

### *Mediciones de ahuellamientos en el ensayo de rueda cargada. Caracterización mediante propiedades reológicas*

#### 5.1. Introducción

El ensayo de rueda cargada es una simulación a escala de laboratorio que fue desarrollada para reproducir los efectos que las cargas del tránsito y la temperatura producen sobre una mezcla asfáltica, es decir, generar de manera acelerada deformaciones permanentes en la mezcla. Este ensayo permite conocer en laboratorio la performance de una dada mezcla asfáltica antes de ser colocada en el pavimento, lo que lo convierte en una herramienta importante a la hora del diseño de una mezcla asfáltica. Sin embargo en nuestro país no es normalmente utilizada en esta etapa sino como comprobación una vez que surgen problemas en el camino.

Las propiedades reológicas se utilizan para caracterizar a los ligantes asfálticos en relación con el desempeño de las mezclas en lo referente a los modos de falla que se suscitan en el pavimento. Las propiedades del asfalto  $G^*/\sin\delta$  y LSV son dos propiedades asociadas a las deformaciones permanentes.

En el capítulo anterior se centró el estudio a nivel de los ligantes asfálticos. En el presente capítulo se estudia el proceso de ahuellamiento a escala del material compuesto, esto es en concretos asfálticos. Los mismos se analizan bajo condiciones normalizadas buscando observar la incidencia de los parámetros de los asfaltos  $G^*/\sin\delta$  (medidos a las frecuencias de 10 y 0,6 rad/s) y LSV para la caracterización de las deformaciones permanentes; las experiencias se realizan empleando todos los asfaltos en mezclas densa del tipo D-20. El objetivo es definir cuál de estas propiedades pondera con mayor eficacia el aporte de los diferentes tipos de asfalto en cuanto a la resistencia al ahuellamiento.

Es importante reiterar que todos los ensayos de rueda cargada que forman parte de este capítulo se realizaron bajo condiciones normalizadas de temperatura y carga, 60 °C y

520 N respectivamente; de igual manera los valores de  $G^*/\text{sen}\delta$ , en cualquiera de sus variantes, y de LSV de los asfaltos se consideraron a la misma temperatura.

La valoración de las deformaciones permanentes sobre las diferentes mezclas se realizó a partir del parámetro velocidad de deformación (Vd) obtenido de los datos de deformación medidos en función del tiempo en los ensayos de rueda cargada.

## 5.2. Deformaciones permanentes en mezclas y el parámetro $G^*/\text{sen}\delta$

Numerosos investigadores han estudiado las relaciones entre el parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , de la especificación SHRP, y las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas encontrando que dicho parámetro no representa bien el comportamiento de los asfaltos modificados con polímero (O liver y Tredeca 1998, Bahia et al. 2001, Le Hir 2003, Dressen et al. 2009). Sin embargo dado que en Argentina y Latinoamérica no existen trabajos que relacionen la propiedad reológica ( $G^*/\text{sen}\delta$ ) con los ahuecimientos medidos en mezclas asfálticas se consideró importante estudiar y verificar las relaciones existentes entre el  $G^*/\text{sen}\delta$  y medidas de deformaciones permanentes en el equipo de pista para los ligantes Argentinos en estudio.

En la tabla 5.1 se observan los resultados de  $G^*/\text{sen}\delta$  de los distintos asfaltos y los correspondientes valores de Vd de las mezclas obtenidos con el equipo de pista. Se incluyen los resultados del parámetro SHRP para los ligantes en estado original y luego de envejecido en RTFOT para las dos frecuencias de carga establecidas (10 y 0,6 rad/s).

Tabla 5.1. Resultados de  $G^*/\text{sen}\delta$  y Vd a 60°C.

Asfalto	$G^*/\text{sen}\delta$				Vd. [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]
	[kPa]				
	$\omega = 10 \text{ rad/s}$		$\omega = 0,6 \text{ rad/s}$		
	Original	RTFOT	Original	RTFOT	
C1	1,51	2,57	0,20	0,27	12,4
C2	2,14	3,95	0,33	0,45	6,7
C3	2,83	5,50	0,50	0,63	9,6
C4	11,54	21,60	1,09	1,83	2,8
M	6,91	12,37	0,77	2,23	3,4
MP1	4,50	7,47	0,47	1,24	3,7
MP2	3,19	6,12	0,99	0,55	2,7
MP3	4,82	6,20	0,89	0,98	3,0

En la figura 5.1 se muestra la relación entre los valores de  $V_d$  obtenidos de las mezclas asfálticas y el parámetro  $G^*/\sin\delta$  para la frecuencia de 10 rad/s de los asfaltos en estado original. Se observa una mala correlación ( $R^2 = 0,60$ ) que indica que el  $G^*/\sin\delta$  no caracteriza bien el comportamiento de todos los asfaltos en cuanto a su aporte en la resistencia frente a las deformaciones permanentes. Esto ocurre sobre todo para el ligante MP2, modificado con polímero SBS; se observa en la figura que la mezcla elaborada con este ligante presentó el menor valor de  $V_d$ , por lo tanto el menor ahuellamiento, sin embargo el valor de  $G^*/\sin\delta$  no denota esa mayor resistencia, sino que la subestima. Es interesante notar que el valor de  $G^*/\sin\delta$  a 10 rad/s del asfalto MP2 original es similar al del C3, sin embargo las mezclas elaboradas con dichos asfaltos presentan comportamientos muy dispares. Finalmente la mezcla con C3 tiene mayores deformaciones permanentes y peor desempeño que la mezcla con MP2.

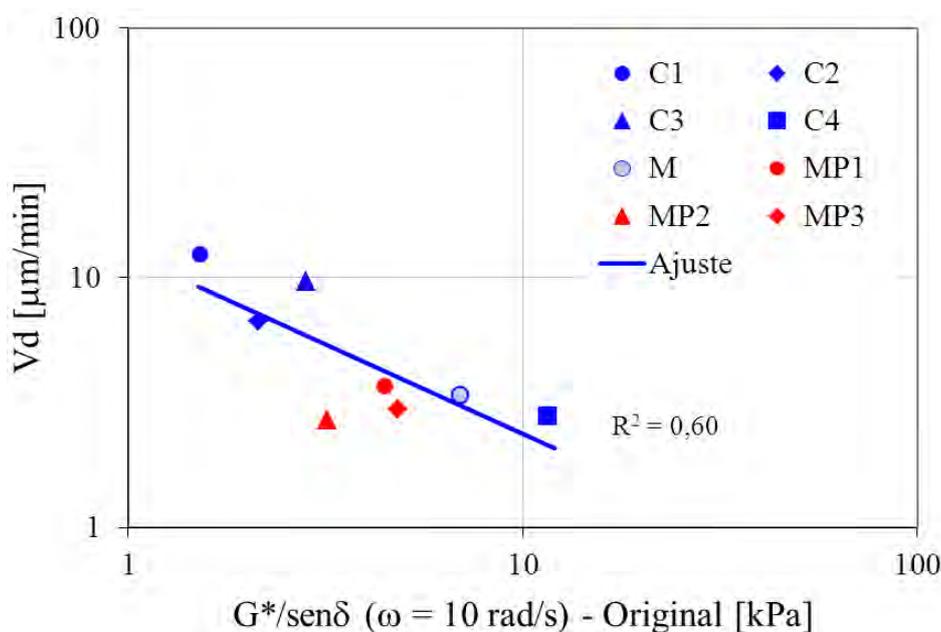


Figura 5.1.  $V_d$  en función del  $G^*/\sin\delta$  ( $\omega = 10\text{rad/s}$ ) en asfalto original.

En la figura 5.2 se comparan los valores de  $V_d$  de las diferentes mezclas con los resultados de  $G^*/\sin\delta$  a la frecuencia de 10 rad/s de los ligantes en vejecidos. Nuevamente se observa una pobre correlación entre los resultados y en este caso los dos ligantes modificados con polímero SBS, MP2 y MP3, presentan comparativamente bajos valores de  $V_d$  en el ensayo de rueda cargada con respecto a lo que podría estimarse en base a los datos de  $G^*/\sin\delta$  si se siguiera la tendencia general del resto de los asfaltos estudiados.

En consecuencia se observa que el proceso de envejecimiento en RTFOT generó discrepancias entre resultados de  $G^*/\sin\delta$  de un mismo asfalto, en lo que se refiere a su capacidad para caracterizar y estimar la resistencia al ahuellamiento en las mezclas. En estado original el ligante MP3 no subestima el ahuellamiento como si lo hace cuando se considera el  $G^*/\sin\delta$  del asfalto envejecido.

Es de destacar en ambas figuras, 5.1 y 5.2, que para el resto de los asfaltos el parámetro  $G^*/\sin\delta$  caracteriza eficientemente el aporte del ligante frente a las deformaciones permanentes. Además no se observan discrepancias con las relaciones

entre los ligantes en estado original y luego de envejecidos en RTFOT. Excluyendo a los ligantes MP2 y MP3, los coeficientes de ajuste mejoran notablemente,  $R^2 = 0,85$  y  $0,81$  considerando los  $G^*/\text{sen}\delta$  en estado original y envejecido respectivamente.

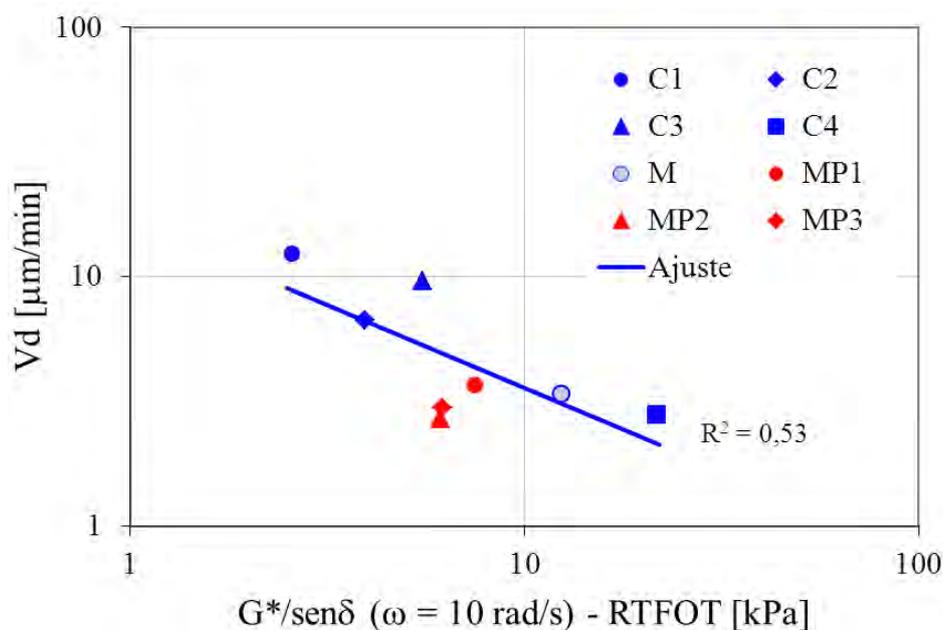


Figura 5.2. Vd en función del  $G^*/\text{sen}\delta$  ( $\omega = 10\text{rad/s}$ ) en asfalto envejecido.

En la figura 5.3 se grafica la relación entre los valores de Vd obtenidos de las mezclas asfálticas en función del  $G^*/\text{sen}\delta$  para la frecuencia de  $0,6\text{ rad/s}$  para los asfaltos en estado original. Se observa una mejora aceptable en la correlación Vd- $G^*/\text{sen}\delta$ , ( $R^2 = 0,78$ ), sin embargo la misma correlación es mala ( $R^2 = 0,51$ ) cuando se considera el  $G^*/\text{sen}\delta$  de los asfaltos envejecidos, figura 5.4. Nuevamente, como se observa en dicha figura, se vuelve a subestimar la resistencia que ofrece el ligante MP2 frente a las deformaciones permanentes.

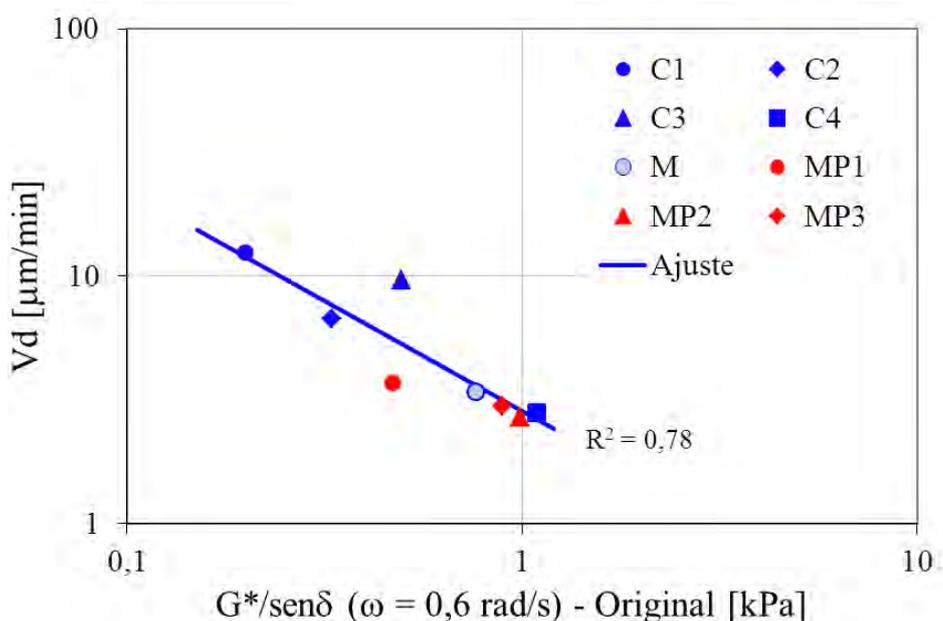


Figura 5.3. Vd en función del  $G^*/\text{sen}\delta$  ( $\omega = 0,6\text{ rad/s}$ ) en asfalto original.

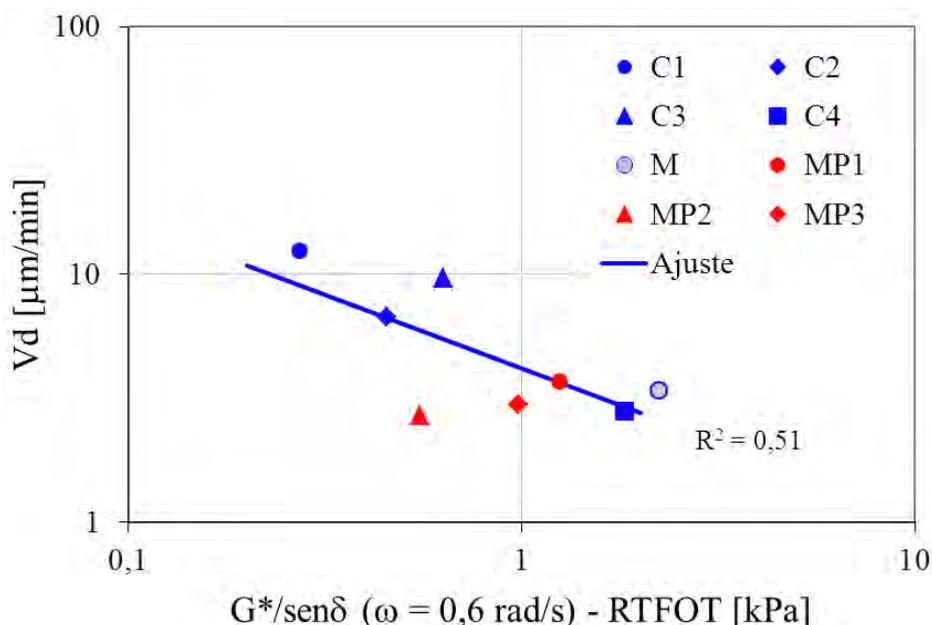


Figura 5.4.  $V_d$  en función del  $G^*/\text{sen}\delta$  ( $\omega = 0,6$  rad/s) en asfalto envejecido.

Como principales conclusiones se constata que el  $G^*/\text{sen}\delta$  a la frecuencia de 10 rad/s no caracteriza el aporte en la resistencia al ahuellamiento de los ligantes modificados con polímero SBS. Como ya se explicara en el capítulo anterior los 10 rad/s son una velocidad de carga rápida que no permite se manifieste la recuperación visco-elástica retardada del ligante. Además se observan para este tipo de ligantes discrepancias en la caracterización entre los resultados con las condiciones en estado original y envejecido en RTFOT.

La frecuencia de 0,6 rad/s se presenta como una mejor alternativa para la caracterización de los asfaltos cuando se toma el  $G^*/\text{sen}\delta$  en estado original no así en el caso de considerar el  $G^*/\text{sen}\delta$  de los ligantes envejecidos. A partir de estos resultados se aprecia que el parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$  medido a la frecuencia de 0,6 rad/s no clasifica eficientemente el comportamiento de los 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.

### 5.3. Deformaciones permanentes en mezclas y la medida de la LSV

En el siguiente apartado se relacionan los ahuellamientos en concretos asfálticos densos en función de la LSV de cada ligante.

En la tabla 5.2 se incluyen los resultados de la LSV a la temperatura de 60 °C para cada uno de los diferentes ligantes en estudio tanto en estado original como luego del proceso de envejecimiento en RTFOT. Como referencia se presentan nuevamente los valores de  $V_d$ , mostrados en la tabla 5.1, obtenidos para las diferentes mezclas a partir de los ensayos de rueda cargada.

Tabla 5.2. Resultados de LSV y Vd a 60°C.

Asfalto	LSV [Pa.s]		Vd. [μm/min]
	Original	RTFOT	
C1	163,8	234,7	12,4
C2	346,3	412,3	6,7
C3	252,2	559,3	9,6
C4	1106,4	2970,4	2,8
M	947,5	3199,4	3,4
MP1	595,0	1043,0	3,7
MP2	2642,1	6461,5	2,7
MP3	2459,3	5169,0	3,0

En la figura 5.5 se observa la relación entre los resultados de Vd y la LSV de los asfaltos en estado original. La correlación obtenida es buena ( $R^2 = 0,86$ ) lo que permite afirmar que la LSV caracteriza eficientemente el comportamiento de la mezcla asfáltica en lo que se refiere a su resistencia al ahuellamiento; a medida que crece la LSV de los asfaltos la resistencia al ahuellamiento es mayor dando lugar a una menor velocidad de deformación.

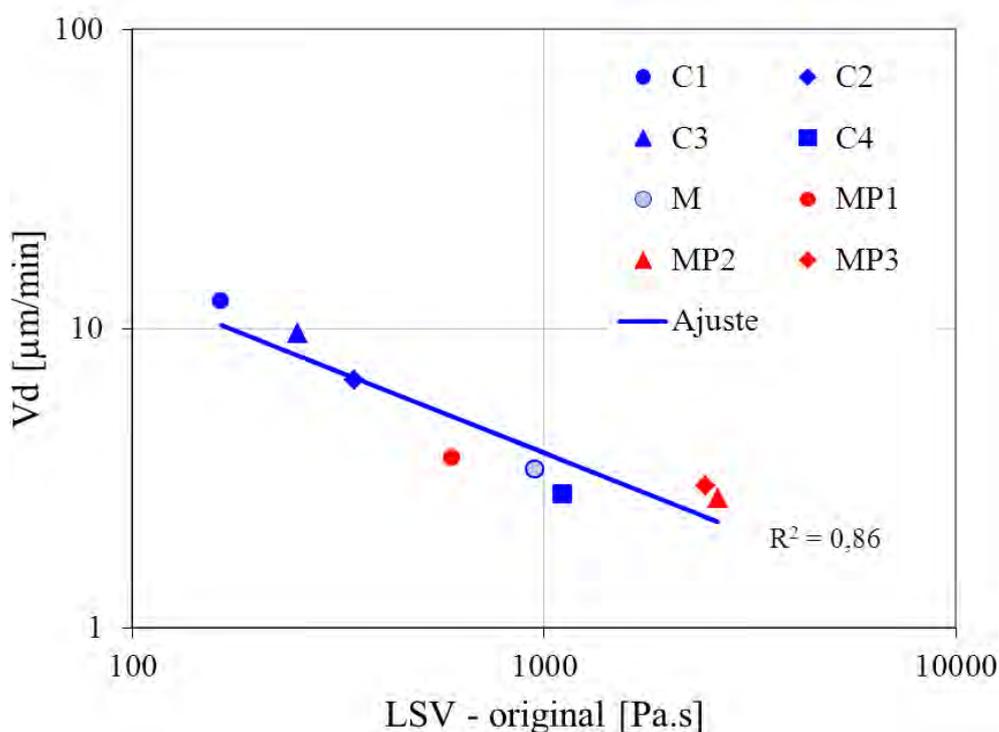


Figura 5.5. Vd en función de la LSV en asfalto original.

Al igual que con el asfalto en estado original la LSV de los asfaltos envejecidos caracteriza de la misma manera los diferentes ahuellamientos, figura 5.6. Esto indica que el proceso de envejecimiento en RTFOT no genera discrepancias en los resultados de LSV que puedan traducirse en una errónea caracterización de la resistencia al ahuellamiento.

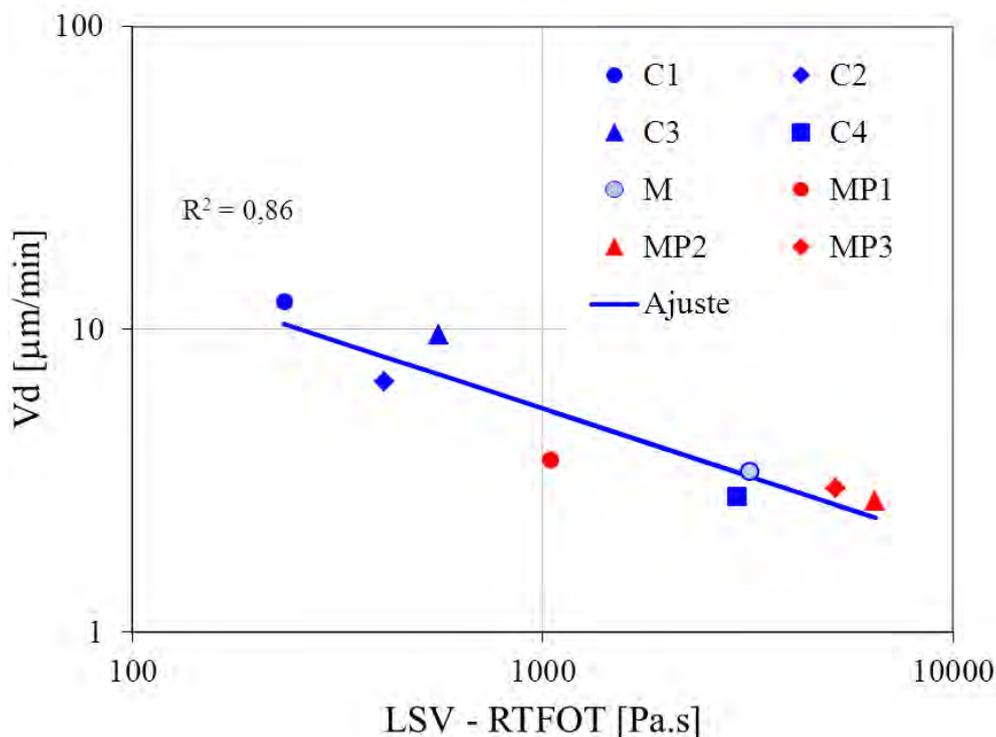


Figura 5.6. Vd en función de la LSV en asfalto envejecido.

Es importante destacar que los ahuellamientos medidos en los concretos asfálticos elaborados con los ligantes modificados con polímero SBS (MP2 y MP3) fueron bien caracterizados por la LSV. Se observa en la tabla 5.2 que, a diferencia de lo ocurrido con el parámetro  $G^*/\sin\delta$ , en este caso ambos ligantes presentan los mayores valores de LSV que siguen una tendencia coherente con los menores ahuellamientos observados (menor Vd) en el ensayo de rueda cargada.

Por todo lo dicho la LSV constituye un parámetro más versátil ya que clasifica a todo tipo de ligante asfáltico en lo que respecta al aporte en la resistencia a las deformaciones permanentes en las mezclas independientemente de sean asfaltos convencionales o modificados.

Para observar las relaciones de las propiedades reológicas con los ahuellamientos en mezclas los datos fueron ajustados de manera preliminar a un modelo potencial de la forma expresada en la ecuación 5.1.

$$Vd[\mu m / \min] = A.LSV^B \quad (5.1)$$

El modelo potencial no caracteriza eficientemente la relación Vd-LSV, a medida que aumenta la LSV la Vd disminuye, sin embargo los valores de Vd obtenidos del ajuste de la ecuación 5.1 son siempre decrecientes, es decir se llega un momento en que la Vd sería cero indicando que la mezcla es un sólido elástico. Eso nunca es así, las mezclas

asfálticas son materiales visco-elásticos por lo que presentaran al menos algún tipo de deformación permanente. La realidad es que el modelo debe presentar una tendencia hacia un valor de Vd constante. Por lo dicho se procedió al ajuste de datos adoptando un modelo como el que indica la ecuación 5.2, utilizando técnicas de regresión no lineal. El ajuste de datos se realizó con un software estadístico.

$$Vd[\mu m / \text{min}] = a + \frac{b}{LSV} \quad (5.2)$$

En la tabla 5.3 se muestran los parámetros de ajuste (a, b y su respectivo R<sup>2</sup>) obtenidos para las relaciones de Vd en función de los asfaltos en estado original y en vejecido respectivamente. En la figuras 5.7 y 5.8 se observan gráficamente estos ajustes.

Tabla 5.3. Parámetros de ajuste por regresión no lineal – relación Vd-LSV.

	Original	Envejecido (RTFOT)
a	1,628	2,451
b	1798,05	2364,93
R <sup>2</sup>	0,97	0,87

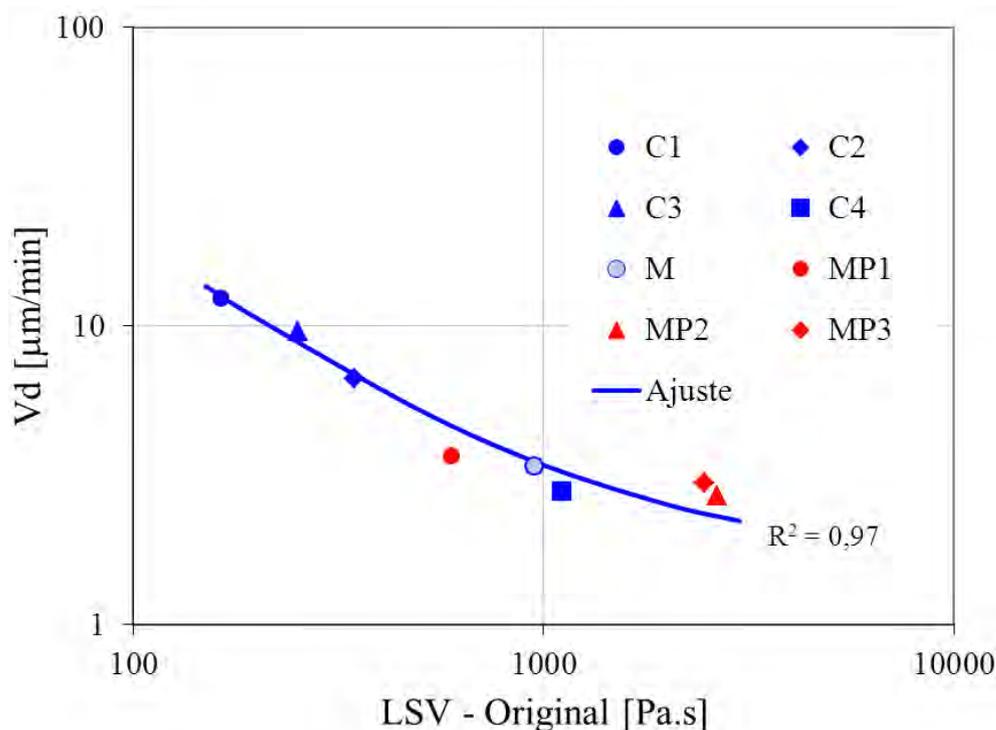


Figura 5.7. Relaciones Vd-LSV de los asfaltos en estado original.

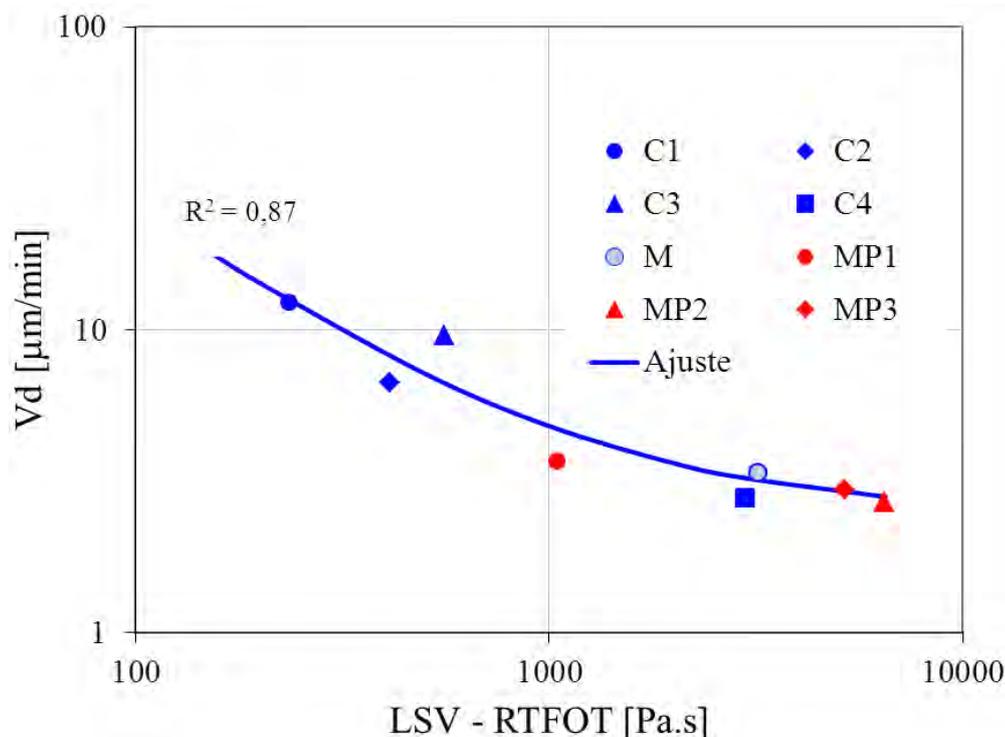


Figura 5.8. Relaciones Vd-LSV de los Asfaltos envejecidos en RTFOT.

Se observa en la figura 5.7 que a bajos valores de LSV (entre 100 y 1000 Pa.s) los cambios en los valores de Vd son importantes, de 12 hasta 3  $\mu\text{m}/\text{min}$  aproximadamente, mientras los ahuellamientos ya no presentan mayores diferencias para valores de LSV mayores a 1000 Pa.s. Este cambio de comportamiento se produce en un rango de valores de LSV donde el ligante empieza a controlar el proceso de deformaciones permanentes en la mezcla asfáltica evitando que las mismas se produzcan de manera excesiva lo que ocasionaría una pérdida de prestaciones del pavimento. Este aspecto se estudiará más profundamente en el siguiente capítulo en donde se involucrará un rango más amplio de temperaturas de ensayo tanto para la LSV de los asfaltos como en los ensayos de rueda cargada, así como el estudio en otras mezclas diferentes al tipo D-20.

#### 5.4. Conclusiones y comentarios al capítulo

Como principales conclusiones se observa que el parámetro  $G^*/\text{sen}\delta$  a la frecuencia de 10 rad/s no caracteriza eficientemente el aporte de todos los tipos de ligantes en lo que se refiere a la resistencia al Ahuellamiento de las mezclas asfálticas. La mayor carencia se da en el caso de los ligantes modificados con polímero SBS.

Se verifica que las medidas de  $G^*/\text{sen}\delta$  son afectadas por el proceso de envejecimiento en RTFOT en determinados asfaltos lo que constituye una nueva limitación para el uso de este parámetro.

Tampoco se observaron mejoras al considerar el  $G^*/\text{sen}\delta$  a la frecuencia de 0,6 rad/s en lo relativo a la caracterización de los ahuellamientos de las mezclas. Este hecho refuta lo mencionado en el capítulo 4, donde se analizaron los resultados a nivel de los ligantes únicamente y de donde surgía que el  $G^*/\text{sen}\delta$  a 0,6 rad/s parecería caracterizar mejor el aporte de los asfaltos en la resistencia al Ahuellamiento. Los resultados en este

capítulo indican que aún persiste el problema de caracterizar a los ligantes modificados con polímero SBS al igual que con el  $G^*/\sin\delta$  medido a la frecuencia de 10 rad/s.

Por el contrario se encontraron muy buenas relaciones entre los ahuellamientos de las mezclas en el ensayo de rueda cargada y los valores de LSV de los ligantes. De esto surge que esta propiedad reológica caracteriza apropiadamente la contribución del asfalto en la resistencia a las deformaciones permanentes en las mezclas asfálticas para todos los ligantes estudiados incluyendo a los ligantes modificados con polímero.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la LSV es la propiedad reológica más conveniente para caracterizar los ligantes asfálticos en lo referente a la resistencia frente al ahuellamiento de las mezclas.

Por tal motivo, en adelante en esta tesis se trabajará con esta propiedad para discutir la relación entre las mediciones en el equipo de rueda cargada y las características de los ligantes asfálticos considerando temperaturas y niveles de carga diferentes a los normalizados (60 °C y 520 N) como así también diferentes tipos de mezclas asfálticas. De este modo se procura una mayor generalización acerca de la estimación y diseño del concreto asfáltico en lo relativo a la problemática de las deformaciones permanentes y la resistencia al ahuellamiento en particular.