

Estudio del comportamiento físico-reológico de asfalto convencional modificado con diferentes porcentajes de polvo de caucho reciclado

Fernando Melendres¹, Jahel S.Ledezma^{1,*}

¹Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

*sarvialedezma@fct.umss.edu.bo

Resumen

La presente investigación evalúa los parámetros reológicos y las características físicas de un cemento asfáltico modificado con diferentes porcentajes en masa de Polvo de Caucho Reciclado (PCR), en comparación con el cemento asfáltico sin modificar y un cemento asfáltico modificado industrialmente con Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) como referencia. Para ello, se llevaron a cabo un total de 150 ensayos de desempeño y 89 ensayos de caracterización física en los materiales, lo que permitió realizar un análisis exhaustivo del comportamiento del material, así como establecer relaciones significativas entre ellos. Los resultados obtenidos revelan que la adición de polvo de caucho reciclado mejora las características de desempeño a temperaturas altas de un cemento asfáltico convencional, sin embargo, se observó que a medida que se incrementa el porcentaje de PCR, la viscosidad aparente aumenta, lo cual puede generar problemas en el bombeo y la mezcla de los materiales. Asimismo, se identificó un valor óptimo de PCR del 9% en masa con respecto al ligante convencional, debido a consideraciones relacionadas con la manejabilidad. Además, se encontró una disminución en el valor-*m* a medida que se incrementa la adición de PCR, lo que podría tener un leve impacto negativo en el desempeño del pavimento a bajas temperaturas.

Finalmente, los resultados indican que la incorporación de polvo de caucho reciclado puede mejorar de manera significativa el desempeño de los cementos asfálticos convencionales, pero es importante tener en cuenta los posibles desafíos asociados con la viscosidad de los materiales al utilizar altos porcentajes de PCR.

Palabras clave: *Reología de cementos asfálticos, Desempeño de cementos asfálticos, Polvo de caucho reciclado.*

Abstract

The present investigation evaluates the rheological parameters and the physical characteristics of an asphalt cement modified with different mass percentages of Recycled Rubber Dust (PCR), in comparison with the unmodified asphalt cement and an asphalt cement industrially modified with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) for reference. For this, a total of 150 performance tests and 89 physical characterization tests were carried out on the materials, which allowed an exhaustive analysis of the behavior of the material, as well as establishing significant relationships between them. The results obtained reveal that the addition of recycled rubber powder improves the performance characteristics at high temperatures of a conventional asphalt cement, however, it was observed that as the PCR percentage increases, the apparent viscosity increases, which can create problems in pumping and mixing materials. Also, an optimal PCR value of 9% by mass with respect to the conventional binder was identified, due to workability considerations. In addition, a decrease in the *m*-value was found as PCR addition increases, which could have a slight negative impact on pavement performance at low temperatures.

Finally, the results indicate that the incorporation of recycled rubber dust can significantly improve the performance of conventional asphalt cements, but it is important to take into account the possible challenges associated with the viscosity of the materials when using high percentages of PCR.

Key words: *Asphalt cement rheology, Asphalt cement performance, Recycled rubber dust.*

1. Introducción

El aumento masivo en la densidad de tráfico en todo el mundo en las últimas décadas ha llevado a un aumento en las fallas prematuras del pavimento. La deformación permanente a temperaturas elevadas, la fractura por fatiga a niveles de temperatura intermedios y la degradación térmica a temperaturas relativamente bajas son los tres tipos más comunes de falla del pavimento. Las fallas tempranas de ahuellamiento en pavimentos son una de las más serias patologías del pavimento, originadas debido a altas temperaturas ambientales y cargas de ejes no controladas; las razones principales de los agrietamientos en el pavimento flexible son el endurecimiento y la fragilidad del cemento asfáltico debido al envejecimiento en la vida útil del pavimento.

Simultáneamente, la abundancia de desechos generados es motivo de preocupación a nivel mundial por el efecto de estos en el cambio climático, generando tendencia hacia el uso de productos 'verdes'. Según WBCSD & The Tire Industry Project (2019) se estima que cada año se producen en todo el mundo mil millones de Neumáticos al Final de su Vida Útil (NFVU).

Según Bahia (1994), la adición de caucho molido resulta generalmente en el incremento del módulo complejo del ligante y en una reducción del ángulo de fase, particularmente a elevadas temperaturas, proporcionando un efecto favorable a la resistencia al ahuellamiento.

Mashaan (2012), estudió los efectos a envejecimiento a corto y largo plazo de ligantes modificados con caucho reciclado. Encontró que el ligante modificado presentaba un decremento en la penetración y un incremento en la viscosidad y el punto de ablandamiento.

En la búsqueda de un mejor desempeño de los recubrimientos asfálticos y métodos para reutilizar estos residuos como material reciclado, los cementos asfálticos modificados con elastómeros son una opción viable. Debido a su contenido de antioxidantes, los neumáticos se pueden utilizar para mejorar la durabilidad del pavimento asfáltico. El método de modificación de un cemento asfáltico se realiza mediante la adición de un modificador de caucho molido denominado Polvo de Caucho Reciclado (PCR). El PCR se utiliza como modificador para

aumentar la elasticidad, flexibilidad y durabilidad del asfalto frente al envejecimiento.

Esta investigación examina los parámetros reológicos de los cementos asfálticos modificados con PCR, como ser el ángulo de fase δ , el módulo de corte complejo ($|G^*|$), el criterio de ahuellamiento ($|G^*|/\sin\delta$), el criterio de fatiga ($|G^*|\sin\delta$), la rigidez a la fluencia por flexión $Sm(t)$ y el valor m .

2. Materiales y métodos

2.1 Composición granulométrica del polvo de caucho reciclado

El polvo de caucho reciclado provino de la planta trituradora de caucho, el tamaño máximo nominal del material corresponde al tamiz N°16.

2.2 Modificación del cemento asfáltico convencional con distintos porcentajes en masa de polvo de caucho reciclado del ligante asfáltico

La incorporación del caucho reciclado se desarrolló por vía húmeda. La modificación se realizó en un homogeneizador de ligante bajo condiciones controladas. La adición del PCR se realizó como un porcentaje en masa de este ligante. De acuerdo con los antecedentes internacionales, se comienza con la adición de un valor máximo del 21% de PCR y con el fin de realizar un estudio completo de la incidencia del PCR en el comportamiento reológico se decrece este porcentaje hasta que el material resultante presente valores típicos de viscosidad. De esta forma, los porcentajes de adición de PCR empleados fueron del 9%, 12%, 15%, 18% y 21%. La homogeneización de los materiales se realizó a 180 °C, a 1700 rpm durante 1 h.

2.3 Caracterización física de los cementos asfálticos

Se llevó a cabo la caracterización física de los cementos asfálticos modificados con polvo de caucho (CAM PCR) en comparación con el ligante sin modificar (CA) y un ligante asfáltico modificado con estireno-butadieno-estireno (CAM SBS). Estos dos últimos ligantes se utilizaron como referencia para el estudio de las propiedades reológicas de los materiales. Los ensayos realizados para determinar las características físicas de los cementos asfálticos utilizados se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1
Caracterización física de los cementos asfálticos

Ensayo	Estándar	CA 60/70	CAM 9% PCR	CAM 12% PCR	CAM 15% PCR	CAM 18% PCR	CAM 21% PCR	CAM SBS
Penetración	ASTM D5 (2020)	1	1	1	1	1	1	1
Viscosidad	ASTM D4402 (2015)	1	3	3	3	3	3	1
Punto de ablandamiento	ASTM D36 (2014)	1	3	3	3	3	3	1
Punto de inflamación	ASTM D92 (2018)	1	3	3	3	3	3	1
Gravedad específica	ASTM D70 (2021)	1	3	3	3	3	3	1
Ductilidad	ASTM D113 (2017)	1	1	1	1	1	1	1
Recuperación elástica	ASTM D6084 (2018)	1	1	1	1	1	1	1
Número de resultados de ensayos		7	15	15	15	15	15	7
Total		89						

Fuente: Autores

2.4 Caracterización reológica de los cementos asfálticos

Se llevaron a cabo pruebas para determinar las propiedades reológicas de los materiales en su estado original, así como en su estado envejecido a corto y largo plazo de los cementos asfálticos investigados. Los ensayos utilizados para determinar las características reológicas de los cementos asfálticos se describen en la Tabla 2.

2.5 Evaluación de los cementos asfálticos estudiados

Se realizaron un total de 150 ensayos de desempeño y 89 ensayos de caracterización física en los materiales. A pesar de que el procedimiento fue diverso, extenso y repetitivo, los resultados obtenidos permitieron

realizar un análisis detallado del comportamiento de cada material, así como establecer relaciones existentes entre ellos. Los resultados procesados y los análisis comparativos en forma gráfica se presentan en la siguiente sección.

3. Resultados

3.1 Modificación del cemento asfáltico convencional con distintos porcentajes en masa de polvo de caucho reciclado del ligante asfáltico

La adición del PCR se realizó como un porcentaje en masa del Cemento Asfáltico (CA), a través del proceso de incorporación por vía húmeda. A continuación, la Tabla 2 detalla las cantidades utilizadas en la producción de Cemento Asfáltico Modificado (CAM).

Tabla 2
Modificación del cemento asfáltico convencional con distintos porcentajes en masa de polvo de caucho reciclado del ligante asfáltico

Identificación	CAC 60/70, g	PCR, g	Descripción
CAM 9% de PCR	2388,0	214,9	CA 60/70 + 9% de PCR
CAM 12% de PCR	2385,0	286,2	CA 60/70 + 12% de PCR
CAM 15% de PCR	2390,0	358,5	CA 60/70 + 15% de PCR
CAM 18% de PCR	2380,0	428,4	CA 60/70 + 18% de PCR
CAM 21% de PCR	2384,0	500,6	CA 60/70 21% de PCR

Fuente: Autores

3.2 Caracterización física de los cementos asfálticos

Los valores registrados en este apartado son el resultado de la media aritmética de los ensayos realizados para cada muestra de material. Los ensayos de laboratorio se realizaron sobre los materiales en estado original.

De acuerdo con la Figura 1 se evidencia un incremento en la consistencia del ligante asfáltico convencional con la adición de PCR, el cemento asfáltico modificado con SBS presenta un valor similar al del ligante asfáltico convencional, mas no está relacionado directamente con este.

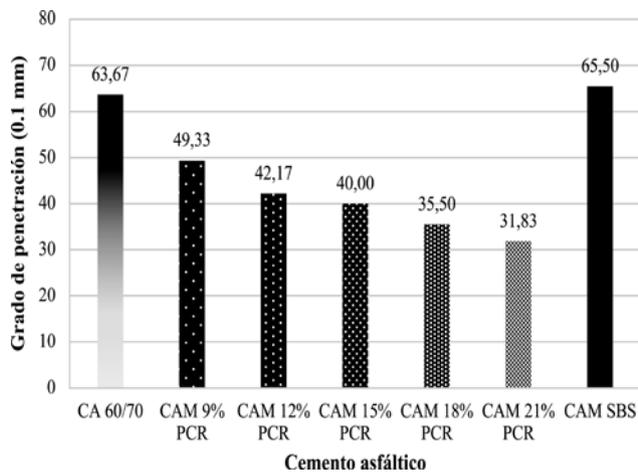


Figura 1. Resultados de las pruebas estándar de penetración en los cementos asfálticos.

La Figura 2 muestra un incremento en la viscosidad del ligante asfáltico convencional de acuerdo con el incremento de PCR, el cemento asfáltico modificado con SBS presenta un valor cercano al cemento asfáltico modificado con 9% de PCR. De acuerdo con

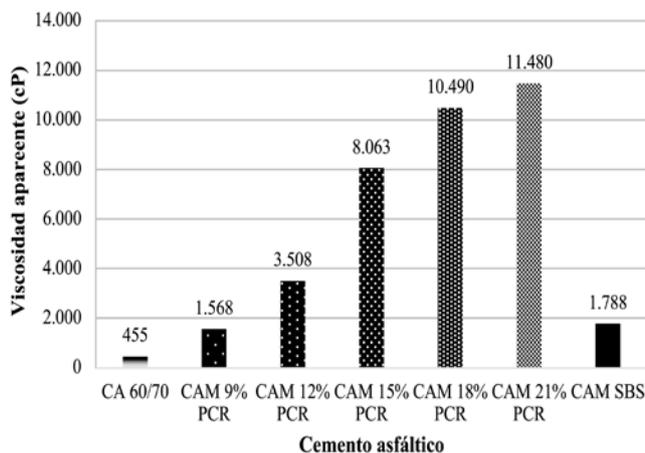


Figura 2. Resultados de las pruebas estándar de viscosidad en un viscosímetro rotacional de los cementos asfálticos.

los criterios de temperaturas de bombeo y mezclado establecidos en la clasificación por desempeño de ligantes asfálticos ASTM D6373-21^a, se recomienda que la viscosidad máxima sea 3000 cP, motivo por el cual ligantes modificados con PCR a partir del 12% en masa no serían recomendados.

La Figura 3 muestra un incremento en el punto de ablandamiento del ligante convencional de acuerdo con la adición de PCR que se realiza.

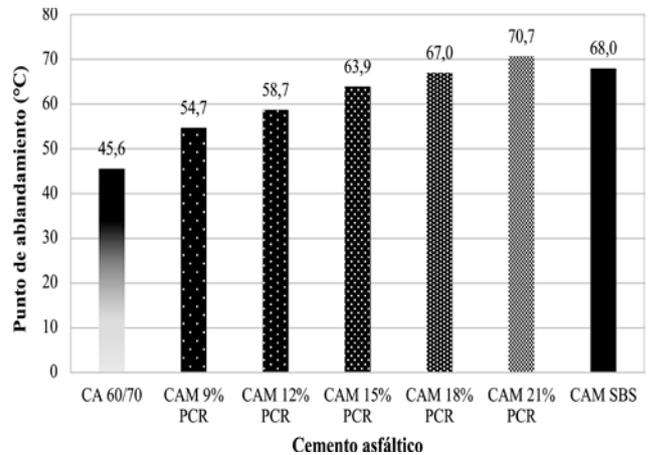


Figura 3. Resultados de las pruebas estándar del punto de ablandamiento de los cementos asfálticos.

La Figura 4 presenta los puntos de inflamación de los ligantes respectivamente, a pesar de que se presentan diferencias en los resultados del material, no se evidencia una tendencia clara en los cementos asfálticos modificados con PCR. Todos los materiales cumplen con el criterio de seguridad mencionado en la clasificación por desempeño de ligantes asfálticos ASTM D6373-21^a donde se establece un valor mínimo de punto de inflamación de 230°C.

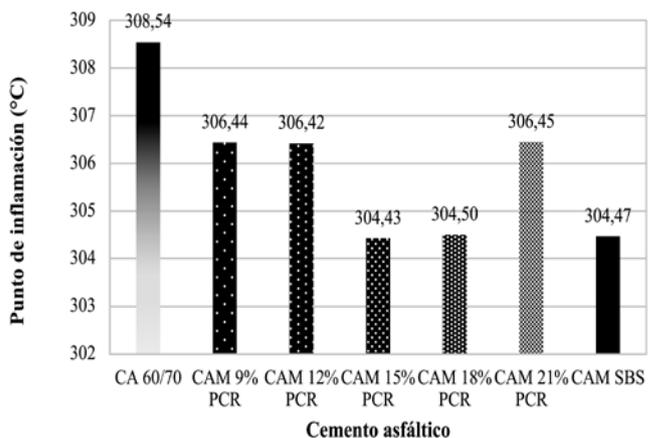


Figura 4. Resultados de las pruebas estándar del punto de inflamación de los cementos asfálticos.

La Figura 5 muestra la gravedad específica registrada para cada material estudiado, este valor se ve incrementado con la presencia de PCR en el cemento asfáltico convencional. El cemento asfáltico modificado con SBS presenta la densidad más baja de las muestras.

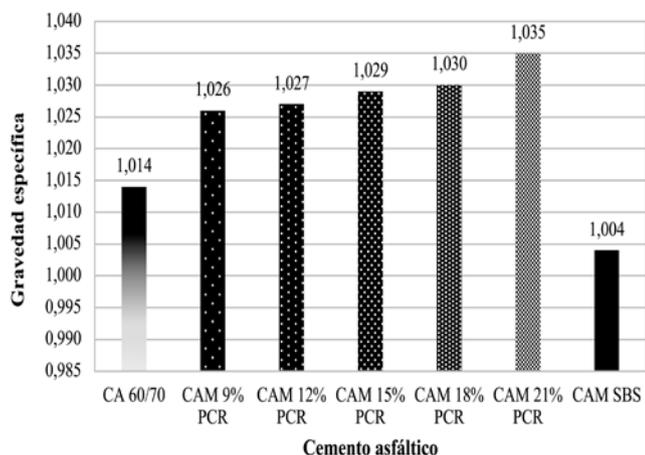


Figura 5. Resultados de las pruebas estándar de gravedad específica por el método del picnómetro de los cementos asfálticos.

La Figura 6 muestra el decremento de la ductilidad del asfalto convencional modificado con PCR según la adición de este. La ductilidad se ve reducida en un valor cercano al 90% con la adición del primer porcentaje de PCR, y mantiene una tendencia de disminución.

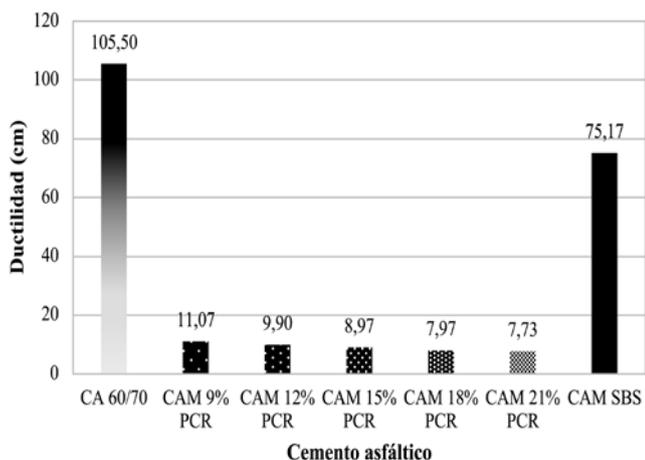


Figura 6. Resultados de las pruebas estándar de ductilidad de los cementos asfálticos.

La Figura 7 evidencia incrementos notables en las características elásticas del cemento asfáltico convencional debido a la adición de PCR.

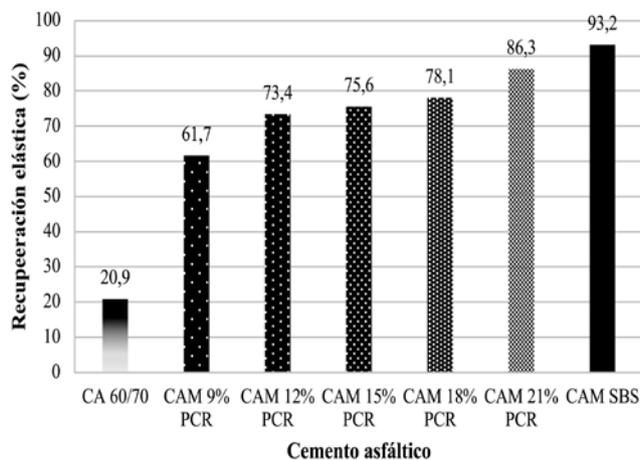


Figura 7. Resultados de las pruebas estándar de recuperación elástica de los cementos asfálticos.

3.3 Caracterización reológica de los cementos asfálticos

La caracterización reológica de los cementos asfálticos en estudio fue desarrollada en estado original, envejecido a corto y largo plazo.

3.4 Propiedades reológicas del material en estado original

La Figura 8 muestra el incremento del módulo complejo de corte con la adición de PCR.

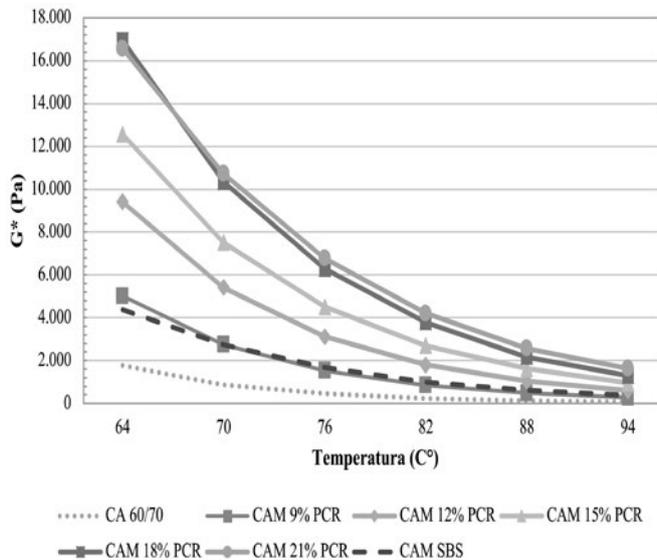


Figura 8. Módulo complejo de corte de los cementos asfálticos estudiados en estado original

Conforme se observa en la Figura 9, se evidencia un incremento en la resistencia a la sensibilidad del ligante ($|G^*|/\sin\delta > 1000$ Pa, obtenida en el reómetro

de corte dinámico, este valor incrementa notablemente a temperaturas elevadas, lo que favorece a la construcción.

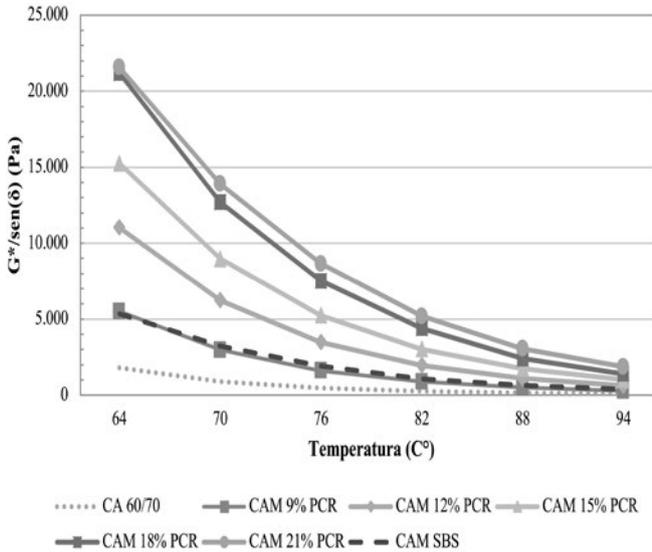


Figura 9. Criterio de sensibilidad de los cementos asfálticos estudiados.

3.5 Propiedades reológicas del material envejecido a corto plazo

La Figura 10 muestra el incremento del módulo complejo de corte con la adición de PCR.

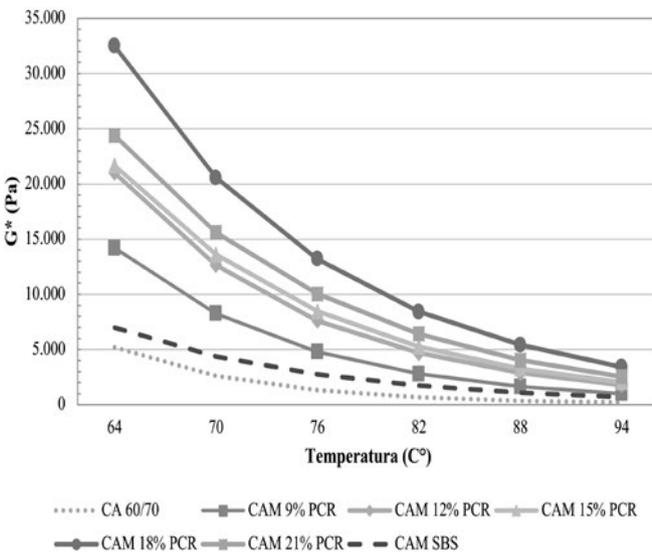


Figura 10. Módulo complejo de corte de los cementos asfálticos estudiados en estado envejecido a corto plazo.

La Figura 11 evidencia un incremento del criterio de rigidez frente al ahuellamiento ($|G^*|/\sin\delta > 2200$ Pa, obtenida en el reómetro de corte dinámico, este valor

incrementa notablemente a temperaturas elevadas, lo que favorece el desempeño.

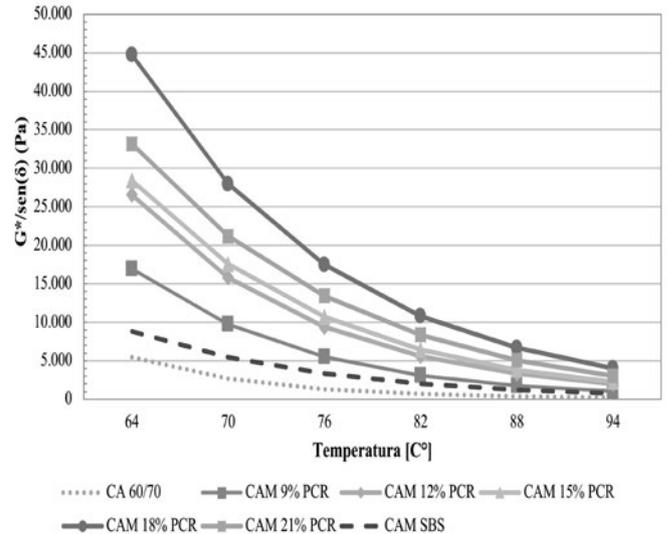


Figura 11. Criterio de resistencia al ahuellamiento de los cementos asfálticos estudiados.

3.6 Propiedades reológicas del material envejecido a largo plazo

La figura 12 muestra un decremento del módulo complejo de corte con la adición de PCR. Sin embargo, no se aprecia una tendencia clara, esto se debe aparentemente por la incidencia de las partículas presentes en la muestra, al ser la muestra en tamaño similar a una gota, una ligera variación en las partículas de PCR puede ocasionar una dispersión notable.

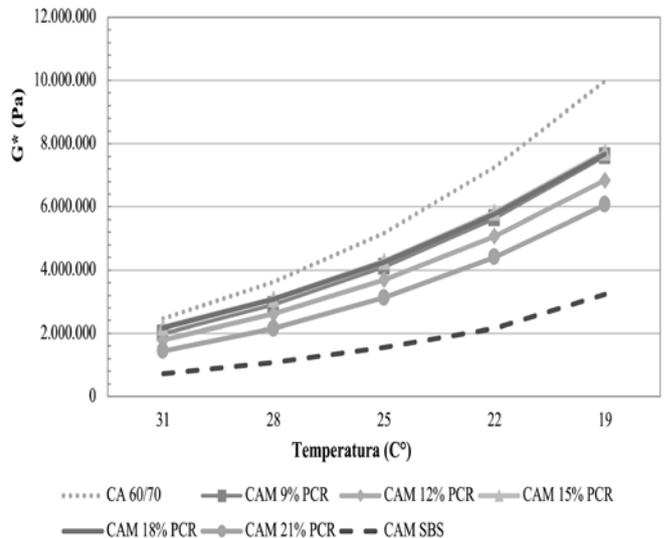


Figura 12. Módulo complejo de corte de los cementos asfálticos estudiados en estado envejecido a largo plazo.

La Figura 13 evidencia una mejora en el criterio de resistencia a la fatiga ($|G^*| \sin \delta$) < 5000000 Pa debido a la adición de PCR. Sin embargo, no se presenta una tendencia clara de mejora entre los distintos porcentajes de PCR debido al tamaño pequeño de las muestras y la dispersión de las mismas partículas de PCR en estas.

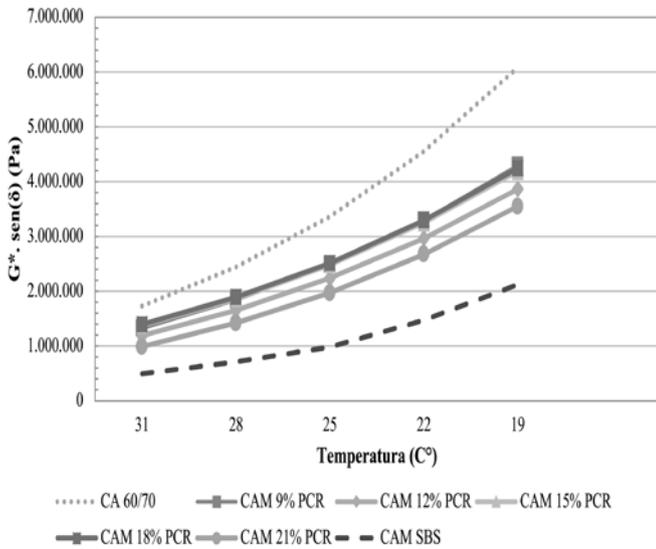


Figura 13. Criterio de resistencia a la fatiga de los cementos asfálticos estudiados.

La Figura 14 muestra que a medida que se adiciona PCR al ligante convencional, este presenta una ligera disminución de la rigidez a la fluencia del ligante, hecho que se repite a las diferentes temperaturas evaluadas de -6, -12 y -18 °C, respectivamente.

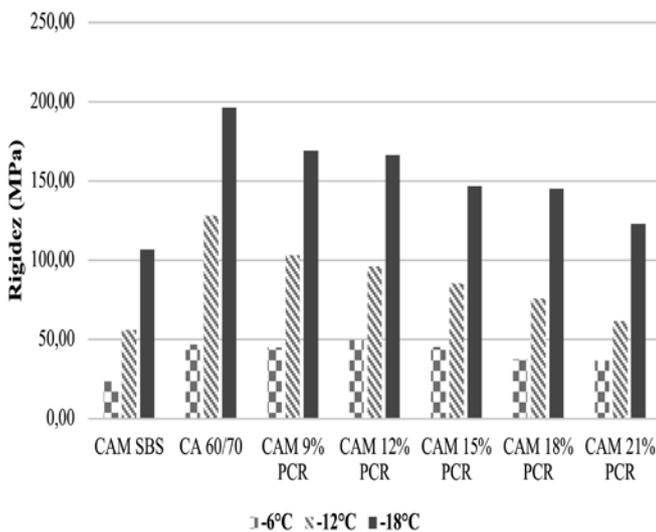


Figura 14. Rigidez a la fluencia de los cementos asfálticos estudiados a distintas temperaturas.

La Figura 15 señala un decremento en el valor-m a medida que se incrementa la adición de PCR para una temperatura de -6, -12 y -18 °C, respectivamente. El valor-m indica la resistencia al flujo de la muestra de asfalto a bajas temperaturas. Un valor-m más bajo indica una mayor susceptibilidad al flujo.

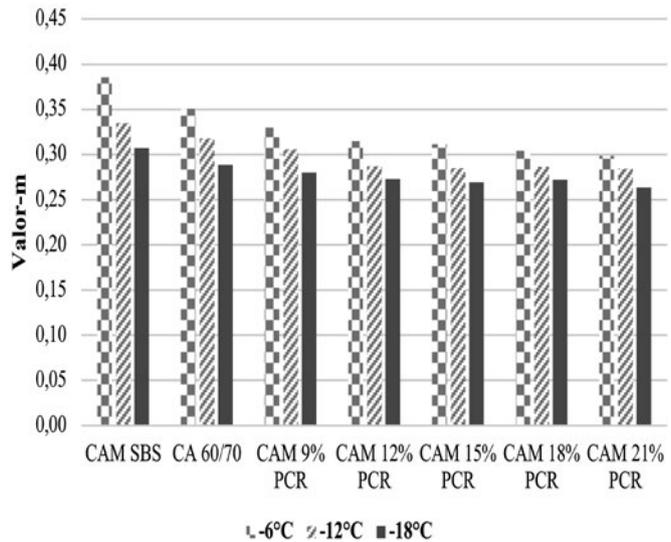


Figura 15. Valor-m de los cementos asfálticos estudiados a distintas temperaturas.

4. Conclusiones

La adición de PCR mejora significativamente las características de desempeño a altas temperaturas de un cemento asfáltico convencional.

Aunque no se presenta una tendencia clara en la mejora de los ligantes asfálticos modificados con PCR respecto al criterio de fatiga, todos los resultados muestran una mejora en comparación con el ligante convencional, lo cual contribuiría al desempeño del pavimento asfáltico.

A medida que se aumenta el porcentaje de PCR, se incrementa la viscosidad aparente, lo cual puede ocasionar problemas en el bombeo y en la mezcla de los materiales. En este estudio, se determinó que el valor óptimo de PCR, teniendo en cuenta el bombeo y la manejabilidad, es del 9% en masa con respecto al ligante convencional.

Además, se observa una disminución en el valor-m a medida que se aumenta la adición de PCR, lo cual puede resultar en una ligera reducción en el rendimiento del pavimento a bajas temperaturas.

5. Recomendaciones

Se recomienda continuar la investigación en el desempeño de mezclas asfálticas preparadas a partir de cementos asfálticos modificados con PCR.

Agradecimientos

Agradecimiento especial al Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos y a la fundación SWISSCONTACT por brindar los medios necesarios por los cuales fue posible ejecutar esta investigación.

6. Referencias bibliográficas

- ASTM D113. (2017). *Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials*. American Society for Testing and Materials. USA
- ASTM D36. (2014). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM D4402. (2015). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM D5. (2020). *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM D6084. (2018). *Standard Test Method for Elastic Recovery of Asphalt Materials by Durometer*. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM D6373. (2021). *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D70. (2021). *Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method)*. American Society for Testing and Materials. USA.
- ASTM D92. (2018). *Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. American Society for Testing and Materials. USA.
- Bahia. H. (1994). *Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance related properties of asphalt binders*. Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT). USA
- Mashaan, N., Rehan K., Abdelaziz, M. (2012). *An overview of crumb rubber modified asphalt*. International Journal of the Physical Sciences Vol. 7(2), pp. 166 – 170.
- WBCSD, T. (2019). *Global ELT Management-A global state of knowledge on regulation, management systems, impacts of recovery and technologies*. World Business Council For Sustainable Development.