



*Investigatio*

ISSN: 1390 - 6399 • ISSN-e: 2602 - 8336

Universidad Espíritu Santo – UEES

---

## Uso de Grano de Caucho Reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria

---

### Using Recycled Rubber Grain to Improve Strength and Durability in Pavements: A Literary Review

---

Pilar Flores<sup>1</sup>  0000-0000-0000-0000

Antonio Gatica<sup>2</sup>  0000-0000-0000-0000

Diana Trinidad<sup>1</sup>  0000-0000-0000-0000

Víctor Sulca<sup>3</sup>  0000-0000-0000-0000

<sup>1</sup>Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería Civil, Ate Vitarte – Perú

<sup>2</sup>Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería Civil, Tarapoto – Perú

<sup>3</sup>Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería Civil, Lima Norte – Perú

**Cita:** Flores, P., Gatica, A., Trinidad, D., & Sulca, V. (2022). *Uso de Grano de Caucho Reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria*, (18). 34 – 49. <https://doi.org/10.31095/investigatio.2022.18.2>

Fechas · Dates	Correspondencia · Corresponding Author
Recibido: 25.07.2021	Pilar Flores
Aceptado: 12.10.2021	Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería Civil, Ate Vitarte – Perú
Publicado: 15.03.2022	<a href="mailto:pfloresto@ucvvirtual.edu.pe">pfloresto@ucvvirtual.edu.pe</a>

### Resumen

Hace ya varios años, a nivel mundial, se desecha grandes cantidades de caucho de neumático, lo cual agrava el problema de la contaminación ambiental. Una buena alternativa para mitigar este problema y a la vez aprovecharlo de una manera eficiente es obtener caucho granulado a partir del caucho reciclado para utilizarlo en los pavimentos ya que mejora su resistencia y durabilidad. El presente documento tuvo como objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura sobre los procesos principales para producir mezclas asfálticas y la manera como el uso del grano de caucho reciclado (CR) incide en el diseño y la mejora de las propiedades físicas y mecánicas en el asfalto. Se revisaron 50 artículos indexados en la base de datos de Scopus entre los años 2015 y 2021 sobre el caucho reciclado, incorporación del caucho granulado en mezclas asfálticas y las propiedades físicas y mecánicas del caucho granulado mezclado con suelos granulares en el asfalto. Después de investigar en diferentes artículos se determinó que los procesos más importantes para incluir el CR en las mezclas asfálticas son el proceso seco, húmedo y semihúmedo. Se concluye que el uso del CR en su mezcla mejora las propiedades mecánicas del asfalto

tales como el aumento del módulo de rigidez, el aumento de la resistencia a la humedad, el alargamiento de su vida útil incluso tiene aplicaciones en la amortiguación de vibraciones en obras de construcción civil.

---

**Palabras clave:** Caucho reciclado, caucho granulado, mezclas asfálticas, proceso húmedo, propiedades del asfalto.

---

### Abstract

For several years now, globally, large quantities of tire rubber have been discarded, which exacerbates the problem of environmental pollution. A good alternative to mitigate this problem and at the same time take advantage of it in an efficient way is to obtain granulated rubber from recycled rubber to use it in pavements since it improves its resistance and durability. The objective of this document was to carry out a systematic review of the literature on the main processes to produce asphalt mixtures and the way in which the use of recycled rubber grain (CBR) affects the design and improvement of the physical and mechanical properties in the asphalt. 50 articles indexed in the Scopus database between 2015 and 2021 on recycled rubber, incorporation of granulated rubber in asphalt mixtures and the physical and mechanical properties of granulated rubber mixed with granular soils in asphalt were reviewed. After investigating in different articles, it was determined that the most important processes to include CR in asphalt mixtures are the dry, wet and semi-humid process. It is concluded that the use of CBR in its mixture improves the mechanical properties of asphalt, such as the increase in the modulus of rigidity, the increase in resistance to humidity, the lengthening of its useful life, and even has applications in the damping of vibrations in construction sites. civil construction.

---

**Keywords:** Recycled rubber, granulated rubber, asphalt mixtures, wet process, asphalt properties.

---

### INTRODUCCIÓN

Se estima que en la actualidad en todo el mundo solo menos del 10% de los neumáticos al final de su vida útil se reutilizan en aplicaciones geotécnicas, mientras que casi el 40% se recicla como combustible derivado de neumáticos (Tasalloti, Chiaro, Murali, & Banasiak, 2021). La generación de residuos a partir de neumáticos de caucho viejos ha ido aumentando y provocando la degradación ambiental con el aumento del número de vehículos especialmente en las ciudades (Mbreyaho, Manzi, Kamanzi, & Nizeyimana, 2021). Los neumáticos al final de su vida útil representan una gran fuente de materiales de construcción sostenibles, de bajo costo y fácilmente disponibles que tienen excelentes propiedades de ingeniería (Tasalloti, Chiaro, Murali, & Banasiak, 2021).

Por otro lado, las llantas recicladas de la India representan alrededor del 6 al 7 por ciento del número mundial. A medida que la industria de neumáticos circundante crece a un ritmo del 12 por ciento anual, aumentan las cantidades derrochadas. India ha estado reutilizando neumáticos desechados durante cuatro décadas, aunque se afirma que el 60 por ciento de los neumáticos se eliminan mediante vertederos ilegales (Kumar Behera, Giri, & Sekhar das, 2020). También se sabe que los desechos derivados de diversas fuentes generalmente se queman al aire libre, se vierten en cuerpos de agua y se descargan en alcantarillas. Entonces surge la necesidad de un uso eficaz de la energía ya que el cambio climático nos obliga a reducir la contaminación y aumentar el reciclaje y la reutilización (Vishnu & Singh, 2021). Entonces mediante el proceso de reciclaje, se pueden ahorrar en el futuro las necesidades energéticas para la producción de material virgen. El material reciclado se utiliza en diversas aplicaciones como construcción, mobiliario, arquitectura, pavimentos de carreteras, bancos de parques, etc., pero antes de su uso en diferentes aplicaciones por parte de los fabricantes, es necesario analizar las propiedades del caucho reciclable (Barnabas & Geethan, 2021). Del mismo modo es preciso mencionar que el aglutinante asfáltico es considerado una de las claves más significativas en el pavimento flexible y sus características tienen un gran

impacto en las mezclas asfálticas por lo que la elección del tipo de aglutinante asfáltico adecuado puede mejorar su desempeño y control en fallas por deformación permanente (Abed & Al-Haddad, 2020). Por ese motivo, el uso de caucho reciclado para la modificación del asfalto está ganando cada vez más atención para el desarrollo de pavimentos sostenibles (Ma, y otros, 2021). Porque el caucho granulado reciclado es rico en compuestos con una potencia tóxica no reconocida (Skoczyńska, Leonards, Llompart, & de Boer, 2021). Además, es sabido que el pavimento flexible depende y consume principalmente una gran cantidad de betún, lo que se ha convertido en un problema importante en términos de sostenibilidad ambiental y puntos de vista económicos (Ansari, Jakarni, Muniandy, Hassim, & Elahi, 2021).

Los materiales de construcción estarán en etapa de extinción en el futuro. El betún obtenido como subproducto de la refinería de petróleo utilizado para la construcción de pavimentos flexibles está al borde de la extinción, ya que el petróleo natural es un recurso no renovable (Kumar Behera, Giri, & Sekhar das, 2020). Y para resolver el problema, se utiliza un número significativo de neumáticos al final de su vida útil para la recuperación de energía, pero de esta manera, el potencial del valioso material no se alcanza por completo (Riekstins, Baumanis, & Barbars, 2021).

Gull y Gahir tienen la misma idea porque mencionan que, el betún utilizado para la construcción de carreteras está disponible en cantidades limitadas como producto del petróleo. El mundo produce una gran cantidad de desechos en forma de caucho molido y cuero de la fabricación de zapatos y desechos después de su uso. La sustitución parcial de caucho y cuero en la mezcla bituminosa puede aumentar el rendimiento de la mezcla bituminosa (Gull & Gahir, 2020). Por eso Alfayez y colaboradores mencionan que la flexibilidad de las mezclas asfálticas modificadas disminuye mucho en comparación con las mezclas no modificadas, lo que da lugar a una reducción de la resistencia al agrietamiento por fatiga. (Do, Nguyen, Tran, & Tai Nguyen, 2020). Varios estudios han indicado que el caucho de neumáticos reciclado puede reducir la deformación permanente de los pavimentos flexibles y mejorar su resistencia a la formación de surcos, reducir los costos de construcción y mantenimiento del pavimento y mejorar la resistencia al daño por fatiga (Alfayez, Suleiman, & Nehdi, 2020).

## **I. DESARROLLO**

### **1.1. METODOLOGÍA**

La revisión de literatura se ha llevado a cabo mediante el análisis de 50 artículos en inglés sobre el tema Uso de grano de caucho reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos. En el presente trabajo se ha utilizado la base de datos Scopus como fuente de información. (Semaan Llurba, 2020)

#### **2.1.1. Método de Muestreo**

El dictamen de búsqueda en la base citada fueron los siguientes; el primer tamizado en la búsqueda de información fue el tipo de documento, por ende sólo se utilizaron los artículos científicos, porque son una fuente confiable ya que pasan por un proceso de revisión pares.

El segundo dictamen fue el periodo de tiempo a abarcar. Se optó que el periodo temporal analizado abarcaría desde el año 2015 hasta el 2021 a su vez también se excluyó aquellos artículos que no estaban relacionados al área temática de ingeniería o ambiental.

El tercer, y último, dictamen fue la temática, en aquellos artículos relacionados con el uso de grano de caucho reciclado en pavimentos. Para ello se estableció que los artículos debían contener en su título, abstract o palabras clave el concepto (a) reciclabilidad del caucho, (b) resistencia y viabilidad de pavimentos a base de

caucho, (c) comportamiento del caucho. Tras realizar la búsqueda, los trabajos fueron revisados manualmente para comprobar: a) que no sean duplicados y, b) que efectivamente trataran del tema objeto de análisis. La muestra final obtenida se compuso de un total de 50 artículos.

### 2.1.2. Análisis de los datos

Respecto a la identificación de palabras claves, de vital importancia para la recopilación de datos, se trabajó con palabras claves ya antes mencionadas tanto en inglés y español, que permitieron un filtro de artículo más rápido y de mayor pertinencia.

**Tabla 1:** Artículos distribuidos de acuerdo al año de publicación

Base de datos	Año de Publicación							total
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
SCOPUS	1	2	2	6	9	15	13	50

Fuente: Elaboración propia

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Comparación de los procesos principales para producir mezclas asfálticas: Proceso Húmedo – Proceso Seco – Proceso Semihúmedo

Chávez y sus colaboradores hicieron un estudio de laboratorio con el objetivo de comparar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas con caucho granulado agregado por diferentes tecnologías mediante tres procesos que son: proceso húmedo, seco y semihúmedo. De las cuales cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventajas. Para el proceso húmedo (WP) se necesitan equipos costosos, mientras que el proceso seco (DP) requiere largos tiempos de digestión para lograr resultados aceptables. En la investigación hecha por los autores aquí citados, se utilizó una mezcla que contiene un 8,6 por ciento de betún de alta viscosidad modificado con caucho. A partir de los ensayos realizados se obtuvieron que, las mezclas de caucho asfáltico fabricadas por vía húmeda tuvieron un correcto comportamiento frente a la sensibilidad a la humedad, deformaciones permanentes y agrietamiento por fatiga; sin embargo, su proceso de fabricación requiere de equipos específicos y por lo tanto no es rentable para proyectos de mediana a baja magnitud. Por otro lado, las mezclas de caucho asfáltico fabricadas por proceso seco tuvieron un buen comportamiento en términos de deformación permanente y agrietamiento por fatiga, sin embargo, necesitaron un tiempo de digestión adecuado para desarrollar resistencia al daño por humedad. Y por último se tuvo al proceso semihúmedo que mantuvo el desempeño obtenido a través de la tecnología húmeda, sin necesidad de utilizar equipos específicos o realizar modificaciones a plantas de asfalto convencionales para fabricar el asfalto cauchutado; y con requisitos mínimos en cuanto a digestión. Finalmente parece que la tecnología semihúmeda favorecería el desarrollo de pavimentos con caucho. Según los autores esto se aplica incluso en el caso de pequeñas intervenciones en las que la tecnología húmeda no sería viable debido a la necesidad de equipos costosos (Chavez, Marcobal, & Gallego, 2019). De manera similar Riekstins y sus colaboradores realizaron un estudio que reveló el desempeño del CR en mezclas asfálticas de densidad densa producidas de dos formas diferentes: proceso húmedo-alta viscosidad y procesos secos en los que el caucho sustituyó una pequeña parte de los agregados. Se utilizaron mezclas convencionales con betún 50/70 y PMB (ligante asfáltico modificado con polímeros elastoméricos) 45 / 80-55. Después se

evaluaron las propiedades del betún modificado con CR. Entonces observó una ligera estratificación del aglutinante mediante la prueba de estabilidad en almacenamiento. Esta prueba mostró cuán significativamente cambian las propiedades físicas del aglutinante modificado CR cuando se almacena durante varios días. El aglutinante con la fracción de caucho de 0,01 / 0,8 mm cambió las propiedades de forma más significativa que 0,8 / 2,0 mm, lo cual es sensible debido a una mayor área superficial. En este estudio, se obtuvo betún modificado con CR suficientemente estable. El asfalto modificado CR fabricado mediante proceso húmedo de alta viscosidad exhibe capacidades similares para resistir el surco y la tenacidad a la fractura que la mezcla de asfalto producida con betún 50/70. Por otro lado, esta mezcla tiene resistencias a la fatiga y a bajas temperaturas significativamente mejores que las mezclas producidas con betún 50/70 e incluso con betún modificado con polímeros (Riekstins, Baumanis, & Barbars, 2021). En cambio, Rodríguez y colaboradores, estudiaron el proceso en seco para la incorporación de caucho granulado (CR) de llantas de desecho. En el laboratorio se prepararon dos mezclas de mezcla de asfalto semi denso modificadas con dos tipos diferentes de CR y se compararon con una mezcla convencional con betún modificado con polímero utilizado como referencia. Los resultados obtenidos muestran que las mezclas con CR tienen un rendimiento adecuado, siendo menos susceptibles al envejecimiento que una mezcla convencional modificada con polímeros. Se observó que el efecto del rejuvenecedor dependía del tipo de CR, pero este hecho no influyó negativamente en el comportamiento de las mezclas recicladas. Los resultados obtenidos muestran que las mezclas con CR tienen un rendimiento adecuado, siendo menos susceptibles al envejecimiento que una mezcla convencional modificada con polímeros. Además, las diferencias encontradas en las propiedades volumétricas es decir la reducción del contenido de huecos de aire y en la respuesta reológica del aglutinante de las mezclas recicladas (capacidad rejuvenecedora) sugieren que el recubrimiento de polímero cambia negativamente el rendimiento resultante del caucho reciclado (Rodríguez, Cavalli, Poulikakos, & Bueno, 2020).

### **3.2. Porcentaje óptimo de caucho molido en mezclas asfálticas**

Con el propósito obtener una mezcla de asfalto de caucho granulado con excelente desempeño, este estudio Ma y colaboradores, combinaron caucho transpolioctenámico (TOR), caucho granulado y otros aditivos para establecer un nuevo tipo de caucho granulado (CRT). Se diseñó y evaluó el comportamiento vial del nuevo tipo de mezcla asfáltica de caucho granulado (CRTAM) de textura esquelética densa a través del proceso seco. Primero, utilizaron el método de volumen compacto de intrusión de esqueleto para optimizar la clasificación de agregados gruesos y finos, y el diseño de la gradación de la mezcla asfáltica de caucho granulado se llevó a cabo mediante el mismo método de clasificación de reemplazo de volumen desigual. Después analizaron tres tipos de comportamiento de la carretera: estabilidad a altas temperaturas, resistencia al agrietamiento a bajas temperaturas y estabilidad al agua. Dando como resultados que el 2% y el 2,5% de caucho granulado cumplieron con un índice de baja temperatura con la misma sustitución de volumen, y las seis gradaciones obtenidas por reemplazo de volumen desigual con 2% de caucho granulado cumplieron con los requisitos de una textura esquelética densa. Por motivos económicos, los autores de esta investigación recomiendan que el contenido de caucho reciclado sea del 2% y la relación de sustitución sea de 0,5 la densidad de energía de deformación por flexión fue la más alta y el rendimiento a baja temperatura fue el mejor (Ma, y otros, 2020).

En esta indagación científica concebida por Wulandari y Tjandra, se realizaron pruebas de laboratorio para la mezcla de emulsión densa clasificada tipo IV. En donde la primera etapa de este estudio fue perpetrar

experimentos de laboratorio en mezcla compactada para establecer el contenido óptimo de betún residual. En la siguiente etapa, una serie de pruebas en miga. Las mezclas de caucho se llevaron a cabo en las condiciones óptimas de contenido de betún residual para investigar el efecto del caucho granulado como reemplazo parcial del agregado fino. Agregado fino en mezcla fría, el asfalto se reemplazó con un 50% de caucho granulado. Tres tamaños diferentes de miga caucho, malla 20 (0,841 mm), malla 40 (0,42 mm) y malla 60 (0,25 mm), se aplicaron en una serie de experimentos de laboratorio. En conclusión, tomando como base este estudio, se puede recomendar que el caucho granulado se pueda incorporar en el asfalto de mezcla fría (CMA) como un material de reposición de áridos finos. Se ha demostrado que con un 50% de reemplazo de caucho granulado. El asfalto de mezcla fría, por sus siglas en inglés (CMA) con caucho granulado tuvo una estabilidad que cumplió con la especificación estándar. El caucho de miga más fino en las mezclas de CMA produjeron la mayor estabilidad. El caucho granulado más fino (# 60) en CMA también produjo el vacío en la mezcla de estabilidad empapada (VIM) requerido como en la especificación estándar (Wulandari & Tjandra, 2019).

### **3.3. Resistencia a la cizalladura:**

Los autores Aquino dos Santos y sus colaboradores realizaron un estudio en cuanto a la resistencia al corte, los análisis mecanicistas se realizaron con el fin de evaluar los esfuerzos cortantes que ocurren en el campo para un suelo dado y posteriormente comparar con las envolventes de resistencia obtenidas en el laboratorio. Por tanto, los suelos en estudio fueron evaluados como material de cimentación de las estructuras dimensionadas y como subrasante de pavimentos delgados compuestos únicamente por doble tratamiento superficial (TSD). (Aquino dos Santos, Barbosa Pinheiro, Pivoto Specht, & Teixeira Brito, 2020)

Vila Romani y Jaramillo, realizaron una investigación donde el objetivo principal de este estudio es analizar la rigidez, bajo cargas de compresión axial, de las mezclas asfálticas modificadas con caucho derivado de neumáticos usados y asfaltita. Incorporado por proceso húmedo que se utiliza generalmente debido a los buenos resultados y variando las proporciones de aditivos, las frecuencias de aplicación de la carga y la temperatura a la que se realizará el ensayo. El análisis mecánico dinámico se realizó utilizando el METRAVIB DMA + 1000 y los resultados que fueron graficados, principalmente, en el gráfico Black Space y Cole-Cole, mostraron mejoras sustanciales en el comportamiento del betún. (Mantilla Forero & Castañeda Pinzón, 2019). En general los asfaltos modificados se utilizan cuando las necesidades de determinadas propiedades están por encima de aspectos meramente económicos. (Vila Romaní & Jaramillo Briceño, 2018).

### **3.4. Afectación que experimenta el CR con modificadores**

Las propiedades de rendimiento mecánico de asfalto se pueden mejorar utilizando varios modificadores, incluidos el CR y la gilsonita. En un estudio actual se modificó la gilsonita agregándole CR lo cual provocó que mejore su resistencia al agrietamiento a baja temperatura y, en consecuencia, mejora la resistencia de los aglutinantes frente a la deformación permanente (Ameli, Babagoli, Asadi, & Norouzi, 2021).

En su estudio, Katla, Rabindra y colaboradores examinaron el comportamiento de formación de surcos y fatiga de la mezcla de matriz de piedra asfalto (SMA) que ellos lo definen como un producto clasificado altamente resistente a los surcos; en la cual reemplazaron parcialmente los agregados vírgenes y betún con pavimento de asfalto reciclado (RAP). Los resultados indicaron una mejora en la formación de surcos y una disminución en la vida a la fatiga, con migagoma-modificado betún (CRMB) que ofrece un mayor grado de

miscibilidad que el estireno-butadieno-estireno (SBS) PMB cuando se infunde con aglutinante RAP. A partir de este estudio, se puede concluir que en una capa superficial de SMA de alta calidad, el 20% es la cantidad más aceptable de contenido de RAP. Sin embargo, si se usa SMA con aglutinante CRMB60 como capa aglutinante, entonces se puede usar el 30% de RAP para mejorar el rendimiento (Katla, Ravindra, Kota, & Raju, 2021). Pero Martínez y colaboradores realizaron otro estudio para determinar la adecuada y correcta aplicación de mezclas asfálticas modificadas con caucho granulado (CR). Este estudio constó de dos etapas: en la primera se hizo un análisis exhaustivo de las propiedades mecánicas de las mezclas, según las tipologías de mezclas asfálticas utilizadas en Colombia. En la segunda etapa se analizó el desempeño y comparación con otros tipos de mezclas asfálticas modificadas con polímeros disponibles en el mercado colombiano. Finalmente, como resultado de la investigación se desarrolló una especificación técnica que sirve de guía para la producción y análisis de mezclas agregadas con caucho granulado (Martínez-Argüelles, y otros, 2018).

Sani y colaboradores centraron su investigación en evaluar los efectos de Gripper, un nuevo aditivo de cera, sobre el rendimiento de goma látex (NRL) modificado asfaltoaglutinantes. En este estudio, se consideraron dos porcentajes de LNR, es decir, 3% y 6% con base en el peso de los asfaltoaglutinante. Se determinaron el valor de penetración, el punto de ablandamiento, la viscosidad rotacional, la estabilidad de almacenamiento, el módulo complejo, el ángulo de fase, el potencial de formación de surcos y los parámetros de recuperación torsional para analizar la base asfalto aglutinante (60/70) y modificado con NRL asfaltoaglutinantes. Dando como resultado de la investigación que la adición de Gripper ha mejorado aún más la estabilidad y el rendimiento mecánico de los asfaltoaglutinantes. Por tanto, se puede concluir que la modificación de asfaltoaglutinantes preparados con el aditivo recién introducido presentan una mejor resistencia a las fallas por surcos y fatiga (Sani, y otros, 2021). Otras investigaciones más recientes orientadas al estudio de las propiedades dinámicas del caucho granulado (CR) nos dan como resultado que el CR también se podría aplicar en la amortiguación de vibraciones en la construcción civil. El uso y aplicación de los neumáticos desechados depende del tamaño de sus partículas trituradas (Moussa, El Naggar, & Sadrekarimi, 2021).

Zhou y colaboradores prestaron mucha atención a su investigación que trato sobre cómo afecta la exposición a la radiación ultravioleta cambia las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del caucho biomodificado con betún (BMR) que contiene varios modificadores biológicos. Se examinaron muestras que contenían modificadores biológicos de aceite de ricino (CO), aceite de rastrojo de maíz (CS), aceite de miscanto (MS), aceite de pellets de madera (WP) y aceite vegetal de desecho (WVO) antes y después de su exposición a la radiación ultravioleta durante 50, 100 y 200 h. De esta manera se obtuvieron resultados del estudio que mostraron que la resistencia de los betunes antes mencionados al envejecimiento causado por la exposición a los rayos ultravioleta dependía en gran medida de la fuente del biomodificador. (Zhou, Kabir, Cao, & Fini, 2021).

### **3.5 Caucho granulado para la mejorara, resistencia y durabilidad de la mezcla asfáltica:**

Nanjegowda y Biligiri investigaron el efecto de agregar el caucho en forma de fragmentos (migas) que se utilizan popularmente en los carreteras de asfalto. Además, el CR como modificador mejoro las propiedades reológicas y mecánicas de las mezclas que podrían prolongar la vida útil de esos sistemas especiales de pavimento y / o postergar las estrategias de mantenimiento / rehabilitación en comparación con los pavimentos asfálticos convencionales no modificados. Además de tener el potencial de reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. (Nanjegowda & Biligiri, 2020). En cambio Eltwati y colaboradores, mediante su

investigación, afirman que el uso de caucho granulado (CR) proveniente de desechos de neumáticos afectan positivamente las propiedades del asfalto. Realizaron pruebas de mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de CR obteniendo como resultados el aumento significativo del módulo de rigidez, la formación de surcos de resistencia y el aumento de la resistencia al daño por humedad. El estudio concluye que un incremento entre el 20% y 24% de CR sobre la mezcla de asfalto convencional produce resultados óptimos (Eltwati , Hossein, & Nasr, 2020). Pero la investigación hecha por Balqis y Suherman en donde analizaron el efecto del uso de caucho granulado (CR) en el diseño de superposición. Los resultados de las pruebas de laboratorio con 15% de CR y 6,3% de betún. Con base en los resultados del estudio los autores encontraron que: El rendimiento del pavimento con el uso de CR reduce la deformación por tracción horizontal en la cual se produjo una disminución del 20,6%. (Balqis & Suherman, 2020).

Franesqui y sus colaboradores realizaron una evaluación sobre rendimiento mecánico evaluado incluyó la resistencia a la tracción y susceptibilidad a la humedad, surcos resistencia, rendimiento anti-pelado, rendimiento a la fatiga y rendimiento a baja temperatura. (Franesqui, Yepes, & García-González, 2019). En la investigación que realizó el investigador Qassim Al-Salih, manejo dos tipos de mezclas bituminosas que fueron, el asfalto de matriz de piedra y el hormigón bituminoso, que se utilizan para realizar la prueba de seguimiento de ruedas. En la cual los resultados se expusieron mediante el uso de la prueba Marshall que el 6% del contenido de CR en peso si el contenido normal de aglutinante 60/70 y el contenido óptimo de aglutinante para el aglutinante en mezclas bituminosas es 5.1% y 5.5% en peso de la mezcla han mejorado las mezclas bituminosas. El beneficio de este estudio fue una excelente carretera para resistir los surcos y la eliminación de residuos de neumáticos de una manera educada con el medio ambiente (Qassim Al-Salih, 2020). En cambio, Manoharan y colaboradores estudiaron la utilización de caucho de neumáticos usado como material de mezcla en el betún necesario para la construcción. El caucho granulado se mezcla con betún en algunos porcentajes (0%, 8%, 12% y 16%) y se realizaron diferentes pruebas para determinar la resistencia del pavimento normal y de caucho agregado. (Manoharan, Jasper Daniel, Premkumar, & Vedhanayaghi, 2020).

Los intelectuales de esta investigación confeccionaron una indagación, donde el único tipo de betún convencional (PG 64-10) disponible en el Reino de Arabia Saudita (KSA) no cumple con los requisitos de temperatura de la mayoría de las regiones del reino lo cual presenta un gran problema. Por lo tanto, el aglutinante debe modificarse para mejorar el rendimiento de los pavimentos flexibles a altas temperaturas y cargas de tráfico pesado. Con el fin de cumplir con los requisitos del Grado de Rendimiento Superpave (PG), se utilizaron como aditivos asfálticos caucho granulado (CR), epoleno (EE-2) y ceniza de palma datilera (DPA) en diferentes porcentajes (4%, 8%, 12% y 16% en peso de betún). En donde Khan y colaboradores realizaron ensayos de viscosidad y reología, así como de estabilidad y tracción indirecta sobre aglutinantes y mezclas asfálticas. Los resultados mostraron que los aglutinantes modificados con CR, EE-2 y DPA mostraron propiedades reológicas y de rendimiento mejoradas en comparación con el aglutinante convencional (Khan, Sutanto, Sunarjono, Room, & Md Yusoff, 2019). En la publicación perpetrada por Kartika y colaboradores tuvo la intención de comparar la consecuencia de adicionar CR al asfalto de mezcla en caliente mediante pruebas de seguimiento de ruedas, realizando variaciones de temperatura. En donde las conclusiones de la investigación fueron que, basado en la prueba de seguimiento de ruedas maquina (WTM) para muestras de un material agregado clasificado por espacios, una mezcla de betún caliente con un óptimo porcentaje de contenido de asfalto y caucho en bruto (CR) óptimo



exhibe una alta resistencia a la deformación por gradación gradual con CR añadido. Este nivel de resistencia a la deformación por formación de surcos también es más alto que el del material clasificado sin CR añadido. Muestra que el caucho reciclado puede mejorar el rendimiento del pavimento asfáltico en términos de resistencia a la deformación por surco (Kartika, Hadiwardoyo, & Sumabrata, 2019).

### **3.6. Factores que implican una evaluación a las mezclas azfálticas:**

La mayor demanda de vehículos conduce a una mayor producción de neumáticos nuevos. Sin embargo, una vez finalizada su vida útil, se convierten en un pasivo medioambiental de difícil eliminación de forma adecuada, tanto por su retraso en la descomposición como por su gran volumen. Su disposición inadecuada provoca un gran daño al medio ambiente y favorece la proliferación de vectores causantes de enfermedades humanas. Finalmente, se realizó una evaluación cuantitativa del beneficio ambiental generado por el uso de residuos y un análisis de costos para la producción de hormigón con caucho. Los resultados mostraron que la adición de caucho promueve una pequeña reducción de la resistencia axial del hormigón del orden de 15,24% y 17,27% para las composiciones con contenidos de 6% y 9%, respectivamente. Sin embargo, todas las trazas producidas alcanzaron valores por encima de los 35 MPa establecidos por ABNT: NBR 9781/2013, por lo que están indicados para su uso en carreteras de poco tráfico. El hormigón con caucho también presentó ventajas, como una reducción de la masa específica y una reducción del 4% en los costos de producción. (Souza Silva, de Ribamar Mouta, Barata da Costa, & Gouvêa Gomes, 2019)

Arroyo y sus colaboradores recomiendan que utilizar neumáticos desechados en las mezclas de asfalto son fundamentales porque permiten una opción para disminuir el alto impacto y crecimiento continuo en los países desarrollados. (Arroyo, y otros, 2018). Por otro lado (Mendoza García & Oliveros-Contreras, 2018) llevaron a cabo una investigación relacionado a la industria del caucho donde tuvo como propósito de evaluación sobre el rendimiento y eficiencia de las empresas cuando fabrican las formas básicas de caucho y las empresas que fabrican llantas a través de metodologías conocidas como Data Envelopment Analysis (DEA) y se obtiene como resultado su gran eficiencia técnica y de escala son satisfactorios superando el 80%. Eso quiere decir que la capacidad de producción de neumáticos cada vez va en mejora y evolución en el sector económico, por ende, la reciclabilidad del caucho en pavimentos es una de las mejores soluciones ya que de esa manera a mayor producción de neumáticos, mayores vías con caucho reciclado y menor contaminación directa al medio ambiente.

Sivapriya menciona que el aumento máximo en la resistencia al corte del suelo ocurre al 15% del reemplazo parcial. Para suelos altamente compresibles (CH), la resistencia aumenta de 160 kPa a 260 kPa, y para suelos moderadamente compresibles (CI) de 190 kPa a 263 kPa. El módulo de cizallamiento del suelo muestra un aumento de valor de hasta un 15% de adición de CR. (Sivapriya, 2018). Otros resultados acerca de las deformaciones plásticas hechas en Lanamme UCR determinan que el espesor total de las capas de pavimentos en la subrasante tendrá un efecto significativo en la resistencia a las deformaciones plásticas en los pavimentos flexibles. (Leiva, Pérez, Aguiar, & Loría, 2017).

### **3.7. Impacto del caucho granulado reciclado en las propiedades del asfalto:**

Eltwati y colaboradores, mediante su investigación, afirman que el uso de caucho granulado (CR) proveniente de desechos de neumáticos afectan positivamente las propiedades del asfalto. Realizaron pruebas de mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de CR obteniendo como resultados el aumento significativo del

módulo de rigidez, la formación de surcos de resistencia y el aumento de la resistencia al daño por humedad. El estudio concluye que un incremento entre el 20% y 24% de CR sobre la mezcla de asfalto convencional produce resultados óptimos (Eltwati , Hossein, & Nasr, 2020). Investigaciones más recientes orientadas al estudio de las propiedades dinámicas del caucho granulado (CR) nos dan como resultado que el CR también se podría aplicar en la amortiguación de vibraciones en la construcción civil. El uso y aplicación de los neumáticos desechados depende del tamaño de sus partículas trituradas (Moussa, El Naggari, & Sadrekarimi, 2021). Sin embargo, al comparar las propiedades del asfalto original y del asfalto envejecido y el módulo dinámico de las mezclas asfálticas mediante las metodologías de Marshall y RAMCODES para determinar la fórmula de trabajo, se tiene como resultado aumento en la rigidez del asfalto envejecido, eso quiere decir que la mezcla asfáltica sumado al caucho reciclado dan como consecuencia mayor rigidez en los pavimentos. (Sandoval, Amaya, & Molano, 2015).

Martínez y sus colaboradores realizaron otro estudio para determinar la adecuada y correcta aplicación de mezclas asfálticas modificadas con caucho granulado (CR). Este estudio constó de dos etapas: en la primera se hizo un análisis exhaustivo de las propiedades mecánicas de las mezclas, según las tipologías de mezclas asfálticas utilizadas en Colombia. En la segunda etapa se analizó el desempeño y comparación con otros tipos de mezclas asfálticas modificadas con polímeros disponibles en el mercado colombiano. Finalmente, como resultado de la investigación se desarrolló una especificación técnica que sirve de guía para la producción y análisis de mezclas agregadas con caucho granulado (Martínez-Argüelles, y otros, 2018).

Los pavimentos constituyen un problema geotécnico ya que se construyen sobre el suelo y con materiales obtenidos de él: sin tratar, como suelos y rocas, y procesados como ligantes hidráulicos y bituminosos; en consecuencia, un marco geotécnico es útil para describir sus elementos constitutivos. (Vásquez-Varela & García-Orozco, 2020). Por ende, las propiedades de rendimiento mecánico de asfalto se pueden mejorar utilizando varios modificadores, incluidos el CR y la gilsonita. En un estudio actual se modificó la gilsonita agregándole CR lo cual provocó que mejore su resistencia al agrietamiento a baja temperatura y, en consecuencia, mejora la resistencia de los aglutinantes frente a la deformación permanente (Ameli, Babagoli, Asadi, & Norouzi, 2021).

### **3.8. Caucho granulado para mejorar las propiedades en la ingeniería del reciclaje en frío**

Castro y sus colaboradores mencionan que las tecnologías de reciclaje de mezclas en frío basadas en emulsión asfáltica han sido reconocidas por permitir reducir las cargas ambientales asociadas con el mantenimiento y rehabilitación de pavimentos de carreteras. Sin embargo, todavía existen varias preocupaciones relacionadas con la alta variabilidad del pavimento de asfalto recuperado (RAP), la falta de procedimientos de diseño de mezcla estándar y el rendimiento mecánico regular / bajo que a menudo se logra, especialmente debido a la baja resistencia a la humedad. La producción de mezclas bituminosas en frío que contienen caucho granulado para desarrollar un material de pavimentación "más ecológico" con un nivel de rendimiento comparable al de los materiales convencionales, representa un gran desafío para la ingeniería de materiales. Para ello realizaron una investigación de laboratorio sobre las características de diseño de mezclas de emulsión asfáltica 100% recicladas en frío, utilizando caucho granulado donde Las propiedades mecánicas y volumétricas se evaluaron mediante el módulo dinámico y la resistencia a la tracción indirecta en muestras secas y acondicionadas con agua. Llegando al desenlace que el caucho reciclado es de vital importancia para mejorar las propiedades de ingeniería del reciclaje en frío. (Castro, Preciado , Martínez-Argüelles, Fuentes , & Dugarte, 2019). Sin embargo, no existe

Uso de Grano de Caucho Reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria

información sobre los procesos de transformación a escala industrial. Los estudios de reología sobre mezclas de caucho permiten definir el mejor método para su procesamiento (Benítez-Lozano, Urrego-Yepes, Velásquez-Restrepo, & Vásquez, 2016). Es por ello que la barrera diseñada intenta dar respuesta a esta demanda y, a su vez, crear una nueva alternativa para la reutilización del caucho de neumáticos usados, contribuyendo así a solucionar el problema medioambiental creado por este tipo de residuos. (Abellán-López & Sánchez-Lozano, 2016)

Según (Farfán & Leonardo, 2018) menciona que el caucho reciclado es un excelente complemento cuando se usa en mezclas de concreto a pesar de las pérdidas de resistencia mecánica, por otro lado cuando se agrega un aditivo plastificante, mejora el concreto hasta en un 10% y se incluyeron tres grupos experimentales, con aditivo plastificante y caucho reciclado y grupos de control que incluye un aditivo plastificante. (Cunha, Borges, & Da Cunha, 2019), En este caso uno de los materiales es el caucho reciclado, que esencialmente fue base de toda la investigación.

## **CONCLUSIONES**

Se concluye que:

- 1) Hay una mejora en términos de propiedades mecánicas de la mezcla bituminosa, porque al adicionar el caucho reciclado (CR) al agregado y a la mezcla bituminosa, se estimaron cambios radicales con respecto a la tenacidad a las fuerzas actuantes sobre la estructura del pavimento, porque los estudios muestran una mejora en cuanto a la resistencia a la tracción, disminución del ruido, envejecimiento, fatiga, a la humedad, a la formación de surcos, a la disminución de la propiedad de transmisión de agua y aire en la estructura del pavimento, así como también el aumento de su vida útil.
- 2) Para mencionar la cantidad de caucho reciclado (CR) ideal que debemos utilizar para cada caso, primero es necesario tener en cuenta que este varía en la forma en cómo se añade a la mezcla asfáltica. En términos generales, según los estudios ya vistos, se recomienda adicionar entre un 20% y 24% de CR sobre la mezcla de asfalto convencional produce resultados óptimos.
- 3) En cuanto al reciclaje de mezclas asfálticas en frío basadas en emulsión asfáltica son reconocidas como importantes, porque son amigables con el medio ambiente, porque la colocación se lleva a cabo a temperaturas más bajas, lo que genera ahorros de energía, una reducción del envejecimiento del asfalto, la liberación de humos y olores y una disminución general de las emisiones en el aire. Llegando a la conclusión que el caucho reciclado es muy importante para mejorar las propiedades de ingeniería del reciclaje en frío.

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseamos expresar nuestro profundo agradecimiento al Ing. Mg. Sócrates Pedro Muñoz Pérez, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo en la ayuda de inculcar conocimientos, redacción y revisión del artículo.

## Referencias

- Abed, Y., & Al-Haddad, A. (2020). Evaluating and Modeling of Modified Asphalt Binder at Elevated Temperatures. (I. P. Ltd, Ed.) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 978. doi:10.1088/1757-899X/978/1/012049
- Abellán-López, D., & Sánchez-Lozano, M. (2016). Nuevo sistema de protección de motociclistas fabricado en caucho reciclado. *Dyna (España)*, 91, 330 - 335. doi:https://doi.org/10.6036 / 7673
- Alfayez, S., Suleiman, A., & Nehdi, M. (2020). Recycling tire rubber in asphalt pavements: State of the art. (M. AG, Ed.) *Sustainability (Switzerland)*, 1 - 15. doi:10.3390/su12219076
- Ameli, A., Babagoli, R., Asadi, S., & Norouzi, N. (2021). Investigation of the performance properties of asphalt binders and mixtures modified by Crumb Rubber and Gilsonite. *Construction and Building Materials*, 279(122424). doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122424
- Ansari, A., Jakarni, F., Muniandy, R., Hassim, S., & Elahi, Z. (2021). Natural rubber as a renewable and sustainable bio-modifier for pavement applications: A review. (E. Ltd, Ed.) *Journal of Cleaner Production*, 289. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125727
- Aquino dos Santos, T., Barbosa Pinheiro, R., Pivoto Specht, L., & Teixeira Brito, L. (2020). Análise do desempenho de subleitos rodoviários à luz de conceitos da Mecânica dos Pavimentos. *REVISTA MATERIA*, 25, 14. doi:https://doi.org/10.1590/S1517-707620200003.1117
- Arroyo, P., Herrera, R., Salazar, L., Giménez, Z., Martínez, J., & Calahorra, M. (2018). Un nuevo enfoque para la integración de factores ambientales, sociales y económicos para evaluar mezclas asfálticas con y sin neumáticos de desecho. *Revista ingeniería de construcción*, 33(3), 301-314. doi:http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000300301
- Balqis, T., & Suherman, S. (2020). The effect of using crumb rubber on fatigue and rutting lives in flexible pavement. (I. o. Publishing, Ed.) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 732. doi:10.1088/1757-899X/732/1/012030
- Barnabas, G., & Geethan, A. (2021). Analysis of material properties of recycled plastic and rubber components. (P. S. Publications, Ed.) *Fresenius Environmental Bulletin*, 30, 1353 - 1362.
- Benítez-Lozano, A., Urrego-Yepes, W., Velásquez-Restrepo, S. M., & Vásquez, D. G. (2016). valuación del comportamiento reológico de mezclas convencionales caucho natural con residuos de cuero. *Dyna (España)*, 549 - 555. doi:https://doi.org/10.6036 / 8677
- Carvajal Muñoz, J., Alvarez Lugo, A., & Walubita, L. (2014). Comparison of the air voids characteristics of different hot mix asphalt (HMA) mixture types. *Ingeniare*, 22(1), 74-75. doi:https://doi.org/10.4067/S0718-33052014000100008
- Castro, A., Preciado, J., Martínez-Argüelles, G., Fuentes, L., & Dugarte, M. (2019). Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas recicladas en frío con caucho granulado. *Serie de conferencias IOP: Ciencia e ingeniería de materiales*, 471, 102044. doi:https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/10/102044

- Chavez, F., Marcobal, J., & Gallego, J. (2019). Laboratory evaluation of the mechanical properties of asphalt mixtures with rubber incorporated by the wet, dry, and semi-wet process. (E. Ltd, Ed.) *Construction and Building Materials*, 205. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.159
- Cunha, M. R., Borges, W. R., & Da Cunha, L. (2019). Investigación de capas de pavimento de hormigón con GPR en la carretera BR-101]. *Anuario del Instituto de Geociencias*, 42, 308-316. doi:https://doi.org/10.11137 / 2019\_1\_308\_316
- Do, T., Nguyen, D., Tran, V., & Tai Nguyen, H. (2020). Effects of Forta-fi Fiber on the Resistance to Fatigue of Conventional Asphalt Mixtures. (I. o. Inc., Ed.) *Proceedings of 2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development, GTSD 2020*, 312 - 316. doi:10.1109/GTSD50082.2020.9303123
- Eltwati , A., Hossein, A., & Nasr, D. (2020). Effect of Crumb Rubber Particles on the Properties of Asphalt. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 59, 43 - 52. doi:https://doi.org/10.1007/978-981-15-1193-6\_5
- Farfán, M., & Leonardo, E. (2018). Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante. *Revista Ingenieria de Construccion*, 33, 241 - 250. doi:https://doi.org/10.4067 / S0718-50732018000300241
- Fransesqui, M., Yepes, J., & García-González, C. (2019). Improvement of moisture damage resistance and permanent deformation performance of asphalt mixtures with marginal porous volcanic aggregates using crumb rubber modified bitumen. (E. Ltd, Ed.) *Construction and Building Materials*, 328 - 339. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.181
- Gull, K., & Gahir, J. (2020). Enhancement in mechanical properties of bitumen mix with crump rubber and waste leather of shoes as sustainable additives. (A. Publishers, Ed.) *Journal of Green Engineering*, 6133 - 6142.
- Guraya, T., Fernandes, M., & Albizuri, J. (2004). Impact Behavior of a Recycled Rubber Coating for Metallic Impact Barriers in Highways. *Informacion Tencologica*, 15(1), 35-42. doi:https://doi.org/10.4067/S0718-07642004000100006
- Kartika, L., Hadiwardoyo, S., & Sumabrata, J. (2019). Rutting deformation of gap-graded hot-mix asphalt with added of waste tire rubber. (A. I. Inc., Ed.) *AIP Conference Proceedings*, 2114. doi:10.1063/1.5112442
- Katla, B., Ravindra, W., Kota, S., & Raju, S. (2021). RAP-Added SMA Mixtures: How Do They Fare? (A. S. (ASCE), Ed.) *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003807
- Khan, M., Sutanto, M., Sunarjono, S., Room, S., & Md Yusoff, N. (2019). Effect of crumb rubber, epolene (EE-2), and date palm ash as modifiers on the performance of binders and mixtures: A sustainable approach. (M. AG, Ed.) *Sustainability (Switzerland)*, 11. doi:10.3390/su11226484

Kumar Behera, H., Giri, D., & Sekhar das, S. (2020). Modification of Bitumen Using Sustainable Materials for Pavement Design. (I. P. Ltd, Ed.) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 970. doi:10.1088/1757-899X/970/1/012022

Leiva, F., Pérez, E., Aguiar, J., & Loría, L. (2017). Modelo de deformación permanente para la evaluación de la condición del pavimento. *Revista ingeniería de construcción*, 32(1), 37-46. doi:http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000100004

Ma, F., Dai, J., Fu, Z., Liu, J., Dong, W., & Huang, Z. (2020). A New type of crumb rubber asphalt mixture: A dry process design and performance evaluation. (M. AG, Ed.) *Applied Sciences (Switzerland)*, 10. doi:10.3390/app10010372

Ma, Y., Wang, S., Zhou, H., Hu, W., Polaczyk, P., Zhang, M., & Huang, B. (2021). Compatibility and rheological characterization of asphalt modified with recycled rubber-plastic blends. *Construction and Building Materials*, 270. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121416

Manoharan, M., Jasper Daniel, J., Premkumar, S., & Vedhanayaghi, V. (2020). Study on behaviour of crumb rubber modified bitumen. (S. a. Society, Ed.) *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29, 342 - 351.

Mantilla Forero, J., & Castañeda Pinzón, E. (2019). Assessment of simultaneous incorporation of crumb rubber and asphaltite in asphalt binders. *DYNA*, 86(208), 257-263. doi:https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.69400

Martínez-Argüelles, G., Caicedo, B., González, D., Celis, L., Fuentes, L., & Torres, V. (2018). Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33, 41 - 50. doi:https://doi.org/10.4067/s0718-50732018000100041

Mbereyaho, L., Manzi, L., Kamanzi, P., & Nizeyimana, B. (2021). Use and Influence of Tire Rubber Waste Powder in Bitumen Product. (D. G. Ltd, Ed.) *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 11, 82 - 88. doi:10.2478/jepmm-2021-0009

Mendoza García, M., & Oliveros-Contreras, D. V. (2018). Eficiencia de las empresas agroindustriales del sector de caucho en Colombia: Un enfoque DEA. *Espacios*, 31. Obtenido de <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85058783785&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=d83ffca3ee61afb9b789bf333e024e4d&sot=b&sdt=b&sl=21&s=TITLE-ABS-KEY%28caucho%29&relpos=18&citeCnt=0&searchTerm=#top>

Moussa, A., El Naggar, H., & Sadrekarimi, A. (2021). Dynamic properties of granulated rubber using different laboratory tests. *Buildings*, 11(186). doi:https://doi.org/10.3390/buildings11050186

Nanjegowda, V., & Biligiri, K. (2020). Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology. (E. B.V., Ed.) *Resources, Conservation and Recycling*, 155. doi:10.1016/j.resconrec.2019.104655

- Qassim Al-Salih, W. (2020). Using Crumb Rubber to Improve the Bituminous Mixes: Experimental Investigation of Rutting Behavior of Flexible Asphalt Mix for Road Construction. (I. o. Publishing, Ed.) *Journal of Physics: Conference Serie*, 1527. doi:10.1088/1742-6596/1527/1/012015
- Riekstins, A., Baumanis, J., & Barbars, J. (2021). Laboratory investigation of crumb rubber in dense graded asphalt by wet and dry processes. (E. Ltd, Ed.) *Construction and Building Materials*, 292. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123459
- Rodríguez, I., Cavalli, M., Poulikakos, L., & Bueno, M. (2020). Recyclability of asphalt mixtures with crumb rubber incorporated by dry process: A laboratory investigation. (M. AG, Ed.) *Materials*, 13. doi:10.3390/ma13122870
- Sandoval, C. H., Amaya, X. V., & Molano, E. A. (2015). Efecto del envejecimiento en las propiedades del asfalto y de las mezclas asfálticas. *Ingeniería y Universidad*, 19, 335 - 349. doi:https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu19-2.eapa
- Sani, A., Mohd Hasan, M., Shariff, K., Jamshidi, A., Poovaneshvaran, S., & Shahid, K. (2021). Physico-Mechanical and Morphological Properties of Wax Latex-Modified Asphalt Binder. (S. S. GmbH, Ed.) *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 865 - 878. doi:10.1007/s40996-020-00422-9
- Semaan Llurba, S. (2020). *¿Qué es Scopus? ¿Y para qué sirve?*[Blog Post]. Obtenido de <https://bibliosjd.org/2018/01/24/scopus-que-es-para-que-sirve/#.YLFRcahKjIX>
- Sivapriya, V. (2018). Stress-strain and penetration characteristics of clay modified with crumb rubber. *Revista Facultad de Ingeniería*, 27(49), 65-75. doi:http://doi.org/10.19053/01211129.v28.n49.2018.8686
- Skoczyńska, E., Leonards, P., Llompart, M., & de Boer, J. (2021). Analysis of recycled rubber: Development of an analytical method and determination of polycyclic aromatic hydrocarbons and heterocyclic aromatic compounds in rubber matrices. (E. Ltd, Ed.) *Chemosphere*, 276. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.130076
- Souza Silva, L., de Ribamar Mouta, J., Barata da Costa, M., & Gouvêa Gomes, L. (2019). Concreto com borracha de recauchutagem de pneu para uso em pavimentação de baixo tráfego. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24(2). doi:https://doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0676
- Tasalloti, A., Chiaro, G., Murali, A., & Banasiak, L. (2021). Physical and mechanical properties of granulated rubber mixed with granular soils—a literature review. *Sustainability*, 13(8), 4309. doi:10.3390/su13084309
- Vásquez-Varela, L. R., & García-Orozco, F. J. (2020). Descripción general del diseño de pavimentos asfálticos para calles y carreteras. *Revista Facultad de Ingeniería*, 10-26. doi:http://dx.doi.org/10.17533/udea.redin.20200367
- Vila Romaní, R., & Jaramillo Briceño, J. (2018). Incidence of the use of the asphalt. *Revista Lasallista de Investigación*, 15(2). doi:https://doi.org/10.22507/rli.v15n2a24

Vishnu, T., & Singh, K. (2021). A study on the suitability of solid waste materials in pavement construction: A review. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 14, 625 - 637.

doi:<https://doi.org/10.1007/s42947-020-0273-z>

Wulandari, P., & Tjandra, D. (2019). The use of crumb rubber for replacing fine aggregate in cold mixture asphalt. (I. o. Publishing, Ed.) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 615.

doi:10.1088/1757-899X/615/1/012119

Yang, X., You, Z., Mohd Hasan, M., Diab, A., Diab, A., Shao, H., . . . Ge, D. (2017). Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using Evotherm. (E. Ltd, Ed.)

*Journal of Cleaner Production*, 159, 346 - 358. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.168

Zhou, T., Kabir, S., Cao, L., & Fini, E. (2021). Effects of ultraviolet exposure on physicochemical and mechanical properties of bio-modified rubberized bitumen: Sustainability promotion and resource conservation. (E. B.V., Ed.) *Resources, Conservation and Recycling*, 171.

doi:10.1016/j.resconrec.2021.105626