

Conclusiones

Esta tesis contribuye al conocimiento, estudio y caracterización de las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas para uso vial considerando las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos y el desempeño de las mezclas. Se estudió el desempeño al ahuellamiento de diferentes tipos de mezclas; densas, microaglomerados y Stone Mastic Asphalt (SMA); a través de métodos de laboratorio como el ensayo de rueda cargada a diferentes temperaturas y niveles de carga. Se emplearon en la elaboración de las mezclas diferentes tipos de ligantes asfálticos de uso comercial en Argentina que abarcan asfaltos convencionales, multigrados y modificados con polímero. Se estudiaron las propiedades reológicas de los asfaltos asociadas al comportamiento y desempeño de las mezclas asfálticas frente a las deformaciones permanentes definiendo cuál representa mejor la contribución de los asfaltos en la resistencia al ahuellamiento.

El estudio de los mecanismos y variables que inciden sobre las deformaciones permanentes dio lugar a resultados de aplicación específica en la selección del ligante en el diseño de mezclas teniendo en cuenta las condiciones climáticas y de carga a las que será expuesto el pavimento en base a las propiedades reológicas. En este capítulo se vuelcan las principales conclusiones así como algunas recomendaciones para estudios futuros sobre el tema.

Los estudios realizados con el equipo de rueda cargada resultaron significativos ya que brindaron mucha e importante información y este ensayo no es utilizado asiduamente por las personas que diseñan las mezclas asfálticas de los pavimentos de nuestro país como una herramienta durante el mismo.

7.1 Conclusiones de la tesis

Particularmente los estudios desarrollados dentro de esta tesis se dividieron en una primera etapa donde se analizaron diferentes propiedades reológicas relacionadas a la problemática de las deformaciones permanentes a nivel del ligante y una segunda etapa donde se relacionaron las anteriores con mediciones sobre mezclas asfálticas en el ensayo de rueda cargada.

Inicialmente se seleccionaron diferentes tipos de asfaltos convencionales y modificados representativos de los tipos de ligante más empleados. Como propiedades reológicas se midieron el parámetro G^*/ω de la metodología SHRP, la Zero Shear Viscosity (ZSV) y la Low Shear Viscosity (LSV).

El G^*/ω se midió a dos diferentes frecuencias, una de 10 rad/s (según norma ASTM D 6373 1999) y otra de 0,6 rad/s similar a la frecuencia de circulación de la rueda del ensayo de rueda cargada. Al nivel de ligante se observó que la menor frecuencia de carga permite una mejor clasificación de los asfaltos por medio del parámetro G^*/ω y que se manifiesta la recuperación visco-elástica retardada de los ligantes modificados con polímero SBS. Por su parte la frecuencia de 10 rad/s no permite una caracterización adecuada de los distintos tipos de ligantes.

La ZSV y la LSV son propiedades semejantes, evaluadas a partir de diferentes métodos. Parte de los propósitos de esta tesis era definir cuál era la metodología más confiable de medición dentro de estos métodos. De los resultados obtenidos surge claramente que el ensayo de barrido de frecuencias (LSV) es más práctico que el de creep con el que se obtiene la ZSV. Ambos métodos arrojaron valores comparables para los asfaltos estudiados pero el barrido de frecuencias conlleva menores tiempos de ensayo. Es todo lo que posiciona de mejor manera para la caracterización de los asfaltos. Tomando en consideración lo mencionado se recomienda a la LSV para la caracterización con fines de especificación.

Al comparar las propiedades reológicas se encontró una buena relación entre el G^*/ω (a 10 rad/s) y la LSV para los asfaltos convencionales e inclusive algunos ligantes modificados. Sin embargo el G^*/ω subestima a los asfaltos modificados con polímero SBS respecto a la LSV.

Al medir G^*/ω se observaron discrepancias en la caracterización entre el ligante en estado original y luego de envejecido en RTFOT en determinados asfaltos, en consecuencia la medición del G^*/ω se ve afectada por el proceso de envejecimiento.

Considerando la relación entre el G^*/ω (a 0,6 rad/s) y la LSV se encontró una buena relación para todos los asfaltos en estado original. Sin embargo cuando se analizaron los asfaltos envejecidos en RTFOT se da una sobreestimación de los ligantes modificados con polímero SBS por parte del parámetro G^*/ω .

A fin de observar cómo las propiedades reológicas seleccionadas, G^*/ω y LSV, caracterizaban la capacidad de resistir las deformaciones permanentes de los asfaltos estudiados, se midieron los desempeños de mezclas asfálticas densas utilizando el ensayo de rueda cargada bajo condiciones normalizadas (60 °C de temperatura y 520 N de carga). Se encontró que el G^*/ω a la frecuencia de 10 rad/s no caracteriza el aporte de todos los tipos de ligante en la resistencia al ahuellamiento. En especial para los ligantes modificados con polímero SBS. En este sentido se verifica para los ligantes empleados en nuestro país resultados similares a los obtenidos a nivel mundial.

Al analizar la relación entre los ahuellamientos en mezclas y el G^*/ω a la frecuencia de 0,6 rad/s se encontró que los desempeños de las mezclas asfálticas no fueron correctamente caracterizados por esta propiedad. 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.

Las relaciones entre los ahuellamientos y la LSV arrojaron muy buenos resultados. La LSV caracteriza apropiadamente la contribución de todos los ligantes estudiados para resistir las deformaciones permanentes en las mezclas, inclusive los ligantes modificados con polímero.

En síntesis se encontró que la propiedad reológica más conveniente para caracterizar los ligantes asfálticos en cuanto a su resistencia al ahuellamiento es la LSV. En los estudios subsiguientes se relacionó esta propiedad con las mediciones en el equipo de rueda cargada considerando temperaturas y niveles de carga diferentes a los normalizados (60 °C y 520 N) e incorporando diferentes tipos de mezclas.

Se estudió el desempeño de mezclas asfálticas para carpeta de rodamiento con tres tipos de asfalto para temperaturas de 50, 60, 70 y 80 °C en el ensayo de rueda cargada. Estos desempeños se compararon con mediciones de LSV de los ligantes a las mismas temperaturas, tomando la LSV de los asfaltos para el asfalto original y luego de envejecido.

Considerando el efecto de la temperatura se observó que la velocidad de ahuellamiento (V_d) depende del tipo de ligante utilizado en la mezcla y se produce como era de esperarse una merma en el desempeño a medida que aumenta la temperatura. Se encontró que la V_d se incrementa más rápidamente para las mezclas con asfalto convencional seguidas por las mezclas con asfaltos modificados, multigrado y con polímero SBS.

Las V_d medidas en el ensayo de pista de diferentes mezclas (densa, microaglomerado y SMA) se agrupan y siguen una única curva en función de la LSV de los asfaltos.

A partir de las curvas V_d vs LSV se encontró que para LSV de los asfaltos menores a 500 y 2000 Pa.s en estado original y envejecido respectivamente a las temperaturas de ensayo se produce un fuerte incremento de la velocidad de ahuellamiento (V_d). Para las mezclas estudiadas valores de LSV de 500 y 2000 Pa.s se recomiendan como límites en la contribución parcial del asfalto en la resistencia frente a las deformaciones permanentes de mezclas asfálticas.

Del párrafo anterior se desprende que la temperatura para la cual cada asfalto alcanza valores de LSV iguales a 500 y 2000 Pa.s para el estado original y envejecido representa la temperatura extrema (T_{alta}) hasta la cual el asfalto ofrece resistencia al ahuellamiento dentro de la mezcla asfáltica. La T_{alta} es una herramienta en el diseño de una mezcla para considerar las condiciones climáticas de la ubicación geográfica del pavimento.

Por todo lo dicho la LSV constituye una propiedad determinante para la caracterización de un asfalto.

Se observó que el envejecimiento en RTFOT de manera normalizada no reflejó el envejecimiento sufrido en la mezcla de uno de los asfaltos modificados con polímero SBS. Al considerar las medidas de LSV del ligante recuperado de la mezcla asfáltica se

encontró un envejecimiento similar al que se produjo en la elaboración al aumentar la temperatura de ensayo del RTFOT reproduciendo las condiciones de elaboración reales.

Uno de los propósitos de esta tesis era predecir las deformaciones permanentes a partir de las características del ligante utilizado, más concretamente sus propiedades reológicas, teniendo en consideración las condiciones de temperatura a las cuales será expuesto en el pavimento. En función de los resultados obtenidos fue posible ajustar a una única curva V_d vs LSV el desempeño de diferentes tipos de mezclas preparadas con diferentes cementos asfálticos. Esta curva constituye una herramienta para:

- predecir el comportamiento frente a deformaciones permanentes para diferentes condiciones de temperaturas del pavimento sólo conociendo la LSV del ligante a la temperatura considerada.
- optimizar la selección del asfalto tomando en cuenta el tipo de aplicación y las condiciones ambientales a las que estará expuesto en el pavimento.

La relación V_d vs LSV fue validada en estudios posteriores de desempeño; se encontró que es posible utilizar la curva sin grandes errores tomando como límite de predicción una $V_d = 8 \mu\text{m}/\text{min}$.

Tomando en consideración la relación V_d vs LSV y los valores LSV límites se propone un límite de desempeño para el ensayo de rueda cargada bajo condiciones normalizadas (60°C , 520 N y 120 min .) de $V_d = 5 \mu\text{m}/\text{min}$. Valores de V_d superiores a este límite obtenidos en cualquier ensayo denotan que el ligante no es el adecuado a utilizar a tan extremas temperaturas.

Otro de los objetivos fue el estudio del desempeño de diferentes mezclas a niveles de carga mayores al normalizado de 520 N en el ensayo de rueda cargada. Se evaluaron mezclas sometidas a 700 y 900 N , niveles de carga que representan los utilizados por los equipos de rueda cargada en la actual normativa europea (UNE 12697-22) y antigua normativa española (NLT 173).

Como era de esperarse aumentos en el nivel de carga produjeron incrementos de ahuellamientos en cualquiera de las mezclas estudiadas, el efecto del nivel de carga fue similar en distintos tipos de mezclas (densa, microaglomerado y SMA) elaboradas con un mismo ligante.

Sin embargo conforme el tipo de ligante asfáltico es diferente la respuesta frente a los incrementos de carga en lo que se refiere a la sensibilidad al ahuellamiento. El asfalto convencional tiene una sensibilidad importante mientras que en el ligante modificado con polímero SBS mostró una baja sensibilidad frente al aumento de la tensión de carga.

Se encontró que la mayor o menor sensibilidad que posee un ligante asfáltico y por tanto la mezcla con él elaborada dependen de la temperatura de ensayo y se relacionan con la temperatura de alta, definida a partir de la LSV correspondiente al asfalto.

Al relacionar los ahuellamientos a distintas temperaturas con los resultados obtenidos por incrementos en el nivel de carga, se encontró que los ahuellamientos generados por aumento de la carga de 520 a 700 N son equivalentes a los que provocaría un aumento de la temperatura cercano a 4°C a partir de los 60°C ; mientras que un aumento del nivel de carga a 900 N es equivalente a un aumento en la temperatura de 10 a 15°C .

Esta vinculación entre incrementos de cargas y sus equivalentes de temperatura, se puede utilizar como herramienta en el diseño de mezclas asfálticas para evitar deformaciones permanentes por efecto de mayores cargas. A partir de los estudios realizados se propone al seleccionar el asfalto contemplar:

1. Las sobrecargas en el pavimento a través de considerar una mayor T_{alta} del asfalto de entre 5 y 10 °C.
2. Los volúmenes de tránsito importantes aumentando en 5 o 10 °C la T_{alta} necesaria del asfalto.

Al analizar diferentes niveles de carga se calculó el factor de destrucción (r) para relacionarlos con la carga normalizada. Se encontró que las cargas de 700 y 900 N son tres y nueve veces más destructivas que la carga de 520 N siendo que sólo representan aumentos de carga de 35 y 73 % respectivamente respecto a la carga normalizada.

Finalmente se estudió el desempeño al ahuellamiento de mezclas asfáltica a diferentes temperaturas y cargas conjuntamente con características del ligante asfáltico (LSV) de manera de obtener una relación para predecir el comportamiento de una mezcla.

Se encontró un modelo que considera la sensibilidad a la variación de temperatura y carga de las mezclas estudiadas así como el comportamiento dependiendo del tipo de ligante a través de la LSV. Este modelo resulta práctico y a que sólo necesita una medición de la LSV a 60 °C para caracterizar al tipo de ligante siendo la relación con los desempeños inversamente proporcional.

7.2 Recomendaciones de estudios futuros

En esta tesis se definió un método efectivo para la seleccionar el tipo de asfalto capaz de resistir deformaciones permanentes en una mezcla. El mismo parte de conocer una propiedad reológica: la LSV. En este estudio la medición de la LSV se ha desarrollado en base a un DSR. Este equipo es muy costoso, al menos para Latinoamérica, por lo que sería interesante desarrollar estudios que relacionen la LSV de los asfaltos con medidas reológicas más sencillas. En este sentido considerando que los viscosímetros Brookfield están muy extendidos a nivel mundial, una relación LSV-viscosidad ofrecería un amplio espectro de utilización de los conceptos volcados en esta tesis.

Un aporte de esta tesis fue el límite propuesto de 500 Pa.s de LSV para la condición de los ligantes en estado original para caracterizar la resistencia de los asfaltos al ahuellamiento. Además se encontró el valor de 2000 Pa.s como límite para los ligantes envejecidos. Ambos valores son de importancia en la caracterización de un ligante dentro del diseño de mezclas asfálticas. Sería importante el desarrollo de una especificación en la cual se contemple la caracterización de los ligantes a partir de límites como el encontrado que se relacionan con propiedades reológicas del ligantes; además la misma se relaciona con el comportamiento al ahuellamiento en mezclas obtenido en el ensayo de rueda cargada.

En base a los resultados obtenidos en el equipo de rueda cargada se han propuesto límites para asegurar un buen desempeño. Sin embargo en Argentina aún no existen

normativas ni límites asociados y definidos para este ensayo. Sería interesante precisar las condiciones de ensayo y elaborar una normativa nacional.

Dentro de esta tesis se estudió el desempeño de mezclas asfálticas con la carga de la norma Europea (700 N) para las condiciones de tiempo de ensayo y velocidad de la rueda de la norma BS 598 (120 min. y 21 ciclos/min); no se analizaron los desempeños para 360 min y 26 ciclos/min de la CEN 12697-22. Resultaría interesante comparar los resultados de desempeño según ambas normativas.

Existen otras metodologías de ensayo basadas en propiedades reológicas de los asfaltos asociadas a la problemática de las deformaciones permanentes que no han sido estudiadas en esta tesis. Entre las que resultaría interesante abordar aparece el Multiple Stress Creep Recovery Test (MSCRT) que involucra, además de la temperatura a la que está expuesto el asfalto, variaciones en el nivel de tensión aplicado que se puede asociar a diferentes niveles de carga en una mezcla asfáltica.

A partir del estudio realizado para esta tesis surge que la especificación SHRP propone grados de desempeño para caracterizar los ligantes asfálticos, sin embargo el parámetro seleccionado para las deformaciones permanentes ($G^*/\sin\delta$) no representa el comportamiento de todos los asfaltos, salvo algunos cambios menores para tratar de caracterizar a los asfaltos modificados con polímero. Por su parte en Europa está normalizada la medición de la LSV pero no existen especificaciones de ligantes para caracterizar el desempeño de mezclas frente a las deformaciones permanentes a partir de esta propiedad ni se incluye como parámetro de diseño de mezclas asfálticas. En esta tesis se trata de cubrir las falencias que tienen ambas líneas de investigación potenciando los aspectos positivos que presentan con el objetivo de considerarlas dentro del diseño y evaluación del comportamiento de mezclas asfálticas.