Revista de Investigaciones
e-ISSN 2077-8686 | ISSN 1997-4035

DOI: 10.26788/ri.v15i2.7144
Artículo Original

Efectos de la incorporación de neumáticos molidos en las propiedades físicas del cemento asfáltico

Effects of the incorporation of ground tires on the physical properties of asphalt cement

Edwin Callacondo Limachi[1,*]

[1] Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0640-7824, CORREO: ecallacondo@unap.edu.pe

Resumen

En las regiones altiplánicas las variaciones climáticas y los efectos de carga vehicular, crean complicaciones que inciden en las propiedades intrínsecas del ligante asfaltico, induciendo a la aparición de deformaciones, fisuras y otros. Además, el aumento del tránsito genera el desuso y dispersión de neumáticos, causando contaminación. El objetivo fue estudiar los efectos que presentan en las propiedades físicas del cemento asfaltico, la incorporación de los neumáticos molidos. La metodología aplicada fue diseño experimental y correlativo, mediante la metodología Marshall se determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico, empleando 38 % de piedra chancada, 30,5 % de arena chancada, 30 % de arena natural y 1,5 % de filler, con contenidos de cemento asfáltico de 5,5 %, 6,0 %, 6,5 %, 7,0 % y 7,5 %, en tres repeticiones. Se obtuvo un contenido óptimo de 6,4 %. Posteriormente el cemento asfáltico fue modificado con neumáticos molidos menores a 1,15 mm de diámetro en 5 %, 10 % y 15 % a la temperatura de 160° y 180 °C de digestión durante 2 horas. Los resultados mostraron que, con 15 % de neumático molido, la penetración disminuyó 55,5 % a 160 °C y 50,7 % a 180 °C, mientras que el punto de ablandamiento alcanzó 51,3 °C y 53,1 °C, que representa una variación del 15,2 % respectivamente. El ANOVA evidenció diferencias significativas ($p < 0,05$). Concluyendo que el neumático molido y la temperatura de digestión influyen en los parámetros del cemento asfaltico proporcionando una mejora a la resistencia y deformación.

Palabras claves: Ablandamiento, cemento asfaltico, neumáticos, PEN 85/100, temperatura.

Abstract

In high-altitude regions, climatic variations and the effects of vehicle traffic create complications that affect the intrinsic properties of the asphalt binder, leading to the appearance of deformations, cracks, and other issues. In addition, increased traffic leads to the abandonment and scattering of tires, causing pollution. The objective of this research was to study the effects of incorporating ground tires on the physical properties of asphalt cement. The methodology applied was experimental and correlative. Using the Marshall test, the optimal asphalt cement content was determined, employing 38 % crushed stone, 30,5 % crushed sand, 30 % natural sand, and 1,5 % filler, with asphalt cement contents of 5,5 %, 6,0 %, 6,5 %, 7,0 %, and 7,5 %, in three replicates. An optimal content of 6,4 % was obtained. Subsequently, the asphalt binder was modified with ground tires smaller than 1,15 mm in diameter at 5 %, 10 %, and 15 % during digestion at temperatures of 160 ° and 180 °C for 2 hours. The results showed that, with 15 % ground tire, penetration decreased by 55,5 % at 160 °C and 50,7 % at 180 °C, while the softening point reached 51,3 °C and 53,1 °C, representing a variation of 15,2% respectively. The ANOVA revealed significant differences ($p < 0.05$). It is concluded that ground tire and digestion temperature influence the parameters of asphalt cement.

Keywords: Asphalt cement, pen 85/100, softening, temperature, tires.

Recibido: 20/04/2026
Aceptado: 09/05/2026
Publicado: 30/06/2026
***Autor para correspondencia:** ecallacondo@unap.edu.pe

Cómo citar: Callacondo Limachi, E. (2026). Efectos de la incorporación de neumáticos molidos en las propiedades físicas del cemento asfáltico. *Revista De Investigaciones, 15*(2), 78-89. https://doi.org/10.26788/ri.v15i2.7144

Introducción

Los pavimentos de mezclas asfálticas convencionales se tornan cada vez en una labor preponderante en los propósitos de la infraestructura vial, sin embargo, como factores condicionantes son la carga vehicular y los efectos de variación climática. El Perú, es en país con gran diversidad de regiones geográficas diferenciadas con variaciones climáticas desde la costa, sierra y la selva (Guerrero y Chang, 2012). (Valdés et al., 2012). Señalan que el cambio de temperatura es uno de los factores que afecta la rigidez del pavimento flexible, debido a las propiedades termoplásticas del asfalto. Boletín del INEI, reporta que el flujo vehicular por unidades de pesaje nacional registró un incremento del 1,2 % para (febrero 2023 al febrero del 2024). Así mismo, por actividad minera para los últimos 12 meses (setiembre 2023 - agosto 2024), el índice del flujo de vehículos pesados de 3 a 7 ejes se incrementó en 2,0 % (INEI, 2024). Además, es fundamental que las vías ofrezcan un servicio adecuado, de lo contrario, se producirían incrementos en los costos de alimentos, pasajes y otros productos (Maguiña, 2019).

El asfalto por ser altamente cohesivo, viscoso (espeso), es capaz de fluir bajo acción de carga permanente y resistir esfuerzos instantáneos (Maila, 2013). La cantidad aproximada de los componentes del asfalto se dan en; carbono (82 a 87 %), hidrogeno (9 a 11 %), nitrógeno (0,2 a 1,2 %), azufre (0,9 a 5,3 %), oxigeno (0,2 a 0,8 %), vanadio (4 a 1400 ppm), níquel (0,4 a 110 ppm)" (Estrada, 2017). Aguirre et al. (2009), señalan que el asfalteno es la molécula más pesada del hidrocarburo y se caracterizan por su dureza, las resinas por su propiedad aglutinante y como constituyente de una estabilidad se tiene a los aceites. Según (Ramírez, 2016), el ligante asfáltico es usada en pavimentos a altas temperaturas (135 °C), facilitando su adherencia a los agregados y mejorando la mezcla en caliente. No obstante, al ser usado en la capa de rodadura durante su vida útil, puede presentar diversos tipos de deterioro, generalmente asociados con los elementos que conforman la mezcla asfáltica, por ser la primera capa en recibir los esfuerzos (Ospino et al., 2019), lo cual hace que los pavimentos presenten desgastes y deterioros prematuros, mostrando envejecimiento a nivel de la capa de rodadura, con impactos negativos en la sociedad. Morea (2011), señala que para la selección del ligante asfáltico debe considerar el clima y la carga, ya que estas variables afectan las deformaciones en los pavimentos. Guerrero y Chang (2015), reportan que las altas temperaturas hacen al asfalto vulnerable a deformaciones permanentes, por lo que es crucial elegir el ligante adecuado según la ubicación de la zona para reducir estos efectos. Cuanta menos sensibilidad presente el asfalto a la temperatura, mejor resistencia se tendrá a la deformación, especialmente cuando se supere los 60 °C es preferible asfaltos con alta viscosidad y menor sensibilidad a la temperatura.

Por otra parte, Goicochea (2019), señala que, una vez que los neumáticos hayan completado su vida útil, son desechados en ríos, quebradas, cerca de caminos o incluso quemados, a esto se añade el desinterés de la sociedad por la protección ambiental, haciendo que se favorezca en la proliferación de roedores, insectos y otros vectores de enfermedades, agravando los problemas medioambientales. Así mismo su proceso de descomposición natural puede extenderse por cientos años. Esta situación resalta la importancia de seguir explorando nuevas opciones para la gestión de este tipo de residuos, con el objetivo de reducir su impacto ambiental.

Las investigaciones más recientes ahondan en la reutilización de los neumáticos como alternativa de posibles aplicaciones en nuevas líneas de negocio, además, desde una perspectiva del progreso tecnológico, se ha visto aprovechar las llantas en forma de partículas trituradas, como parte de nuevas metodologías que permita el refuerzo elastomérico frente a las exigencias del tránsito y las variaciones bruscas de temperatura, considerando su desempeño como capa de rodadura. En esta perspectiva Vargas y Reyes (2010), señalan como aspecto a futuro, incluir nuevos modificadores de ligante asfaltico que no solo mejoren sus propiedades reológicas, sino que también aumente su durabilidad. No obstante Sánchez (2021), señala que el neumático molido reacciona ablandándose e hinchándose al presentar la absorción de los aceites aromáticos, mostrando cambios en la viscosidad de la mezcla. En efecto Múnera y Ossa (2014), señalan que, al añadir caucho reciclado en el asfalto, mejora sus

parámetros respecto al asfalto patrón, actuando como relleno en la estructura coloidal del ligante. Por otro parte, Figueroa et al. (2009), encontraron que la ductilidad del asfalto modificado con neumáticos triturados es mínima, dependiendo de su proporción, lo que indica alta rigidez y baja susceptibilidad térmica. Fonseca et al. (2014), al realizar el procedimiento modificatorio al 170 ºC y 180 ºC, alcanzaron que el adecuado proceso de mezclado fue obtenido para 180 °C. Abdulrahman et al. (2020), reportaron que la incorporación de NR incrementa la viscosidad del betún, lo que exige temperaturas elevadas durante el proceso de mezclado (170 °C – 200 °C). En estudios más recientes Chavarría y Marreros (2022), indican que los asfaltos con penetración inferior a 30dmm son "duros", mejorando la durabilidad y resistencia del pavimento.

Durant (2017), precisa que la viscosidad bajo el modificante del neumático molido se incremente en 140 %, el cual le da una mayor flexibilidad al mortero asfaltico a temperatura bajas y una excelente estabilidad a temperaturas altas. Vera (2014), reportó en su investigación que la viscosidad se incrementa en la combinación del asfalto-polímero, haciendo elástica a temperaturas mínimas y menos dúctiles a temperaturas elevadas. Bressi et al. (2019), llegan a la conclusión de que; pocos son los estudios que están disponibles para la comparación entre diferentes tecnologías del caucho; por otra parte, al añadir caucho, se reduce el punto de reblandecimiento y la ductilidad.

Teniendo en cuenta las referencia de estudios previos y comprender mejor el comportamiento del asfalto-neumáticos molidos y sus efectos, es que se ha resuelto aprovechar las llantas en forma de partículas trituradas para el refuerzo elastomérico del asfalto, con el objeto de solucionar las deformaciones prematuras del asfalto, ya que en algunos países se han empleado como una opción que refuerza el rendimiento de la mezcla asfáltica en fracciones reducidas, presentando ventaja de mejora en determinadas propiedades del asfalto y como alternativa para mitigar los efectos de la contaminación.

El propósito de esta investigación tuvo como objetivo fundamental evaluar los efectos que presentara la incorporación de neumáticos molidos en las propiedades físicas del cemento asfaltico y su comparación respecto al cemento asfaltico convencional, afín de obtener una base fundamental de la mejora en algunas propiedades del asfalto modificado.

Métodos

Como parte del trabajo de investigación, se examina la influencia del modificante en los parámetros del asfalto modificado PEN 85/100. Para lograrlo se obtuvo primeramente el óptimo de cemento asfaltico con la dosificación granulométrica de 38 % de piedra chancada, 30,5 % de arena chancada, 30 % de arena natural, 1,5 % de polvo fíller. Añadiendo cemento asfaltico PEN 85/100 en (5,5 %; 6,0 %; 6,5 %; 7,0 % y 7,5 %) en tres repeticiones a la temperatura de 150 °C. Seguidamente la mezcla fue compactada a 75 golpes por cada cara mediante la metodología marshall afín de obtener los parámetros de: estabilidad, flujo, densidad, porcentaje de vacíos, VMA y la relación estabilidad/flujo. Asimismo, de la máxima curva inicialmente para; estabilidad, densidad y porcentaje de Vacíos con aire, respecto al ligante bituminoso, mediante la metodología determinado por National Asphalt Pavement Association (NAPA), es obtenida el óptimo contenido del cemento asfaltico (figura 1).

Para conocer la influencia de los neumáticos molidos en los parámetros del ligante asfaltico modificado, posteriormente se combinó asfalto-neumático molido menores a 1,15 mm de diámetro en 5 %, 10 % y 15 % a la temperatura de 160° y 180 °C de digestión durante 2 horas, lo que permitió realizar experimentos y analizar sus diversos efectos, tanto positivos como negativos, sobre los parámetros del asfalto modificado en comparación con el asfalto base. Para ambas temperaturas se ensayaron un conjunto de 24 muestras del parámetro de penetración, 16 muestras para las propiedades del punto de ablandamiento, 8 muestras para determinar el punto de inflamación, 8 muestras para determinar punto de combustión, 8 muestras para determinar el promedio del índice de penetración respecto a los 8 muestra del promedio del punto de ablandamiento, aplicando las normas MTC y ASTM. Los resultados obtenidos en los ensayos permiten definir la proporción más adecuada del modificante en la mezcla asfalto-neumáticos molidos.

Figura 1

Tamizado y pesado de partículas de Neumáticos molidos



Nota. Etapa de preparación y análisis granulométrico (tamizado) de muestras en laboratorio.

Ámbito o lugar de estudio

Esta investigación fue desarrollada en la región de Puno a una altitud de 3812 msnm., (orillas del Lago Titicaca), caracterizada por una marcada variabilidad climática en las distintas estaciones a lo largo del año. Durante los periodos de otoño e invierno, se observa un descenso de la temperatura durante la noche hasta menos -5 °C con un clima seco y frígidos; mientras que en primavera y verano las temperaturas superan los 18 °C durante el día, acompañadas de precipitaciones pluviales. Estas condiciones hacen la región se convierta en un entorno con características térmicas particulares.

Los ensayos de caracterización de materiales fueron realizados en la provincia de San Román-Juliaca, en el laboratorio de Mecánica de Suelos, Concreto y Pavimento de la empresa GEOTECNIA PUNO & Ingenieros Consultores, en cambio los ensayos de las propiedades físicas del cemento asfaltico se llevaron a cabo en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Pavimentos de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Descripción de métodos

Periodo de estudio

Los ensayos de los agregados y diseño de Marshall se realizaron durante los meses de setiembre y octubre del 2023, los ensayos de las propiedades del asfalto fue desarrollado entre los meses de abril a junio del 2024. La estación del año no constituyó una variable experimental del estudio, debido a que las variables evaluadas fueron el porcentaje de neumático molido y la temperatura de digestión del cemento asfáltico, mientras que los ensayos se desarrollaron en laboratorio. Por tanto, las diferencias climáticas propias de los periodos de ejecución no fueron incorporadas como factor de análisis.

Materiales, instrumentos y equipos

Los materiales pétreos para el diseño de mezcla asfáltica procedieron de la cantera del río Cabanillas, y corresponde a agregados de origen volcánico andesítico. Estos materiales fueron empleados para determinar mediante

la metodología Marshall, el contenido óptimo de cemento asfáltico. El cemento asfaltico PEN 85/100 adquirido de la empresa Asfaltos K&C. constituyó el ligante base sobre el cual se evaluó el efecto del modificante. Los neumáticos molidos, proporcionados por Líder Gras Perú, se utilizaron como material modificante en tamaños menores a 1,15 mm y en proporciones de 5 %, 10 % y 15 %.

Entre los instrumentos y equipos de medición que se utilizaron para la preparación, control y caracterización de las muestras, se tiene todos aquellos medidores como; balanzas digitales, termómetro digital, horno, tamices, bandejas, probetas cilíndricas, pisón compactador, conos de arena, y otros instrumentos de medición. Asimismo, se emplearon los equipos correspondientes a los ensayos Marshall, penetración, punto de ablandamiento, punto de inflamación y punto de combustión, además de baño maría y formatos de registro de laboratorio. Estos materiales, instrumentos y equipos permitieron preparar las mezclas, controlar las condiciones de temperatura y tiempo de digestión, y obtener los valores experimentales de las propiedades físicas del cemento asfáltico modificado.

Variables analizadas

La variable dependiente fueron las propiedades físicas del cemento asfaltico PEN 85/100 modificado. evaluadas mediante penetración, punto de ablandamiento, punto de inflamación, punto de combustión e índice de penetración. Esta variable permite determinar el efecto producido por la modificación del ligante y, por tanto, responde directamente al objetivo de evaluar los cambios en las propiedades físicas del cemento asfáltico.

Las variables independientes corresponden al porcentaje de neumático molido y a la temperatura de digestión. El porcentaje de neumático molido representa el factor de modificación aplicado al ligante, con niveles de 0 %, 5 %, 10 % y 15 %, mientras que la temperatura de digestión representa el segundo factor experimental, con niveles de 160 °C y 180 °C. Ambas variables permiten establecer si los cambios observados en las propiedades físicas del cemento asfáltico se asocian con el nivel de incorporación del modificante, con la temperatura de digestión o con la interacción entre ambos factores. Esta estructura es consistente con estudios que han evaluado conjuntamente el volumen de caucho y la temperatura de mezcla como variables de la modificación del asfalto (Durant, 2017).

Prueba estadística aplicada

El análisis ANOVA evidenció que los parámetros de penetración y ablandamiento presentan diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el asfalto convencional y las mezclas modificadas con neumáticos molidos, tanto a 160 °C como a 180 °C de temperatura de digestión. Las mezclas con 0% y 5% mostraron las mayores medias en penetración, mientras que con 15 % se obtuvo la más baja. En el punto de ablandamiento, el incremento del modificante y la temperatura generaron un efecto positivo, ya que a mayores niveles se requirió más calor para el paso de fase semisólida a fluida, mejorando así la resistencia a la deformación frente a la muestra de control. Análisis que fueron realizadas mediante el programa o software de Minitab.

Resultados

Caracterización detallada del cemento asfáltico modificado

Para la mezcla asfáltica de 1200 g, el 6,40 % del contenido óptimo de cemento asfáltico resulta 76,80 g, mientras que los neumáticos molidos en proporciones del 5 %, 10 % y 15 % representan (3,84 g) (7,68 g) y (11,52 g), respectivamente con relación al peso del óptimo obtenido. Se analizaron los ensayos para evaluar los efectos del NM en el ligante asfaltico a la temperatura de digestión de 160 °C y 180 °C durante dos horas, afín de determinar su grado de desempeño según los objetivos planteados. Para realizar los ensayos, el equipo debe contara con todos sus partes y en buen estado y limpio (Guevara y Ruiz, 2017).

Los resultados de la penetración, a la temperatura de digestión de 160 °C/2horas, muestran que, a mayor dotación de los neumáticos molidos en el asfalto, disminuye este parámetro, presentándose

de forma similar para 180 °C de digestión. Khaled et al. (2020), reportaron que la adición de caucho reciclado mejora la resistencia al daño por humedad, aumenta el módulo resiliente y reduce la deformación permanente al efecto de la carga del tráfico. El punto de inflamación a la temperatura de digestión de 160°C y 180°C/2horas, muestran un descenso cuando se proporciona mayor porcentaje del neumático molido, ocurriendo lo mismo para el punto de combustión. En cambio, el punto de ablandamiento mejora su temperatura de reblandecimiento (Tabla 1).

Tabla 1

Ensayos del asfalto modificado para una temperatura de digestión entre (160°C y 180°C/2horas).

Ensayo de Penetración a 25 ºC, 100 g, 5 s, 0,1mm

Muestra	% de neumático molido	TD 160°C/2horas		TD 180°C/2horas	
		Promedio	% de Variación	Promedio	% de Variación
M-1	0 %	114	0,0 %	102	0,0 %
M-2	5 %	80	-29,7 %	77	-24,5 %
M-3	10 %	60	-47,2 %	60	-41,3 %
M-4	15 %	51	-55,5 %	50	-50,7 %
Punto de inflamación (°C)					
M-1	0 %	228	0,0 %	238	0,0 %
M-2	5 %	220	-3,5 %	218	-8,4 %
M-3	10 %	223	-2,2 %	212	-10,9 %
M-4	15 %	213	-6,6 %	210	-11,8 %
Punto de combustión (°C)					
M-1	0 %	245	0,0 %	252	0,0 %
M-2	5 %	247	0,8 %	245	-2,8 %
M-3	10 %	242	-1,2 %	241	-4,4 %
M-4	15 %	242	-1,2 %	248	-1,6 %
Punto de ablandamiento (°C)					
M-1	0 %	45,1	0,0 %	46,1	0,0 %
M-2	5 %	48,2	7,0 %	49,1	6,5 %
M-3	10 %	49,8	10,5 %	52,1	13,0 %
M-4	15 %	51,3	13,9 %	53,1	15,2 %

Nota. Variación de propiedades físico-químicas con incorporación de neumático molido en diferentes porcentajes (0 %, 5 %, 10 %, 15 %).

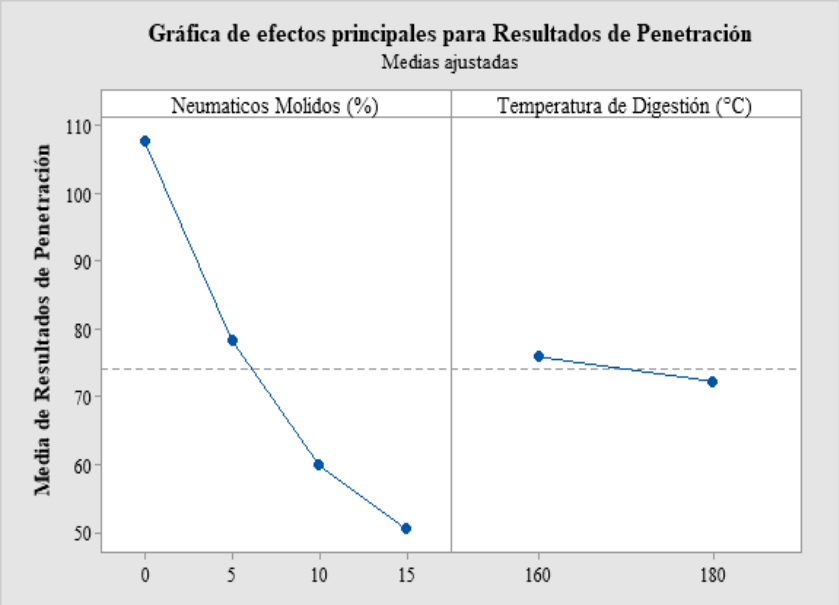
El índice de penetración del asfalto, propuesto por Van Doormal y Pfeiffer, se determina a partir de los valores de penetración y del punto de ablandamiento frente a variaciones de temperatura. Según Montejo (1998), las pruebas estándar permiten evaluar la susceptibilidad térmica del ligante modificado con polímero.

Los resultados obtenidos para 160 °C de digestión muestran que el asfalto modificado con 5 %, 10 % y 15 % de aditivo presenta un índice de penetración negativo (-0,5; -0,8 y -0,9, respectivamente) y a 180 °C, los valores similarmente resultan negativos (-0,4; -0,2 y -0,4) lo que evidencia una alta susceptibilidad térmica, además se mantienen dentro del rango de referencia establecido como parámetro de control (+1 a -1). Enfocado en el segundo objetivo donde el porcentaje apropiado de neumáticos molidos mejora los efectos de resistencia y elasticidad en razón del asfalto convencional. El incremento en el porcentaje de neumáticos molidos provoca una disminución

en los valores de penetración ajustados, lo que incide directamente en la variable de respuesta. En contraste, la temperatura de digestión ejerce una influencia limitada, con un impacto reducido a 180 °C (Figura 2).

Figura 2

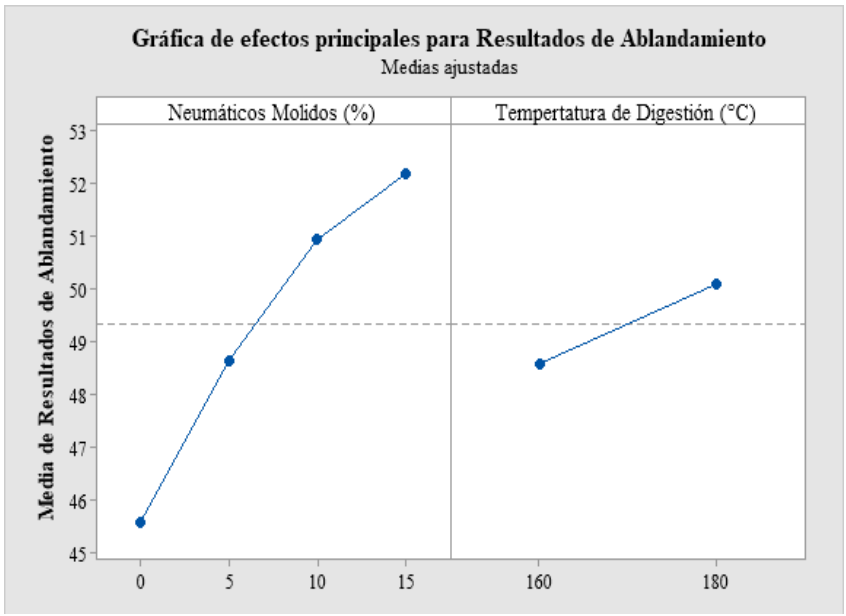
Efectos principales de interacción para resultados de penetración (T°D 160 °C y 180 °C).



Los resultados del punto de ablandamiento evidencian que, a medida que aumenta la proporción de modificante, el asfalto adquiere mayor consistencia con mejor respuesta, lo que refleja una sensibilidad más marcada frente a variaciones de temperatura. La mayor incidencia se observa a 180 °C (Figura 3).

Figura 3

Efectos principales de interacción para resultados de punto de ablandamiento.



Para el tercer objetivo, se compararon las propiedades físicas del cemento asfáltico modificado mediante el ANOVA y la prueba de Tukey, permitiendo evaluar la interacción entre factores y su influencia en las variables de respuesta, tomando en cuenta la misma importancia para cada factor. Es así que, el porcentaje de neumáticos molidos (factor A) como la temperatura de digestión (factor B) y la interacción de ambos, denota influencia en la penetración del asfalto modificado (Tabla 2).

Tabla 2
Análisis de varianza (ANOVA).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor Fo	Valor p
Modelo	7	11702,6	1671,80	1116,08	0,000
Lineal	4	11570,8	2892,71	1931,15	0,000
A: Neumáticos Molidos (%)	3	11492,7	3830,90	2557,49	0,000
B: Temperatura digestión (°C)	1	78,1	78,12	52,15	0,000
AB: Interacciones de 2 términos	3	131,8	43,93	29,32	0,000
NM (%) * T°D (°C)	3	131,8	43,93	29,32	0,000
Error	16	24,0	1,50		
Total	23	11726,6			

Nota. modelo estadísticamente válido y altamente significativo de ($p < 0,05$).

La prueba comparativa de Tukey aplicada a pares de datos agrupados, con cuatro tratamientos para diferentes porcentajes de neumáticos molidos y seis repeticiones; muestran los resultados una disminución progresiva de las medias conforme se incrementa el contenido de modificante, lo que permite establecer agrupaciones estadísticas diferenciadas: 0 % (A), 5 % (B), 10 % (C) y 15 % (D), correspondiendo este último al valor medio más bajo (Tabla 3).

Tabla 3
Prueba de significancia para medias agrupadas utilizando el método de Tukey ($p < 0,05$) y una confianza de 95 %.

Neumáticos Molidos (%)	N	Media	Agrupación
0	6	107,78	A
5	6	78,383	B
10	6	59,900	C
15	6	50,417	D

Nota. A medida que aumenta el porcentaje de neumático molido, la media de la variable de respuesta disminuye.

Los resultados del ANOVA aplicado al punto de ablandamiento evidencian diferencias estadísticamente significativas, con un p-valor < 0,05. Esto confirma que tanto el porcentaje de neumáticos molidos, como la temperatura de digestión y la interacción entre ambos factores, ejercen una influencia relevante sobre el comportamiento del asfalto modificado. Asimismo, el método de comparación de medias de Tukey permitió identificar las diferencias entre tratamientos (Tabla 4).

Tabla 4
Resumen de la prueba de significancia para medias de punto de ablandamiento utilizando el método de Tukey ($p < 0,05$) y una confianza de 95 %.

Neumáticos Molidos (%)	N	Media	Agrupación
0	6	107,78	A
5	6	78,383	B
10	6	59,900	C
15	6	50,417	D

Nota. Comparación de medias con prueba de agrupación.

Discusión

Los resultados del ANOVA en la Tabla 2 expone un p-valor < 0,05 lo cual confirma que la adición de neumáticos molidos afecta el parámetro de la penetración, mejorando la resistencia y flexibilidad del asfalto, mientras que la mayor temperatura 180 °C, favorece una mejor incorporación del neumático. Estudios previos (Fonseca et al., 2014; Cortez, 2022; Goicochea, 2019), respaldan estos hallazgos, destacando que el caucho reciclado incrementa la rigidez, elasticidad y resistencia a deformaciones. Investigaciones adicionales (Andrade y Murcia, 2013; Chavarría y Marreros, 2022; Múnera y Ossa, 2014), refuerzan que el neumático molido modifica significativamente el asfalto, optimizando su desempeño en pavimentos y reduciendo deformaciones bajo carga vehicular.

El punto de ablandamiento del asfalto modificado se incrementa significativamente a 180 °C debido a la naturaleza elastomérico del neumático, lo que mejora su estabilidad térmica. Con mayores porcentajes de adición (10 % y 15 %), el material se ablanda más lentamente, aumentando su resistencia frente a la temperatura y lo que hace que al ser usada en capas del pavimento refleje su importancia con menor grado de deformación. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas: Durant (2017), destacó que un mayor punto de ablandamiento mejora resistencia y rigidez del asfalto; (Shu y Huang, 2014; Wang et al., 2022), observaron disminución significativa en el punto de ablandamiento a medida que se incrementaba el porcentaje de neumático a diferentes niveles de adición. Aziz (2016) y Maguiña (2019), confirmaron su mejor desempeño a altas temperaturas; Herencia (2002), destacó su afinidad y resistencia, mientras que Goicochea (2019), señaló beneficios como mayor cohesión, elasticidad y menor susceptibilidad térmica. No obstante Abdulrahman et al. (2020), enfatizaron una mejora de la resistencia a la fatiga, la estabilidad térmica y la humedad del pavimento, reduciendo el ahuellamiento y el agrietamiento a bajas temperaturas. Por consiguiente, la incorporación de neumáticos molidos mejora la viscoelasticidad, rigidez, resistencia y comportamiento del asfalto contribuyendo a mejorar su desempeño estructural frente a cargas y cambios de temperatura, con beneficios económicos y ambientales.

Al aumentar el porcentaje de neumático molido, el punto de inflamación del asfalto disminuye respecto al diseño patrón, mientras que el punto de combustión se incrementa al elevar la temperatura de digestión a 180 °C, debido a una mayor integración del caucho en la matriz asfáltica. Según Estrada (2017) y Maila (2013), estos parámetros son fundamentales para determinar la temperatura a la que el asfalto puede inflamarse y generar riesgos de incendio. En concordancia con otros estudios, este ensayo resulta clave para establecer condiciones de temperaturas seguras de aplicación, contribuyendo a minimizar riesgos durante la construcción vial con asfaltos modificados.

Los resultados del Índice de Penetración (IP) muestran que la adición de neumáticos molidos influye en su valor, manteniéndolo en el rango de -1 a +1, lo que refleja propiedades reológicas y de flujo intermedias. A 160 °C se obtuvo un IP de -0,9 (15 %) y -0,5 (5 %), mientras que a 180 °C los valores fueron -0,4 (5 % y 15 %) y -0,2 (10%),. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Goicochea (2019) y Maila (2013), confirmando la validez del comportamiento observado. Dado que los asfaltos adecuados para pavimentos presentan un IP entre -1 y +0,5, los valores obtenidos sugieren que el asfalto modificado es apto para aplicaciones en infraestructura vial.

Conclusiones

La incorporación de neumáticos molidos modifica las propiedades físicas del cemento asfáltico PEN 85/100 bajo las condiciones experimentales evaluadas, evidenciándose cambios en su consistencia y comportamiento debió a que el efecto depende del porcentaje de modificante y de la temperatura de digestión.

El incremento del porcentaje de neumático molido produjo una disminución de la penetración respecto al asfalto convencional, mientras que el punto de ablandamiento aumentó. A mayor temperatura de digestión, las mezclas entre 5 % y 10 % de neumáticos molidos presentaron mayor flexibilidad y resistencia a la penetración, mejorando su viscoelasticidad al ablandarse a elevadas temperaturas, con mejor respuesta de recuperación elástica y una menor susceptibilidad a cambios térmicos. En particular, el tratamiento

con 15 % de neumático molido alcanzó los valores más bajos de penetración y los mayores valores de punto de ablandamiento dentro de los tratamientos estudiados, evidenciando una modificación del comportamiento frente a la temperatura.

El porcentaje de neumático molido, la temperatura de digestión y la interacción entre ambos factores presentaron efectos estadísticamente significativos sobre las propiedades evaluadas. El análisis de ANOVA confirmó que su interacción influye significativamente en el comportamiento del ligante ($p < 0,05$).

Los resultados obtenidos respaldan el aprovechamiento de neumáticos molidos como material modificante del cemento asfáltico PEN 85/100 y favorecer el aprovechamiento de neumáticos en desuso, especialmente por su capacidad de alterar propiedades físicas del ligante asociadas con la consistencia y la respuesta térmica. No obstante, la selección de una dosificación para aplicaciones viales requiere considerar las condiciones de servicio y realizar ensayos complementarios de desempeño.

Agradecimientos

Mi agradecimiento al equipo técnico del laboratorio de Mecánica de Suelos y Pavimento de la UNSA, en especial al Ing. Juan Carlos Zevallos A. por su grandioso apoyo desinteresado.

Referencias

Abdulrahman, S., Hainin, M. R., Mohd Satar, M. K. I., Hassan, N. A., & Al Saffar, Z. H. (2020). Review on the potentials of natural rubber in bitumen modification. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 476(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012067

Aguirre, R. A., Calderón, I. M., & Salazar, I. I. (2009). Evaluación de la incidencia de la temperatura en el desempeño de las carpetas asfálticas en caliente en El Salvador. https://repositorio.ues.edu.sv/items/78f7398b-f0cc-457e-89b3-adbd8dc90416/full

Andrade, W. J., & Murcia, D. A. (2013). Efecto de la arcilla calcinada en un asfalto 80 /100 modificado con grano de caucho reciclado. Instname:Universidad Piloto de Colombia. http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/1444

Aziz, M. M. A. , A. Z. A. , K. K. A. B. & J. H. B. (2016). A short review on using crumb rubber as modification of bitumen binder. https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/9479/5627

Bressi, S., Fiorentini, N., Huang, J., & Losa, M. (2019). Crumb rubber modifier in road asphalt pavements: State of the art and statistics. Coatings, 9(6). https://doi.org/10.3390/COATINGS9060384

Chavarría, T., & Marreros, J. M. (2022). Análisis del punto de ablandamiento y el grado de penetración del asfalto modificado con polímero SBS para pavimentos flexibles, Mundo 2021. https://doi.org/https://orcid.org/0000-0003-3392-9580

Cortez, F. S. (2022). Reologia del Betun Asfaltico con Incorporacion de Polvo de Neumatico en las Propiedades Fisico- Quimicas de un Ligante Modificado. Universidad Peruana Los Andes. http://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/4505

Durant, J. G. (2017). Relleno elastométrico para pavimentos asfálticos en climas de altura mediante el reciclado de neumáticos. Universidad Nacional Del Altiplano. https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/9554

Estrada, V. R. (2017). Estudio y análisis de desempeño de mezcla asfáltica convencional PEN 85/100 plus y mezcla asfáltica modificada con polímero tipo SBS PG 70-28. https://repositorio.ues.edu.sv/items/78f7398b

Figueroa, A. S., Fonseca, E. B., & Reyes, F. A. (2009). Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. 13(1), 45–70. http://

www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262009000100003

Fonseca, E. B., Figueroa, A. S., Paola, C., & Prieto, M. R. (2014). Contrastación entre el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada empleando dos métodos de mezclado. https://www.redalyc.org/pdf/955/95501008.pdf

Goicochea, F. (2019). Estudio de un asfalto con adición de caucho de neumático reciclado como polímero base, Chachapoyas – Amazonas – 2017. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza - UNTRM. https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/1627

Guerrero, N. H., & Chang, A. C. M. (2012). La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el perú. Carreteras, 4(183), 75–82. https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v2i11.402

Guerrero, N. H., & Chang, C. M. (2015). La deformación permanente en las mezclas asfálticas y el consecuente deterioro de los pavimentos asfálticos en el Perú. Perfiles de Ingeniería, 11(11), 22–31. https://doi.org/10.31381

Guevara, J. J., & Ruiz, R. C. (2017). Análisis comparativo de áridos del sector El Milagro estabilizados con asfalto de caucho reciclado y asfalto convencional para capas bases. https://hdl.handle.net/20.500.12759/3564

Herencia, W. L. (2002). Modificación de asfaltos con polímeros. Universidad Nacional de Ingeniería. https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/8324

INEI. (2024). Flujo vehicular por unidades de peaje. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/7118117

Khaled, T. T., Aboud, G. M., & Al-Hamd, R. K. S. (2020). Study the effect of adding crumb rubber on the performance of hot mix asphalt. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 737(1), 012129. https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012129

Maguiña, W. T. (2019). Caucho reciclado de llantas en la mezcla de Asfalto a Compresión para mejorar las Propiedades Mecánicas. Universidad Ricardo Palma. https://hdl.handle.net/20.500.14138/2919

Maila, M. E. (2013). Comportamiento de una mezcla asfáltica modificada con polímero etileno vinil acetato (EVA). Quito: UCE. http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/742

Montejo, A. (1998). Ingeniería de pavimentos. Ingeniería de Pavimentos Para Carreteras, 2, 39–70. https://es.slideshare.net/slideshow/ingenieria-de-pavimentos/35870317

Morea, F. (2011). Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. https://doi.org/10.35537/10915/1457

Múnera, J. C., & Ossa, E. A. (2014). Estudio de mezclas binarias Asfalto - Polímero. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 70, 18–33. http://www.scielo.org.co/scielo.php

Ospino, R. H., Tinoco, C. D., & Crespo, D. A. (2019). Análisis de daño por causa del envejecimiento y auscultación en estructuras de pavimentos flexibles en las ciudades de Santa marta y Barranquilla entre los años 2012-2017. Universidad Cooperativa de Colombia, Facultad de Ingenierías, Ingeniería Civil, Santa Marta. https://hdl.handle.net/20.500.12494/15686

Ramírez, M. A. (2016). Evaluación de compatibilidad de mezclas asfálticas, utilizando agregados de la cantera San Martin con Cemento Asfaltico Pen60/70 y Emulsión Asfáltica CSS-1Hp. Vol. 2 Núm, 142. https://doi.org/https://doi.org/10.18050/ingnosis.v2i2.2013

Sánchez, H. M. (2021). Mejoras mecánicas de la mezcla asfáltica con la incorporación de caucho como parte del agregado fino para la ciudad de Piura. https://hdl.handle.net/11042/4871

Shu, X., & Huang, B. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. Construction and Building Materials, 67(PART B), 217–224. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.11.027

Valdés, G., Pérez-Jiménez, F., & Martínez, A. (2012). Influencia de la temperatura y tipo de mezcla asfáltica en el comportamiento a fatiga de los pavimentos flexibles. Revista de La Construccion, 11(1), 88–101. https://doi.org/10.4067/S0718-915X2012000100009

Vargas, X., & Reyes, F. (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. 30(3), 27–44. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092010000300003

Vera, C. A. (2014). Análisis del comportamiento reológico y caracterización de asfalto modificado con llanta triturada (caucho) en relación al asfalto convencional, como alternativa de mitigación de contaminación ambiental por llantas en desuso. https://es.scribd.com/document/280012223/Asfalto-Modificado-con-llanta-resiclada-Tesis-de-Maestria

Wang, Q., Yu, R., Fu, G., Chen, X., Cai, L., Xiao, Y., Zhang, X., & Zhu, X. (2022). The short-term aging effect on the interface and surface wetting behavior of modified asphalt mixtures. Materials Research Express, 9(8). https://doi.org/10.1088/2053-1591/AC8AE7

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY) International License https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/