

Influencia de la incorporación de polvo de caucho reciclado en el desempeño de mezclas asfálticas por vía húmeda

Influence of recycled rubber powder incorporation on the performance of asphalt mixtures using the wet process

Filemón Mejía Blanco¹, Jahel Sarvia Ledezma Pérez^{2,*}, Victor Hugo Miranda Challapa³, Joaquín Humberto Aquino Rocha⁴

*Correo de correspondencia: ja.ledezma@umss.edu

Resumen

La susceptibilidad a la humedad y la deformación permanente inducida por cargas repetitivas de tráfico se constituyen en mecanismos de deterioro que debilitan la estructura de los pavimentos flexibles en edades tempranas. Paralelamente, el creciente volumen de neumáticos fuera de uso (NFU) plantea un desafío ambiental que puede ser abordado mediante procesos de reciclaje sostenibles. En este contexto, la incorporación de polvo de caucho reciclado (PCR) en mezclas asfálticas por vía húmeda ha surgido como una alternativa prometedora para mejorar el desempeño mecánico de los pavimentos. La presente investigación evalúa la influencia del cemento asfáltico modificado con PCR en la resistencia a la humedad y al ahuellamiento. Se analizaron tres tipos de mezclas asfálticas: una mezcla convencional, una modificada con polímero industrial Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) y una tercera modificada con PCR. En esta última, se empleó cemento asfáltico convencional de procedencia peruana (grado de penetración 60/70), modificado con 9% de PCR, sometido a un proceso de mezcla previa durante 1,5 horas a 175 ± 5 °C y 1700 rpm. Los resultados muestran que la mezcla modificada con PCR presenta un desempeño superior respecto a las demás mezclas, evidenciando un incremento del 8% en la resistencia a la tracción indirecta respecto a la mezcla convencional. En cuanto a la deformación permanente, se observó una reducción del 69% frente a la mezcla convencional y del 45% respecto a la mezcla con SBS, destacando así el potencial del PCR como modificador sostenible para mejorar la durabilidad de los pavimentos flexibles.

Palabras clave: caucho reciclado, mezclas asfálticas modificadas, resistencia a la humedad, deformación permanente.

Abstract

Permanent deformation caused by repetitive traffic loads and moisture susceptibility are major deterioration mechanisms that compromise the structure of flexible pavements at early service ages. Simultaneously, the growing volume of end-of-life tires (ELT) presents a significant environmental challenge, which can be addressed through sustainable recycling strategies. In this context, the incorporation of recycled rubber powder (RRP) into asphalt mixtures via the wet process has emerged as a promising approach to enhance the mechanical performance of pavements. This study evaluates the influence of asphalt binder modified with RRP on moisture damage and rutting performance. Three types of asphalt mixtures were evaluated: a conventional mixture, a mixture modified with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) polymer, and a third mixture modified with RRP. For the latter, a conventional asphalt binder sourced from Peru (penetration grade 60/70) was used, modified with 9% RRP through a pre-mixing process conducted for 1.5 hours at 175 ± 5 °C and 1700 rpm. The results show that the RRP-modified asphalt mixture outperforms both the conventional and SBS-modified mixtures, with an 8% increase in indirect tensile strength relative to the conventional mixture. In terms of permanent deformation, the RRP-modified mixture exhibited a 69% reduction compared to the conventional mixture and a 45% reduction relative to the SBS-modified mixture. These findings highlight the potential of RRP as a sustainable modifier to enhance the durability of flexible pavements.

Keywords: recycled rubber, modified asphalt mixtures, moisture resistance, permanent deformation.

¹ Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0004-0114-3692>

² Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-2743-6256>

³ Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0009-2752-8087>

⁴ Laboratorio de Resistencia de Materiales, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-3383-6379>

1. Introducción

La construcción y el mantenimiento de carreteras desempeñan un papel fundamental en el desarrollo económico y social de cualquier país (World Bank, 2020). En los últimos años, ha cobrado creciente importancia la implementación de procedimientos y metodologías orientados a mejorar el desempeño de los pavimentos flexibles, priorizando además la sostenibilidad mediante el empleo, reutilización y reciclaje de materiales que conforman la estructura vial, sin comprometer el cumplimiento de las especificaciones técnicas requeridas (Salehi et al., 2021; Li et al., 2022). Con el objetivo de optimizar el desempeño de las mezclas asfálticas, surge la necesidad de desarrollar materiales más resistentes, capaces de mejorar propiedades como la durabilidad, la resistencia al ahuellamiento y a la fatiga, especialmente frente a condiciones severas de tránsito y clima que afectan negativamente la vida útil de los pavimentos (Singh & Sahoo, 2021).

Entre las estrategias emergentes para modificar las mezclas asfálticas destaca la incorporación de polvo de caucho reciclado (PCR), obtenido a partir de la trituración de neumáticos fuera de uso (NFU). Su incorporación puede realizarse mediante dos métodos principales: vía húmeda, donde el ligante asfáltico es modificado previamente al mezclado a través de un proceso controlado de temperatura y agitación; y vía seca, donde el PCR se incorpora como parte de los agregados durante la mezcla (Zhao et al., 2023).

Diversos estudios han reportado resultados favorables: por ejemplo, Martínez et al (2018) observaron incrementos de hasta un 20 % en la resistencia al ahuellamiento de mezclas modificadas con PCR; Díaz & Castro (2017) documentaron mejoras en la durabilidad y la resistencia a la fatiga en condiciones de carga repetida; mientras que Zhao et al. (2023) identificaron que la incorporación de caucho reciclado redujo las deformaciones permanentes en un 15 % respecto a mezclas convencionales.

Además de contribuir al mejoramiento de las propiedades mecánicas, el uso de PCR ofrece beneficios ambientales significativos al reducir la contaminación derivada de la inadecuada disposición de neumáticos, tales como la quema a cielo abierto y las consecuentes emisiones de CO₂ (Díaz & Castro, 2017). Sin embargo, la adición de PCR también plantea desafíos técnicos que deben ser considerados. Entre ellos, se incluyen posibles variaciones en la trabajabilidad de la mezcla, cambios en la estabilidad del ligante y en la adherencia ligante-agregado, los cuales podrían afectar el desempeño final si no se controlan adecuadamente durante el proceso de modificación (Presti, 2013; Nanjgowda & Biligiri, 2023).

Particularmente en América Latina, y en Bolivia en específico, el creciente volumen de neumáticos fuera de uso representa un problema ambiental relevante, haciendo urgente la búsqueda de alternativas de reciclaje que no solo reduzcan su impacto negativo, sino que también mejoren el desempeño de las infraestructuras viales (Martínez-Arguelles et al., 2018).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la influencia de la incorporación de PCR en el desempeño de mezclas asfálticas mediante el proceso de vía húmeda, enfocándose en la resistencia al daño por humedad y a la deformación permanente. La innovación de esta investigación radica en el análisis comparativo entre mezclas convencionales, mezclas modificadas con polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) y mezclas modificadas con PCR, aplicando un proceso de modificación controlada del ligante. De esta manera, se busca aportar evidencia experimental sobre el potencial del PCR como una alternativa técnica y ambientalmente sostenible para mejorar la durabilidad de los pavimentos flexibles.

2. Material y métodos

Las características y propiedades de los materiales empleados en la presente investigación fueron determinadas con el fin de verificar su idoneidad para el uso en mezclas asfálticas. La caracterización se realizó en dos partes: por un lado,

se evaluaron los agregados minerales, y por otro, el cemento asfáltico, del tipo convencional, modificado con PCR y modificado con polímero SBS.

Caracterización de los agregados minerales

Los agregados utilizados en esta investigación provienen del acopio de materiales del río Espíritu Santo. La Tabla 1 presenta los ensayos realizados para su caracterización, los cuales fueron desarrollados de acuerdo con los procedimientos establecidos en las normas de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Tabla 1

Caracterización de los agregados minerales

Ensayo	Unidad	Norma	Limite	Resultado	Verificación
Agregado Grueso					
Gravedad específica del agregado grueso	g/cm ³	ASTM C127	-	4,95	-
Abrasión de los Ángeles	%	ASTM C131	Máx 40%	24,40	Cumple
Caras fracturadas	%	ASTM D5821	Min 90%	95,3	Cumple
Resistencia a los sulfatos (Sanidad)	%	ASTM C2419	Máx 12%	6,2	Cumple
Agregado Fino					
Gravedad específica del agregado fino	g/cm ³	ASTM C128	-	2,533	-
Equivalente de arena	%	ASTM D2419	Min 45%	86,16	Cumple

Fuente: Autores.

Caracterización del cemento asfáltico

El cemento asfáltico utilizado en la mezcla convencional proviene de Perú y presenta una clasificación de penetración 60/70. Para su caracterización, se realizaron los ensayos mostrados en la Tabla 2, desarrollados conforme a los procedimientos establecidos en las normas ASTM correspondientes.

Tabla 2

Caracterización del cemento asfáltico convencional

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado	Verificación
				60/70	
Penetración a 25°C	mm	ASTM D5	Mín. 60	63,22	Cumple
Peso específico del asfalto a 25°C	g/cm ³	ASTM D71	-	1,029	-
Ductilidad a 25°C	cm	ASTM D113	Mín. 100	149,2	Cumple
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36	48-54	44,1	No Cumple
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	Mín. 230	299,6	Cumple
Adhesividad de agregados gruesos– ligante asfáltico	%	DNER-ME 078	Min 95	97,58	Cumple
Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos	%	INVIAS E 744	Min 4	3	No Cumple

Fuente: Autores.

Caracterización de cementos asfálticos modificados

Se realizaron ensayos de caracterización al cemento asfáltico modificado con un 9% de PCR y al cemento asfáltico modificado industrialmente con polímero SBS, siguiendo los procedimientos establecidos en las normas ASTM correspondientes. Los resultados obtenidos en la caracterización de ambos materiales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Caracterización de cementos asfálticos modificados

Ensayo	Unidad	Norma	Límite	Resultado 9% PCR	Resultado SBS
Penetración a 25°C	mm	ASTM D5	Mín. 40	43.48	56.83
Peso específico del asfalto a 25°C	g/cm ³	ASTM D71	-	1.027	0.998
Ductilidad a 25°C	cm	ASTM D113	Mín. 100	13.39	86.14
Punto de ablandamiento	°C	ASTM D36	48-54	59.1	71.5
Punto de inflamación	°C	ASTM D92	Mín. 230	332.5	306.6
Adhesividad de agregados gruesos–ligante asfáltico	%	DNER-ME 078	Min 95	100 (con 0,8% de mejorador de adherencia)	98
Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos	%	INVIAS E 744	Min 4	10	10

Fuente: Autores.

Diseño de mezcla asfáltica convencional y modificada

La dosificación utilizada tanto para las mezclas convencionales como para las modificadas se realizó siguiendo la metodología propuesta por el Instituto del Asfalto (*Asphalt Institute*, 2014), basada en el método Marshall. Se empleó una única gradación de agregados para la mezcla asfáltica convencional y la mezcla modificada con PCR. Para la mezcla modificada con polímero SBS, se utilizó una gradación similar, con variaciones únicamente en el porcentaje de material fino.

Para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico, se ensayaron cinco porcentajes diferentes de asfalto, evaluando un promedio de tres resultados obtenidos de cuerpos de prueba compactados. La selección del contenido óptimo se basó, principalmente, en alcanzar un 4% de vacíos de aire en los especímenes compactados.

En el diseño de las mezclas asfálticas —convencional, modificada con SBS y modificada con PCR— se determinaron los parámetros volumétricos Marshall, entre los que se incluyen: porcentaje óptimo de cemento asfáltico, vacíos de aire en la mezcla compactada (Va), estabilidad, flujo, densidad específica *Bulk*, vacíos llenos de asfalto (VFA) y vacíos en el agregado mineral (VMA).

Evaluación de la susceptibilidad a la humedad

La evaluación de la susceptibilidad a la humedad en las mezclas asfálticas diseñadas se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM D4867 (ASTM, 2014). Para ello, se elaboraron cuerpos de prueba correspondientes a la mezcla asfáltica convencional, a la mezcla modificada con polímero SBS y a la mezcla modificada con PCR.

Se utilizaron los contenidos óptimos de cemento asfáltico determinados mediante el método Marshall, elaborándose seis cuerpos de prueba para cada tipo de mezcla. Cada cuerpo de prueba presentó un diámetro de 102 mm y una

altura de 63,5 mm. Se verificó que el porcentaje de vacíos de aire estuviera dentro del rango requerido de 6% a 8%, utilizando un compactador giratorio.

Posteriormente, los cuerpos de prueba se dividieron en dos grupos: un grupo acondicionado en ambiente húmedo y otro en condiciones secas, siguiendo los procedimientos de acondicionamiento definidos en la norma. Una vez acondicionados, los especímenes fueron ensayados a compresión diametral en el equipo Marshall, determinándose la resistencia a la tracción indirecta de cada grupo.

Este ensayo permitió estimar el daño potencial de las mezclas asfálticas frente a la acción del agua, mediante la determinación de la resistencia a la tracción (S_t) y del índice de relación de resistencia a la tracción (TSR), utilizando la Ecuación (1).

$$TSR = \left(\frac{S_{TM}}{S_{TD}} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde:

T_{SR} = Relación de resistencia a la tracción (%),

S_{TM} = Resistencia a la tracción del subconjunto condicionado por humedad (kPa),

S_{TD} = Resistencia a la tracción del subconjunto seco (kPa).

Evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente

La determinación de la susceptibilidad a la deformación permanente de los cuerpos de prueba se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma AASHTO T324 (AASHTO, 2004). Este método, basado en el ensayo con la rueda de Hamburgo, permite identificar fallas prematuras en las mezclas asfálticas, atribuibles a debilidades en la estructura del agregado, rigidez inadecuada del cemento asfáltico o daño por humedad.

Para la ejecución del ensayo, se elaboraron cuatro cuerpos de prueba para cada tipo de diseño de mezcla asfáltica, cada uno con un diámetro de 150 mm. Durante la prueba, los especímenes se sumergieron en agua a una temperatura de 50 °C, aplicándoseles una carga de $705 \pm 4,5$ N a una velocidad de 50 ± 5 pasadas por minuto con la rueda de Hamburgo. El ensayo continuó hasta alcanzar 20.000 pasadas o hasta que se registrara una deformación máxima de 20 mm, conforme a los criterios establecidos por el Instituto del Asfalto (*Asphalt Institute*, 2014).

3. Resultados y Discusión

Diseño de la mezcla asfáltica convencional y modificado con PCR

Los resultados de los parámetros volumétricos obtenidos en el diseño Marshall de las mezclas asfálticas analizadas se presentan en la Tabla 4. Se observa que la estabilidad de la mezcla modificada con PCR se incrementa en un 10% respecto a la mezcla modificada con polímero SBS y en un 25% en comparación con la mezcla asfáltica convencional.

Tabla 4

Resultados obtenidos del diseño volumétrico de las mezclas asfálticas

Parámetros volumétricos	Unidad	Requerimiento Instituto del Asfalto	Tipos de mezclas asfálticas		
			MA Conv.	MA SBS	MA 9% PCR
Contenido de cemento asfáltico óptimo	%	-	5,6	5,5	5,8
Vacíos de aire en la mezcla compactada "Va"	%	3 - 5	4,4	4,6	3,9
Vacíos en agregado mineral "VMA"	%	Min. 14	13,2	16,6	13,65
Vacíos llenos de asfalto "VFA"	%	65-75	68	72	71
Estabilidad	N	Min. 8.006	19.350	17.300	22.900
Flujo	0,25 mm	8 - 14	13,1	12,2	11,9
Densidad	kg/m ³	-	2,326	2,298	2,302

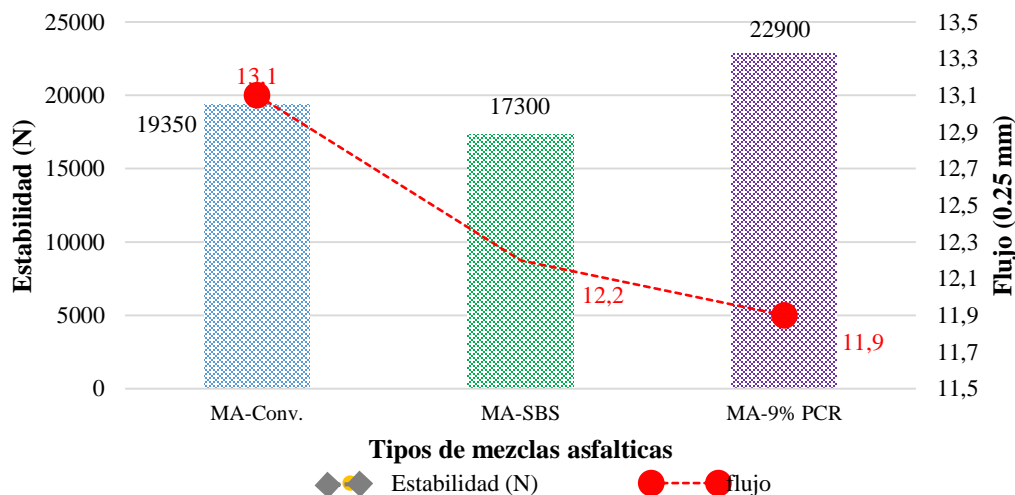
Fuente: Autores.

Complementariamente, la Figura 1 presenta la comparación de los valores de estabilidad y flujo obtenidos para las mezclas asfálticas convencionales y modificadas. Se observa que la mezcla modificada con polvo de caucho reciclado (MA-9% PCR) alcanza el mayor valor de estabilidad (22.800 N), superando en un 25% al valor registrado por la mezcla convencional (19.350 N) y en un 27% al de la mezcla modificada con SBS (17.800 N).

Respecto al flujo, se evidencia una tendencia decreciente conforme se introducen modificaciones en la mezcla. La mezcla convencional presenta el valor más alto de flujo ($13,1 \times 0,25$ mm), seguido por la mezcla modificada con SBS ($12,8 \times 0,25$ mm) y, finalmente, por la mezcla modificada con PCR, que muestra el menor valor de flujo ($11,9 \times 0,25$ mm). Estos resultados indican que la modificación con polvo de caucho reciclado no solo mejora la estabilidad de la mezcla, sino que también contribuye a una disminución del flujo, sugiriendo una estructura interna más rígida y, potencialmente, una mayor resistencia frente a la deformación permanente.

Figura 1

Relación de estabilidad y flujo de las diferentes mezclas asfálticas



Fuente: Autores.

Evaluación de la susceptibilidad a la humedad

Los resultados de TSR y de la resistencia a la tracción indirecta de los grupos seco y condicionado por humedad de las mezclas asfálticas evaluadas se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5

Resultados obtenidos del ensayo de susceptibilidad a la humedad

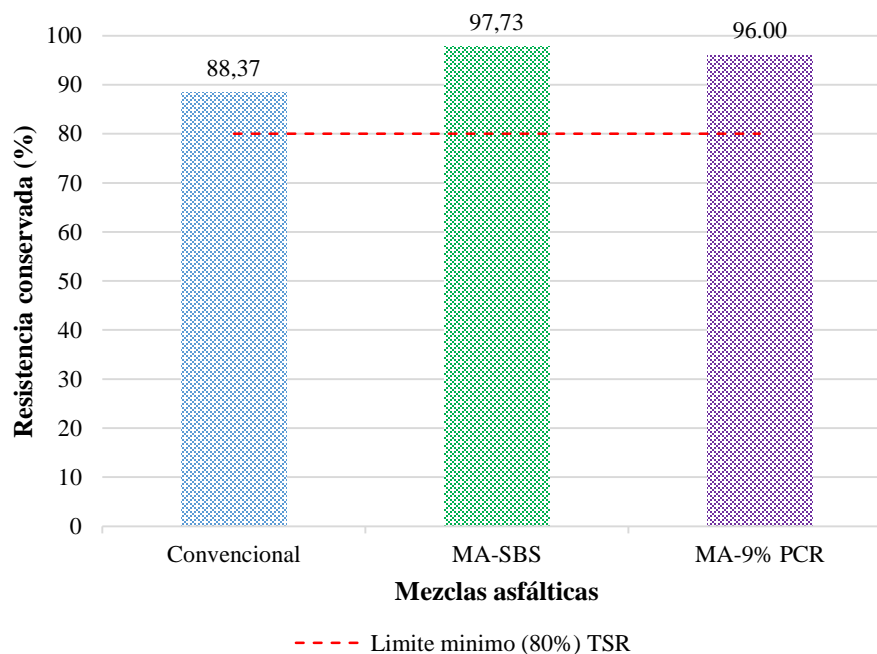
Tipo de mezcla asfáltica	Porcentaje de cemento asfáltico	Grupo de evaluación	Porcentaje de vacíos en la mezcla (Va)	Resistencia a la tracción indirecta (KPa)	Resistencia a la humedad (%)
Convencional	5,6	Seco	7,27	704,04	88,37
		Acondicionado	7,24	622,17	
MA-SBS	5,5	Seco	6,63	626,33	97,73
		Acondicionado	6,35	612,13	
MA-9% PCR	5,8	Seco	5,96	1.019,01	96,00
		Acondicionado	5,96	978,21	

Fuente: Autores.

Se observa que todas las mezclas analizadas cumplen con el requisito mínimo establecido por la norma ASTM D4867 (ASTM, 2014), que exige una relación de resistencia a la humedad superior al 80%. La mezcla asfáltica convencional obtuvo un TSR de 88,37%, mientras que las mezclas modificadas con polímero SBS y PCR alcanzaron valores de 97,73% y 96,00%, respectivamente, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Resistencia a la humedad en las mezclas asfálticas evaluadas

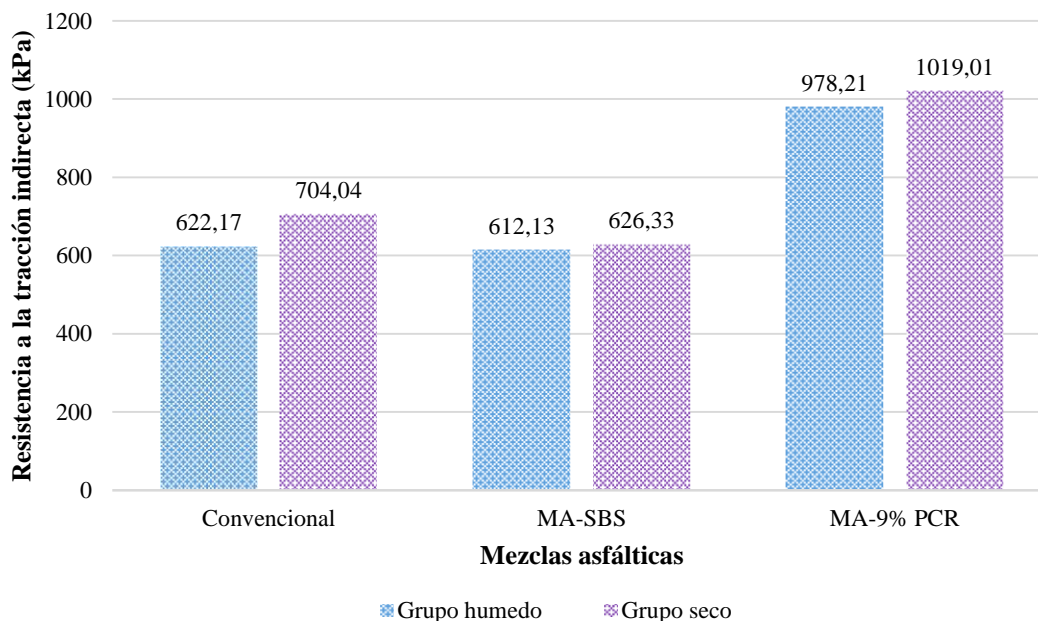


Fuente: Autores

Respecto a la resistencia a la tracción indirecta (Figura 3), se evidencia que la incorporación de modificadores mejora significativamente el desempeño de las mezclas. La mezcla modificada con SBS presenta un incremento aproximado del 10% en la resistencia a la tracción indirecta en estado seco respecto a la mezcla convencional. No obstante, la mezcla modificada con 9% de PCR exhibe la mayor resistencia a la tracción, con un aumento superior al 45% respecto a la mezcla convencional.

Figura 3

Resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas evaluadas



Fuente: Autores.

Los resultados indican que el uso de modificadores, tanto SBS como PCR, mejora la resistencia de las mezclas asfálticas frente a los daños provocados por la humedad. Particularmente, la mezcla modificada con polvo de caucho reciclado mostró un desempeño superior en términos de resistencia a la tracción indirecta, consolidándose como una alternativa técnica viable para mejorar la durabilidad de los pavimentos frente a la acción del agua.

Evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente

La susceptibilidad a la deformación permanente de las mezclas asfálticas evaluadas se determinó mediante el ensayo de rueda de Hamburgo, conforme a la norma AASHTO T324 (AASHTO, 2004). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6
Resultados obtenidos del ensayo de la rueda de Hamburgo

Tipo de mezcla asfáltica	Porcentaje de cemento asfáltico	Rueda	Número de pasadas al punto de <i>stripping</i>	Ahuellamiento desarrollado	Media de ahuellamiento
Convencional	5,6	1	No presenta	6,91	6,03
		2	No presenta	5,14	
MA-SBS	5,5	1	No presenta	2,34	3,34
		2	No presenta	4,34	
MA-9% PCR	5,8	1	No presenta	2,09	1,85
		2	No presenta	1,60	

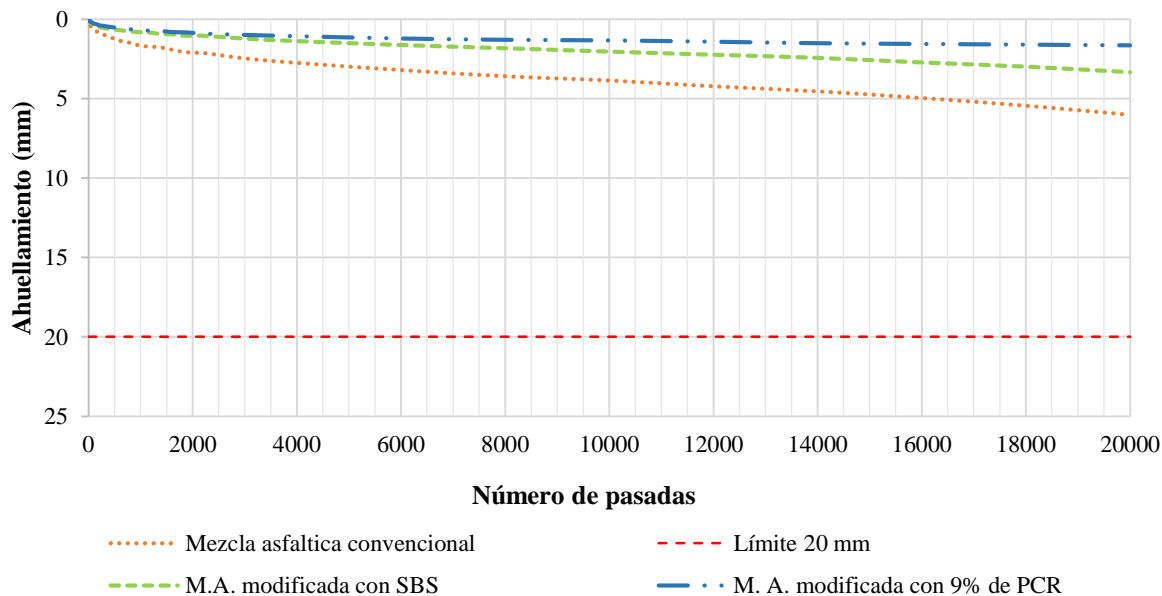
Fuente: Autores

Se observa que la mezcla asfáltica convencional exhibe el mayor valor de deformación permanente, con una media de 6,03 mm. En comparación, la mezcla modificada con polvo de caucho reciclado (MA-9% PCR) muestra una reducción del 69,3% en la deformación respecto a la mezcla convencional, mientras que la mezcla modificada con SBS registra una disminución del 44,6%. Todos los especímenes cumplieron con el criterio de la norma, limitando su deformación por debajo de los 20 mm y resistiendo 20.000 pasadas sin fallas por *stripping*.

En cuanto al comportamiento frente a la deformación progresiva, la Figura 4 muestra la evolución del ahuellamiento en función del número de pasadas. La mezcla modificada con PCR se distingue por su menor tasa de deformación acumulada, seguida por la mezcla modificada con SBS y, en último lugar, la mezcla convencional.

Figura 4

Deformación permanente de las mezclas asfálticas evaluadas



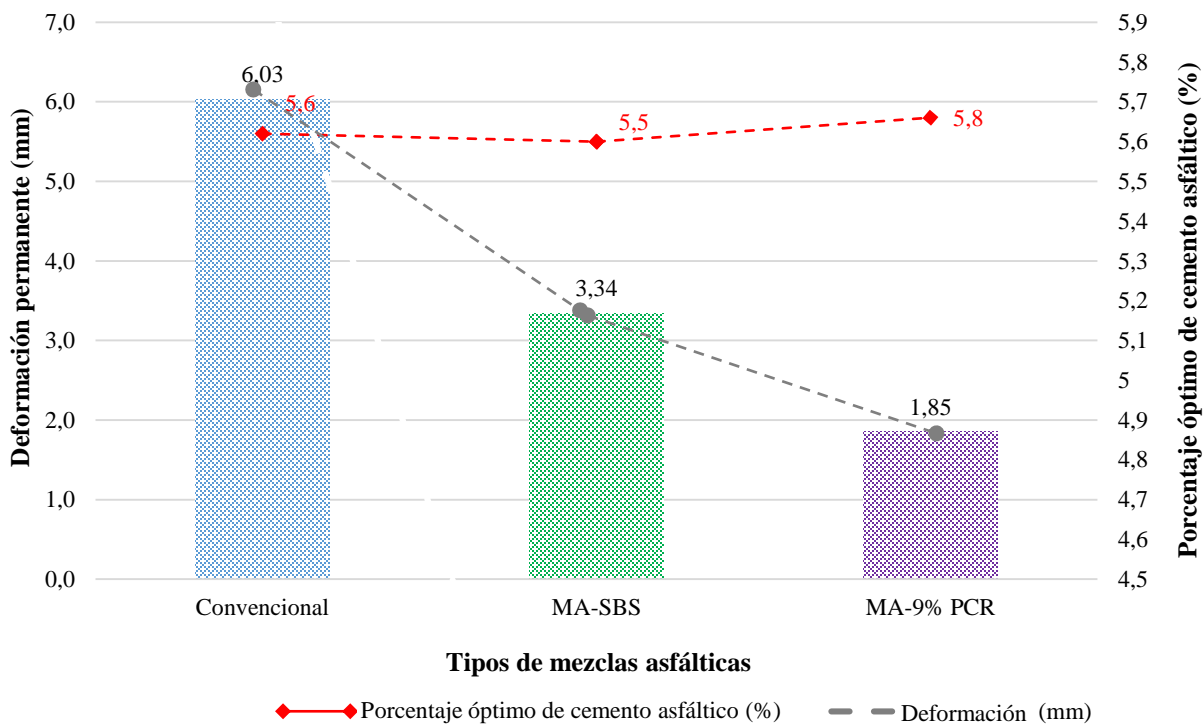
Fuente: Autores.

Por otro lado, la Figura 5 compara los valores medios de deformación permanente y los porcentajes óptimos de contenido de cemento asfáltico. Se evidencia que la mezcla MA-9% PCR no solo presenta el menor valor de deformación (1,85 mm), sino que también mantiene un contenido de cemento asfáltico similar al de las otras mezclas. Esto sugiere que la mejora en la resistencia al ahuellamiento se atribuye principalmente a las propiedades intrínsecas de la modificación con caucho reciclado a través del aumento de rigidez.

En resumen, los resultados obtenidos confirman que la modificación de mezclas asfálticas con polvo de caucho reciclado proporciona una mejora significativa en la resistencia a la deformación permanente, superando incluso a las mezclas modificadas con polímero SBS, y sin evidencias de *stripping*. Este comportamiento destaca el potencial del uso de PCR como una alternativa técnica viable y ambientalmente favorable en la mejora de la durabilidad de pavimentos asfálticos.

Figura 5

Resultados del ensayo de deformación permanente y porcentaje óptimo de cemento asfáltico de las mezclas asfálticas evaluadas



Fuente: Autores.

4. Conclusión

En la presente investigación se evaluó el desempeño de mezclas asfálticas convencionales y modificadas mediante la incorporación de PCR y polímero SBS, considerando ensayos de resistencia a la humedad, parámetros volumétricos Marshall y susceptibilidad a la deformación permanente. Con base en los ensayos realizados, se obtienen las siguientes conclusiones:

- En los ensayos de resistencia a la humedad, se evidenció que la mezcla modificada con PCR presenta un desempeño similar al de la mezcla modificada con SBS, con una diferencia de apenas 1,7% en la relación

de TSR. Ambas mezclas superaron ampliamente el límite mínimo del 80%, mientras que la mezcla convencional registró valores inferiores.

- En cuanto a los parámetros volumétricos Marshall, se observó que la estabilidad de la mezcla modificada con PCR aumentó aproximadamente un 10% respecto a la mezcla modificada con SBS y un 25% en comparación con la mezcla convencional, evidenciando una mejora significativa en la resistencia estructural del material.
- Respecto a la deformación permanente, se constató que la modificación del ligante 60/70 con un 9% de PCR permitió reducir la deformación en un 69% respecto a la mezcla convencional y en un 45% respecto a la mezcla modificada con SBS. Todas las mezclas ensayadas alcanzaron las 20.000 pasadas en la prueba de la rueda de Hamburgo sin superar la deformación máxima de 20 mm, además de no presentar fallas por *stripping* durante el ensayo.
- El adecuado desempeño frente a la humedad y la deformación permanente sugiere que la modificación con PCR mejora la adherencia ligante-agregado, contribuyendo positivamente a la durabilidad y desempeño mecánico de las mezclas asfálticas.

La incorporación de un 9% de PCR en mezclas asfálticas constituye una alternativa técnica viable y sostenible, capaz de mejorar significativamente el comportamiento mecánico frente a condiciones críticas de tráfico y clima, promoviendo además el aprovechamiento de residuos sólidos en aplicaciones de infraestructura vial.

Se recomienda la implementación del cemento asfáltico modificado con PCR en futuros diseños de mezclas asfálticas, especialmente en aquellas destinadas a zonas de alta carga de tránsito, debido a su destacada resistencia a la deformación permanente. Por otro lado, se sugiere ampliar los estudios a nivel nacional, evaluando diferentes porcentajes de incorporación de PCR y condiciones de carga y clima variables, a fin de establecer especificaciones técnicas más detalladas para su aplicación masiva en proyectos de infraestructura vial.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

Agradecimientos: Se agradece de manera especial al Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos y el Laboratorio de Resistencia de Materiales por proporcionar los medios, equipos e instalaciones necesarias para la ejecución de este proyecto de investigación.

5. Referencias bibliográficas

- AASHTO. (2004). T324-04: Hamburg wheel-track testing of compacted hot mix asphalt (HMA). Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Asphalt Institute. (2014). Marshall method of mix design. Asphalt Institute. (7 th Edition), Asphalt Mix Design Methods (Chapter 7, p. 77).
- ASTM. (2014). ASTM D4867/D4867M-14: Standard test method for effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures. west conshohocken, PA: ASTM International. https://doi.org/10.1520/D4867_D4867M-09R14
- Diaz, César Mauricio & Castro, Liliana Carolina. (2017). Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Li, F., Zhang, X., Wang, L., & Zhai, R. (2022). The preparation process, service performances and interaction mechanisms of crumb rubber modified asphalt (CRMA) by wet process: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 354, 129168.

- Martínez-Argüelles, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2018). Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos. *Revista ingeniería de construcción*, 33(1), 41-50.
- Nanjegowda, V. H., & Biligiri, K. P. (2023). Utilization of high contents of recycled tire crumb rubber in developing a modified-asphalt-rubber binder for road applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 192, 106909.
- Presti, D. L. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and building materials*, 49, 863-881.
- Salehi, S., Arashpour, M., Kodikara, J., & Guppy, R. (2021). Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127936.
- Singh, A. K., & Sahoo, J. P. (2021). Rutting prediction models for flexible pavement structures: A review of historical and recent developments. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 315-338.
- World Bank. (2020). Transport overview. The World Bank. Disponible en: <https://www.worldbank.org/en/topic/transport/overview>
- Zhao, Z., Wu, S., Xie, J., Yang, C., Yang, X., Chen, S., & Liu, Q. (2023). Recycle of waste tire rubber powder in a novel asphalt rubber pellets for asphalt performance enhancement. *Construction and Building Materials*, 399, 132572.