

Evaluación reológica del asfalto modificado con grano de caucho reciclado por vía húmeda respecto a su desempeño a temperaturas altas

Jahel S. Ledezma

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

sarvialedezma@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

Desde el año 2019, a través del proyecto “Mercados para el reciclaje” se trabaja de forma conjunta con la fundación SWISSCONTACT para investigar las opciones de incorporación de grano de caucho reciclado en pavimentos flexibles, buscando la reducción de este tipo de residuos a través de la aplicación de un modelo de economía circular en el mercado Cochabambino. De esta forma, la primera fase atendió la adición grano de caucho por vía seca en la elaboración de mezclas asfálticas y la segunda fase, busca la modificación del cemento asfáltico con grano de caucho por vía húmeda. Para esto, la presente investigación evaluó la incorporación de seis diferentes contenidos de grano de caucho reciclado 9, 12, 15, 18 y 21% en un asfalto convencional 60/70. El proceso fue realizado en un mezclador de alto cizallamiento a una temperatura de 180°C, velocidad de 700 rpm y tiempo de mezclado de 90 minutos. Posteriormente, se evaluó las propiedades reológicas de los asfaltos modificados en seis rangos de temperatura y se comparó con la respuesta del asfalto base y un asfalto SBS de modificación industrial. Los resultados muestran que la adición de caucho en el asfalto base, mejora la respuesta de los parámetros de viscosidad, $G^*/\sin\delta$, módulo complejo G^* y ángulo de fase δ , mejorando el desempeño a altas temperaturas del cemento asfáltico base. Comparando con el asfalto industrial SBS, se observa que el porcentaje de adición de 9% de GCR presenta características similares en su estado original, pero en estado envejecido a corto plazo aumenta su rigidez.

Palabras clave: *Grano de caucho reciclado, Asfalto modificado, Reología de ligantes.*

Abstract

Since 2019, through the “Markets for recycling” project, we have been working together with the SWISSCONTACT foundation to investigate the options for incorporating recycled rubber grain into flexible pavements, seeking to reduce this type of waste through the application of a circular economy model in the Cochabamba market. In this way, the first phase attended the improvement of rubber grain by dry way in the preparation of asphalt mixtures and the second phase, seeks the modification of asphalt cement with rubber grain by wet way. For this, the present investigation evaluated the incorporation of six different recycled rubber grain contents 9, 12, 15, 18 and 21% in a conventional 60/70 asphalt. The process was carried out in a high shear mixer at a temperature of 180°C, speed of 700 rpm and mixing time of 90 minutes. Subsequently, the rheological properties of the modified asphalts were evaluated in six temperature ranges and compared with the response of the base asphalt and an industrial modified SBS asphalt. The results show that the addition of rubber in the base asphalt improves the response of the parameters of viscosity, $G^*/\sin\delta$, complex modulus G^* and phase angle δ , improving the performance at high temperatures of the base asphalt cement. Comparing with the SBS industrial asphalt, it is observed that the percentage of increase of 9% of GCR presents similar characteristics in its original state, but in the short-term aged state its stiffness increases.

Key words: *Recycled rubber grain, Modified asphalt, Binder rheology.*

1. Introducción

Según los datos de Smithers (2022), se estima que para finales del año 2022 el mercado mundial de llantas alcanzará más de los 2700 millones de unidades. Considerando que estas cifras continuarán en aumento debido a la evolución inherente del

transporte terrestre, es necesario indagar en métodos que reutilicen los futuros residuos de este mercado. En este sentido, en el área de ingeniería civil, es posible emplear este residuo en forma de grano de caucho reciclado (GCR) como modificador en cementos asfálticos (Daryoush, 2015). Diversas investigaciones

demonstraron los beneficios de la incorporación de caucho en el desempeño del cemento asfáltico, tal como el aumento del módulo del ligante, lo que otorga mayor rigidez a la mezcla asfáltica y se traduce en el aumento de la resistencia de este material a la formación de roderas, disminuyendo los costos de mantenimiento futuro (NDOT, 2016).

El asfalto modificado con caucho presenta mejoras en el grado de desempeño del cemento asfáltico convencional, especialmente en el rango superior de temperaturas (Rodezno y Kaloush, 2011), ya que el caucho aumenta la elasticidad, flexibilidad y durabilidad del asfalto frente a procesos de envejecimiento. Respecto a los parámetros reológicos (Cong *et al*, 2012), menciona que el asfalto modificado con caucho incrementa los parámetros de viscosidad y módulo complejo (G^*), del mismo modo que disminuye el ángulo de fase (δ) asociado con la respuesta elástica del material.

Respecto al contenido óptimo de caucho a incrementar en el asfalto virgen Mehdi *et al* (2019), menciona que muestras que presentan un contenido de caucho

entre 5 a 12% modifican el grado de desempeño del cemento asfáltico virgen en al menos un intervalo de temperatura, dependiendo del grado de desempeño inicial que este presente.

2. Materiales y métodos

A continuación, se describe los materiales usados en el estudio, así como las pruebas realizadas en laboratorio.

2.1 Materiales

2.1.1 Cemento asfáltico

Considerando la aplicación local de los resultados de la presente investigación y dado que el cemento asfáltico es un material importado, se optó por emplear el asfalto de mayor preferencia de las plantas municipales en Cochabamba, de esta forma, se trabajó con un cemento asfáltico convencional de procedencia peruana con clasificación por penetración 60/70 o mediante la evaluación de su grado de desempeño PG 64-28. Los resultados obtenidos en la caracterización del cemento asfáltico base se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Resultados de la caracterización del cemento asfáltico 60/70

Ensayo	Unidad	Norma	Requerimiento	Resultado
Penetración (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	ASTM D5	Min. 60	60.67
Peso específico (25°C)	-	ASTM D70	-	1.052
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	cm	ASTM D113	Min. 100	107
Recuperación elástica (20cm, 25°C)	%	ASTM D6084	-	5.9
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36	-	45.8
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	Min. 232	312.6

Fuente: Rios, 2022

2.1.2 Grano de caucho reciclado

El grano de caucho reciclado utilizado proviene de una empresa de triturado de caucho ubicado en la ciudad de Cochabamba, donde emplean un proceso de trituración por corte mecánico para la obtención del GCR. En consecuencia, este tipo de proceso

otorga al grano de caucho una superficie más rugosa (NDOT, 2016). Las propiedades del grano de caucho reciclado se presentan en la Tabla 2, conforme la norma ASTM D5603 (ASTM, 2019) y la composición granulométrica se detalla en la Tabla 3, de acuerdo a la ASTM C136 (ASTM, 2015).

Tabla 2

Resultados de los ensayos de caracterización del GCR

Ensayo	Unidades	Norma	Requerimiento	Resultado
Contenido de humedad	%	UNE103-300	0.75	0.73
Densidad aparente	g/cm ³	-	-	0.418
Contenido de acero	%	UNE 14243	0.01	0.26

Fuente: Rios, 2022

Tabla 3

Granulometría del GCR

Tamiz N°	N° 16	N° 30	N° 50	N° 100	N° 200
Diámetro (mm)	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
Granulometría del GCR	100.00	89.54	29.76	5.48	0.45

Fuente: Rios, 2022

2.2 Metodología

Para la obtención del asfalto modificado con caucho se procedió a incorporar diferentes porcentajes de GCR al asfalto convencional 60/70, empleando una temperatura, velocidad y tiempo de mezclado recomendados en la revisión literaria. Basado en la evaluación del grado de desempeño de ligantes, descrito en la norma ASTM D6373 (ASTM, 2021), se procedió a evaluar las características reológicas del asfalto resultante en el reómetro de corte dinámico y el viscosímetro rotacional. Dado que se busca evaluar el desempeño del cemento asfáltico modificado con caucho a altas temperaturas, la evaluación reológica se realizó en los estados original y envejecido a corto plazo, aplicándose para este último, el envejecimiento del ligante en el horno de película delgada rotacional (RTFO).

Tómese en cuenta que, para evaluar las características del proceso de modificación del asfalto con el caucho, los resultados obtenidos fueron comparados con el asfalto convencional original 60/70 y con otro asfalto modificado industrialmente con SBS (*Styrene Butadiene Styrene*) de origen ruso y clasificación por grado de desempeño PG 76-28.

2.2.1 Preparación del asfalto modificado con caucho por vía húmeda

Para la modificación del cemento asfáltico 60/70 con caucho, se emplearon los porcentajes de 9, 12, 15, 18 y 21% de GCR en relación al peso del ligante (Peiliang C, 2013; Daryoush Y, 2015; Xiaorui Z, 2021). El procedimiento de modificación fue realizado en un mezclador de laboratorio de alto cizallamiento construido por el Programa de Investigación en Tecnología Aplicada (PITA) perteneciente al departamento de Ingeniería Mecánica de la UMSS. El mezclador cuenta con una cuba térmica para el control de temperatura y un sistema de velocidad controlada para el ajuste de revoluciones, en el cual es posible modificar aproximadamente 2500 gramos de cemento asfáltico. Con el fin de conseguir una integración homogénea del GCR dentro la matriz asfáltica, se adoptaron los siguientes parámetros: temperatura de modificación de 180°C, velocidad de cizallamiento

de 700 rpm y un período de compatibilización de 90 minutos después del mezclado visual del GCR y el ligante asfáltico (Cong, 2013).

Cabe señalar que, inmediatamente finalizado el proceso de mezclado, se procedió con los ensayos en el reómetro de corte dinámico y viscosímetro rotacional. En caso de que el ligante fuera almacenado para ser ensayado en una fecha posterior, este se calentaba y se se agitaba vigorosamente antes de iniciar las pruebas.

2.3 Ensayos de desempeño del cemento modificado con caucho

2.3.1 Viscosímetro rotacional

El ensayo de viscosidad rotacional fue llevado a cabo en el viscosímetro Brookfield, a una temperatura de 135°C de acuerdo a la normativa ASTM D6373 (ASTM, 2021). La viscosidad está relacionada con los procesos de mezclado y compactado, en este sentido, se limita el valor máximo de viscosidad a 3(Pa*s). para obtener un adecuado recubrimiento del agregado, así como para fines de bombeo del ligante en planta.

2.3.2 Reómetro de corte dinámico

Las propiedades reológicas del cemento asfáltico modificado con caucho, en su estado original y envejecido a corto plazo, se midieron empleando el reómetro de corte dinámico (DSR) en condiciones de esfuerzo controlado. Para esto, se ensayaron pequeñas muestras de cemento asfáltico modificado con caucho, en sus diferentes porcentajes de adición, entre placas paralelas de 25mm de diámetro separadas a 1mm de distancia, frecuencia fija de 10rad/s, y barridos de temperatura en intervalos de 6°C, conforme la norma ASTM D6373 (ASTM, 2021). Como resultado del proceso descrito, se determinaron las siguientes propiedades viscoelásticas del asfalto: módulo complejo (G^*), ángulo de fase (δ) y la relación $G^*/\text{sen}\delta$, siendo este último la relación entre el esfuerzo cortante máximo y la deformación máxima que proporciona la medida de resistencia total a la deformación permanente del cemento asfáltico ensayado. Para cada muestra evaluada, tres especímenes fueron ensayados

y el promedio de los resultados fueron usados en el análisis de los resultados.

2.3.3 Ensayos de desempeño a altas temperaturas del cemento asfáltico

La evaluación de desempeño a altas temperaturas se realizó de acuerdo al método Superpave mediante la clasificación por grado de desempeño (PG) de ligantes, el mismo que considera el rango de temperaturas altas de diseño en el cual el cemento asfáltico presentará un adecuado comportamiento en campo. Para esto, se realizó la evaluación de las propiedades reológicas medidas en el ensayo DSR, para los seis rangos de temperatura definidos (64, 70, 76, 85, 88 y 94°C) en el estado original y envejecido a corto plazo de las muestras evaluadas.

3. Resultados

3.1 Viscosidad rotacional

Los resultados de viscosidad rotacional del cemento asfáltico convencional 60/70, asfalto modificado con diferentes porcentajes de caucho y el asfalto modificado con polímero SBS se presentan en la Figura 1. En el mismo se advierte que la viscosidad aumenta con el incremento de caucho incorporado en el cemento asfáltico base. El mayor incremento de viscosidad se observa para porcentajes de 15, 18 y 21% que presentan un incremento de 1.21 a 2.27 veces la viscosidad del cemento modificado con 12% de GCR.

Considerando que la norma ASTM D6373 recomienda un valor máximo de viscosidad de 3(Pa*s), sólo el porcentaje de adición de 9% de GCR cumpliría con este requerimiento. Por otro lado, comparando el valor de viscosidad del asfalto modificado SBS, se observa que este es muy similar al valor de viscosidad del cemento asfáltico con 9% de GCR.

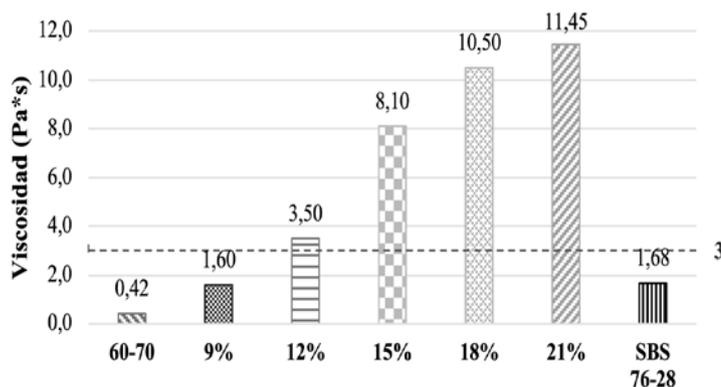


Figura 1. Valor de viscosidad en diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

3.2 Evaluación del comportamiento reológico y desempeño a altas temperaturas del cemento asfáltico

La relación entre el valor de $G^*/\text{sen}\delta$ respecto a los diferentes porcentajes de GCR añadidos al cemento asfáltico base 60/70 en sus estados original y envejecido, se presentan en la Figura 2 y 3.

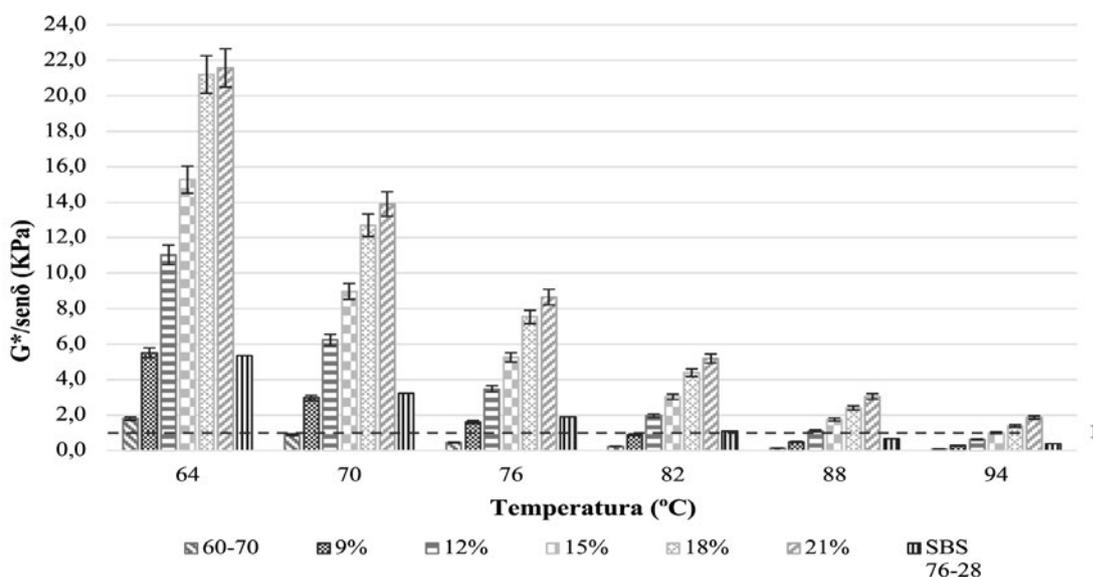


Figura 2. Valor de $G^*/\text{sen}\delta$ en estado original de los diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

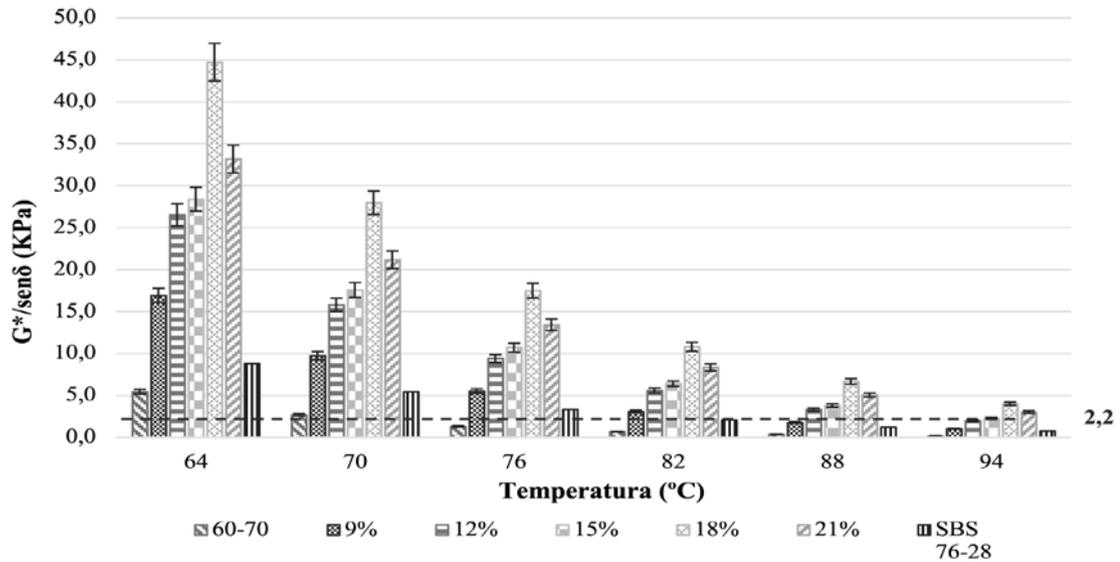


Figura 3. Valor de $G^*/sen\delta$ en estado envejecido a corto plazo de los diferentes porcentajes de GCR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

El parámetro $G^*/sen\delta$ indica la resistencia a la deformación permanente del cemento asfáltico a altas temperaturas, de esta forma, para reducir la formación de roderas en el pavimento es que el sistema de clasificación por grado de desempeño (PG) limita el valor de $G^*/sen\delta$ a valores menores a 1.0 (KPa) para asfaltos en estado original y para estado envejecido a corto plazo a valores menores a 2.2 (KPa).

Observando la Figura 2 y 3, se evidencia que el valor de $G^*/sen\delta$ aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de GCR en el asfalto base, tanto para el estado original como envejecido a corto plazo. Nótese, por ejemplo, que la adición de 9% de GCR incrementa la clasificación a alta temperatura en dos intervalos superiores (76°C) respecto al asfalto base 60/70 que presenta una clasificación de 64°C. En este sentido, adiciones de 18 y 21% de GCR pueden incrementar hasta en cinco intervalos la resistencia del asfalto base, llegando a la clasificación de 94°C.

Por otro lado, analizando el comportamiento del asfalto modificado SBS en relación al cemento modificado con 9% de GCR, se observa ambos muestran un

comportamiento similar en estado original, pero en estado envejecido a corto plazo, el cemento asfáltico con 9% de GCR presenta un mejor comportamiento que el SBS.

Debido a las características viscoelásticas del cemento asfáltico, es que el módulo complejo de este material es altamente dependiente de los cambios de temperatura. Tal como se observa en la Figura 4, en el estado original, de forma general el módulo complejo del material disminuye a medida que aumenta la temperatura. Analizando el comportamiento del ligante que presenta incorporación de caucho, es posible observar la mejora en el módulo complejo del asfalto base 60/70, el mismo que presentaba módulos menores a 2 KPa a 64°C, reduciéndose a la mitad por cada aumento de intervalo de temperatura hasta un valor próximo a cero a los 94°C. Los aumentos más significativos en el módulo complejo se dan para incorporaciones superiores a 12% de GCR, presentando los porcentajes de 18 y 21% un comportamiento similar, de la misma forma que sucede con el valor de 9% de GCR y el asfalto modificado SBS.

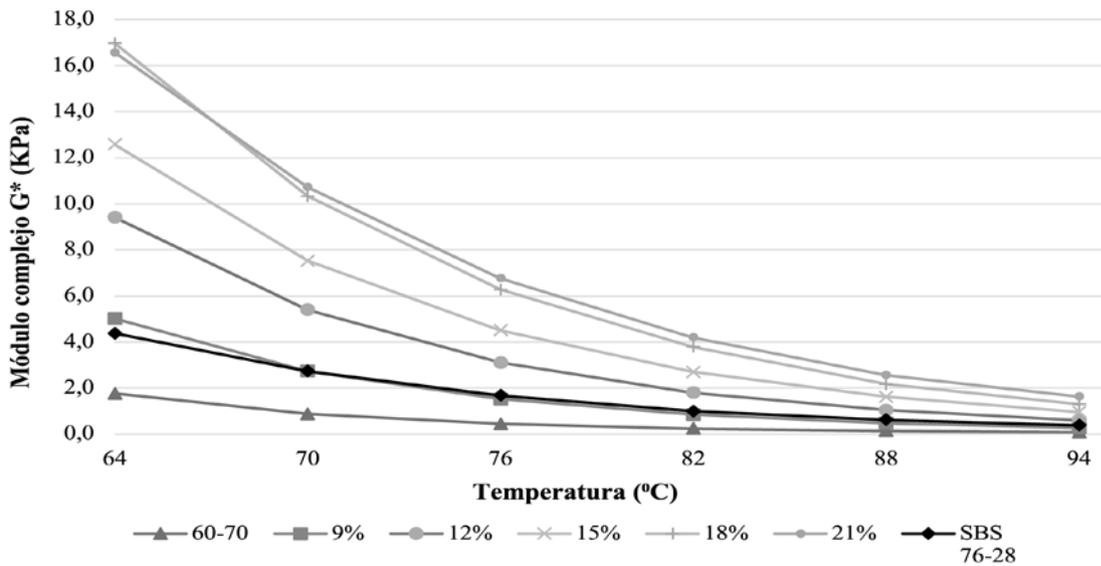


Figura 4. Valor de G^* en estado original de los diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

En relación al comportamiento en el estado envejecido a corto plazo, presentado en la Figura 5, se observa que, a diferencia del estado original, el asfalto modificado con 18% de GCR presenta un módulo superior al de 21%, situación similar al asfalto de 9% de GCR y SBS. Esto indica que tanto el asfalto con 18% y 9% de GCR alcanzarán estados de rigidez superiores que los

asfaltos de 21% y SBS, respectivamente, en un tiempo de 5 años de vida útil (tiempo representado por el envejecimiento a corto plazo) lo cual es desfavorable para el cemento asfáltico, ya que tenderá a rigidizarse y en consecuencia presentar fisuraciones en la mezcla asfáltica, sin embargo, este aspecto debe evaluarse con el comportamiento a bajas temperaturas.

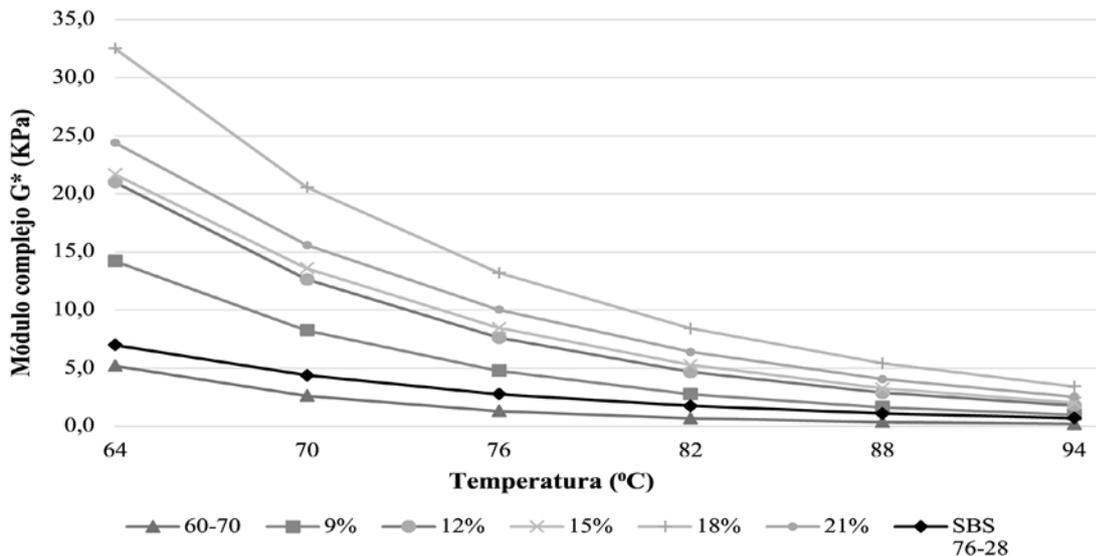


Figura 5. Valor de G^* en estado envejecido a corto plazo de los diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

Respecto al parámetro del ángulo de fase δ , este parámetro también se asocia con el comportamiento viscoelástico del cemento asfáltico, cuanto mayor sea el valor de δ (próximo a 90°) mayor será su componente viscoso y cuanto menor sea su valor

(próximo a 0°) mayor será su respuesta elástica. Es así que, las Figuras 6 y 7, presentan la tendencia de este parámetro en estado original y envejecido a corto plazo de los ligantes en estudio, respectivamente.

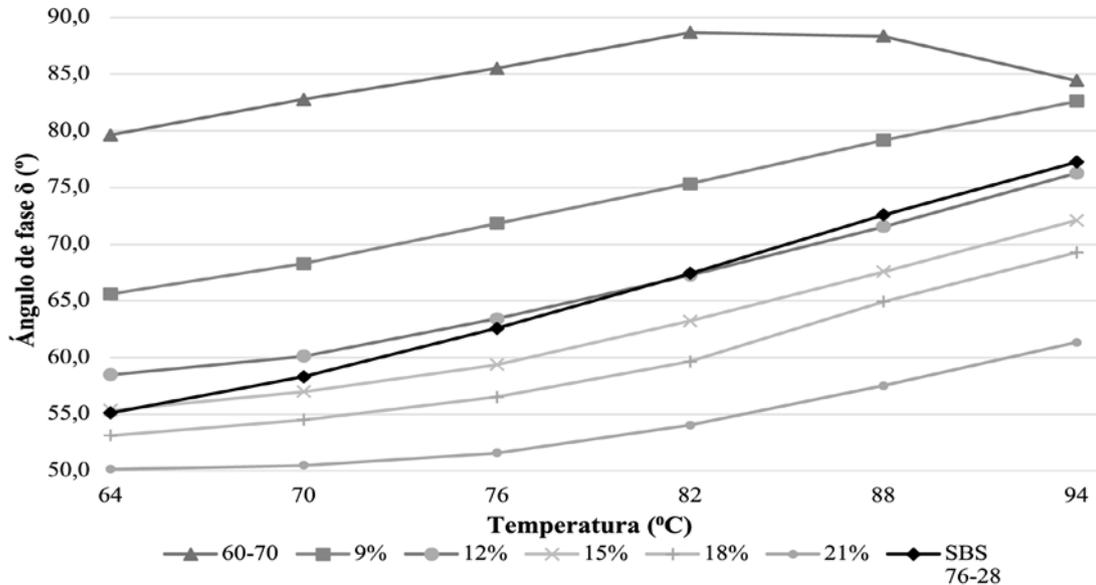


Figura 6. Valor de δ en estado original de los diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

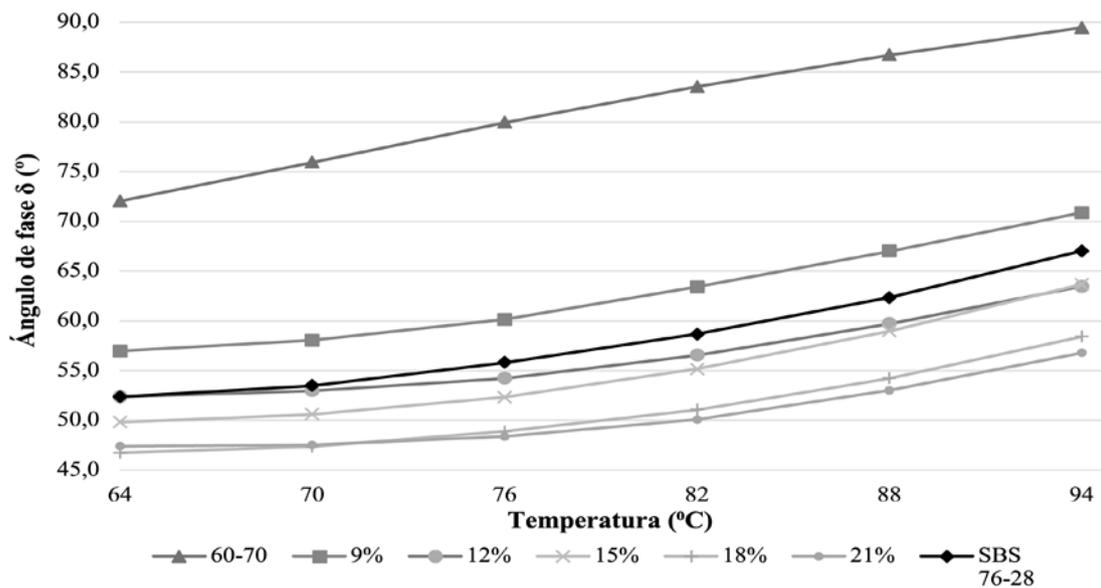


Figura 7. Valor de δ en estado envejecido a corto plazo de los diferentes porcentajes de CGR añadidos al cemento asfáltico base 60/70.

Analizando ambas figuras, es posible evidenciar las mejoras en la respuesta elástica del asfalto base 60/70 a medida que se incrementa el porcentaje de GCR. Respecto a este parámetro, se observa que el ligante con 12% de GCR presenta una respuesta elástica similar al ligante SBS y que el ligante con 9% de GCR tiene una tendencia más viscosa que este último al presentar un mayor ángulo de fase. De forma general, para todos los porcentajes de adición de GCR, se observa que, en estado envejecido a corto plazo, todos presentan un ángulo de fase menor a 70° , contrario al comportamiento del cemento asfáltico original

60/70, el mismo que reporta ángulos superiores a este, evidenciando el potencial del GCR en el aumento de la respuesta elástica y por consiguiente en la reducción de la deformación del material a altas temperaturas.

4. Conclusiones

La modificación de cemento asfáltico con GCR por vía húmeda mejora la respuesta reológica del material, dado que, a mayor incorporación de caucho mayor es la respuesta del parámetro $G^*/\text{sen}\delta$ asociado con la reducción de ahuellamiento en el pavimento.

Sin embargo, se sugiere que, para efectos de manejo en planta no se supere con adiciones mayores a 12% debido al incremento en la viscosidad del material.

Realizando la comparación con un cemento asfáltico modificado SBS, comercializado industrialmente por las ventajas de este polímero en el comportamiento reológico a altas temperaturas, el asfalto modificado con 9% de GCR presenta un comportamiento similar en los parámetros de viscosidad, $G^*/\sin\delta$ y módulo complejo (G^*) en su estado original. No obstante, respecto a la respuesta en estado envejecido a corto plazo, se observa que el asfalto con 9% de GCR presenta mayor rigidez, lo que indica que este material podría presentar una tendencia a la formación de grietas, aspecto debe cotejarse con la respuesta a bajas temperaturas.

De forma general, para todas las adiciones de GCR, se observa un aumento en el parámetro de la respuesta elástica del ángulo de fase δ , para las condición en estado original como envejecido a corto plazo. Esto muestra el potencial del GCR para mejorar las propiedades elásticas del cemento asfáltico a alta temperatura.

5. Recomendaciones

Se recomienda continuar con ensayos reológicos a bajas temperaturas respecto a la modificación de asfaltos con GCR por vía húmeda para realizar la categorización completa por grado de desempeño del ligante.

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 este proyecto.

6. Referencias bibliográficas

- Abdelrahman, M. (2006). Controlling Performance of Crumb Rubber-Modified Binders Through Addition of Polymer Modifiers. *Transportation Research Board of the National Academies*, 7.
- ASTM. (2006). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. EEUU: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2015). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. EEUU: American Society for Testing and Materials.

- ASTM. (2019). *Classification for Rubber Compounding Materials-Recycled Vulcanizate Rubber*. EEUU: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2019). *Standard Specification for Asphalt-Rubber Binder*. EEUU: American Society for Testing and Materials.
- ASTM. (2021). *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder*. EEUU: American Society for Testing and Materials.
- Daryoush Yousefi Kebriaa, S. R. (2015). Laboratory investigation of the effect of crumb rubber on the characteristics and rheological behaviour of asphalt binder. *Road Materials and Pavement Design*, 14.
- Mehdi Khalilia, Kazem Jadidia, Moses Karakouziana, Serji Amirkhanian. (2019). Rheological properties of modified crumb rubber asphalt binder and selecting the best modified binder using AHP method. *Case Studies in Construction Materials*, 20.
- NDOT, N. D. (2016). *Evaluation of new innovations in rubber-modified asphalt binders and rubberized asphalt mixes for nevada DOT*. Carson City, EEUU: NDOT Research Report.
- P. Cong, P. Xun, M. Xing, S. Chen. (2012). *Investigation of asphalt binder containing various crumb rubber and asphalt*. Construction building materials.
- Peiliang Cong, P. X. (2013). Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts. *Construction and Building Materials*, 10.
- Rios Urquidi, B. (2022). *Estudio de la influencia del tiempo y temperatura de digestión en mezclas asfálticas mejoradas con grano de caucho reciclado por vía seca*. Cochabamba: Proyecto de Pregrado, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Simón (UMSS).
- Rodezno, M. C., & Kaloush, K. E. (2011). *Implementation of asphalt-rubber mixes into the mechanistic empirical pavement design guide*. EEUU: oad Materials and Pavement Design.
- Smithers. (2022). *The Future of Global Tires to 2022*. EEUU: Smithers.
- Xiaorui Zhang, C. H. (2021). Evaluating the Rheological Properties of High-Modulus Asphalt Binders Modified with Rubber Polymer Composite Modifier. *Materials*, 16.