



El uso de polímeros como modificante en la mezcla de pavimentos asfálticos en zonas tropicales, Chanchamayo, Junín

The use of polymers as modifiers in asphalt pavement mixes in tropical areas, Chanchamayo, Junín

O uso de polímeros como modificadores na mistura de pavimentos asfálticos em áreas tropicais,
Chanchamayo, Junín

ARTÍCULO ORIGINAL

Marcos Rupay

mrupay@uniscjsa.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-7891-1838>

Universidad Nacional Intercultural de
la Selva Central Juan Santos
Atahualpa, Perú

Regner Parra

rparra@uniscjsa.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0002-3564-4637>

Universidad Nacional Intercultural de
la Selva Central Juan Santos
Atahualpa, Perú

Renzo Torres

73104402@uniscjsa.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0001-5074-5831>

Universidad Nacional Intercultural de
la Selva Central Juan Santos
Atahualpa, Perú

Jeancarlo Quezada

60099408@uniscjsa.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0008-3098-7199>

Universidad Nacional Intercultural de
la Selva Central Juan Santos
Atahualpa, Perú

Kofi Chavez

72102657@uniscjsa.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0003-5103-872X>

Universidad Nacional Intercultural de
la Selva Central Juan Santos
Atahualpa, Perú

Elvis Ponce

75059467@uniscjsa.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0002-3547-9800>

Universidad Nacional Intercultural de
la Selva Central Juan Santos
Atahualpa, Perú

Recibido 13 de Abril 2024 | Arbitrado y aceptado 20 de Junio 2024 | Publicado el 12 de Diciembre 2024

RESUMEN

Este artículo de revisión muestra varias secciones de betún, mezclas asfálticas, polímeros y residuos plásticos en la ingeniería de pavimentos. El artículo revisa y evalúa la influencia del uso de polímeros reciclados como modificadores de asfalto, analizando sus características como el punto de fusión, las condiciones de mezcla y las cantidades máximas de polímero añadido. Además, se estudia su impacto sobre el comportamiento mecánico de los ligantes asfálticos, así como su estabilidad con y sin el uso de aditivos. Los resultados indican que el rendimiento del ligante modificado depende principalmente del tipo de polímero utilizado y de las condiciones de mezcla, más que del tipo de betún base llegando a una conclusión del polímero más efectivo en zonas tropicales.

Palabras clave: Polímeros; Pavimento Asfáltico; Materiales reciclados; Sostenibilidad

ABSTRACT

This review article presents various sections on bitumen, asphalt mixtures, polymers and plastic waste in pavement engineering. The article reviews and evaluates the influence of using recycled polymers as asphalt modifiers, analyzing their characteristics such as melting point, mixing conditions and maximum amounts of polymer added. Furthermore, their impact on the mechanical behavior of asphalt binders is studied, as well as their stability with and without the use of additives. The results indicate that the performance of the modified binder depends mainly on the type of polymer used and the mixing conditions, rather than on the type of base bitumen, leading to a conclusion of the most effective polymer in tropical areas.

Keywords: Polymers; Asphalt Pavement; Recycled Materials; Sustainability

RESUMO

Este artigo de revisão mostra diversas seções de betume, misturas asfálticas, polímeros e resíduos plásticos na engenharia de pavimentos. O artigo revisa e avalia a influência do uso de polímeros reciclados como modificadores asfálticos, analisando suas características como ponto de fusão, condições de mistura e quantidades máximas de polímero adicionado. Além disso, é estudado seu impacto no comportamento mecânico de ligantes asfálticos, bem como sua estabilidade com e sem uso de aditivos. Os resultados indicam que o desempenho do ligante modificado depende principalmente do tipo de polímero utilizado e das condições de mistura, e não do tipo de betume base, chegando à conclusão do polímero mais eficaz em áreas tropicais.

Palavras-chave: Polímeros; Pavimento Asfáltico; Materiais reciclados; Sustentabilidade

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el aumento del volumen de tráfico y de las cargas, junto con el gradiente térmico extremo experimentado en algunos lugares, ha dado lugar a un deterioro prematuro de los pavimentos (Gogoi, R,2021), Además del crecimiento constante de las redes viales en todo el mundo ha sido fundamental para el desarrollo económico y social. Las carreteras modernas son la columna vertebral de las sociedades urbanas e interurbanas, conectando comunidades, facilitando el comercio y mejorando la movilidad. Sin embargo, esta expansión ha traído consigo desafíos significativos, entre los que se destacan el agotamiento de recursos naturales, las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂) y la acumulación de residuos industriales.

El asfalto, uno de los materiales más utilizados en pavimentos, depende en gran medida de agregados naturales y asfaltos derivados del petróleo. Aunque su rendimiento ha sido probado durante décadas, el impacto ambiental de su producción y uso sigue siendo una preocupación importante. En respuesta, los investigadores han comenzado a explorar alternativas que puedan reducir el impacto ambiental de los pavimentos sin comprometer su calidad. Entre estas soluciones, destaca el uso de residuos de polímeros para modificar pavimentos de asfalto como un nuevo enfoque.

Este enfoque tiene como objetivo mejorar el rendimiento del pavimento y abordar las preocupaciones ambientales de los residuos de polímeros. Los investigadores han demostrado que la incorporación de residuos poliméricos en mezclas de asfalto puede conducir a mejoras de rendimiento en pavimentos de asfalto.

En todo el mundo se produce una cantidad significativa de materiales de desecho, lo que genera efectos ambientales adversos, como la contaminación del suelo, el aire y el agua. Estos desafíos ambientales tienen implicaciones para las consideraciones económicas, la salud humana y la conservación de la energía. Además, la acumulación de materiales de desecho plantea preocupaciones con respecto a la ocupación de áreas extensas. En consecuencia, se han llevado a cabo investigaciones adicionales sobre la posible reutilización de materiales de desecho dentro de la industria del pavimento

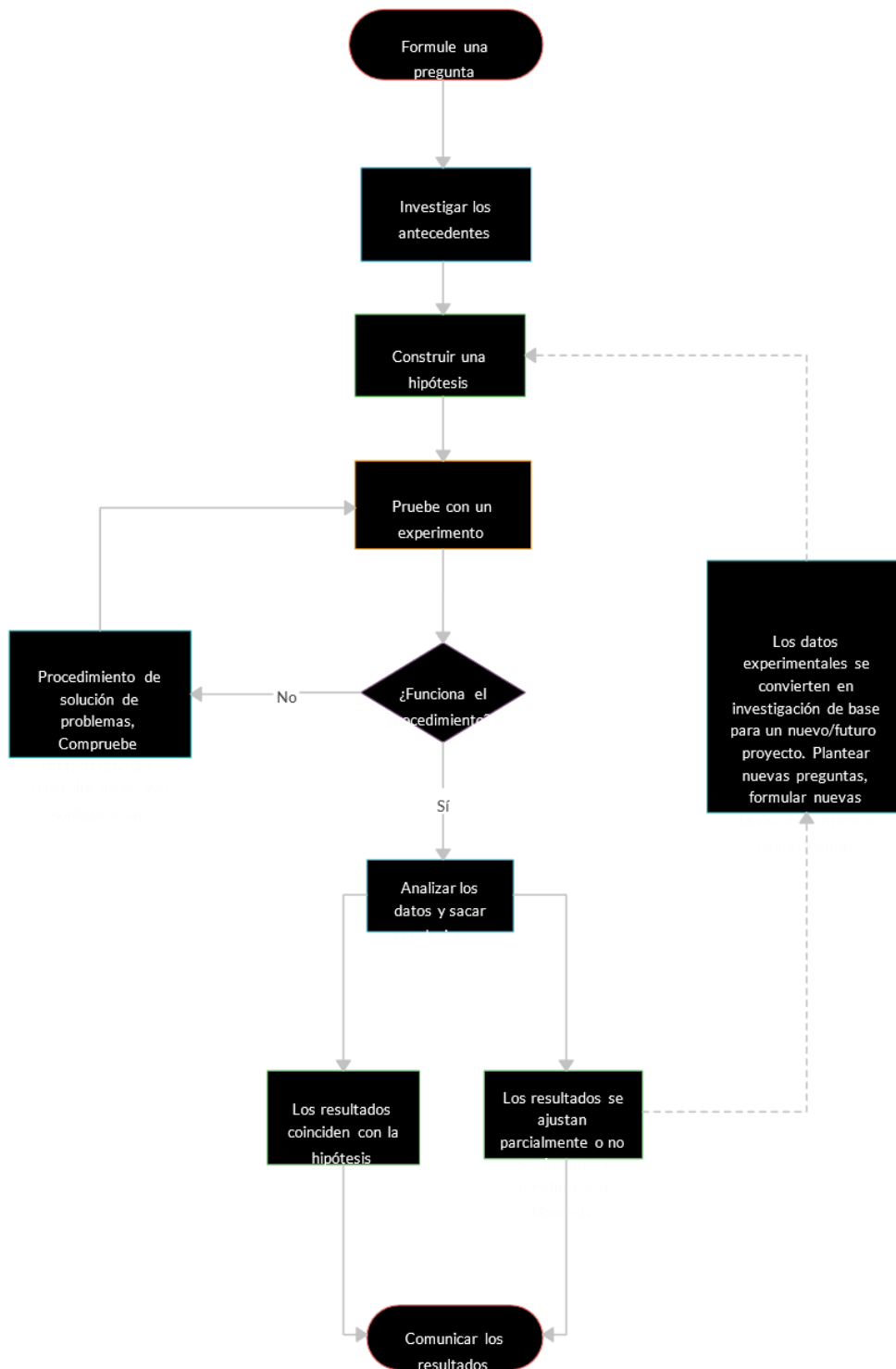
MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar la revisión se emplearon diferentes bases de datos (Web of Science, SCOPUS, Google Scholar, MDPI, ScienceDirect, Redalyc, etc.), haciendo uso de las diferentes tipologías de polímeros, así como de los términos “bitumen”, “asfalto”, “reciclado”, “recuperado” o “modificado”, entre otros, como palabras clave principales de búsqueda. Se hizo distinción el momento en el que se publicaron los artículos o la publicación científica (tesis, ponencias, etc.), también se tomaron precauciones para incluir los trabajos más referenciados y las últimas tendencias en el campo, de modo de reflejar adecuadamente el estado del arte actual. Por tanto, el artículo analiza y compara las principales propiedades de cada polímero, su punto de fusión, proceso de incorporación, cantidad añadida, así como su efecto sobre el comportamiento mecánico y la estabilidad de los ligantes asfálticos. Esto permite proporcionar una visión práctica de los requisitos, limitaciones y beneficios de cada polímero para facilitar su selección y aplicación.

Esta revisión integral tiene como objetivo proporcionar a los investigadores, ingenieros y profesionales en el campo de los materiales y la construcción de pavimentos una comprensión integral de la aplicación de polímeros de desecho en pavimentos de asfalto. Al examinar el estado actual del conocimiento y destacar las lagunas de investigación, esta revisión contribuye al desarrollo de prácticas de construcción de carreteras respetuosas con el medio ambiente y sostenibles que aborden los desafíos asociados con la eliminación de polímeros de desecho. El estudio concluye con recomendaciones y sugerencias para futuras investigaciones.

Figura 1

Diagrama de aaaaaaaaaa



¿Qué son los polímeros y por qué son relevantes para mitigar el impacto ambiental?

Los Polímeros como Ciencia independiente se desarrollan desde la tercera década del siglo XX. Es una Ciencia frontera con campos como el biológico. Las macromoléculas están presentes en todos los organismos vivos, vegetales y animales. En la actualidad, los Polímeros constituyen también las sustancias químicas que forman los materiales plásticos de tan amplia aplicación (G. Odian, 2004). Los materiales plásticos, es decir, los polímeros, se han vuelto extremadamente frecuentes en nuestra vida diaria y se utilizan en diversas industrias. Sirven como materias primas esenciales para producir una amplia gama de artículos, incluidos vasos de plástico, botellas, artículos para el hogar, contenedores de almacenamiento y tuberías (Zharaa et al, 2023) La construcción continua de pavimento asfáltico requiere una cantidad significativa de materiales, tecnología y combustible, lo que genera importantes emisiones de CO₂. Dada la necesidad crítica de reducir las emisiones de CO₂, es fundamental disminuir el nivel de emisiones de carbono del pavimento asfáltico e implementar materiales y tecnologías de reducción de emisiones efectivos, ya que esto ayudará a lograr los objetivos de desarrollo sostenible al tiempo que reduce el impacto ecológico de la construcción y el mantenimiento del pavimento asfáltico.

Según un informe de 2017 de la Federación Internacional de Carreteras y World Road Statistics, las redes de carreteras del mundo abarcan una longitud total de 32 millones de kilómetros (Mirhashem et al, 2022), por otro lado, predijo que se construirían entre 3 y 4,7 millones de kilómetros de nuevas carreteras para 2050.

Las prácticas de pavimentación asfáltica con uso de polímeros son importantes por razones como:

- Protección del medio ambiente: el uso de materiales y tecnologías de desechos reciclados en pavimentos de asfalto puede minimizar significativamente los efectos ambientales negativos de la construcción y el mantenimiento de carreteras, como las emisiones de gases de efecto invernadero y el agotamiento de los recursos basados en combustibles fósiles. También fomenta la gestión de residuos y reduce la necesidad de vertederos (AH. Birniwa et al, 2022) (H. Assaf, 2022).

- **Rentabilidad:** Las prácticas de pavimentación asfáltica sostenible pueden ahorrar dinero a largo plazo al reducir la necesidad de reparaciones y reemplazos costosos durante la vida útil del pavimento. El uso de materiales reciclados en pavimento asfáltico, por ejemplo, minimiza la necesidad de materiales vírgenes, lo que puede reducir los costos de producción (H. Assaf, 2022) (X. Ai et al, 2023).
- **Mejora del rendimiento:** las prácticas de pavimentación asfáltica sostenible pueden aumentar la durabilidad y el rendimiento, lo que reduce la necesidad de mantenimiento y reparación. Por ejemplo, la tecnología de asfalto mezclado en caliente puede mejorar la compactación del pavimento asfáltico, lo que conduce a un mejor rendimiento y durabilidad (A. Milad et al, 2022) (MR. Gruber & B. Hofko, 2023)
- **Responsabilidad social:** Las prácticas de pavimentación asfáltica sostenible pueden fomentar la responsabilidad social al minimizar las consecuencias perjudiciales de la construcción de carreteras.

Este documento tiene como objetivo analizar en detalle los procedimientos, resultados y aplicaciones prácticas del uso de polímeros en mezclas asfálticas, basándose en investigaciones recientes. Se abordarán las mejoras en propiedades mecánicas, los beneficios ambientales y las limitaciones observadas.

Tabla 1

“Tabla de revisión técnicas por jerarquía”

| | Autores | Título | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 |
|---|-------------------------------------|--|----|----|----|----|
| 1 | Mostafi Emtiaz et al, 2023 | " Revisión exhaustiva de la literatura sobre el ligante asfáltico modificado con polímeros " | | x | | |
| 2 | Rafiq Kakar, M et al, 2022 | " Rendimiento a alta y baja temperatura de mezclas asfálticas de bajo ruido modificadas con plástico de desecho de polietileno " | | x | | |
| 3 | Jaime R. Ramírez Vargas et al, 2024 | " Una revisión de los agregados para pavimentos sostenibles " | | | x | |
| 4 | Ali Behnood, 2019 | " Morfología, reología y | | | x | |

| | | | | | | |
|-------|---|--|---|---|---|---|
| | | propiedades físicas de ligantes asfálticos modificados con polímeros " | | | | |
| 5 | Abdalrhman Milad et al, 2022 | " Utilización de geopolímeros a base de residuos en la modificación y construcción de pavimentos asfálticos: una revisión " | | x | | |
| 6 | Sabzoi Nizamuddin, Yeong Jia Boom y Filippo Giustozzi, 2021 | " Polímeros sostenibles a partir de residuos plásticos reciclados y sus homólogos vírgenes como modificadores del betún: una revisión exhaustiva " | | | x | |
| 7 | Luzana Brasileiro et al, 2019 | " Polímeros recuperados como modificadores de aglomerantes asfálticos para carreteras más sostenibles: una revisión " | | | x | |
| 8 | Zahraa Jwaida et al, 2023 | " El uso de polímeros de desecho en mezclas asfálticas: análisis bibliométrico y revisión sistemática " | | | | x |
| 9 | Nuha Mashaan, 2022 | " Caracterización ingenieril de materiales de capas de rodadura modificados con residuos plásticos" | | | | x |
| 10 | Nura Shehu et al, 2023 | " Una visión general de la utilización de materiales y tecnologías de desecho reciclados en pavimentos de asfalto: hacia carreteras con bajas emisiones de carbono, respetuosas con el medio ambiente y sostenibles" | | | | x |
| 11 | Fernado Wulf, 2008 | "Análisis de pavimento asfáltico modificados con polimeros". | x | | | |
| total | | | 1 | 3 | 4 | 3 |

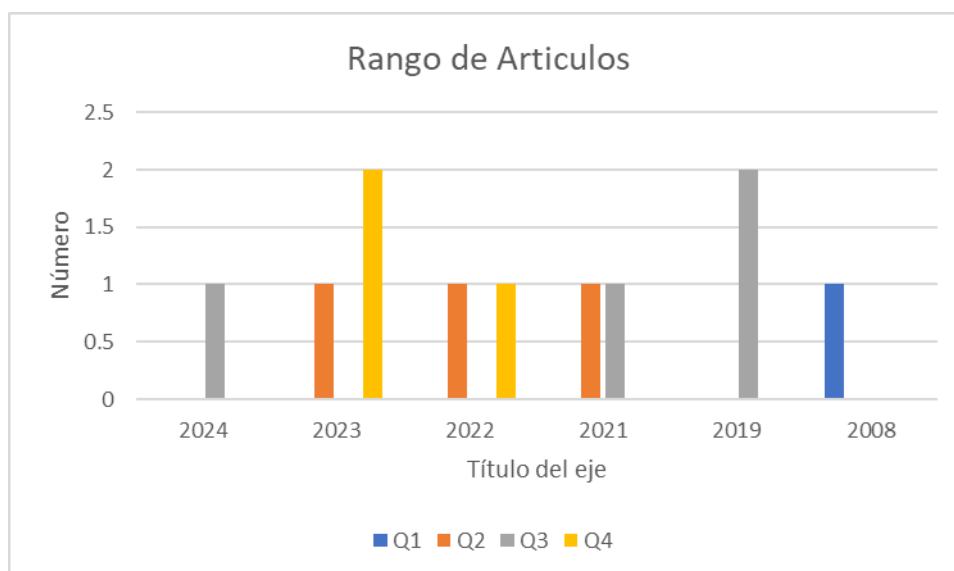
Tabla 2

“Cuartil de artículos”

| cU | AÑO | Cuartil de los Artículos | | | |
|------------------------------|------|--------------------------|----|----|----|
| | | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 |
| Número de Artículos revisión | 2024 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 2023 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| | 2022 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | 2021 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | 2019 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| | 2008 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Figura 2

Rango de artículos



Antecedentes del Uso de Polímeros en Pavimentos

La primera patente para procesos de modificación de betún con polímeros sintéticos o naturales data de 1843, mientras que los proyectos de prueba iniciales en este campo se lanzaron en Europa ya en la década de 1930 y el empleo de látex de neopreno se promulgó por primera vez en América del Norte en la década de 1950 (Y. Yildirim, 2007). Sin embargo, 20 años después (década de 1970), Europa ya había superado a los EE. UU. en la aplicación de mezcla bituminosa modificada con polímeros para pavimento de carreteras, ya que, en Europa, las garantías proporcionadas por los contratistas alentaron un interés sin precedentes

en los costos reducidos del ciclo de vida a pesar de los costos más altos en las fases iniciales de los proyectos. Estos costos iniciales restringieron el uso de betún modificado con polímeros en los Estados Unidos. Sin embargo, a mediados de la década de 1980, se introdujo y utilizó nuevos tipos de polímeros en Europa y luego en los EE. UU., donde prevalecía cada vez más una perspectiva económica pobre en todo el país. La Especificación Nacional de Asfalto de Australia ha proporcionado especificaciones y guías para ligantes modificados con polímeros (Nuha Mashaan, 2022).

Los polímeros comúnmente utilizados en la modificación de ligantes se pueden dividir en tres categorías principales: elastómeros termoplásticos, plastómeros y polímeros reactivos. A pesar del hecho de que estos modificadores pueden mejorar la susceptibilidad térmica de los ligantes asfálticos, cada categoría tiene un efecto específico en sus propiedades: los elastómeros termoplásticos mejoran principalmente las propiedades elásticas del ligante (aumentando la resistencia a la fatiga), mientras que los plastómeros o polímeros reactivos actúan principalmente aumentando la rigidez y la resistencia contra la deformación en respuesta a la carga (Luzana Brasileiro et al, 2019). Sin embargo, a pesar de estas ventajas tiene un elevado coste que limita su aplicación, por lo que el uso de polímeros recuperados es una alternativa interesante tanto para reducir el precio como para alargar la vida útil de los pavimentos. Por ello, en este trabajo se presenta una revisión comparativa de los polímeros reciclados más estudiados como modificadores de asfalto: polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), acetato de etilvinilo (EVA) y caucho de neumático molido (GTR).

Métodos de incorporación de los polímeros a la mezcla asfáltica

En la actualidad todavía existe una cantidad considerable de residuos plásticos que acaban en vertederos sin ningún proceso de recuperación o reciclaje. Además, el punto de fusión de la mayoría de éstos está por debajo de la temperatura de fabricación de las mezclas bituminosas (que suele variar entre 150 °C y 180 °C), lo que asegura la interacción física y química con el betún, es un material que se utiliza en la construcción de pavimentos para unir los aditivos minerales sólidos, como la arena o las piedras pequeñas, en las mezclas bituminosas (Luzana Brasileiro et al, 2019).

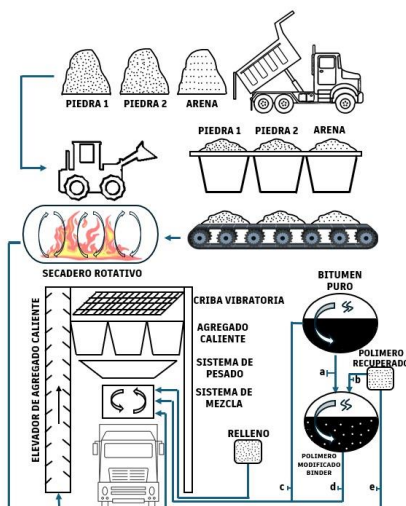
Existen dos métodos principales que se llevan a cabo para modificar mezclas asfálticas utilizando polímeros de desecho, a saber, los métodos secos (mecánicos) y húmedos (químicos) para la preparación de la mezcla (Z. Du, 2020).

- Método seco, implica la adición directa de polímeros de desecho que se mezclan inicialmente con el agregado caliente, seguido de la adición de betún caliente (Martin-Alfonso, JE et al, 2021).
- Método húmedo, implica agregar polímeros de desecho al betún caliente, que luego se mezcla con el agregado caliente. Es adecuado y se utiliza principalmente para polímeros de bajo punto de fusión como LDPE, en el que los polímeros se trituran o se pulverizan finamente antes de mezclarlos con el betún a altas temperaturas y velocidad de mezcla para lograr una mezcla de asfalto uniforme y bien dispersa. (S. Heydari et al, 2021).

Los dos métodos en una planta de asfalto discontinua se ilustran en la Figura 1. La figura ilustra el punto de cierre 'b' y los puntos de apertura 'a' y 'c' para representar la adición de asfalto después de la mezcla adecuada de polímeros y agregados en el proceso seco, mientras que el punto 'b' está abierto y los puntos 'a' y 'c' están cerrados en el proceso húmedo para representar la adición directa de polímeros al aglutinante de asfalto caliente antes de mezclarlo con agregados (Luzana Brasileiro et al, 2019).

Figura 3

Esquema de proceso húmedo y seco en una planta de asfalto discontinuo adaptado de



Betún o ligante

El betún es un material de ingeniería bien conocido y se obtiene de la destilación fraccionada del petróleo crudo. Aunque la composición química del betún es variable y compleja, comúnmente, se divide en cuatro fracciones generales que incluyen hidrocarburos aromáticos (80% de carbono, 15% de hidrógeno), asfaltenos, resinas y saturados (Sabzoi Nizamuddin et al, 2021).

Tabla 3

“Características generales del betún estándar para pavimentos (sin modificar). Adaptado de (Sabzoi Nizamuddin et al, 2021).

| Propiedad | Valor | Referencias |
|-------------------------------|---------------|--|
| Densidad (g/cm ³) | 1.004 - 1.019 | (Onyango, F. et al, 2015)(Belsare, CP & Kaley, AAJD, 2015)(Zhang, H. et al, 2013)(Gómez, NHC et al, 2021) |
| Penetración (0.1mm) | 59.10 - 98.0 | (Onyango, F. et al, 2015)(Beena, K. & Bindu, C, 2010)(Mohammadiroudbari, M et al, 2016)(Zachariah, JP et al, 2018) |
| Índice de penetración (IP) | 0.152 - 0.601 | (Gibreil, HA & Feng, CP, 2017)(Malarvizhi, G et al,2012) |
| Punto de ablandamiento (°C) | 42 - 65 | (Onyango, F. et al, 2015)(Belsare, CP & Kaley, AAJD, 2015)(Zhang, H. et al, 2013)(Beena, K. & Bindu, C, 2010)(Mohammadiroudbari, M et al, 2016)(Gibreil, HA & Feng, CP, 2017)(Bala, N, 2018)(Larsen, DO, 2009) |
| Punto de inflamación (°C) | 240 - 350 | (Onyango, F. et al, 2015)(Beena, K. & Bindu, C, 2010)(Mohammadiroudbari, M et al, 2016) |
| Punto de inflamación (°C) | 270 - 376 | (Mohammadiroudbari, M et al, 2016) |
| Ductilidad (mm) | 76 - 720 | (Onyango, F. et al, 2015)(Beena, K. & Bindu, C, 2010)(Mohammadiroudbari, M et al, 2016)(Bala, N, 2018) |
| Viscosidad a 135 °C (cP) | 100 - 460.35 | (Onyango, F. et al, 2015)(Beena, K. & Bindu, C, 2010) |
| Saturados (%) | 4.0 - 15.8 | (Onyango, F. et al, 2015)(Gómez, NHC et al, 2021) |
| Aromaticos (%) | 39.6 - 69.0 | |

| | | |
|-----------------|---------------|---------------------------|
| Resinas (%) | 15.0 - 34.8 | (Onyango, F. et al, 2015) |
| Asfaltenos (%) | 9.0 - 14.0 | |
| Indice coloidal | 0.190 - 0.333 | |

Impacto Ambiental

El uso de residuos plásticos en la modificación del betún ofrece una alternativa para reducir los residuos en vertederos, pero genera preocupaciones ambientales. Una de ellas es el posible aumento de emisiones y humos durante la producción de betún, lo que requiere más investigación sobre este impacto. Además, la liberación de microplásticos es una preocupación no evaluada en el caso del betún modificado con plásticos reciclados. También se plantea la cuestión de la reciclabilidad del asfalto modificado con plástico. Para evaluar completamente los efectos de estos materiales, se necesitan más estudios que vayan más allá de las propiedades mecánicas y aborden las preocupaciones ambientales. (Sabzoi Nizamuddin et al, 2021)

Impacto Económico

El uso de polímeros reciclados para modificar el betún representa una alternativa económica atractiva al costoso SBS, lo que podría reducir significativamente los costos en la producción de betún modificado. Esta práctica también ayuda a minimizar los residuos plásticos, contribuyendo a una solución más rentable y sostenible.

Las ventajas identificadas del uso de mezclas con polímeros

Incluyen varias mejoras tanto en términos de desempeño como en sostenibilidad. Ambos procesos, seco y húmedo, tienen sus ventajas y desventajas, pero su efectividad depende en gran medida de las condiciones específicas de la mezcla y el tipo de plástico utilizado. En general, el proceso húmedo tiende a ofrecer mejores mejoras en la resistencia térmica y la adhesividad, pero es más costoso y complejo. El proceso seco es más sencillo y accesible, pero enfrenta desafíos en términos de interacción adecuada entre el plástico y el betún. (Zharaa et al, 2023)

Las desventajas observadas en el uso de mezclas con polimeros incluyen:

- La incorporación de plásticos reciclados en el betún puede afectar su compatibilidad, reduciendo la resistencia al envejecimiento y acelerando la degradación del pavimento, lo que compromete su durabilidad y vida útil.
- El uso de plásticos con bajo punto de fusión puede aumentar la rigidez de la mezcla asfáltica, mejorando su resistencia térmica, pero también afectando negativamente su comportamiento de fatiga. Esta mayor rigidez puede hacer que la mezcla sea más vulnerable a fisuras y agrietamientos bajo cargas repetidas o bajas temperaturas, reduciendo así la durabilidad y el desempeño del pavimento, especialmente en climas fríos o con tráfico pesado.
- Optimizar los procesos húmedo y seco es complicado debido a la necesidad de controlar variables como la temperatura, el tiempo y la velocidad de mezcla. Estas condiciones pueden variar según el tipo de plástico y el betún, lo que puede generar resultados inconsistentes. Si el plástico no se integra adecuadamente con el betún, la calidad y durabilidad del pavimento pueden verse afectadas.

Recomendaciones para futuras investigaciones

- Optimización de condiciones de mezcla: Se deben realizar más estudios para mejorar las condiciones de mezclado (tiempos, temperaturas y tipo de mezclador) para garantizar una mezcla homogénea de betún con polímeros reciclados.
- Análisis reológicos más completos: Es necesario realizar estudios reológicos más detallados, que incluyan no solo la viscosidad, el punto de reblandecimiento y la penetración, sino también el análisis de parámetros como el módulo complejo, el ángulo de fase, y otros indicadores específicos que evalúen los efectos del polímero en un amplio rango de temperaturas y en el betún envejecido. (Luzana Brasileiro et al, 2019)

- Evaluación del ciclo de vida: Es crucial realizar análisis de evaluación del ciclo de vida de los polímeros reciclados para cuantificar mejor los beneficios ambientales y económicos.

RESULTADOS

Resultados de los polímeros recuperados

- Polietileno (PE)

El polietileno (PE) es un plastómero que se ablanda al calentarse y se solidifica al enfriarse. Los puntos de fusión varían según el tipo de polietileno: entre 110-120 °C para baja densidad, alrededor de 125 °C para su baja densidad lineal, y entre 130-149 °C para alta densidad lineal. (Luzana Brasileiro et al, 2019)

El polietileno de desecho puede ser procesado de diferentes maneras, como lavado, secado, extrusión, o simplemente recortado o molido si es limpio. El tamaño de las partículas añadidas al aglutinante varía entre 0,3 y 0,5 mm. El porcentaje de polietileno añadido al ligante puede oscilar entre 1% y 10%, siendo lo más común entre el 3% y el 5%. (Nuha Mashaan, 2022).

Las condiciones de incorporación del polietileno también varían: la temperatura de mezcla está entre 150 y 180 °C, el tiempo de digestión de 3 minutos a 4 horas, y la velocidad del mezclador varía entre 120 y 7200 rpm. Estos parámetros y sus efectos sobre la penetración y el punto de reblandecimiento del ligante se resumen en diversas figuras del estudio. (Luzana Brasileiro et al, 2019)

Figura 4

Extraído de <https://www.aceromafe.com/que-es-el-polietileno/>



- Acetato de etilvinilo (EVA)

El etilvinilacetato (EVA) es un polímero termoplástico que se utiliza en productos como juguetes y herramientas para el hogar. Se obtiene por copolimerización de etileno (E) y acetato de vinilo (VA). El contenido de VA en el EVA influye en sus características, ya que un bajo contenido de VA da lugar a un material más rígido, mientras que un alto contenido mejora la flexibilidad y estabilidad de almacenamiento del material. (Sahar Basim Al-Ghurabi & Basim H. Al-Humeidawi, 2021)

La temperatura de fusión del EVA varía entre 54 y 110 °C, y la incorporación del EVA al betún se realiza a temperaturas entre 150 y 190 °C, con tiempos de mezcla de entre 20 minutos y 4 horas. El porcentaje habitual de EVA añadido es del 5% en peso de ligante, con un 18% de VA en la mayoría de los casos.

Los efectos de la adición de EVA incluyen:

- Reducción de la penetración del ligante, que varía entre el 33% y el 51%, dependiendo del tipo de betún base utilizado.
- Aumento del punto de ablandamiento, con variaciones del 21.6% al 53%. El uso de anhídrido maleico (MA) incrementa significativamente este valor.

- Incremento de la viscosidad de la mezcla, lo que mejora su rigidez. Sin embargo, en contraste con otros polímeros, la ductilidad aumenta, especialmente con el uso de EVA injertado con anhídrido maleico.
- Mejora en la resistencia al ahuellamiento del pavimento a altas temperaturas.
- Estabilidad de almacenamiento mejorada con un mayor contenido de VA en el EVA, lo que aumenta la estabilidad de la mezcla.

Figura 5

Extraído de <https://www.plastico.com/es/noticias/etilvinilacetato-o-eva-propiedades->



- Polipropileno (PP)

El polipropileno (PP) es uno de los polímeros más producidos a nivel mundial, y se utiliza ampliamente en una variedad de aplicaciones, como envases de alimentos, piezas de automóviles y sistemas de tuberías. Es un plastómero con un punto de fusión superior al HDPE, que oscila entre los 145 °C y 162 °C. (Sahar Basim Al-Ghurabi & Basim H. Al-Humeidawi, 2021)

Modificación del betún con polipropileno:

El PP se utiliza como modificador del betún en la fabricación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Polímeros (RPMB), y se ha empleado en porcentajes que varían entre el 0,5% y el 11% en peso de betún, siendo los más comunes los 3% y 5%.

- Temperaturas de mezcla: Varían entre 160 °C y 190 °C.

- Tiempo de digestión: Entre 5 y 90 minutos.
- Velocidad de mezcla: De 120 a 5000 rpm.
- Efectos en las propiedades del betún modificado con PP:
- Penetración:
 - Para un 3% de PP, la reducción de penetración varía entre 18% y 30%.
 - Para un 5% de PP, la reducción de penetración varía entre 38% y 50%.
 - Punto de ablandamiento:
 - Para un 3% de PP, el aumento del punto de ablandamiento varía entre 4% y 30%.
 - Para un 5% de PP, el aumento varía entre 11% y 43,5%..

Viscosidad y ductilidad:

Viscosidad: Las RPMB con PP no superaron el límite de viscosidad de 3,0 Pa.s a 135 °C en muchos casos, especialmente cuando se utilizó PP clorado o PP con anhídrido maleico. Sin embargo, las mezclas con PP convencional a menudo exceden este límite. Es importante notar que la viscosidad de la mezcla varía según el grado de penetración del betún base y la interacción química entre el polímero y el betún. (Luzana Brasileiro et all, 2019)

Ductilidad: La adición de PP reduce la ductilidad del ligante. Cuando se añade 5% de PP, la reducción de ductilidad es de alrededor del 20%. Sin embargo, esta reducción disminuye a 5% cuando se utiliza PP modificado con anhídrido maleico. (Luzana Brasileiro et all, 2019)

Figura 6

Extraído de <https://www.envaselia.com/blog/que-es-el-polipropileno-id13.htm>



- Cloruro de polivinilo (PVC)

Es uno de los polímeros más producidos en Europa, representando el 10,1% de la producción europea de plásticos. Se utiliza principalmente en la fabricación de productos como marcos de ventanas, perfiles, aislamiento de cables y mangueras de jardín. Sin embargo, su uso como modificador de betún ha sido limitado debido a su alto punto de fusión (alrededor de 298 °C), lo que puede dificultar su incorporación en mezclas bituminosas. (Sabzoi Nizamuddin et al, 2021)

Modificación del betún con PVC:

A pesar de su alto punto de fusión, algunos estudios han logrado incorporar el PVC al betún en mezclas calientes. Este proceso se realiza calentando el PVC a temperaturas entre 160 °C y 190 °C. Los desechos de PVC provenientes de tuberías, cables o marcos de ventanas son triturados y limpiados para ser utilizados como modificadores en el betún. Las partículas de PVC utilizadas tienen tamaños que oscilan entre 0,075 mm y 2 cm.

Condiciones de mezcla:

- Temperatura de mezcla: Varía entre 140 °C y 180 °C.
- Tiempo de digestión: De 20 minutos a 3 horas.

- Velocidad de mezcla: Entre 1300 y 3750 rpm.

Efectos del PVC en las propiedades del betún:

- Para un 5% de PVC en peso de betún, la reducción de la penetración varía entre 12% y 57%. La mayor reducción se observó en betunes con un alto grado de penetración.
- El incremento del punto de ablandamiento para un 5% de PVC varía entre 6% y 26%. Este aumento es mayor en los betunes con mayor reducción en la penetración.
- La viscosidad aumenta significativamente con la adición de PVC. Para un 5% de PVC, la viscosidad puede aumentar hasta 300%, aunque no supera el límite de 3,0 Pa.s a 135 °C establecido por SHRP.
- La ductilidad del ligante disminuye con la adición de PVC. Esta reducción en la ductilidad es uno de los efectos comunes al incorporar PVC en el betún.

Mejoras en las propiedades del pavimento:

Módulo complejo y ángulo de fase: La adición de PVC aumenta el módulo complejo y reduce los valores del ángulo de fase, lo que mejora la resistencia al ahuellamiento a altas temperaturas y aumenta la durabilidad del pavimento. Este comportamiento es característico de otros plastómeros y ayuda a extender la vida útil de las mezclas bituminosas.

Figura 7

Extraído de <https://es.chemicalsafetyfacts.org/chemicals/polyvinyl-chloride/>



- Caucho para neumáticos de tierra (GTR)

Es un material reciclado que se obtiene al procesar neumáticos fuera de uso. Este material, clasificado como elastómero, tiene la capacidad de deformarse significativamente bajo tensiones aplicadas y recuperar su forma original cuando estas cesan. Las aplicaciones más comunes del GTR incluyen la fabricación de neumáticos nuevos, productos de ingeniería civil, usos agrícolas, recreativos y deportivos, y la construcción de pavimentos con betún modificado con GTR recuperado. (Sahar Basim Al-Ghurabi & Basim H. Al-Humeidawi, 2021)

Proceso de modificación del betún con GTR:

- Proceso húmedo: Implica la digestión parcial del GTR en el betún, donde los aceites aromáticos del ligante son adsorbidos en las cadenas poliméricas del caucho, causando su hinchamiento y ablandamiento. Sin embargo, temperaturas altas o tiempos prolongados de mezcla pueden generar degradación del caucho y envejecimiento del betún, lo que afecta negativamente el rendimiento del ligante.

- Proceso seco: Se añade GTR en tamaños de partícula mayores (0,6 a 3,0 mm) con porcentajes que oscilan entre 1% y 10% del peso total de la mezcla.
- Porcentaje añadido de GTR: Los rangos de adición de GTR al betún varían entre el 1,75% y el 25%, siendo lo más común el 10% en peso de betún. El tamaño de las partículas de caucho generalmente oscila entre 0,15 y 0,60 mm.
- Temperaturas y tiempos de mezcla: Las temperaturas de mezclado van de 140 °C a 195 °C, con tiempos de digestión de entre 20 minutos y 3 horas, y velocidades de mezclado entre 200 y 7200 rpm
- Penetración: Cuando se añade un 10% de GTR al betún, la reducción de la penetración varía entre un 12% y un 37%. Esta variabilidad depende del grado de penetración inicial del betún base utilizado.
- Punto de ablandamiento: La adición de GTR eleva el punto de ablandamiento entre un 9% y un 23%, lo que mejora la resistencia a altas temperaturas.
- Viscosidad y ductilidad: La viscosidad aumenta con la adición de GTR, aunque no alcanza el límite de 3 Pa.s a 135 °C. Sin embargo, se observa una reducción significativa de la ductilidad (alrededor del 90%) a 15 °C.

Figura 8

Extraído de <https://www.infobae.com/america/soluciones/2022/09/21/como-se-reciclan->



DISCUSIÓN

| Características de la mezcla | Polietileno (PE) | Polipropileno (PP) | Cloruro de polivinilo (PVC) | Acetato de etilvinilo(EVA) | Caucho para neumaticos de tierra (GTR) |
|--|------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------------|--|
| Cantidad de polimero más comunmente utilizado (%) | (3-5) | (3-5) | 5 | 5 | 10 |
| Temperatura de la mezcla (*C) | (163-180) | (160-180) | (165-180) | (170-180) | 180 |
| Tiempo de digestión (minutos) | (60-150) | (60-90) | (20-180) | (40-240) | (90-140) |
| Velocidad de mezcla(rpm) | (1300-5000) | (120-1200) | (1300-2000) | (300-3000) | (800-5000) |
| Reducción de la penetración (%) | (33-59) | (23-82) | (46-57) | (33-51) | (16-30) |
| Aumento de la temperatura del punto de ablandamiento (%) | (11-92) | (30-44) | (6-29) | (22-53) | (9-19) |

| | | | | | |
|--|---|----------------------------|-----------------------|--|---|
| Uso de aditivos compatibilizantes /dispersantes/aglutinantes | No:hasta un 3% de PE si: entre 45 y un 5% de PE (MA entre un 0.87% y un 5% en peso de PE) | Si(MA 0.91% en peso de PP) | Si (dispersante) | No-hasta un 5% de EVA Si- (MA 2% en peso de EVA) | No-hasta un 5% de GTR si-(TOR 3-6% en peso del aglutinante) |
| Coste aproximado del polimero(€/t) | (378.00-1261.00[101]) | (461.00-1261.00[102]) | (424.00-1051.00[103]) | - | (336.00-1177.00[104]) |

Con base en los resultados analizados en esta revisión de la literatura, en la Tabla se resumen las diferentes variables que influyen en el proceso de modificación y el desempeño del betún resultante modificado con polímeros reciclados.

- Se menciona que el caucho granulado (elastómero) suele utilizarse en mayores proporciones que los plastómeros, con un 5% de peso en el betún puro. Esto implica que el potencial de reciclaje del elastómero es mayor, lo que resulta en beneficios tanto ambientales como económicos, dado que se aprovechan materiales que de otro modo podrían acabar en vertederos o ser incinerados.
- En cuanto a las temperaturas de mezcla, los plastómeros requieren temperaturas alrededor de los 160-165 °C, mientras que el caucho granulado (elastómero) necesita temperaturas más altas, generalmente alrededor de los 180 °C.
- Polímeros como el polietileno y el Acetato de etilvinilo son estables sin aditivos, mientras que el polipropileno y el Caucho para neumáticos de tierra requieren aditivos como el anhídrido maleico para mejorar su estabilidad. Sin embargo, un exceso de polímero puede causar fragilidad y agrietamiento.
- Los plastómeros, como el polietileno y el polipropileno, aumentan la rigidez y mejoran la resistencia a altas temperaturas, mientras que el Caucho para neumáticos de tierra mejora la resistencia a la fatiga y la elasticidad a bajas temperaturas.

CONCLUSIONES

Al finalizar la exhaustiva investigación del uso de polímeros en la mezcla asfáltica, y su revisión literaria se tiene en cuenta que los polímeros pueden ser de una forma eficaz pero poco viable como aditivo u agregado de la mezcla, debido a las altas condiciones que se requieren y la precisión alta de su uso correspondiente, a pesar de eso su uso de estas misma mitiga el impacto ambiental que de por sí mismo genera las plantas procesadoras de la mezcla con su reciclaje. El tipo de polímero más efectivo debido a sus propiedades son los plastómeros (polietileno y polipropileno) para las zonas tropicales por lo cual sería viable aplicar en Chanchamayo, Junín.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la institución de escuela superior “Universidad Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa” por su prestación de servicios de investigación y promover investigaciones por el avance de nuestra sociedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Mashaan, N.; Karim, M.; Khodary, F.; Saboo, N.; Milad, A. Refuerzo de pavimento bituminoso con fibra: una revisión. *CivilEng* **2021** , 2 , 599-611.
2. Liu, K.; Li, T.; Wu, C.; Jiang, K.; Shi, X. La fibra de bambú tiene propiedades de ingeniería y un rendimiento adecuado como refuerzo para la mezcla asfáltica. *Constr. Build. Mater.* **2021** , 290 , 123240
3. Guo, Q.; Chen, Z.; Liu, P.; Li, Y.; Hu, J.; Gao, Y.; Li, X. Influencia de la fibra de basalto en las propiedades de fractura de modo I y II de la mezcla asfáltica a temperaturas medias y bajas. *Theor. Appl. Fract. Mech.* **2021** , 112 , 102884.
4. Hassan, HF; Al-Jabri, KS Efecto de las fibras orgánicas en las propiedades de la mezcla de la capa de fricción de granulometría abierta. *Int. J. Pavement Eng.* **2005**
5. Mashaan, NS; Hassan, A.; Karim, MR; Aziz, MA Una revisión sobre el uso de caucho granulado para reforzar pavimentos asfálticos. *Sci. World J.* **2014** , 2014 , 21.

6. Yaro, NSA; Sutanto, MH; Baloo, L.; Habib, NZ; Usman, A.; Yousafzai, AK; Ahmad, A.; Birniwa, AH; Jagaba, AH; Noor, A. Una descripción general integral de la utilización de materiales y tecnologías de desechos reciclados en pavimentos de asfalto: hacia carreteras con bajas emisiones de carbono, respetuosas con el medio ambiente y sostenibles. *Processes* **2023** , *11* , 2095.
7. Xu, X.; Chen, G.; Wu, Q.; Leng, Z.; Chen, X.; Zhai, Y.; Tu, Y.; Peng, C. Reciclaje químico de PET de desecho en pavimento asfáltico sostenible que contiene áridos de hormigón reciclado: conocimiento del daño inducido por la humedad. *Constr. Build. Mater.* **2022** , *360* , 129632. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Martínez-López, M.; Martínez-Barrera, G.; Salgado-Delgado, R.; Gencel, O. Reciclaje de residuos de polipropileno y polietileno en la producción de morteros poliméricos a base de poliéster. *Constr. Build. Mater.* **2021** , *274* , 121487. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
9. Xu, C.; Zhang, Z.; Zhao, F.; Liu, F.; Wang, J. Mejora del rendimiento del asfalto modificado con RET con la adición de prepolímero de poliuretano (PUP). *Constr. Build. Mater.* **2019** , *206* , 560–575. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
10. Brasileiro, LL; Moreno-Navarro, F.; Martínez, RT; del Sol-Sánchez, M.; Matos, JME; del Carmen Rubio-Gámez, M. Estudio de la viabilidad de la producción de betunes asfálticos modificados a partir de copos fabricados a partir de polímeros reciclados. *Constr. Build. Mater.* **2019** , *208* , 269–282. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
11. Nanjegowda, VH; Biligiri, KP Reciclabilidad del caucho en sistemas de carreteras de asfalto: una revisión de la investigación aplicada y el avance en la tecnología. *Resour. Conserv. Recycl.* **2020** , *155* , 104655. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
12. Xu, S.; Xiao, F.; Amirhanian, S.; Singh, D. Características de humedad de mezclas con tecnologías de asfalto mezclado tibio: una revisión. *Constr. Build. Mater.* **2017** , *142* , 148–161. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

13. Almeida, A.; Capitán, S.; Bandeira, R.; Fonseca, M.; Picado-Santos, L. Rendimiento de mezclas de aire acondicionado que contienen escamas de película plástica de LDPE recogidas de residuos urbanos teniendo en cuenta el envejecimiento. *Construcción Construir. Madre.* **2020** , 232 , 117253. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
14. Rahaman, MZ; Hossain, Z.; Zaman, M. Comportamiento de recuperación y cumplimiento no recuperable de ligantes modificados con polímeros y asfalto recuperado modificado en Arkansas. *J. Test. Eval.* **2018** , 46 , 2483–2497. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
15. Fang, CQ; Zhang, MY; Yu, RE; Liu, XL Efecto de la temperatura de preparación en las propiedades de envejecimiento del asfalto modificado con polietileno residual. *J. Mater. Sci. Technol.* **2015** , 31 , 320–324. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
16. Zhang, H.; Wu, X.; Cao, D.; Zhang, Y.; He, M. Efecto del polietileno lineal de baja densidad injertado con anhídrido maleico (LLDPE-g-MAH) sobre las propiedades del asfalto modificado con polietileno de alta densidad/estireno-butadieno-estireno (HDPE/SBS). *Constr. Build. Mater.* **2013** , 47 , 192–198. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
17. Liu, Y.; Zhang, J.; Chen, R.; Cai, J.; Xi, Z.; Xie, H. Ligantes asfálticos epoxi modificados con copolímero de etileno acetato de vinilo: evolución de la separación de fases y propiedades mecánicas. *Constr. Build. Mater.* **2017** , 137 , 55–65. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
18. Gogoi, R.; Biligiri, KP; Das, NC Análisis de predicción del rendimiento de materiales de caucho de estireno-butadieno y caucho granulado en aplicaciones de carreteras de asfalto. *Mater. Struct.* **2016** , 49 , 3479–3493. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
19. Zhang, F.; Hu, C. La investigación sobre asfalto modificado con caucho molido y compuestos plásticos de desecho. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2016** , 124 , 729–741. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
20. Zhang, H.; Wu, X.; Cao, D.; Zhang, Y.; He, M. Efecto del polietileno lineal de baja densidad injertado con anhídrido maleico (LLDPE-g-MAH) sobre las propiedades del

- asfalto modificado con polietileno de alta densidad/estireno-butadieno-estireno (HDPE/SBS). *Constr. Build. Mater.* **2013**, *47*, 192–198. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
21. Xiao, F.; Amirkhani, S.; Juang, CH Resistencia a la formación de surcos en pavimentos de hormigón asfáltico cauchutado que contienen mezclas de pavimento asfáltico recuperado. *J. Mater. Civ. Eng.* **2007**, *19*, 475–483. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[Versión verde](#)]
 22. Amirkhani, AN; Xiao, F. Caracterización de un ligante asfáltico no envejecido modificado con nanopartículas de carbono. *Int. J. Pavem. Res. Technol.* **2011**, *4*, 1997. [[Google Scholar](#)]
 23. Golestani, B.; Hyun, B.; Moghadas, F.; Fallah, S. Aplicación de nanoarcilla al hormigón asfáltico: caracterización de polímeros y aglutinante y mezcla de asfalto modificado con nanocompuestos lineales. *Construct. Build. Mater.* **2015**, *91*, 32–38. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 24. Ramírez-Vargas, JR; Zamora Castro, SA; Herrera-May, AL; Sandoval-Herazo, LC; Salgado-Estrada, R.; Diaz-Vega, ME Una revisión de los agregados de pavimento sostenible. *Aplica. Ciencia.* **2024**, *14*, 7113. <https://doi.org/10.3390/app14167113>
 25. Mohammadyan-Yasouj, SE; Ghaderi, A. Investigación experimental de residuos de polvo de vidrio, fibra de basalto y nanotubos de carbono sobre las propiedades mecánicas del hormigón. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *252*, 119115. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 26. Zhao, X.; Webber, R.; Kalutara, P.; Browne, W.; Pienaar, J. Gestión de residuos de construcción y demolición en Australia: una mini-revisión. *Waste Manag. Res* **2022**, *40*, 34–46. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 27. Brasileiro, L.; Moreno-Navarro, F.; Tauste-Martínez, R.; Matos, J.; del Carmen Rubio-Gámez, M. Polímeros recuperados como modificadores de aglomerantes asfálticos para carreteras más sostenibles: una revisión. *Sostenibilidad* **2019**, *11*, 646. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

28. Zhang, H.; Huang, M.; Hong, J.; Lai, F.; Gao, Y. Estudio de dinámica molecular sobre el efecto de mejora del tereftalato de bis(2-hidroxietilo) en las propiedades adhesivas de la interfaz asfalto-agregado. *Fuel* **2021** , 285 , 119175. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
29. Amirkhanian, S. Utilización de desechos plásticos en aglutinantes asfálticos. En *Materiales de construcción de pavimentos ecoeficientes* ; Elsevier: Ámsterdam, Países Bajos, 2020; págs. 13–32. [[Google Académico](#)]
30. Yildirim, Y. Ligantes asfálticos modificados con polímeros. *Constr. Build. Mater.* **2007** , 21 , 66–72. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
31. Jwaida, Z.; Dulaimi, A.; Mydin, MAO; Özkılıç, YO; Jaya, RP; Ameen, A. El uso de polímeros de desecho en mezclas asfálticas: análisis bibliométrico y revisión sistemática. *J. Compos. Sci.* **2023** , 7 , 415. <https://doi.org/10.3390/jcs7100415>
32. Ameli, A.; Maher, J.; Mosavi, A.; Nabipour, N.; Babagoli, R.; Norouzi, N. Evaluación del desempeño de aglutinantes y mezclas de asfalto con matriz de piedra (SMA) modificados con caucho de neumático molido (GTR), tereftalato de polietileno de desecho (PET) y agentes antidecapantes (ASA). *Constr. Build. Mater.* **2020** , 251 , 118932. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
33. Mustafa, S.; Hameed, MA; Dulaimi, A. Evaluación de las propiedades de un ligante asfáltico local modificado mediante el uso de caucho de estireno butadieno (SBR) o polietileno de baja densidad (LDPE). *Sci. Rev. Eng. Environ. Sci.* **2022** , 31 , 190–202. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
34. Nizamuddin, S.; Boom, YJ; Giustozzi, F. Polímeros sostenibles a partir de residuos plásticos reciclados y sus homólogos vírgenes como modificadores de betún: una revisión exhaustiva. *Polymers* **2021** , 13 , 3242. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
35. Mashaan, N. Caracterización de ingeniería de materiales de capas de desgaste modificados con residuos plásticos. *Reciclaje* **2022** , 7 , 61. <https://doi.org/10.3390/recycling7040061>

36. Mostafa, AEA Examinando el rendimiento del asfalto mezclado en caliente utilizando nanomateriales. *J. Eng.* **2016** , *6* , 25–34. [[Google Scholar](#)]
37. Ali, AH; Mashaan, NS; Karim, MR Investigaciones de las propiedades físicas y reológicas del betún cauchutado envejecido. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2013** , *2013*. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
38. Yaro, NSA; Sutanto, MH; Baloo, L.; Habib, NZ; Usman, A.; Yousafzai, AK; Ahmad, A.; Birniwa, AH; Jagaba, AH; Noor, A. Una descripción general integral de la utilización de materiales y tecnologías de desechos reciclados en pavimentos de asfalto: hacia carreteras con bajas emisiones de carbono, respetuosas con el medio ambiente y sostenibles. *Processes* **2023** , *11* , 2095. <https://doi.org/10.3390/pr11072095>
39. ODIAN, G. *Principles of Polymerization*. 4ta Edición. USA: Wiley-Interscience A John Wiley & Sons, 2004. ISBN 0-471-27400-3.
40. Rafiq Kakar, M.; Mikhailenko, P.; Piao, Z.; Poulikakos, LD Rendimiento a alta y baja temperatura de mezclas asfálticas de bajo ruido modificadas con plástico de desecho de polietileno. *Constr. Build. Mater.* **2022** , *348* , 128633. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
41. Du, Z.; Jiang, C.; Yuan, J.; Xiao, F.; Wang, J. Características de rendimiento a baja temperatura de asfaltos modificados con polietileno: una revisión. *Constr. Build. Mater.* **2020** , *264* , 120704. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
42. Nizamuddin, S.; Boom, YJ; Giustozzi, F. Polímeros sostenibles a partir de residuos plásticos reciclados y sus homólogos vírgenes como modificadores de betún: una revisión exhaustiva. *Polymers* **2021** , *13* , 3242. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
43. Gruber, MR; Hofko, B. Evaluación del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de pavimento de asfalto reciclado. *Sustainability* **2023** , *15* , 4629. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
44. Milad, A.; Babalghaith, AM; Al-Sabaeei, AM; Dulaimi, A.; Ali, A.; Reddy, SS; Bilema, M.; Yusoff, NIM Una revisión comparativa de las tecnologías de asfalto

- mezclado en caliente y templado desde perspectivas ambientales y económicas: hacia un pavimento de asfalto sostenible. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022** , 19 , 14863. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
45. Birniwa, AH; Abubakar, AS; Mahmud, HNME; Kutty, SRM; Jagaba, AH; Abdullahi, SSA; Zango, ZU Aplicación de desechos agrícolas para la eliminación de colorantes catiónicos de aguas residuales. En *Tratamiento de aguas residuales textiles: materiales y macromoléculas bio-nano sostenibles* ; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2022; Volumen 1, págs. 239–274. [[Google Académico](#)]
 46. Ai, X.; Pei, Z.; Cao, J.; Zhu, X.; Hu, W.; Gao, L.; Feng, D.; Yi, J. Evaluación del impacto ambiental de HMA reciclado con materiales RAP del proceso de descomposición rotatoria en comparación con HMA virgen y HMA reciclado convencional. *J. Clean. Prod.* **2023** , 389 , 136078. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 47. Assaf, H.; Abdo, AA Evaluación del ciclo de vida de la incorporación de materiales reciclados en el diseño de pavimentos. *J. King Saud Univ.-Eng. Sci.* 2022; *en prensa* . [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 48. Onyango, F.; Wanjala, SR; Ndege, M.; Masu, L. Efecto del uso de neumáticos de caucho y desechos plásticos en pavimentos de hormigón asfáltico. *Int. J. Civ. Environ. Eng.* **2015** , 2 , 1403–1407. [[Google Académico](#)]
 49. Belsare, CP; Kaley, AAJD Interpretación de mezclas bituminosas con ligantes modificados. *Int. J. Adv. Eng. Res. Dev.* **2015** , 2 , 1504–1512. [[Google Académico](#)]
 50. Zhang, H.; Wu, X.; Cao, D.; Zhang, Y.; He, M. Efecto del polietileno lineal de baja densidad injertado con anhídrido maleico (LLDPE-g-MAH) sobre las propiedades del asfalto modificado con polietileno de alta densidad/estireno-butadieno-estireno (HDPE/SBS). *Constr. Build. Mater.* **2013** , 47 , 192–198. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
 51. Gómez, NHC; Oeser, M.; Fleischel, O. Modificación química del betún con un nuevo aditivo a base de isocianato para mejorar el rendimiento del asfalto. *Cons. Build. Mater.* **2021** , 301 , 124128. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

52. Beena, K.; Bindu, C. Residuos plásticos como aditivo estabilizador en asfalto de masilla de piedra. *Int. J. Eng. Technol.* **2010** , 2 , 379–387. [[Google Académico](#)]
53. Mohammadiroudbari, M.; Tavakoli, A.; Aghjeh, MKR; Rahi, M. Efecto de la nanoarcilla en la morfología del betún modificado con polietileno. *Constr. Build. Mater.* **2016** , 116 , 245–251. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
54. Zachariah, JP; Sarkar, PP; Debnath, B.; Pal, M. Efecto de las fibras de polipropileno en el hormigón bituminoso con ladrillo como agregado. *Constr. Build. Mater.* **2018** , 168 , 867–876. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
55. Gibreil, HA; Feng, CP Efectos del polietileno de alta densidad y del polvo de caucho molido como modificadores de las propiedades del asfalto mezclado en caliente. *Constr. Build. Mater.* **2017** , 142 , 101–108. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
56. Malarvizhi, G.; Senthul, N.; Kamaraj, C. Un estudio sobre el reciclaje de caucho molido y mezcla de polietileno de baja densidad sobre asfalto con matriz de piedra. *Int. J. Sci. Res.* **2012** , 2 , 1–16. [[Google Scholar](#)]
57. Bala, N.; Napiyah, M.; Kamaruddin, I. Efecto de las partículas de nanosílice en el rendimiento de la mezcla asfáltica modificada con polímero de polipropileno. *Case Stud. Constr. Mater.* **2018** , 8 , 447–454. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
58. Larsen, DO; Alessandrini, JL; Bosch, A.; Cortizo, MS Características microestructurales y reológicas de mezclas de asfalto y SBS durante su fabricación. *Constr. Build. Mater.* **2009** , 23 , 2769–2774. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
59. Sahar Basim Al-Ghurabi & Basim H. Al-Humeidawi, Investigación sobre el efecto del betún modificado con polímeros de reciente uso en el rendimiento del pavimento asfáltico recuperado que contiene asfalto mezclado en caliente. 2021, 30(3):451-463 [10.22630/PNIKS.2021.30.3.38](https://doi.org/10.22630/PNIKS.2021.30.3.38)
60. Behnood, Ali y Mahsa Modiri Gharehveran. "Morfología, reología y propiedades físicas de ligantes asfálticos modificados con polímeros". *European Polymer Journal* 112 (2019): 766-791.

61. S. Heydari. El uso de residuos plásticos en asfalto: una revisión crítica sobre el diseño de mezclas asfálticas y las propiedades Marshall Construir. 2021. Edificar. Mater.
62. Jwaida, Z.; Dulaimi, A.; Mydin, MAO; Özkılıç, YO; Jaya, RP; Ameen, A. El uso de polímeros de desecho en mezclas asfálticas: análisis bibliométrico y revisión sistemática. *J. Compos. Sci.* **2023**, 7, 415. <https://doi.org/10.3390/jcs7100415>
63. Emtiaz, Mostafiz, et al. "Una revisión exhaustiva de la literatura sobre el ligante asfáltico modificado con polímeros". *CivilEng* 4.3 (2023): 901-932.

Financiamiento de la investigación

Con recursos propios.

Declaración de intereses

Declaro no tener ningún conflicto de intereses, que puedan haber influido en los resultados obtenidos o las interpretaciones propuestas.

Declaración de consentimiento informado

El estudio se realizó respetando el Código de ética y buenas prácticas editoriales de publicación.

Derechos de uso

Copyright© 2024 por **Marcos Rupay, Regner Parra, Renzo Torres, Jeancarlo Quezada, Kofi Chavez, Elvis Ponce**



[Este texto está protegido por la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente, siempre que cumpla la condición de atribución: usted debe reconocer el crédito de una obra de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace.