

**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y
URBANISMO**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

**Análisis de la adición de caucho reciclado en
asfaltos calientes: Una revisión**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER EN INGENIERÍA CIVIL**

Autor(es)

Acosta Cordova Miguel Angel

<https://orcid.org/0000-0002-0215-2062>

Hurtado Rodriguez Cesar Augusto

<https://orcid.org/0000-0003-0251-1173>

Asesor

Mg. Elver Sanchez Diaz

<https://orcid.org/0000-0001-9499-1252>

Línea de Investigación

**Tecnología e Innovación en Desarrollo de la Construcción y la
Industria en un Contexto de Sostenibilidad**

Sublínea de Investigación

**Innovación y Tecnificación en Ciencia de los Materiales, Diseño e
Infraestructura**

Pimentel – Perú

2025



DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Quienes suscribimos la **DECLARACIÓN JURADA**, somos egresados del Programa de Estudios de **INGENIERÍA CIVIL** de la Universidad Señor de Sipán S.A.C, declaramos bajo juramento que somos autores del trabajo titulado:

**ANÁLISIS DE LA ADICIÓN DE CAUCHO RECICLADO EN ASFALTOS CALIENTES:
UNA REVISIÓN**

El texto de mi trabajo de investigación responde y respeta lo indicado en el Código de Ética del Comité Institucional de Ética en Investigación de la Universidad Señor de Sipán (CIEI USS) conforme a los principios y lineamientos detallados en dicho documento, en relación a las citas y referencias bibliográficas, respetando al derecho de propiedad intelectual, por lo cual informo que la investigación cumple con ser inédito, original y auténtico.

En virtud de lo antes mencionado, firman:

Acosta Cordova Miguel Angel	DNI: 75569602	
Hurtado Rodriguez Cesar Augusto	DNI: 73001534	

Pimentel, 16 de diciembre de 2024

Miguel & Cesar Acosta & Hurtado

Análisis de la adición de caucho reciclado en asfaltos calientes: Una revisión

 Universidad Señor de Sipán

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::26396:429009944

Fecha de entrega

11 feb 2025, 9:05 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

11 feb 2025, 9:06 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

TURNITIN_TRABAJO DE INVESTIGACION.docx

Tamaño de archivo

34.2 KB

10 Páginas

3,278 Palabras

17,440 Caracteres




14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 13%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

Dedicamos el presente trabajo de investigación con gratitud y gran reconocimiento a nuestros queridos padres y hermanos quienes nos apoyaron incondicionalmente y fueron fuente de inspiración y dedicación.

Agradecimientos

Nos es un privilegio y nos sentimos muy felices de utilizar este espacio para agradecer a Dios por acompañarnos a lo largo de nuestra vida académica, por bendecirnos con buena salud y permitirnos tener y disfrutar de nuestras familias. Agradecemos a nuestros queridos padres, por brindarnos la posibilidad de convertirnos en profesionales y motivarnos a seguir superándonos día a día. A la Universidad Señor de Sipán, origen de nuestra educación, por darnos la posibilidad de adquirir los conocimientos necesarios para ser profesionales competitivos en el mercado laboral. Finalmente, agradecemos a todos los que contribuyeron de una forma u otra a la realización de nuestros objetivos.

ÍNDICE

Dedicatoria.....	5
Agradecimientos.....	6
Resumen	8
Abstract.....	9
I. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Realidad problemática.....	10
1.2. Justificación e Importancia de estudio.....	11
1.3. Formulación del problema.....	11
1.4. Hipótesis	11
1.5. Objetivos.....	11
1.6. Teorías relacionadas al tema	12
II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	13
III. RESULTADOS	13
IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	18
V. REFERENCIAS	20
V. ANEXOS.....	26

Resumen

En todo el mundo, el caucho es muy utilizado porque es uno de los materiales que podemos encontrar en neumáticos, zapatos; entre otros, sus propiedades lo convierten en un material muy duradero y flexible. Anualmente, se generan millones de toneladas de neumáticos abandonados, el cual constituye un serio problema al ambiente, por ende, reciclar neumáticos usados es una excelente manera de proteger el medio ambiente. El objetivo del análisis es comprender; determinar sus ventajas y desventajas de la adición y caracterizar las propiedades que tiene este material. La discusión muestra que el caucho reciclado potencia la capacidad de resistir del asfalto ante fisuras, deformaciones y elevadas temperaturas, logrando disminuir la demanda de mantenimiento. Por lo tanto, se encontró en los estudios revisados que, en general, la adición de caucho reciclado mejora la durabilidad y reduce la necesidad de mantenimiento frecuente en comparación con los asfaltos convencionales.

Palabras Clave: Caucho reciclado; asfaltos calientes; durabilidad; mantenimiento.

Abstract

All over the world, rubber is widely used because it is one of the materials we can find in tires, shoes; among others, its properties make it a very durable and flexible material. Millions of tons of abandoned tires are generated annually, which is a serious problem for the environment, therefore, recycling used tires is an excellent way to protect the environment. The objective of the analysis is to understand; determine the advantages and disadvantages of the addition and characterize the properties that this material has. The discussion shows that recycled rubber increases the resistance capacity of asphalt to cracking, deformation and high temperatures, thus reducing the demand for maintenance. Therefore, it was found in the reviewed studies that, in general, the addition of recycled rubber improves durability and reduces the need for maintenance.

Key words: recycled rubber; hot asphalts; durability; maintenance.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La mezcla asfáltica hecha de agregados clasificados y ligante asfáltico es el material de pavimentación más común para infraestructuras de transporte como carreteras, puentes y aeródromos. El ligante asfáltico actúa como un adhesivo para unir los agregados entre sí para formar la resistencia del pavimento asfáltico. El asfalto mezclado en caliente es un método común para producir mezcla asfáltica [1] [2] [3].

Los ligantes asfálticos se calientan a una fase líquida a una temperatura alta (>150 °C) y se mezclan con agregados para producir una mezcla asfáltica suelta, que se coloca en la parte superior de la base de la carretera y se compacta para formar un pavimento asfáltico soportable. Aunque la mayoría de los compuestos livianos en el petróleo crudo se han eliminado durante el proceso de refinación, todavía quedan algunos restos en el residuo de asfalto final [1] [4]. Estos compuestos restantes pueden liberarse durante el proceso de producción de la mezcla asfáltica a alta temperatura, lo que también se conoce como emisión [5].

El caucho granulado (CR) producido a partir de neumáticos de vehículos usados reciclados se ha utilizado para mezclarlo con asfalto de petróleo con el fin de mejorar el rendimiento y reciclar neumáticos usados. Cada año se genera una gran cantidad de neumáticos usados, lo que es una gran preocupación para su tratamiento adecuado [6] [7]. La adición de CR a la mezcla de asfalto puede mejorar el rendimiento del pavimento asfáltico, como la estabilidad a temperaturas altas, incrementar la resistencia contra el agrietamiento a diminutas temperaturas del asfalto caliente [8]. El asfalto mezclado en caliente se ha introducido en la ingeniería de pavimentos debido a los beneficios tales como menor consumo de energía y emisión reducida [4].

Existe una gran demanda de utilización de neumáticos usados en las obras de construcción, lo que reducirá el daño al medio ambiente. Por tanto, reciclar neumáticos usados no sólo es una forma innovadora, sino también una de las formas más efectivas de prolongar la vida de los asfaltos del pavimento. Por lo tanto, los pavimentos de asfaltos calientes construidos con caucho reciclado tienen muchas ventajas, como una mayor durabilidad, una mayor resistencia al fatigarse inducida por la superficie y a las grietas reflectantes, y una mayor resistencia debido a una mayor capacidad de envejecimiento y oxidación a favor del pavimento asfáltico [9] [10] [11].

1.2. Justificación e Importancia de estudio

Este estudio es de relevancia creciente debido a su impacto en los ámbitos ambiental, económico y tecnológico. La producción masiva de neumáticos y su disposición inadecuada representan un problema ambiental significativo, ya que los neumáticos fuera de uso (NFU) son altamente contaminantes y de lenta degradación. Desde una perspectiva técnica, la incorporación de caucho reciclado en asfaltos calientes mejora las propiedades mecánicas del pavimento, como su durabilidad, resistencia al agrietamiento y capacidad de soporte de cargas. En el ámbito económico, esta práctica fomenta el desarrollo de un mercado secundario para los NFU, generando nuevas oportunidades de negocio y reduciendo gastos referidos a la disposición final de residuos. Por último, desde un punto de vista ambiental, contribuye a una mejor sostenibilidad de los residuos sólidos y a la reducción de la huella de carbono de las obras viales, en línea con los objetivos globales de desarrollo sostenible [12] [13] [14].

La revisión propuesta permitirá analizar y sintetizar el estado actual del conocimiento sobre esta tecnología, identificando sus ventajas, desafíos y oportunidades para promover su implementación en mayor escala, consolidando así un enfoque integral hacia una infraestructura vial más sostenible.

1.3. Formulación del problema

¿Cuáles son los efectos de la adición de caucho reciclado en asfaltos calientes respecto a su resistencia y a su vida útil?

1.4. Hipótesis

La adición de caucho reciclado en asfaltos calientes; influye de manera considerable en sus propiedades, mejorando su resistencia y alargando la vida útil.

1.5. Objetivos

Objetivo general

- Analizar el comportamiento de los asfaltos calientes adicionando caucho reciclado.

Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades del CR.
- Evaluar la resistencia de los asfaltos calientes con la adición de CR.
- Evaluar el porcentaje óptimo de CR que mejore las propiedades en asfaltos calientes.

- Identificar las ventajas y desventajas adicionando CR en asfaltos calientes.

1.6. Teorías relacionadas al tema

El espesor mínimo de construcción de la capa de asfalto caliente es de 40 mm, si el espesor es menor que el espesor especificado, se puede utilizar un espesor constructivamente equivalente de la capa de asfalto frío, grava asfáltica o micro superficie de 25 mm como capa superior de la berma. El refuerzo de los pavimentos debe extender su vida útil para resistir el tráfico esperado en condiciones de uso pleno y los costos de mantenimiento esperados dependiendo del tipo de carretera y pavimento. El objetivo principal de la restauración y refuerzo de pavimentos es eliminar las deficiencias de la superficie del pavimento existente, que perjudican la seguridad, el confort y la velocidad, con lo que se debe proporcionar al tráfico actual y futuro el grado adecuado de usabilidad en un periodo de tiempo determinado [15].

El caucho de neumáticos reciclados en gran proporción se deposita en vertederos donde se ocupa una gran cantidad de espacio valioso y se plantea una posible amenaza para las aguas subterráneas [16]. Además, crean importantes riesgos de incendio cuando se depositan abiertamente en el medio ambiente [17] [18]. Los componentes esenciales para la fabricación de neumáticos son 14% de caucho natural y sintético, 28% de carbón, 14-15% de acero, 16-17% de tejidos, rellenos, aceleradores y antiozonantes. Los principales componentes químicos del caucho de neumáticos usados son carbono (29%), aditivos (13%), relleno (1,9%) y otras mezclas químicas complejas, elastómeros, poli isopreno, polibutadieno y estireno-butadieno [19] [20].

Las mezclas granuladas porosas y discontinuas, que incorporan caucho granulado proveniente de Neumáticos usados (CR), parecen mostrar una absorción super buena de ruido, minimizando el nivel de ruido gracias a su alto contenido de vacíos de aire (21 %) [19] [21] [22]. El asfalto caliente generalmente se produce en una terminal de asfalto, donde luego se hierva el caucho a altas temperaturas, lo que puede durar varias horas o días, hasta lograr una mezcla continua [23]. Cuando el producto está terminado, se bombea a camiones o furgonetas, se transporta y se almacena en tanques especiales antes de su uso [24] [25].

El caucho asfáltico es un material aglutinante que se obtiene mezclando caucho reciclado de menor tamaño, conocido como caucho granulado (CR), con cemento asfáltico (betún) a temperaturas muy altas que van desde los 175° a 190 °C. Lo típico es mezclar el modificador de caucho granulado (CRM) con asfalto en una concentración

que varía entre el 5 y el 25 % en peso del aglutinante asfáltico de base [26] [27] [28].

El producto de caucho reciclado, funciona en el asfalto de manera eficiente siempre y cuando los materiales requeridos se seleccionan, diseñan, procesan y construyen adecuadamente [29]. La mezcla terminal es un proceso húmedo modificado que promueve la dispersión del caucho en el asfalto mediante cizallamiento a alta temperatura y alta velocidad. El tratamiento de activación del caucho puede mejorar la actividad y reducir el grado de polimerización, se han realizado muchos esfuerzos en términos de los procesos de fabricación, varias propiedades e influencias de las propiedades del caucho y el asfalto, se demostró que la ciencia y la tecnología del reciclaje del caucho de neumáticos de desecho se está fomentando en todo el planeta [30] [31] [32].

II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

En esta investigación se aplicó el método de investigación cualitativa documental, en el cual se obtuvieron datos acerca del análisis de la adición de caucho reciclado en asfaltos calientes. El proceso implicó la investigación de información, elección y revisión de dichos datos. La información fue obtenida de diversas fuentes de datos, como Scopus, Scielo, Ebsco, Science Direct, entre otras. La información fue interpretada y analizada de manera crítica, extrayendo los puntos más importantes. Finalmente, se redactó el artículo argumentando y comparando los resultados de las diferentes investigaciones.

III. RESULTADOS

Objetivo 1: Caracterizar las propiedades del CR

El CR tiene características como una alta elasticidad, resistencia al desgaste y a la fatiga, y una buena capacidad de amortiguación. Cuando se utiliza en la formulación de asfaltos calientes, el CR puede modificar el comportamiento del asfalto, aumentando su elasticidad, durabilidad y resistencia al agrietamiento. Sin embargo, uno de los desafíos es que el CR es difícil de mezclar de manera uniforme con el asfalto debido a su naturaleza heterogénea y a las diferencias en las propiedades de los materiales. Los resultados señalan que adicionando partículas de CR se reduce ligeramente el contenido óptimo de cemento asfáltico, da mayor estabilidad, mejor deformación plástica, mayor capacidad de resistencia alargando la vida del asfalto, en comparación de las mezclas convencionales [13] [33] [34].

El asfalto con grado de penetración de tipo 60/70 se agregaron diferentes CR en su estudio utilizando el proceso seco, y los resultados mostraron que el uso del proceso seco puede aumentar la vida útil del asfalto [35]. Por otro lado, utilizaron asfalto de permeabilidad 60/70 ampliamente utilizado en los sistemas viales iraníes y agregaron un 15% de CR en su estudio. Indicaron que la CR mejoró significativamente la resistencia a la fractura del asfalto porque el ligante base se volvió flexible y aumentó la adhesión entre el ligante y el agregado [36].

Tabla I

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CR

Elemento	Composición
Carbono – C (%)	70
Hidrógeno - H (%)	7
Azufre - S (%)	1.3
Cloro - Cl (%)	0.2 – 0.6
Hierro - Fe (%)	15
Oxido de Zinc – ZnO (%)	2
Dióxido de Silicio - SiO ₂ (%)	5
Cromo - Cr (ppm)	97
Níquel – Ni (ppm)	77
Plomo – Pb (ppm)	60 – 760
Cadmio - Cd (ppm)	5 – 10
Talio - Tl (ppm)	0.2 – 0.3

Nota: Se detalla la composición química del CR [19][6].

Un punto de vista es que la regeneración consiste principalmente en añadir los componentes ligeros faltantes al asfalto envejecido, de modo que la proporción de los componentes del asfalto se coordine y se restaure a las propiedades originales [37]. Una revisión a detalle muestra que la adición de CR al asfalto, agregados y mezclas puede mejorar el desempeño de las mezclas en términos de resistencia a la tracción,

sensibilidad a la humedad, resistencia al ahuellamiento, etc. Resistencia a la penetración y al envejecimiento, alarga la vida de la mezcla y reduce el ruido [41] [42].

Tabla II
COMPOSICIÓN DEL CR SEGÚN EL TIPO

Componente	Llanta de carro liviano	Llanta de camión
Caucho natural (%)	14	27
Caucho sintético (%)	27	14
Negro de humo (%)	28	28
Acero (%)	14 – 15	14 – 15
Fibra textil; suavizantes; óxidos; etc. (%)	16 – 17	16 – 17
Peso promedio (kg); etc.	8.6	45.4
Volumen (m3)	0.06	0.36

Nota: Se detallan los componentes del CR, según el tipo [19][6].

Objetivo 2: Evaluar la resistencia de los asfaltos calientes con la adición de CR

El asfalto mezclado en caliente se ha introducido en la ingeniería de pavimentos debido a los beneficios tales como menor consumo de energía y emisión reducida. Por lo tanto, el uso de CR como aditivo mejorador de rendimiento en pavimentos puede ser una de las alternativas para reciclar y reutilizar este material de desecho [6]. Expuesto al entorno natural e influenciado por la luz solar, la temperatura, la humedad, la oxidación, etc., el asfalto envejece gradualmente, lo que reduce la durabilidad y el rendimiento en carretera. Con el fin de ahorrar recursos y cuidar el ambiente, el reciclaje de materiales a menudo se considera en la construcción de carreteras, incluida la regeneración de aglutinante asfáltico. Hay principalmente dos puntos de vista sobre el mecanismo de regeneración del asfalto [38] [39].

Sobre el rendimiento y/o comportamiento y las propiedades mecánicas en asfaltos se realizaron estudios para determinar el efecto de mezclar con CR. Los resultados del estudio demostraron que la adición de CR al ligante asfáltico en caliente es útil para

aumentar la resistencia a condiciones húmedas, aumentar el módulo elástico y mejorar la capacidad de resistir las deformaciones permanentes que ocurren en cualquier nivel de carga del vehículo. cuyo comportamiento se acelera al aumentar la carga del tráfico. Además, en cuanto a resistencia al deslizamiento, se agregó CR a la mezcla asfáltica en proporciones de 0,5%, 1%, 1,5% y 2%, teniendo como resultado que la adición de 1% CR ha mostrado los mejores resultados y proporciona una mejor resistencia al deslizamiento [40] [26].

Objetivo 3: Evaluar el porcentaje óptimo de CR que mejore las propiedades en asfaltos calientes

El porcentaje óptimo de CR en una mezcla asfáltica varía dependiendo de cómo se agrega el CR a la mezcla asfáltica. Al agregar asfalto, se recomienda reponer el 20% de la masa asfáltica. Cuando se agregue a una mezcla, use del 1 % al 3 % del peso total de la mezcla para obtener resistencia y longevidad a largo plazo. Las propiedades microestructurales de las partículas de caucho reciclado CR afectan el rendimiento después de mezclarlas con el aglutinante. El porcentaje en masa de partículas de caucho reciclado es del 5% y del 10% del peso del aglutinante base [30].

Tabla III

PORCENTAJE DE CR

Porcentaje de caucho reciclado (%)	Mejoras
5 y 10	Cuando el nivel de adición es del 5%, la mejora es insignificante, cuando el nivel de adición es del 10%, se mejora la resistencia al agrietamiento y la alta recuperación de fluencia por tensión múltiple.
8 y 12	El 8% ayuda a mejorar el rendimiento a altas temperaturas. El rendimiento y la flexibilidad a altas temperaturas mejoraron en un 10 %.
3 y 6	El 3% proporciona más estabilidad, el 6% proporciona menos estabilidad.
15 y 20	Mejora de la reducción de surcos, fatiga y grietas.

Nota: Diferentes porcentajes de CR usados [30].

La adición de CR procedente de neumáticos de desecho a las mezclas de pavimento asfáltico tiene como objetivo mejorar las propiedades del asfalto al reducir su sensibilidad natural a la temperatura del aglutinante. El CR modificado con un contenido de miga superior al 20% se caracteriza por una mayor viscosidad, mejor elasticidad y mejores propiedades antifatiga y antienviejamiento. De manera similar, el CR se agrega a las mezclas asfálticas como estrategia efectiva para mejorar la resistencia a la fatiga de los pavimentos asfálticos [41] [42]. Los ahorros en asfalto con CR son del 5,8% en comparación con el asfalto no modificado, el ahorro de combustible es de aproximadamente el 13% y las emisiones nocivas se han reducido significativamente; de manera similar, los resultados de las propiedades mecánicas muestran que el asfalto con CR tiene mejor resistencia al ahuellamiento, rendimiento a bajas temperaturas y mejores propiedades de fatiga y resistencia al daño por humedad en comparación con el betún sin CR [30] [43].

Sin embargo, para investigar el efecto de este producto sobre la resistencia a la deformación, se calculó la mezcla de asfalto y caucho con diferentes proporciones y tamaños, lo que demostró que las partículas de CR tienen un tamaño inferior a 0,6 mm y una proporción del 2% tiene una relación excelente comportamiento anti deformación. En otro caso, se realizó una evaluación presentando un análisis del aumento de la adherencia y disminución de la deformación de superficies semiflexibles al utilizar aditivos en cantidades del 3%, 4%, 5% en comparación con el peso total del caucho usado [44] [45].

Tabla IV
PORCENTAJE ÓPTIMO DE CR

Porcentaje de caucho (%)	Tamaño de partícula (mm)	Mejoras
5	0.3	Mejora la durabilidad del asfalto
2	0.6	Excelente resistencia a la deformación
0.15	2.36	Mayor resistencia y rigidez a bajas temperaturas.

Nota: Diferentes porcentajes óptimos de CR usados y su tamaño [30].

Objetivo 4: Identificar las ventajas y desventajas adicionando CR en asfaltos calientes

Se resalta que el uso de caucho granulado en pavimentos asfálticos ayuda a reducir el impacto al medio ambiente. En el campo de la ingeniería de pavimentos, una de las aplicaciones prácticas del CR fue la modificación del asfalto de pavimentación como modificador de elastómero, y el producto final se conoció como asfalto cauchutado. Por un lado, tenía las principales ventajas de una vida útil prolongada del pavimento, un retardo del agrietamiento por reflexión, una disminución del ruido del tráfico y una reducción del costo de mantenimiento [46] [47].

Tiene un gran efecto positivo en la mejora del rendimiento del asfalto base ordinario, sino que también tiene las ventajas de una gran producción, bajo precio y protección del medio ambiente, asimismo mejora la capacidad de fatiga de la mezcla de asfalto, pero el grado de mejora del método de inyección directa fue ligeramente más débil que el de la modificación húmeda mejora moderadamente la absorción acústica, especialmente en mezclas con un alto contenido de huecos [26] [48] [49]. Sin embargo, también existían preocupaciones por otro lado, como la mala estabilidad de almacenamiento, la alta viscosidad y las emisiones peligrosas adicionales. El asentamiento y la degradación incompleta de las partículas de caucho durante la mezcla provoca la disparidad entre el asfalto y el modificador, lo que limitó la utilización de dicho asfalto modificado en el campo [50].

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Es esencial caracterizar adecuadamente las propiedades del CR para comprender cómo interactúa con el asfalto y asegurar que las modificaciones mejoren las propiedades deseadas del pavimento. La variabilidad de los tipos de CR reciclado puede influir en el comportamiento final del asfalto, por lo que se deben realizar estudios detallados sobre su origen, proceso de reciclaje y condiciones de uso para predecir sus efectos en la mezcla de asfalto [13] [33] [34].

La incorporación de CR en asfaltos calientes tiende a mejorar la resistencia a la fatiga, ya que el CR reduce la propagación de grietas. Sin embargo, es importante evaluar si esta mejora en la resistencia se acompaña de efectos negativos, como una reducción en la adherencia entre el asfalto y el agregado, lo cual podría contrarrestar los beneficios. Además, el proceso de mezcla debe ser cuidadosamente controlado para evitar que el CR interfiera con otras propiedades del asfalto, como su adherencia o su comportamiento a altas temperaturas [38] [39].

Es necesario realizar un balance adecuado entre la cantidad de CR y las propiedades del asfalto para asegurar que los beneficios superen a los posibles inconvenientes. Un porcentaje bajo de CR puede no generar una mejora significativa en la elasticidad y resistencia, mientras que un porcentaje demasiado alto puede dificultar la producción del asfalto y afectar la calidad del pavimento. La investigación de mezclas con diferentes porcentajes de CR es clave para establecer pautas de uso óptimas en función de los requisitos de durabilidad, manejo y rendimiento de los pavimentos [26] [51] [52].

Las ventajas de la adición de CR en asfaltos calientes son claras, especialmente en términos de sostenibilidad y mejora de la durabilidad. No obstante, los desafíos técnicos relacionados con la mezcla y el control de la calidad del pavimento siguen siendo puntos críticos. La investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de mezcla, junto con la evaluación constante de las propiedades de los asfaltos modificados, son esenciales para mitigar las desventajas y maximizar los beneficios del CR en asfaltos calientes [53] [54].

Basándose en detalladas revisiones de investigaciones anteriores sobre los impactos de incluir caucho reciclado en mezclas asfálticas calientes, se obtuvieron las conclusiones siguientes:

Las pruebas han demostrado que la adición de polvo de neumáticos (CR) mejora las propiedades físicas y mecánicas del asfalto convencional; como la resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas.

El uso de caucho de neumáticos reciclados en las mezclas asfálticas aumenta la resistencia al deslizamiento.

Dar uso a mezclas modificadas, no cambia los procedimientos normalmente utilizados en las operaciones de pavimentación, además se destaca que esta adición, trae beneficios económicos a largo plazo durante el mantenimiento y vida útil de la capa asfáltica.

V. REFERENCIAS

- [1] X. Yang , T. Zhanping , D. Perram, D. Mano , Z. Ahmed, W. Wei y L. Sang , «Emission analysis of recycled tire rubber modified asphalt in hot and warm mix conditions,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. CCCLXV, nº 5, pp. 942-951, 2019.
- [2] Z. Wenhua , W. Hainian , C. Yu , J. Jie , Y. Zhanping y Z. Yuqing , «A review on compatibility between crumb rubber and asphalt binder,» *Construction and Building Materials*, vol. CCXCVII, nº 23, 2021.
- [3] Goshtasp Cheraghian , A. Cannone Falchetto, T. Zhanping , C. Siyu , K. Yun Su , J. Westerhoff, L. Ki Hoon y M. P. Wistuba, «Warm mix asphalt technology: An up to date review,» *Journal of Cleaner Production*, vol. CCLXVIII, nº 20, 2020.
- [4] M. Sukhija y . N. Saboo, «A comprehensive review of warm mix asphalt mixtures- laboratory to field,» *Construction and Building Materials*, vol. CCLXXIV, nº 8, 2021.
- [5] W. Cando, P. Bonilla, G. Yáñez, . J. Bucheli, A. Muñoz y M. F. Orquera, «Efecto de la incorporación por vía seca del residuo de caucho obtenido tras la remoción de una pista de aeropuerto en asfalto AC-20,» *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia,* vol. XLIII, nº 1, pp. 3-11, 2020.
- [6] A. Tasalloti, G. Chiaro, A. Murali y L. Banasiak, «Physical and Mechanical Properties of Granulated Rubber Mixed with Granular Soils—A Literature Review,» *Sustainability*, vol. XIII, nº 8, pp. 1-27, 2021.
- [7] L. G. Picado-Santos, S. D. Capitão y J. M. Neves, «Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review,» *Construction and Building Materials*, vol. CCXLVII, nº 30, 2020.
- [8] JTTE Editorial Office, J. Chen , D. Hancheng , D. Yongjie , . G. Yangming, . G. Meng y et al., «New innovations in pavement materials and engineering: A review on pavement engineering research 2021,» *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, vol. VIII, nº 6, pp. 815-999, 2021.
- [9] L. Jin , C. Zixuan , X. Feipeng y S. N. Amirkhanian, «Surface activation of scrap tire crumb rubber to improve compatibility of rubberized asphalt,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. CLXIX, 2021.
- [10] W. Chaohui , W. Menghao , C. Qian y L. Zhang, «Basic performance and asphalt smoke absorption effect of environment-friendly asphalt to improve pavement construction environment,» *Journal of Cleaner Production*, vol. CCCXXXIII ., nº 20, 2022.
- [11] J. E. Salcedo Fontalvo, . D. L. Vega A., A. Castro Cabeza, C. Ramirez Lozano y S.

Lopez Rengifo , «Mechanical and Environmental Analysis of Granular Subbase with Fine Crumb Rubber,» *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. XLIX, nº 10, pp. 14389-14401, 2024.

- [12] . C. Higuera-Flórez, J. Cárdenas-Pulido y A. Vargas-Aguilar, «Evaluación experimental y numérica del uso de caucho reciclado como apoyo elastomérico en modelos de puentes simplemente apoyados,» *Revista UIS Ingenierías*, vol. XXI, nº 2, 2022.
- [13] B. C. Cox, A. S. Carey, . J. V. Lewis y I. L. Howard, «Twenty-Five Years of Rubber Tire Wheel Tracking of Asphalt Pavements in a Laboratory,» *Transportation Research Record*, vol. MMDCLXXVI, nº 11, pp. 74-92, 2022.
- [14] P. Flores, A. Gatica, D. Trinidad y V. Sulca, «Uso de Grano de Caucho Reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria,» *Investigatio*, nº 18, pp. 34-49, 2022.
- [15] M. D. C. R. N. 10-2014-MTC/14, *SUELOS, GEOLOGÍA, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS*, 2014.
- [16] A. Adeyemi y D. Sreekanta , «Crack properties, toughness and absorption evaluation of FRCC incorporating reclaimed asphalt pavement and crumb rubber as aggregates,» *Cleaner Materials*, vol. I, 2021.
- [17] O. A. Abaza, Ph.D. y M.ASCE., «Steel Fiber-Reinforced Rubberized Concrete for Roadways in Cold Regions: Public Road Test,» *Journal of Materials in Civil EngineeringList of IssuesVol. 35, No. 7*, vol. XXXV, nº 7, 2023.
- [18] F. Ma, J. Dai , Z. Fu , J. Liu , W. Dong y Z. Huang , «A New Type of Crumb Rubber Asphalt Mixture: A Dry Process Design and Performance Evaluation,» *Applied Sciences*, vol. X, nº 1, p. 372, 2020.
- [19] S. A. Alfayez, A. R. Suleiman y M. L. Nehdi, «Recycling Tire Rubber in Asphalt Pavements: State of the Art,» *Sustainability, MDPI*, vol. XII, nº 21, pp. 1-15, 2020.
- [20] A. . S. Figueroa Infante y E. F. Santanilla, «Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR,» *Infraestructura Vial*, vol. XXII, nº 39, 2020.
- [21] F. R. Apaza Apaza, V. Vázquez, S. Paje, L. Saiz, F. Gulisano y J. Gallego , «The potential effect of crumb rubber on the maximum sound absorption performance of asphalt mixtures,» *Construction and Building Materials*, vol. CCCLXXXIX, nº 31, 2023.
- [22] Y. Guo, P. Tatarann y C. Sangiorgi, «The use of fibres in asphalt mixtures: A state of the art review,» *Construction and Building Materials*, vol. CCCXC, nº 1, 2023.

- [23] M. Yuetan , S. Wang, H. Zhou , . W. Hu , P. Polaczyk y B. Huang, «Recycled polyethylene and crumb rubber composites modified asphalt with improved aging resistance and thermal stability,» *Journal of Cleaner Production*, vol. CCCXXXIV, nº 1, 2022.
- [24] Ahmed Hemida, Ph.D., Aff.M.ASCE y Magdy Abdelrahman, Ph.D., A.M.ASCE, «Performance Assessment of Bioasphalt Mixtures Containing Guayule Resin as an Innovative Biobased Asphalt Alternative,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. XXX5, nº 4.
- [25] M. A. Guzmán-Sánchez, «Comparative study of stress relaxation phenomenological constitutive modeling of carbon black-reinforced natural rubber-based compounds,» *Dyna*, vol. LXXXVIII, nº 216, pp. 55-61, 2021.
- [26] L. M. Hoyos Díaz, K. d. C. Puicon Herrera y S. P. Muñoz Pérez, «Uso del caucho granulado en mezclas asfálticas: Una revisión literaria,» *Infraestructura Vial*, vol. XXIII, nº 41, 2021.
- [27] V. Hosahally Nanjegowda y K. Prapoorna Biligiri, «Utilization of high contents of recycled tire crumb rubber in developing a modified-asphalt-rubber binder for road applications,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. CXCII, 2023.
- [28] V. Hosahally Nanjegowda y K. Prapoorna Biligiri, «Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. CLV, 2020.
- [29] G. Jalal Kashesh, . J. Hasan H., A. Dulaimi y A. Jalal Kaishesh, «Laboratory investigation on the performance of asphalt bitumen using recycled tyre rubber produced in Iraq,» *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [30] J. R. Bobadilla Peña, F. L. Tesen Muñoz, J. J. Tigre Acosta y S. P. Muñoz Pérez , «USE OF POLYMERS IN ASPHALT: A REVIEW,» *Gaceta Técnica*, vol. XXIII, nº 1, pp. 94-109, 2022.
- [31] Qi Liu, Bo Han, Shuyi Wang, A. Cannone Falchetto, Di Wang, Bin Yu y Jiupeng Zhang , «Evaluation and molecular interaction of asphalt modified by rubber particles and used engine oil,» *Journal of Cleaner Production*, vol. CCCLXXV, nº 15, 2022.
- [32] S. Lotfollahi, A. Jaidari, P. Bakhtiari, M. Hosseini y M. Ghorbani , «Effect of Wollastonite Microfibers and Waste Tire Rubber on Mechanical Properties of Concrete,» *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. XVII, nº 33, 2023.
- [33] D. V. Guzmán-Ortiz, J. B. Hernández-Zaragoza y T. López-Lara, «Uso de agregado

de pavimento asfáltico reciclado para un pavimento rígido,» *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, vol. XXII, nº 1, 2021.

- [34] R. Ochoa Díaz y C. H. Higuera Sandoval, «Effect of the grain size of recycled rubber on the behaviour of an asphalt mix,» *Revista ingeniería de construcción*, vol. XXXVIII, nº 1, pp. 163 - 175, 2023.
- [35] I. Bakheit y H. Xiaoming, «Modification of the dry method for mixing crumb rubber modifier with aggregate and asphalt based on the binder mix design,» *Construction and Building Materials*, vol. CCXXI, nº 6, pp. 278-284, 2019.
- [36] S. Pirmohammad y M. Khanpour, «Fracture strength of warm mix asphalt concretes modified with crumb rubber subjected to variable temperatures,» *Road Materials and Pavement Design*, vol. XXI, nº 1, pp. 1-20, 2020.
- [37] X. Guangji , . Y. Yushi, M. Tao , H. Siwen y N. Bin , «Experimental study and molecular simulation on regeneration feasibility of high-content waste tire crumb rubber modified asphalt,» *Construction and Building Materials*, vol. CCCLXIX, nº 10, 2023.
- [38] L. R. Vásquez-Varela y F. J. García-Orozco, «An overview of asphalt pavement design for streets and roads,» *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, nº 98, pp. 1-17, 2021.
- [39] F. Jove Wilches, Á. R. Caballero Guerrero y G. Patrón Lambraño, «Modeling of Asphalt Pavement Considering the Application of Empirical,» *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. XIII, nº 11, pp. 3919-3926, 2020.
- [40] T. Khaled, G. Aboud y R. Al-Hamd, «Study the effect of adding crumb rubber on the performance of hot mix asphalt,» *Materials science and engineering*, 737(1), 1-12., vol. DCCXXXVII, nº 1, pp. 1-12, 2020.
- [41] Weitian Zha y Qun Yang, «Life cycle assessment and multi-index performance evaluation of semi-flexible pavement after composite modification by using fly ash, rubber particles, warm mixing asphalt and recycled asphalt pavement,» *Construction and Building Materials*, vol. CCCLXIV, nº 18, 2023.
- [42] P. S. Wulandari y D. Tjandra, «The use of crumb rubber for replacing fine aggregate in cold,» *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. DCXV, nº 1, pp. 1-7, 2019.
- [43] Y. Xiaoguang , X. Huiyu y X. Tao , «Mechanical properties and enhancement mechanisms of cold recycled mixture using waterborne epoxy resin/styrene butadiene rubber latex modified emulsified asphalt,» *Construction and Building Materials*, vol. CCCLII, nº 17, 2022.

- [44] S. Kocak y M. E. Kutay, «Fatigue performance assessment of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using viscoelastic continuum damage analysis and AASHTOWare pavement ME design,» *Construction and Building Materials*, vol. CCXLVIII, nº 10, 2020.
- [45] H. . A. Rondón Quintana, W. A. Castro López y J. . H. Castillo Chamorro, «Propiedades dieléctricas de asfaltos: revisión,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. XXXI, nº 2, pp. 61-73, 2021.
- [46] A. Riekstins, J. Baumanis y J. Barbars, «Laboratory investigation of crumb rubber in dense graded asphalt by wet and dry processes,» *Construction and Building Materials*, vol. CCXCI, nº 19, 2021.
- [47] A. M. Rodríguez-Alloza, F. Autelitan y F. Giuliani, «Restoration of physical properties on an aged crumb rubber modified bitumen adding a bio-based recycling agent,» *Case Studies in Construction Materials*, vol. XVIII, 2023.
- [48] T. T. Khaled, . G. M. Aboud y R. K. Al-Hamd, «Study the effect of adding crumb rubber on the performance of hot mix asphalt,» *Materials science and engineering*, vol. DCCXXXVII, nº 1, pp. 1-12, 2020.
- [49] Z. Chen , L. Rui , K. Dongliang , L. Xudong y P. Jianzhong , «Preparation of direct injection waste PE/rubber powder composite modified granules and performance for recycling asphalt,» *Construction and Building Materials*, vol. CCCLXVII, nº 27, 2023.
- [50] Y. Ma, S. Wang, H. Zhou , W. Hu y P. Polaczyk, «Compatibility and rheological characterization of asphalt modified with recycled rubber-plastic blends,» *Construction and Building Materials.*, vol. CCLXX, nº 8, 2021.
- [51] R. E. Vasquez Llamo , . W. R. Vasquez Ramírez y S. P. Muñoz Pérez, «Uso de aditivos adherentes en el diseño de mezclas asfálticas en caliente: una revisión,» *Gaceta Técnica*, vol. XXII, nº 1, pp. 66-78,, 2021.
- [52] J. Taheri-Shakib y A. Al-Mayah,, «A review of microstructure characterization of asphalt mixtures using computed tomography imaging: Prospects for properties and phase determination,» *Construction and Building Materials*, vol. CCCLXXXV, nº 3, 2023.
- [53] . C. Makoundo, . A. Fathollahi, S. Kleiven, . S. J. Coupe y C. Sangiorgi, «Mechanical and leaching characterisation of impact-absorbing rubberised asphalts for urban pavements.,» *Materials and Structures*, vol. LVI, nº 3, 2023.
- [54] Tacettin GEÇKİL, Talha SARICI y Bahadır OK, «Model studies on recycled whole rubber tyre reinforced granular fillings on weak soil,» *Revista de la construcción*,

vol. XXI, nº 2, pp. 264 - 280, 2022.

- [55] H. Ibrahim , S. Marini, L. Desidery y M. Lanotte, «Recycled plastics and rubber for green roads: The case study of devulcanized tire rubber and waste plastics compounds to enhance bitumen performance,» *Resources, Conservation & Recycling Advances*, vol. XVIII, 2023.
- [56] T. B. Vishnu y K. Lakshman Singh , «A performance study on asphalt concrete mixes with different waste materials as modifiers in pavement application,» *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. XXV, p. 1519–1533, 2023.

V. ANEXOS

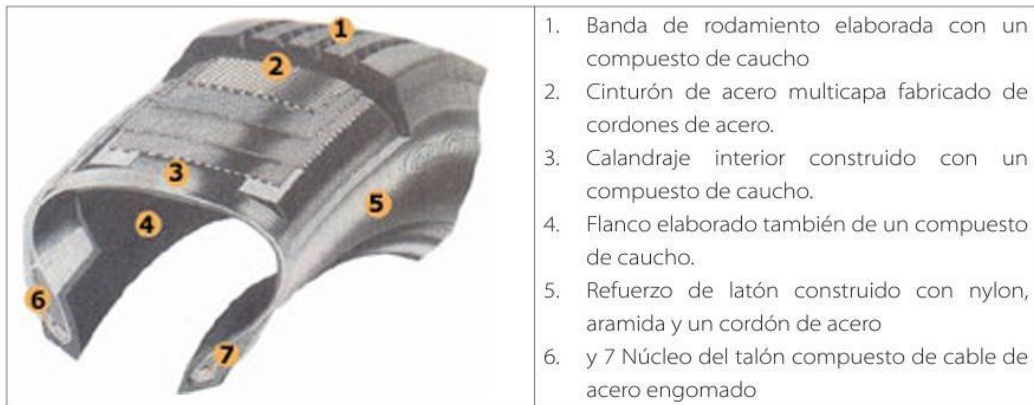


Fig. 1. Componentes de la estructura de las llantas



Fig. 2. Proceso de adición del CR por vía seca

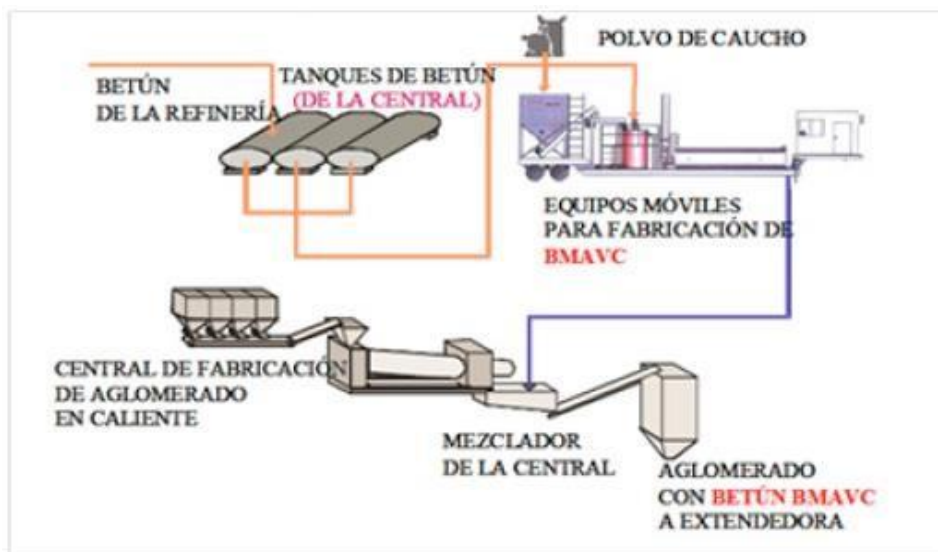


Fig. 3. Proceso de adición del CR por vía húmeda