los datos pero existe una baja dispersión de los resultados de ZSV que son los mismos de LSV a la frecuencia 0,001 Hz.

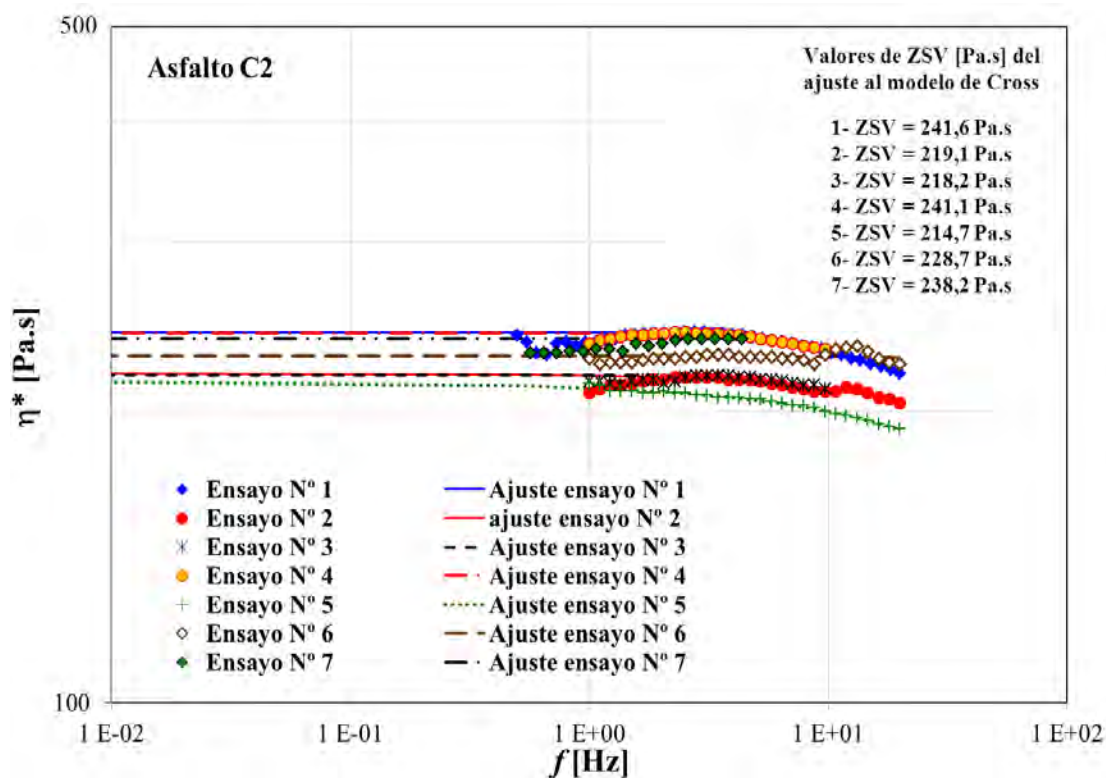


Figura 4.8. Viscosidad en función de la frecuencia para las muestras del asfalto C2.

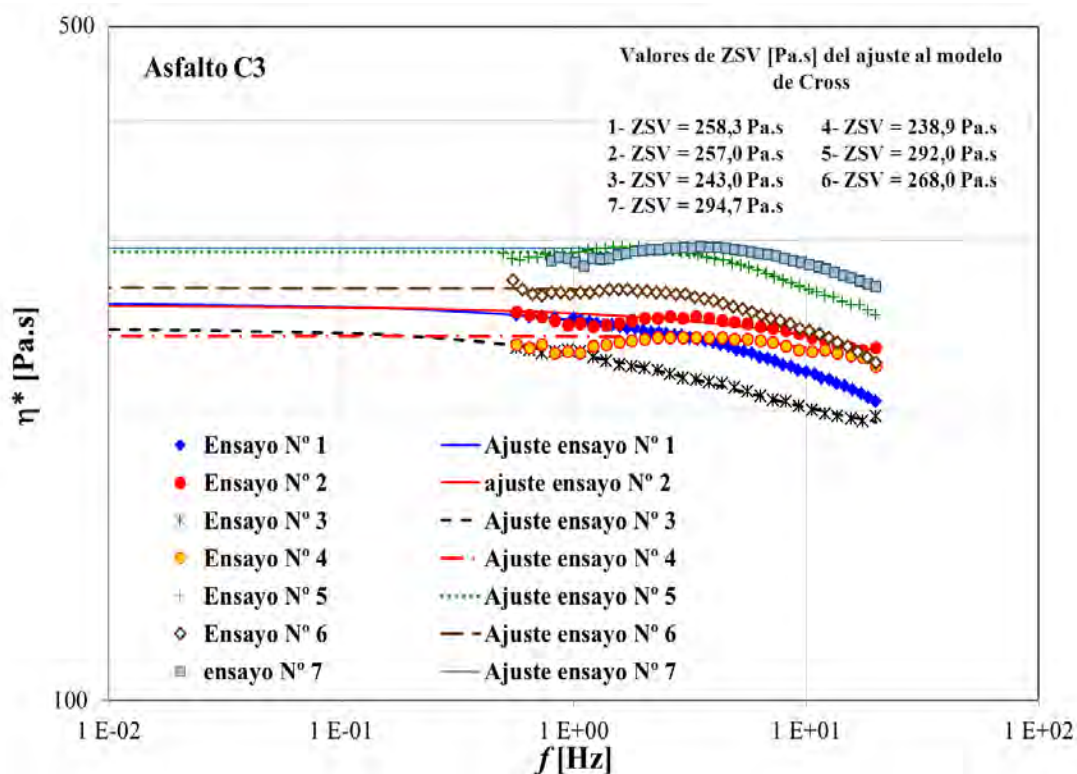


Figura 4.9. Viscosidad en función de la frecuencia para las muestras del asfalto C3.

En lo que respecta al resto de los resultados y para confirmar que los valores medios arrojados por ambos métodos son representativos de la misma población se realizó un análisis de varianza (ANOVA) tal como indica la tabla 4.4. El análisis ANOVA muestra que las diferencias en los valores de las medias a lo largo de los grupos no son suficientemente grandes como para excluir la posibilidad que se deben a la variabilidad en el muestreo y por tanto constituyen una insignificancia estadística (en todos los casos los valores de P son más grandes que 0,05). Como consecuencia se puede concluir que los métodos de barrido de frecuencias y creep dan resultados igualmente confiables.

En lo referente a los protocolos de ensayo, el tiempo que conlleva la realización de un ensayo fue una diferencia importante entre métodos. Los barridos de frecuencia requieren un máximo de dos horas entre preparación de la muestra y el ensayo e incluso en todos los asfaltos estudiados, mientras que para los ensayos de creep el tiempo de ensayo depende del tipo de asfalto. Para los asfaltos convencionales se requirió una hora de ensayo, e incluso en los asfaltos modificados M y MP1 se necesitaron cuatro horas para alcanzar el estado estable de fluir. En el caso particular del asfalto MP2 el estado estable no pudo ser alcanzado incluso después de ocho horas de creep; y aún peor, la estructura del asfalto se vio afectada. En la figura 4.10 se observa la pérdida de la alta capacidad cohesiva que dicho asfalto normalmente posee. Esta afectación se debe a la alteración de la estructura interna que forma las cadenas de polímero SBS.

En los últimos años la ZSV y la LSV han sido estudiadas en Europa como parámetros para caracterizar la contribución del asfalto en el comportamiento frente al ahuellamiento en un concreto asfáltico. Estos ensayos de especificación se deben llevar a cabo de manera regular, por tanto su robustez y repetitividad constituyen cualidades deseables de tales determinaciones. El ensayo de barrido de frecuencias es rápido y fácil de llevar a cabo y se presenta como un método más práctico que el ensayo de creep a los fines de una especificación. Sin embargo, los resultados deben ser cuidadosamente estudiados en el caso de los asfaltos modificados con polímeros.



Figura 4.10. Detalle de dos muestras de asfalto MP2 luego de estar sometidas a diferentes tiempos en el ensayo de creep.

A partir de los resultados obtenidos surge claramente que el ensayo de barrido de frecuencias se presenta como un ensayo más práctico que el de creep ya que ambos métodos arrojan valores comparables de LSV y ZSV para los asfaltos aquí estudiados, pero el barrido de frecuencias conlleva menores tiempos de ensayo. Esto lo posiciona como una mejor herramienta como ensayo de caracterización. En adelante en esta tesis se hablara de la LSV de los asfaltos. Esto último no quita que el ensayo de creep constituya una herramienta útil, de hecho lo es con los ligantes convencionales.

#### 4.4. Parámetro LSV

La LSV de los diferentes asfaltos se calculó para las temperaturas de referencia de 50, 60, 70 y 80 °C utilizando la metodología de barrido de frecuencias explicada en el capítulo 3. En todos estos ensayos se aseguró estar dentro de los límites lineal viscoelástico de cada ligante para lo cual se llevaron a cabo los barridos de deformaciones pertinentes. En las tablas 4.5 y 4.6 se volcaron los resultados de LSV de los asfaltos en estado original y luego de envejecidos en el RTFOT.

Tabla 4.5. LSV de los asfaltos convencionales.

LSV [Pa.s]								
T	C1		C2		C3		C4	
[°C]	Original	RTFOT	Original	RTFOT	Original	RTFOT	Original	RTFOT
50	554,1	1024,3	1024,1	1642,0	1012,4	2674,5	8143,1	23728,3
60	163,8	234,7	346,3	412,3	252,5	559,3	1106,4	2970,4
70	49,9	73,5	71,1	101,3	83,2	159,5	234,0	570,8
80	-	-	-	-	34,3	58,4	69,8	154,2

Tabla 4.6. LSV de los asfaltos modificados.

LSV [Pa.s]								
T	M		MP1		MP2		MP3	
[°C]	Original	RTFOT	Original	RTFOT	Original	RTFOT	Original	RTFOT
50	3631,1	15267,4	3534,4	4465,5	5998,7	17922,1	7669,9	24952,9
60	947,5	3199,4	595,0	1043,0	2642,1	6461,5	2459,3	5169,0
70	308,1	863,9	147,7	313,3	1257,2	2590,7	911,3	1367,7
80	120,5	288,5	49,7	115,9	641,6	1142,5	383,1	445,0

Cuanto más grande sea la LSV a una temperatura dada el ligante tiene mayor consistencia y, en teoría, ofrece mejor resistencia frente a las deformaciones permanentes. En un primer análisis se observa que la LSV clasifica mejor que el  $G^*/\sin\delta$  a los diferentes asfaltos valorando con una mejor condición a los ligantes modificados con polímero por sobre los convencionales. Se observa que la LSV ofrece una mejor clasificación a los asfaltos MP2 y MP3 (modificados con polímero SBS) que el parámetro  $G^*/\sin\delta$ .

Al comparar entre los valores originales y luego del envejecido en RTFOT no se observan resultados atípicos en el comportamiento o algún cambio en la clasificación de los ligantes. Es de mencionar el hecho de que en el ligante MP3 luego de envejecido a 80 °C no tuvo un aumento significativo de LSV, como ocurrió a las demás temperaturas. Este hecho se puede deber a que el ensayo de envejecimiento en RTFOT es inadecuado para el envejecimiento de los asfaltos modificados con polímero (Bahia et al. 2001 y Jia et al. 2005).

#### 4.5. Comparación entre el parámetro $G^*/\sin\delta$ y la LSV

En la figura 4.11 se observa la relación entre los valores de  $G^*/\sin\delta$  (medido a  $\omega = 10$  rad/s) y la LSV de todos los asfaltos obtenidos a las diferentes temperaturas analizadas, para los asfaltos en estado original. En carácter general ambas propiedades reológicas presentan una buena relación cuando se consideran los asfaltos convencionales (C1, C2, C3 y C4), el asfalto multigrado (M) e inclusive el ligante modificado MP1 (modificado con polímero EVA). Sin embargo se observa que el  $G^*/\sin\delta$  subestima a los asfaltos modificados con polímero SBS (MP2 y MP3) respecto a la LSV. Este análisis coincide con lo comentado anteriormente cuando se consideraron los resultados del parámetro  $G^*/\sin\delta$  en la sección 4.2 de este capítulo. Este hecho se repite cuando se comparan estas propiedades en los asfaltos envejecidos en RTFOT, figura 4.12. En las figuras 4.11 y 4.12 se observa un buen ajuste entre los valores de  $G^*/\sin\delta$  y la LSV para los ligantes convencionales y el multigrado ( $R^2$  de 0,98 y 0,96 respectivamente).

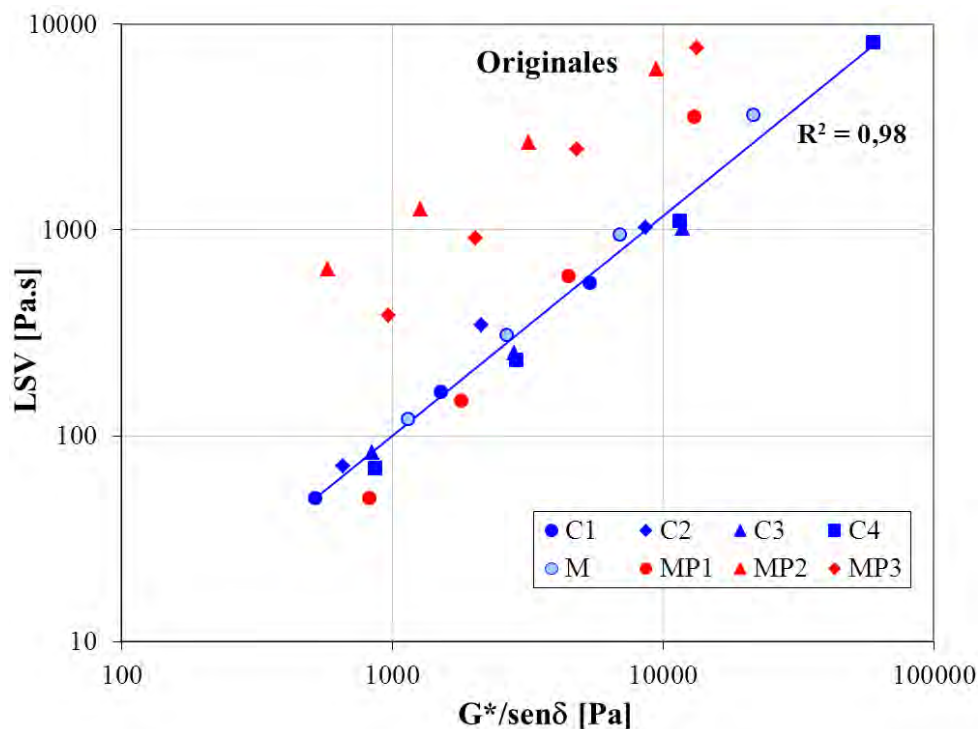


Figura 4.11. LSV versus  $G^*/\text{sen}\delta$  ( $\omega = 10$  rad/s). Asfaltos en estado original.

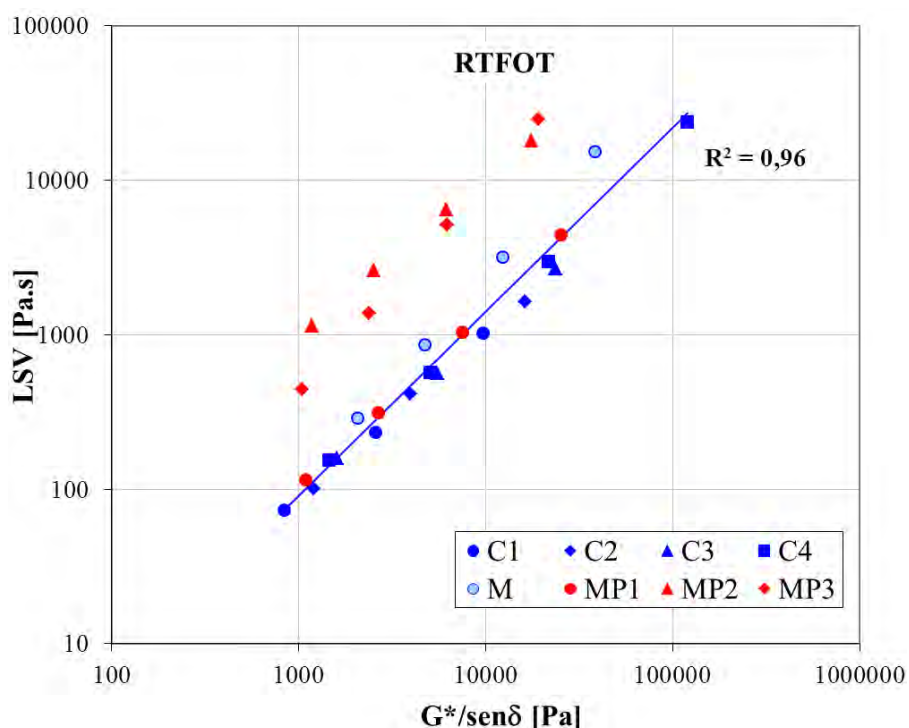


Figura 4.12. LSV versus  $G^*/\text{sen}\delta$  ( $\omega = 10$  rad/s). Asfaltos envejecidos.

Rowe et al. (2002) estudiaron la relación entre  $G^*/\text{sen}\delta$  de la especificación SHRP y la ZSV. Para los asfaltos convencionales ellos encontraron, al igual que en esta tesis, una relación entre la ZSV y el  $G^*/\text{sen}\delta$  ( $\omega = 10$  rad/s). Sin embargo los asfaltos modificados se alejaban de esa representación. Ellos proponen a partir de la relación encontrada para

los asfaltos convencionales, y teniendo en cuenta que el parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$  representa bien la contribución de los mismos frente al ahuellamiento, calcular los valores de ZSV asociados a los valores de especificación de  $G^*/\text{sen}\delta$  de 1 kPa en asfaltos originales y hacerlo a un valor de 2,2 kPa en asfaltos envejecidos en RTFOT (ver tabla 2.2 capítulo 2). Los valores de LSV asociados a 1 y 2,2 kPa de  $G^*/\text{sen}\delta$  obtenidos de la relación para los asfaltos de esta tesis son de 100 y 232,5 Pa.s respectivamente. Ambos similares a los encontrados por Rowe et al.

Dentro de la especificación de ligantes SHRP se calcula la temperatura a la cual el ligante presenta un valores de  $G^*/\text{sen}\delta$  de 1 kPa para el estado original. En esta tesis se determinaron los grados P G de los ligantes y se obtuvo esta temperatura para los ligantes estudiados, tabla 4.7. Esta temperatura se denomina temperatura de alta del grado de desempeño, siendo esta la máxima temperatura del pavimento a la cual el ligante ofrecería una buena resistencia frente a las deformaciones permanentes. Tomando en cuenta los valores de LSV calculados anteriormente que se relacionan con este valor de  $G^*/\text{sen}\delta$  y haciendo uso de las relaciones LSV-Temperatura de la tabla 4.5 se puede calcular, por interpolación, la temperatura a la cual cada asfalto presenta una LSV de 100 Pa.s. Esta sería la temperatura máxima asociada con la LSV, tabla 4.7. En la tabla 4.7 se volcaron también las diferencias de temperatura ( $\Delta T$ ) que aparecen entre ambos criterios. De manera similar se puede analizar para los asfaltos envejecidos en RTFOT tomando como límite 2,2 kPa para el parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$  y 232,5 Pa.s para la LSV, tabla 4.7. A partir de este análisis se observa que para los ligantes convencionales, el multigrado y el modificado con polímero EVA (MP1) ambos criterios dan valores de temperaturas máximas similares. En cambio para los dos ligantes modificados con polímero SBS (MP2 y MP3) se observa que el criterio de  $G^*/\text{sen}\delta$  subestima por mucho la temperatura máxima de estos asfaltos respecto a la LSV.

Tabla 4.7. Temperaturas de alta asociadas a la LSV y el  $G^*/\text{sen}\delta$ .

		C1	C2	C3	C4	M	MP1	MP2	MP3
Original	T [°C] (LSV = 100 Pa.s)	63,7	67,9	68,7	76,7	81,8	73,4	118,9	98,8
	T [°C] ( $G^*/\text{sen}\delta = 1,0$ kPa)	63,7	66,1	68,3	78,6	81,8	77,3	73,1	79,7
	$\Delta T$ [°C]	0,0	1,8	0,4	-1,9	0,0	-3,8	45,8	19,1
Envejecido	T [°C] (LSV = 232,5 Pa.s)	60,2	63,6	67,0	76,5	82,0	72,7	105,2	86,5
	T [°C] ( $G^*/\text{sen}\delta = 2,2$ kPa)	61,3	64,9	67,5	76,7	79,0	72,3	71,7	70,8
	$\Delta T$ [°C]	-1,1	-1,3	-0,5	-0,2	3,0	0,5	33,5	15,6

No considerar este último aspecto mencionado en la selección del ligante asfáltico podría tener implicancias prácticas durante el diseño de la mezcla. Recordemos que dentro del programa SHRP la selección del asfalto se realiza a partir de considerar las



temperaturas extremas que se suscitan en el pavimento. El asfalto a utilizar en la mezcla debe asegurar buenas prestaciones dentro de ese rango de temperaturas teniendo un grado de desempeño que incluya a las temperaturas extremas, vale recordar que el grado de desempeño representa las temperaturas extremas en las que el ligante tiene buenas prestaciones frente a los distintos modos de falla de un pavimento. Para el ahuellamientos la temperatura de alta del ligante a seleccionar debe superar la máxima de la zona de pavimento para no tener problemas de deformaciones permanentes.

Tomando en consideración los resultados encontrados en la tabla 4.7, el ligante MP2 no se podría utilizar en zonas donde la temperatura del pavimento es superior a 70 °C si lo analizamos con el criterio del parámetro  $G^*/sen\delta$ . En cambio el criterio de la LSV brinda una mejor caracterización y una idea más real de la máxima temperatura en el que este ligante se puede utilizar.

Todo lo hasta aquí analizado fue para los valores de  $G^*/sen\delta$  medidos en el DSR a la frecuencia de 10 rad/s. En la figura 4.13 se muestra la relación de la LSV y el  $G^*/sen\delta$  medido a la frecuencia de 0,6 rad/s para los asfaltos en estado original. Se observa para esta frecuencia una aceptable relación entre ambos parámetros,  $R^2 = 0,87$ , para todos los asfaltos. Sin embargo cuando se relacionan los resultados de los asfaltos envejecidos en RTFOT se observa como los asfaltos modificados MP2 y MP3 son subestimados nuevamente por el parámetro  $G^*/sen\delta$ , figura 4.14. Se observa allí que el ajuste para todos los asfaltos en conjunto es pobre ( $R^2 = 0,51$ ) mientras que si se saca del ajuste a los ligantes modificados con polímero SBS el ajuste mejora notablemente ( $R^2 = 0,86$ ).

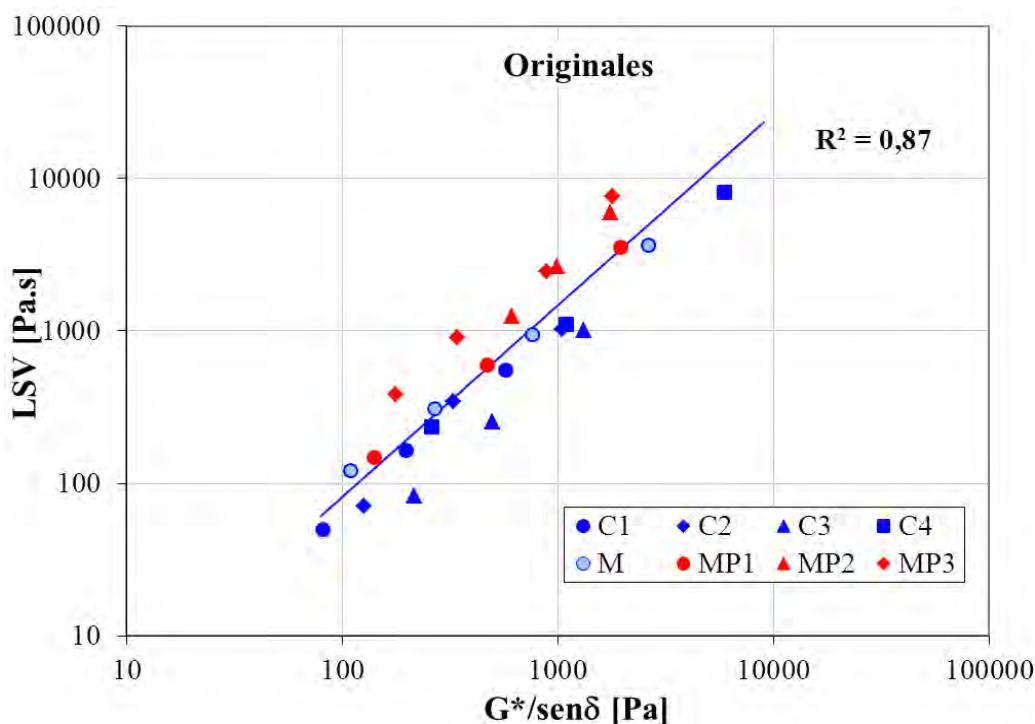


Figura 4.13. LSV versus  $G^*/sen\delta$  ( $\omega = 0,6$  rad/s). Asfaltos en estado original.

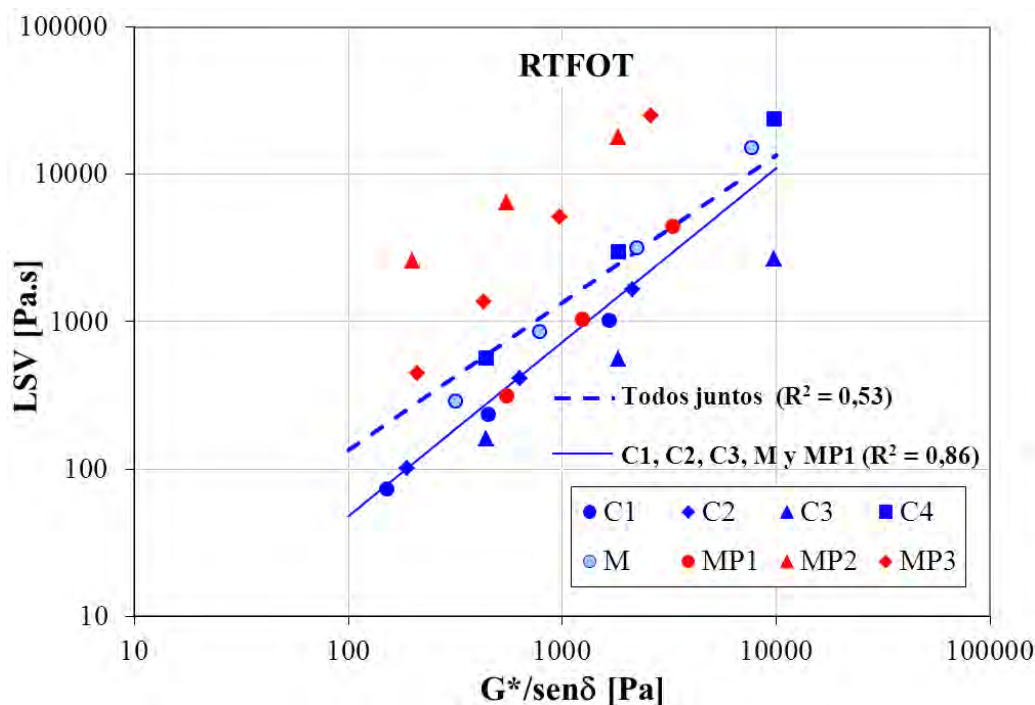


Figura 4.14. LSV versus  $G^*/\text{sen}\delta$  ( $\omega = 0,6$  rad/s). Asfaltos envejecidos en RTFOT.

A partir de estos resultados surge que el parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$  medido a la frecuencia de 0,6 rad/s no describe eficientemente el comportamiento de diferentes tipos de asfaltos. Se observa que aún persiste el problema de caracterizar a los ligantes modificados con polímero SBS al igual que con el  $G^*/\text{sen}\delta$  medido a la frecuencia de 10 rad/s.

#### 4.6. Conclusiones y comentarios sobre las propiedades reológicas de los asfaltos vinculadas a las deformaciones permanentes

Como principal conclusión de este capítulo surge que la medición del  $G^*/\text{sen}\delta$  con la menor frecuencia de carga clasifica mejor la respuesta de los ligantes MP2 y MP3, ambos modificados con polímero SBS, que la frecuencia de 10 rad/s. Esto se puede explicar a partir del hecho que la menor velocidad de carga permite que se manifieste la gran recuperación visco-elástica retardada que estos ligantes poseen y sea tenida en cuenta dentro del parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$ .

Por tanto de manera preliminar la frecuencia de 0,6 rad/s se presenta como una mejor alternativa para la caracterización de los asfaltos al representar una velocidad de carga lenta y permite manifestar las diferencias en el comportamiento de los distintos ligantes.

La frecuencia de 10 rad/s representa una velocidad de carga rápida que no permite que se manifieste la recuperación visco-elástica retardada del ligante, si la tuviere, como es el caso de los asfaltos modificados con polímero.

A partir de los resultados obtenidos en la medición de ZSV y LSV surge claramente que el ensayo de barrido de frecuencias se presenta como un ensayo más práctico que el de creep y a que ambos métodos arrojan valores comparables de LSV y ZSV respectivamente para los asfaltos aquí estudiados y el barrido de frecuencias conlleva

menores tiempos de ensayo. Es todo lo posiciona como una mejor herramienta de caracterización y en adelante en esta tesis se tomará la LSV de los asfaltos. Esto último no descarta al ensayo de creep como una herramienta útil.

Cuando se compararon el  $G^*/\sin\delta$  (a 10rad/s) y la LSV se observó una buena relación cuando se consideran los asfaltos convencionales (C1, C2, C3 y C4), el asfalto multigrado (M) e inclusive el ligante modificado MP1 (modificado con polímero EVA). Sin embargo se observa que el  $G^*/\sin\delta$  subestima a los asfaltos modificados con polímero SBS (MP2 y MP3) con respecto a los valores que alcanza la LSV.

La relación entre el  $G^*/\sin\delta$  (a 0,6 rad/s) y la LSV presentó una buena relación para todos los asfaltos cuando se analizaron los ligantes en estado original. Sin embargo volvió a aparecer la desestimación de los ligantes modificados con polímero SBS cuando se analizaron los asfaltos envejecidos en RTFOT.

