

Revisión del estado del arte sobre el proceso evolutivo de asfaltos modificados con grano de caucho reciclado (GCR).

Zuleima Escalante Pérez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Civil

Directora

Sandra Milena Cote Vargas

Magíster en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

El presente trabajo de grado va dedicado a Dios, quien como guía estuvo presente en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer. A mi madre que con su apoyo incondicional, amor y confianza permitieron que logre culminar mi carrera profesional, a mi padrastro que me guió y me apoyó en momentos difíciles creyendo siempre en mí, a mi tía Nelsy que estuvo presente dándome fuerzas para continuar con mi meta, a mis hermanas por estar en momentos difíciles y ser incondicionales, a mi abuelita que siempre me vio como triunfadora y que desde el cielo sé que se siente orgullosa de mis logros y a mis amigos más cercanos que estuvieron presentes en momentos difíciles de tensión que me ayudaron de manera desinteresada al recibir su apoyo en este proceso y lograr culminar mis estudios con éxito.

Todos en conjunto me hicieron ver, que sin importar cuanto tiempo me tome, todo se puede si de verdad se quiere. Me muy siento afortunada de tenerles.

Zuleima Escalante Pérez

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi directora quien con sus conocimientos y apoyo me guió a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

También quiero agradecer a la Universidad Industrial de Santander por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación.

No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.

Por último, quiero agradecer a todos mis compañeros y a mi familia, por apoyarme aún cuando mis ánimos decaían. En especial, un profundo agradecimiento a mi familia, que siempre estuvieron ahí para darme palabras de apoyo.

Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Metodología	13
1.1 Búsqueda Bibliográfica.....	13
1.2 Organización de lecturas encontradas.....	13
1.3 Revisión de los archivos encontrados	14
2. Desarrollo de la investigación.....	20
2.1 Grano de Caucho Reciclado (GCR).....	20
2.2 Asfaltos modificados	20
2.2.1 Ventajas:	21
2.2.2 Ventajas ambientales de la implementación del asfalto caucho.	23
2.2.3 Desventajas:	23
2.3 Proceso por vía seca.....	24
2.4 Proceso por vía húmeda	25
2.5 Experiencias extranjeras y nacionales utilizando caucho reciclado en la historia.....	29
2.6 Algunos aplicaciones exitosas registrados en la utilización del residuo de llantas a nivel nacional.	30
2.7 Casos internacionales de aplicación exitosos.	31
2.8 Pavimentos modificados con grano de caucho y las vías 4G	32

2.9 Empresas de reciclaje de llantas Colombia.....	32
3. Línea de tiempo.....	34
3.1 Línea de tiempo Nacional	34
3.2 Línea de Tiempo Internacional	35
4. Conclusiones	36
Referencias Bibliográficas	37
Apéndices.....	43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Publicaciones por año	19
Figura 2. Publicaciones por país	19
Figura 3. Influencia del GCR en la resistencia a la deformación.	22
Figura 4. Costo de mantenimiento de vías pavimentadas convencionales y modificadas.....	22
Figura 5. Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por vía seca.....	25
Figura 6. Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por vía húmeda.	26
Figura 7. Resistencia Mecánica vs Temperatura de Compactación.....	26
Figura 8. Efecto del asfalto modificado con GCR sobre la rigidez y la temperatura.	27
Figura 9. Densidad de fisuración en diferentes tipos de asfaltos.	28
Figura 10. Módulo resiliente para mezclas convencionales y modificadas con GCR.....	28
Figura 11. Línea de Tiempo Nacional	34
Figura 12. Línea de Tiempo Internacional.....	35

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Artículos consultados para la revisión del estado del arte	14

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Cuadro cronológico del proceso evolutivo del asfalto modificado con Grano de Caucho Reciclado (GCR) y sus incidencias en el desarrollo de la investigación del GCR según las fuentes bibliográficas consultadas.	43

Resumen

Título: Revisión del estado del arte sobre el proceso evolutivo de asfaltos modificados con grano de caucho reciclado (GCR)*.

Autor: Zuleima Escalante Pérez**

Palabras Clave: Grano de caucho, asfalto modificado, GCR, reciclado, internacional.

Las carreteras son de significativa importancia en el crecimiento y desarrollo de un país, además contribuye a fortalecer a la industria nacional en sus procesos de producción, distribución y comercialización, haciéndola más productiva y competitiva ayudando a la economía de los países, en Colombia y a nivel internacional, teniendo en cuenta el cambio climático y la aplicación de mezclas asfálticas modificadas con grano caucho reciclado en las grandes obras de infraestructura se ha incrementado la investigación al respecto. Las mezclas asfálticas modificadas con caucho han sido un aporte significativo, debido a la problemática ambiental que generan los desechos del caucho. Por tal motivo, se ha empezado a promover este tipo de materiales debido que al ser más económicos y perdurables en el tiempo tienden a mejorar significativamente las propiedades del asfalto. En el siguiente artículo se presenta una revisión bibliográfica de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado (GCR), los beneficios del aprovechamiento del asfalto modificado con grano de caucho reciclado (GCR) teniendo en cuenta sus ventajas y desventajas económicas y ambientales en la construcción de carreteras. Por último, se presenta una línea de tiempo de los materiales que se emplearon en la construcción de carreteras hasta la actualidad.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías físicas y mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director. Sandra Milena Cote Vargas, Magíster Ingeniería Civil

Abstract

Title: Review of the state of the art on the evolutionary process of asphalt modified with recycled rubber grain (RRG)*.

Author: Zuleima Escalante Pérez**

Keywords: Rubber grain, modified asphalt, GCR, recycling, international.

Roads are of significant importance in the growth and development of a country, it also contributes to strengthening the domestic industry in its production, distribution and marketing processes, making it more productive and competitive helping the economy of countries, in Colombia and internationally, taking into account climate change and the application of modified asphalt mixtures with recycled rubber grain in large infrastructure works has increased research in this regard. Modified asphalt mixtures with rubber have been a significant contribution, due to the environmental problems generated by rubber waste. For this reason, this type of material has begun to be promoted because being cheaper and longer lasting tend to significantly improve the properties of asphalt. The following article presents a bibliographic review of modified asphalt mixtures with recycled rubber grain (GCR), the benefits of using recycled rubber grain modified asphalt (GCR) taking into account its economic and environmental advantages and disadvantages in road construction. Finally, there is a timeline of the materials that were used in road construction to this day.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director. Sandra Milena Cote Vargas, Magíster Ingeniería Civil

Introducción

Las vías primarias, secundarias y terciarias juegan un papel fundamental en un país ya que son las que permitirán un avance en el desarrollo del país, razón por la cual Colombia ha querido actualizar sus vías día a día con nuevos proyectos con grandes inversiones para el mejoramiento de esta. Las redes viales primarias, secundarias y terciarias contienen 7.019 km, 45.137 km y 142.284 km respectivamente. (Andrés et al., n.d.).

El territorio nacional tiene el 9,2% de vías primarias de las cuales el 13,61% está en buen estado, 21,9% de vías secundarias, las cuales cuentan con aproximadamente el 18% en buen estado, y la red vial terciaria tiene la mayor extensión en el territorio nacional representada por el 68,9%, pero solo cuenta con el 6% en buen estado en las cuales en estas se ve el gran abandono de las zonas rurales del país. (*Clasificación de Las Carreteras*, n.d.)

En la actualidad, las plantas recicladoras de neumáticos y procesadoras del caucho, se encuentra en etapas iniciales de desarrollo, son muy escasas, lo cual implica que desde un punto de vista económico los precios para obtener el caucho sean altos, pues son muy pocos los proveedores de este insumo que garanticen cantidades satisfactorias para la producción de mezcla con asfalto caucho.

Los neumáticos desechados constituyen un grave problema medio ambiental en el mundo, Colombia genera 5.300.000 llantas usadas al año, lo que equivale a 100.000 toneladas de residuos sólidos, lo cual representa un impacto negativo al medio ambiente que ha obligado a diversas compañías a buscar mecanismos para su mitigación. Las principales dificultades generadas por

este residuo tienen que ver con su disposición final, dado que la mayoría de los neumáticos fuera de uso, se encuentran dispuestos en sitios que no cumplen ningún tipo de reglamentación para su disposición, ocupando gran espacio y por ser considerados desechos sólidos deben ser enterrados, almacenados, la acumulación de neumáticos incrementa la posibilidad de incendios, la posible emanación de gases tóxicos y ayudar a la propagación de enfermedades afectando la salud pública.

Las mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos pueden incorporar una parte importante del caucho contenido en los neumáticos desechados. La adición de caucho proveniente de neumáticos a las mezclas asfálticas es una forma de reciclar tales desechos y mejorar las propiedades del pavimento. Las mezclas asfálticas modificadas con caucho permiten obtener un pavimento con mejores respuestas a los cambios térmicos, así como también aumentan la resistencia a la fisuración por fatiga y al envejecimiento, incrementando la vida útil del pavimento y disminuyendo los costos de mantenimiento.

El presente trabajo resalta la investigación del estado de la importancia y beneficios del uso del grano de caucho reciclado en las carreteras.

1. Metodología

A continuación, se describe la metodología usada para la redacción de este artículo.

1.1 Búsqueda Bibliográfica

Para el desarrollo de la primera fase de la metodología se llevó a cabo una revisión de la literatura encontrada de la base de datos de la universidad industrial de Santander y de diferentes fuentes bibliográficas educativas y oficiales con temas relevantes a la investigación,

preparar un archivo en Word, que contenga todo el artículo, incluyendo figuras, tablas y anexos.

1.2 Organización de lecturas encontradas

Con el fin de organizar los documentos encontrados, se clasifica el material de acuerdo a su año de publicación y su incidencia en el desarrollo de la investigación del GCR, se utilizó la herramienta Mendeley que permite Visualizar diferentes categorías (Palabras clave, título, resumen y año de publicación), por las cuales se puede realizar una búsqueda rápida y además incluir la bibliografía de manera correcta al redactar, y con ayuda de Excel se organizó la base de datos que incluyó año de publicación, título y autor correspondiente.

1.3 Revisión de los archivos encontrados

Al tener todos los archivos seleccionados y organizados se realizó una lectura detallada de los artículos para la redacción de la investigación acerca del estado del arte.

A continuación, se muestra la tabla con los archivos organizados que tuvieron incidencias en el desarrollo de la investigación por fecha de publicación y se incluye Autor, año, país y descripción.

Tabla 1.

Artículos consultados para la revisión del estado del arte

Autor (Año, país)	Descripción
González Herrera (1996, España)	Estudio sobre el diseño y construcción de mezclas bituminosas en caliente con granos de caucho reciclado, empleando husos granulométricos españoles.
Chávez Alderete (2000, México)	Análisis socioeconómico y ambiental para el uso de asfalto recubierto de goma en la construcción de carreteras.
Duarte Ayala (2005, Colombia)	Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos.
Muñoz Rojas (2006, Chile)	Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco.
Weidong Cao (2006, China)	Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process.
Figuroa Infante, Sánchez Castillo & Reyes Lizcano (2007, Colombia)	Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada.

Autor (Año, país)	Descripción
Wulf Rodríguez (2008, Chile)	Análisis de pavimento asfáltico modificado con polímero.
Figueroa Infante, Fonseca Santanilla & Reyes Lizcano (2008, Colombia)	Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado.
Rondón Quintana, Moreno Anselmi, Rodríguez Urrego & Lee Mariño (2009, Colombia)	Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos.
Pineda Rodríguez & Rey Moreno (2012, Colombia)	Mezclas Asfálticas drenante modificada con grano de caucho reciclado.
Rondón Quintana, Molano Mora & Tenjo Lancheros (2012, Colombia)	Influencia de la temperatura de compactación sobre la resistencia bajo carga monótonica de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado de llantas.
Mora Campos & Chicaiza Defas (2013, Ecuador)	Propuesta Económica, técnica y operativa para la creación de una empresa recicladora de llantas desechadas de vehículos para producir polvo de caucho y comercializarlo en la ciudad de Quito: Caso práctico aplicación en el asfalto.
Moreno Anselmi (2013, Colombia)	Comportamiento monótonico de mezclas asfálticas MDC-2 adicionadas con desecho de caucho.
Lo presti (2013, Inglaterra)	Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review.
Múnera & Ossa (2014, Colombia)	Estudio de mezclas binarias Asfalto – Polímero.
Danae Esparza Lozano (2014, España)	El diseño del suelo: el papel del pavimento en la creación de la imagen de la ciudad
Ramírez Villamizar, Ladino Rubio & Rosas Ramírez (2014, Colombia)	Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología gap graded para la ciudad de Bogotá.

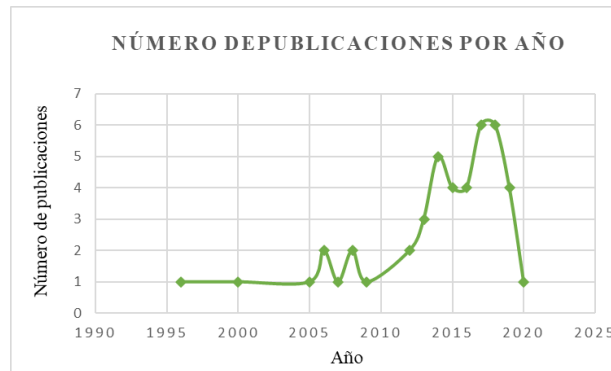
Autor (Año, país)	Descripción
Murat Karacasu, Volkan Okur, & Arzu Er (2014, Turquía)	A Study on the Rheological Properties of Recycled Rubber-Modified Asphalt Mixtures.
Osorio Baquero (2014, Colombia)	Breve reseña histórica de las vías en Colombia.
Salvatierra Cerda (2014, Perú)	Desarrollo de un aglomerado asfáltico con polvo de caucho.
Llago Serrano (2015, España)	Empleo en mezclas asfálticas de caucho recuperado de neumáticos fuera de uso.
Pereda Rodríguez & Cubas Parimango (2015, Perú)	Investigación de los asfaltos modificados con el uso de caucho reciclado de llantas y su comparación técnico-económico con los asfaltos convencionales.
Victoria Palma, Ortiz Cisneros, Ávalos Belmonte & Castañeda Facio (2015, México)	Modificación de asfalto con elastómeros para su uso en pavimentos.
Luis Fernando Varón (2015, Colombia)	Diseño de mezcla asfáltica de gradación tipo-i (idu) con asfalto modificado con grano de caucho reciclado (gcr) de MPI ltda
Ruiz Galeano & Rodríguez Medina (2016, Colombia)	Comportamiento, viabilidad y costos de la implementación de grano de caucho reciclado para la fabricación de mezcla asfáltica.
Calahorra, Giménez, Herrera, Martínez, Salazar (2016, Chile)	Análisis de ciclo de vida de mezcla asfáltica con/sin caucho: estudio de caso.
Vega Zurita (2016, Ecuador)	Análisis del comportamiento a compresión de asfalto conformado por caucho reciclado de llantas como material constitutivo del pavimento asfáltico.
Cervera Borja (2016, Perú)	Influencia en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica incorporando caucho reciclado de neumáticos.

Autor (Año, país)	Descripción
Pelález Arroyave, Velásquez Restrepo & Giraldo Vásquez (2017, Colombia)	Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura.
Diaz Claros & Castro Celis (2017, Colombia)	Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá.
Jaime Hidalgo (2017, Colombia)	Métodos de reutilización de llantas usadas: selección y elaboración de nuevos productos.
Granados Noa & Saez Alvan (2017, Perú)	Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente modificada con caucho mediante proceso por vía seca respecto a la mezcla asfáltica convencional.
Durant Broden (2017, Perú)	Relleno elastomérico para pavimentos asfálticos en climas de altura mediante el reciclado de neumáticos.
Camacho vega & Vargas Porras (2017, Colombia)	Prefactibilidad de uso de mezclas asfálticas fabricadas con goma de neumático fuera de uso y agregados de la región de Tunja.
Ladino oyola & Rubiano Quiroga (2017, Colombia)	Aduques en asfalto reciclado y grano de caucho reciclado "GCR"
Patiño & Rodríguez Ramos (2017, Colombia)	Llantas usadas: materia prima para pavimentos y múltiples eco aplicaciones.
Castro (2017, Argentina)	Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos.
G. Martínez, B. Caicedo, D. González, L. Celis & V. Torres (2018, Colombia)	Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos.
Cabezas Dulanto & Mendoza Aguirre (2018, Perú)	Alternativa de diseño de mezcla asfáltica en caliente con polvo de caucho de NFU para la ciudad de Lima.

Autor (Año, país)	Descripción
Correa Lesmes (2018, Colombia)	Implementación de mezcla asfáltica modificada con granulo de caucho en el barrio San Carlos de la localidad de Tunjuelito.
Valero Martínez, Zamora Álvarez, Natividad Vivó & Cerdá Casanoves (2018, España)	Estudio prenормativo y elaboración de una guía para prescriptores de pavimentos de caucho.
Fernández & Ramos (2018, Brasil)	Uso de residuos de caucho en pavimentos de asfalto: una revisión de literatura.
Chávez More (2018, España)	Comparación en laboratorio de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con caucho producidas mediante el proceso húmedo, seco y semihúmedo.
Higuera Sandoval, Olarte Riaño & Soler Sánchez (2019, Colombia)	Efecto del grano de caucho reciclado en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica.
Jaimes Leal & Torres Cervera (2019, Colombia)	Aprovechamiento del gcr para la elaboración de adoquines ecológicos como alternativa a la industria constructiva.
Goicochea Fernández (2019, Perú)	Estudio de un asfalto con adición de caucho de neumático reciclado como polímero base.
Rama Labrador (2019, Colombia)	Historia de los pavimentos urbanos
Riaño Velásquez & Ramírez Hernández (2019, Colombia)	Diagnóstico de las vías primarias en Colombia, y la intervención de la ingeniería civil para su ejecución y mantenimiento.
Figueroa Infante & Fonseca Santanilla (2020, Colombia)	Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR.

Figura 1.

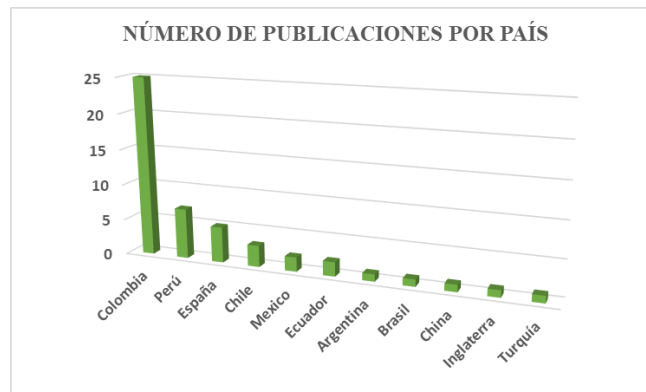
Publicaciones por año



Ver anexo A donde se relaciona la evolución de los ensayos realizados al grano de caucho reciclado.

Figura 2.

Publicaciones por país



2. Desarrollo de la investigación

2.1 Grano de Caucho Reciclado (GCR)

El GCR es un material obtenido de las llantas en desuso de los vehículos automotores, que por lo general tiene un destino no muy controlado ambientalmente, rellenos sanitarios, plantas térmicas, basureros a cielo abierto, entre otros, que generan un daño ambiental importante.

Se obtiene mediante procesos de molienda de llantas usadas, disminuido en tamaño, este material es utilizado en diferentes obras de ingeniería civil, como lo son en rellenos de terraplenes, materiales de contención, pisos de parques, como modificador en las mezclas asfálticas, entre otros. (Diaz Claros & Castro Celis, 2017)

2.2 Asfaltos modificados

Estos tipos se originan por la necesidad o la inquietud de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los cementos asfálticos, para así generar una amplia gama de productos que sea eficaz bajo los diferentes esfuerzos a los que se puede ser sometido en pavimento asfáltico, es decir su resistencia a las deformaciones por diferentes factores. Ante esta situación se empezó a hacer uso de agentes externos como aditivos, y los más comunes eran los polímeros, que son un agente contaminador y poco reciclable.

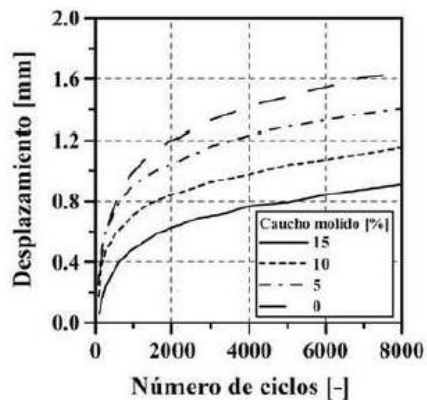
El objetivo de los asfaltos modificados es contar con asfaltos más viscosos, que estos ligantes a temperaturas elevadas sean resistentes, aumentando la rigidez de la capa de rodadura y poder reducir las deformaciones permanentes ocasionadas por el ahuellamiento. ((PDF) *Obtención de Asfalto Modificado Con Polvo de Caucho Proveniente Del Reciclaje de Neumáticos de Automotores*, n.d.)

2.2.1 Ventajas:

- Mejora la adherencia y daño por humedad, resistiendo así problemas de desgranamiento o desprendimientos.
- Mayor cohesión, trabajabilidad y compactación.
- Mayor duración de la mezcla alargando la vida útil de esta.
- Mayor elasticidad que mejora la resistencia al agrietamiento por fatiga donde la mezcla modificada es capaz de dispersar esfuerzos aplicados y recobrar su forma original.
- Reduce la exudación del asfalto.
- Reduce costos de mantenimiento, produciendo rentabilidad económica en el tiempo.
- Mayor resistencia a las deformaciones a altas temperaturas, menos susceptibilidad a la formación de rodaduras.
- La adición de polvo de caucho modifica la reología de los asfaltos, de manera que aumentan su elasticidad y resiliencia a temperaturas elevadas y disminuye la susceptibilidad térmica.

Figura 3.

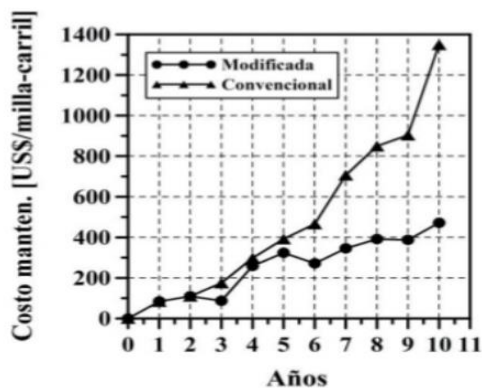
Influencia del GCR en la resistencia a la deformación.



Nota. Tomado de: (Pineda Rodriguez & Rey Moreno, 2012)

Figura 4.

Costo de mantenimiento de vías pavimentadas convencionales y modificadas.



Nota. Tomado de (Estudio Sobre El Diseño y Construcción de Mezclas Bituminosas En Caliente Con Granos de Caucho Reciclado, Empleando Husos Granulométricos Españoles, n.d.)

2.2.2 Ventajas ambientales de la implementación del asfalto caucho.

La implementación del granulo de caucho en las mezclas asfálticas genera una serie de ventajas ambientales, las cuales permiten generar un menor impacto en el entorno, dichas ventajas son las siguientes:

- Se reciclan y reduce el volumen de neumáticos fuera de uso depositados en vertederos y en lugares desconocidos o no autorizados. El empleo de residuos permite a su vez ahorros en recursos naturales. En la técnica de las mezclas fabricadas por vía húmeda con porcentajes altos de incorporación de polvo de caucho (del orden del 20% respecto al peso del asfalto), se estima un aprovechamiento de 350 neumáticos de turismo por kilómetro de pista y por cada centímetro de espesor de mezcla asfáltica. Esta cifra es del orden de 75 a 150 en las otras técnicas, por vía húmeda o vía seca, con menores porcentajes de incorporación (entre 5 y 15% respecto al peso del asfalto).

- Su empleo en mezclas asfálticas permite reducir el nivel sonoro de rodadura. Las reducciones observadas son del orden de 3 a 4dB respecto a las mezclas asfálticas convencionales.

- Las mezclas asfálticas fabricadas con polvo de caucho pueden reciclarse en el futuro, cuando se agote su capacidad de servicio. (Pineda Rodriguez & Rey Moreno, 2012)

2.2.3 Desventajas:

- El incremento de la viscosidad genera un aumento en la temperatura de fabricación en planta y extensión obra de la mezcla asfáltica modificada lo que genera una mayor dificultad y complejidad a la hora de construirla in situ.

- En planta, la modificación del CA con el GCR se realiza a temperaturas entre 180-200 °C lo que genera la necesidad de mayor energía para la fabricación de la mezcla.

- La captación de aceites de asfalto por parte del cacho puede afectar las propiedades de adherencia y cohesión.

El asfalto modificado con grano de caucho modificado es más costoso que el asfalto convencional, pero presenta mayores beneficios económicos respecto a los convencionales ya que son más duraderos y requieren menor mantenimiento. (Ruiz Galeano & Rodriguez Medina, 2016)

2.3 Proceso por vía seca

El GCR es adicionado a los agregados antes de ser mezclados con el cemento asfáltico.

De acuerdo con investigaciones realizadas se determinan las siguientes ventajas:

Al mejorar la mezcla asfáltica, se produce:

- Mayor resistencia a la fatiga
- Mejor adherencia neumático-pavimento.
- Menor reflejo de luz.
- Disminuye ruido contacto neumático-pavimento.
- No requiere cambios significativos en planta.

Figura 5.

Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por vía seca.



Nota. Tomado de: (Diaz Claros & Castro Celis, 2017)

2.4 Proceso por vía húmeda

El GCR es adicionado al cemento asfáltico produciendo una mezcla modificada llamada asfalto-caucho usada de igual manera como un ligante modificado. (Carlos et al., n.d.)

Al modificar el ligante con GCR se logra mejorar:

- La resistencia al envejecimiento.
- comportamiento elástico, aportando flexibilidad.
- La susceptibilidad térmica.
- La durabilidad ante agentes agresores.
- La resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas.

Figura 6.

Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por vía húmeda.

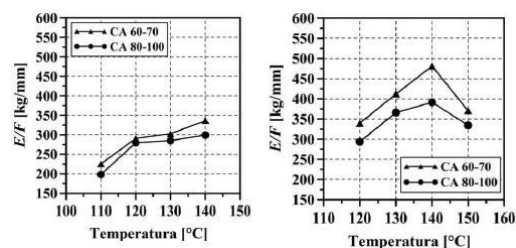


Nota. Tomado de: (Lo Presti, 2013)

Este proceso de modificación aumenta la viscosidad del cemento asfáltico dándole unas características particulares. La plasticidad de esta mezcla disminuye en temperaturas altas, lo cual es un punto a favor para evitar fenómenos como el ahuellamiento. Además, en bajas temperaturas, la flexibilidad de esta mezcla aumenta, esto traduce un mejor comportamiento ante problemas de posible fisuración. (*Angulo Rodríguez & Duarte Ayala*, n.d.)

Figura 7.

Resistencia Mecánica vs Temperatura de Compactación.



Nota. Tomado de: (Influencia de La Temperatura de Compactación Sobre La Resistencia Bajo Carg...: Universidad Industrial de Santander, n.d.)

En la figura 7 se muestra la diferencia de magnitudes cuando hay GCR (parte derecha) y cuando no hay (parte izquierda), siendo notoria la mejora en la resistencia mecánica cuando el GCR es adicionado a la mezcla. (*Influencia de La Temperatura de Compactación Sobre La Resistencia Bajo Carg...: Universidad Industrial de Santander, n.d.*)

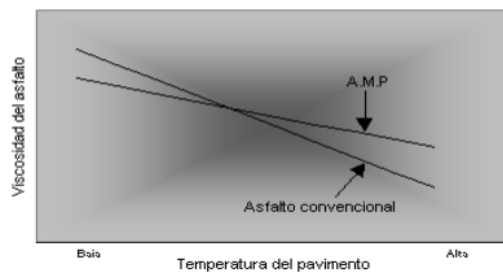
Se recomienda que la temperatura de producción de las mezclas asfálticas modificadas con GCR debe ser la siguiente:

- Temperatura del cemento asfáltico: 163° - 191°C.

Temperatura del agregado: <177°C. ((PDF) *Caracterización Física de Un Asfalto Modificado Con Poliestireno y Llanta Triturada, n.d.*)

Figura 8.

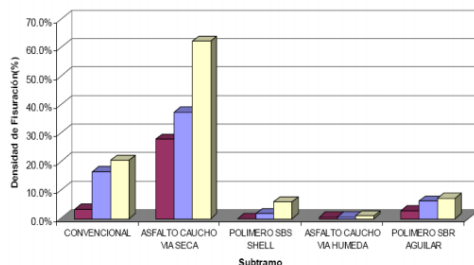
Efecto del asfalto modificado con GCR sobre la rigidez y la temperatura.



Nota. Tomado de: (*Estudio Sobre El Diseño y Construcción de Mezclas Bituminosas En Caliente Con Granos de Caucho Reciclado, Empleando Husos Granulométricos Españoles, n.d.*)

Figura 9.

Densidad de fisuración en diferentes tipos de asfaltos.

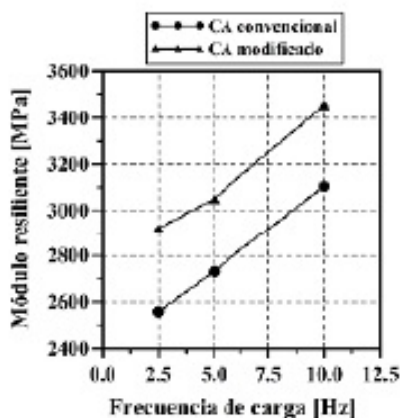


Nota. Tomado de: (*Curva Reológica Del Asfalto Convencional Del CIB | Download Scientific Diagram*, n.d.)

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad-temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto tanto a bajas como a altas temperaturas.

Figura 10.

Módulo resiliente para mezclas convencionales y modificadas con GCR.



Nota. Tomado de: (En et al., n.d.)

2.5 Experiencias extranjeras y nacionales utilizando caucho reciclado en la historia.

El caucho en las mezclas asfálticas ha sido utilizado desde principios del siglo pasado. En 1920, empezaron los estudios y las primeras pruebas de la modificación del asfalto con caucho molido, sin mucho éxito.

La primera tecnología en la cual se utilizó el proceso húmedo fue llamada el proceso McDonald, debido a los estudios realizados en 1960, por Charles McDonald, quien encontró una fórmula exitosa de tiempo/temperatura para la incorporación de caucho reciclado para modificar el ligante. (Maria Camacho Vega & Helena Vargas Porras, n.d.)

En 1968, el “Arizona Department of Transportation” (ADOT), colocó la primera membrana SAM y en 1972, la primera SAMI como retardadora de figuración.

Experiencias similares fueron llevadas a cabo por la Arizona Refinery Company (ARCo) o la EnviroTire INC con su sistema PlusRide de incorporación de granos de caucho de triturado de neumático al agregado, para fabricar una mezcla discontinua. Varios estados de Estados Unidos, entre ellos California y Florida, se unieron a estas experiencias, realizando tramos de prueba y colocando asfalto-caucho donde quiera que se presente agrietamiento, con buenos resultados.

En España, los estudios comienzan en 1974 cuando el Centro de Investigaciones Elpidio Sánchez Marcos trabajó en fórmulas de incorporación de caucho al ligante para posteriormente fabricar mezclas asfálticas que fueron aplicadas en las calles de la ciudad de Barcelona. (*Vista de Experiencias Sobre El Estudio de Materiales Alternativos Para Modificar Asfaltos | Ingeniería*, n.d.)

En Sudamérica, también se ha experimentado con caucho. En Brasil, existen tramos de prueba usando vía seca y húmeda, al igual que en México y en Colombia. En Argentina, se realizó

un tramo de prueba utilizando el proceso seco en el año 2002, en la ciudad de Buenos Aires, en un sector de una de las avenidas más importantes de la ciudad, con alto tráfico de autobuses urbanos, con resultados bastantes alentadores.

En Chile, existen dos tramos experimentales utilizando el proceso húmedo realizados por la Dirección de Vialidad. El primero de ellos, se realizó en la undécima Región de Aysén en la Ruta X-65 en mayo del año 2004. El segundo tramo experimental fue realizado en la V Región, en la provincia de Los Andes, en la Rehabilitación de la Ruta60 CH, llevado a cabo en marzo del año 2005. (Ramírez Palma, 2006)

2.6 Algunos aplicaciones exitosas registrados en la utilización del residuo de llantas a nivel nacional.

Obras civiles donde ha sido implementado la modificación del asfalto caucho fue en el proyecto de transformación del aeropuerto de Barranquilla, Ernesto Cortissoz, en donde con una inversión de \$345.000 millones se iniciaron las obras de pavimentación de la zona norte de la pista y la intervención de las calles de rodaje que suman 60.000 metros cuadrados en los que se colocará una capa de asfalto caucho que deberán acabar a más tardar el 24 de septiembre de 2016. “Con estas obras en la pista empieza en firme la transformación del aeropuerto de Barranquilla, y complementarán el proceso de modernización que tendrá la terminal en el futuro. El Gobierno está invirtiendo 345.000 millones de pesos en este proyecto de vital importancia para el Caribe colombiano” (Pineda Rodriguez & Rey Moreno, 2012)

Para mejorar la movilidad de la ciudad, en los carriles donde transitará el **Masivo Integrado de Occidente** (MIO) de la ciudad de Cali, como compromiso para el medio ambiente se usa asfalto modificado con grano de caucho.

Una de las mega obras que ha causado gran controversia es el Viaducto el gran Manglar, donde se ejecutaron cuatro estrategias principales para complementar el sistema constructivo el uso de asfalto con caucho reciclado para minimizar la incidencia del ruido en las zonas de anidación de aves. La estructura tiene una longitud de 5,4 kilómetros en total, de los cuales de 4,73 kilómetros se encuentran sobre el espejo de agua de la Ciénaga de la Virgen y 360 metros pertenecen a un retorno. Cuenta con dos carriles de 3,65 metros y bermas internas y externas de 1,80 metros y una altura promedio sobre la Ciénaga de 7 metros. (Danae, 2014)

2.7 Casos internacionales de aplicación exitosos.

Desde la invención de McDonald, la tecnología de proceso húmedo se ha utilizado y modificado más ampliamente en cuatro estados en los EE. UU.: Arizona, California, Texas y Florida. Más recientemente el proceso húmedo se ha utilizado también en Carolina del Sur, Nevada y Nuevo México. Sudáfrica y Australia comenzaron a introducir el asfalto modificado con GCR como cemento asfáltico para pavimentos y para los sellos de la década de 1980 y mediados de la década de 1970, respectivamente. “En Sudáfrica, se informó de los procesos tanto húmedos y secos que se han utilizado con éxito”. “Dos estados de Australia (Nueva Gales del Sur y Victoria) adoptaron el procedimiento por vía húmeda para la aplicación limitada de asfalto modificado con GCR, principalmente como capa de resistencia a la grieta, pero por lo demás su uso ha sido

predominantemente para aplicaciones de sellado pulverizados”. (Pineda Rodriguez & Rey Moreno, 2012)

Hoy en día la tecnología de asfalto con grano de caucho está siendo adoptado en muchas otras partes del mundo. (Diaz Claros & Castro Celis, 2017)

2.8 Pavimentos modificados con grano de caucho y las vías 4G

Los hallazgos encontrados sobre el tema a nivel mundial y el impulso que ha tenido el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), al igual que la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), gracias a la Vicepresidencia de la República, el Ministerio de Ambiente, en los últimos años ha abierto las puertas a la utilización de dichos pavimentos, como una solución ecológica y económica, para el desarrollo de infraestructuras de tránsito y transporte en el país. Es tanto el éxito en la utilización de pavimentos modificados con GCR en la ciudad de Bogotá y en diferentes partes del mundo, que, tanto el INVIAS como la ANI, han unido esfuerzos y han decretado el uso de estas tecnologías a nivel nacional con un porcentaje del 10% de la obra, para empezar, dicho porcentaje aumentará progresivamente. (Lubo Gómez & Martínez Giraldo, 2019)

2.9 Empresas de reciclaje de llantas Colombia

- Planta de reciclaje y aprovechamiento de llantas, CORPAUL en Antioquia. Esta empresa se dedica a la recolección, procesamiento y aprovechamiento de llantas. Cierran el ciclo de su vida útil reincorporándolas de nuevo a la cadena productiva. Se procesan alrededor de 250000 unidades al año para producir 1600 toneladas de caucho y polvo, además de aprovechar el

caucho, acero y lona. Procesan una tonelada de llantas por hora, reciclan 433 toneladas de caucho y 41,5 toneladas de polvo.

- GRUPO GERCONS COLOMBIA ubicado en la ciudad de Bogotá, Empresa enfocada al tratamiento, reciclaje, trituración y disposición final de residuos sólidos. Para procesar los neumáticos fuera de uso, tienen plantas completas o máquinas por separado. GERCONS Colombia, recicla 64 toneladas de llantas al día, trabajando las 24 horas. Manejan cinco tamaños de grano de caucho reciclado base debido a las diferentes aplicaciones que ofrecen. Sin embargo, en la tabla, se muestran todos los tamaños obtenidos.

- RECICLAIR en Cundinamarca, Empleando equipos de alta calidad para procesar con más eficiencia las llantas usadas, producen una variedad de gránulos de caucho con diferentes granulometrías. RECICLAIR produce hasta 20 mallas de partículas de caucho para diferentes aplicaciones en el campo del reciclaje.

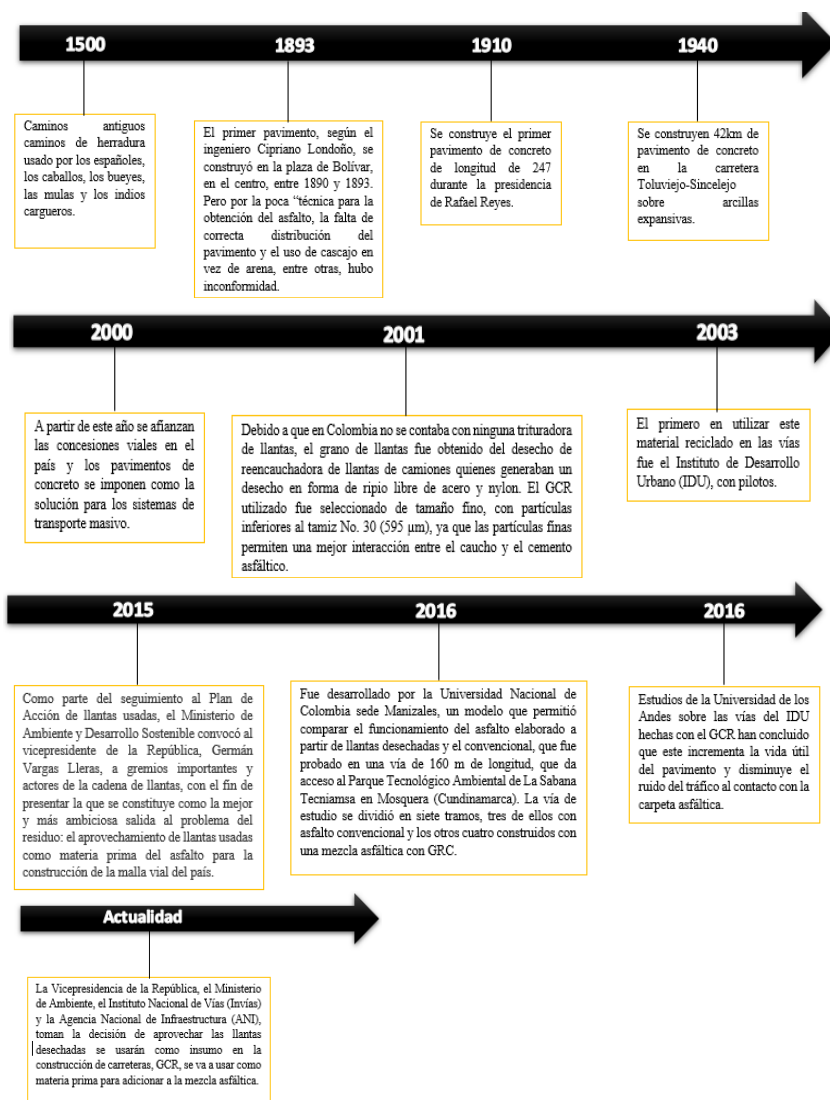
- CERREJÓN & INDUTRADE RECYCLING S.A.S, Esta empresa se inauguró en Julio de 2016 en la Guajira, convirtiéndose en la primera planta de reciclaje de llantas de gran tamaño en Latinoamérica, con una planta que trabajará con tecnología de última generación, libre de contaminación química y con grandes beneficios ambientales. (Jaimes Leal & Torres Cervera, 2018)

3. Línea de tiempo

3.1 Línea de tiempo Nacional

Figura 11.

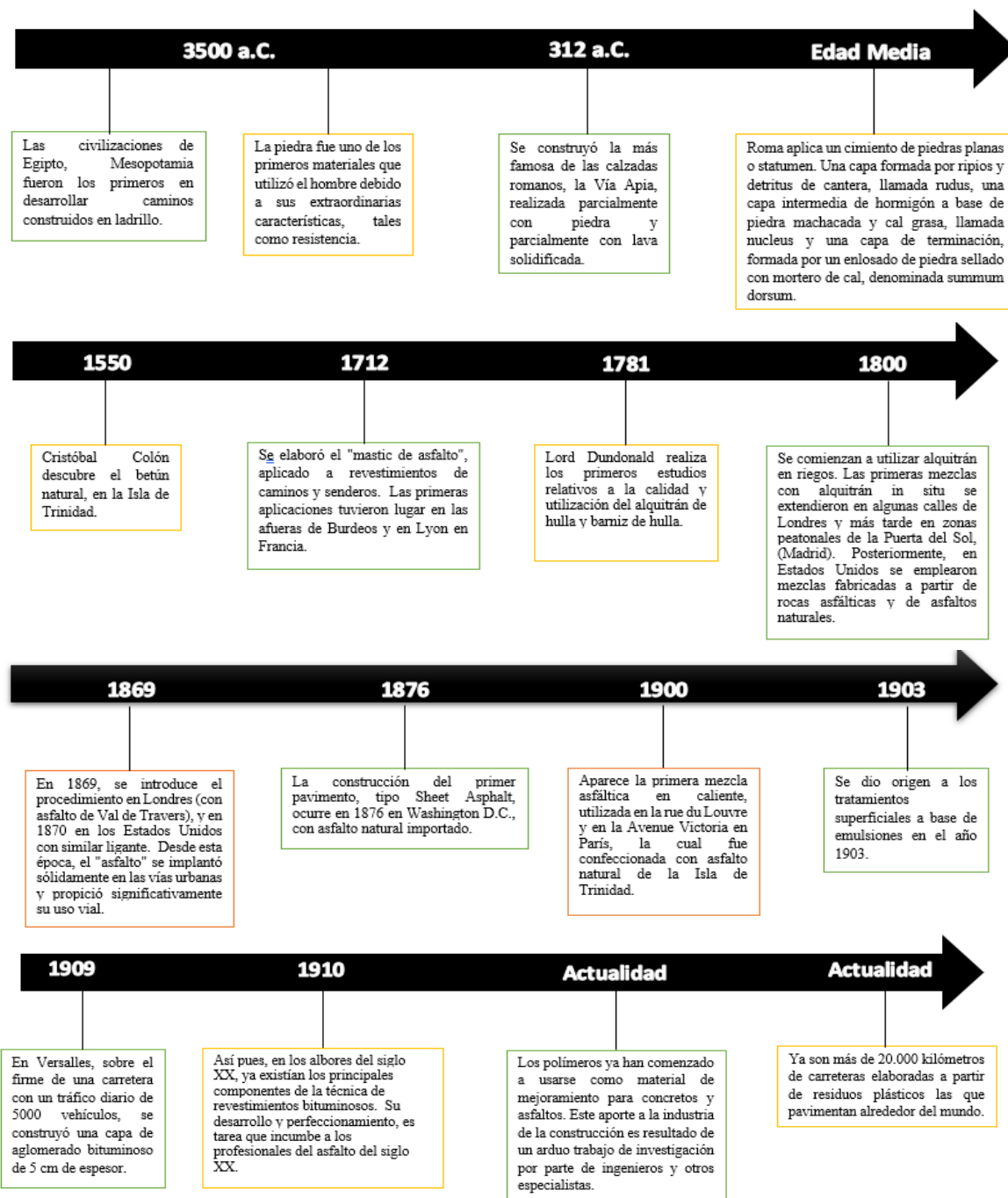
Línea de Tiempo Nacional



3.2 Línea de Tiempo Internacional

Figura 12.

Línea de Tiempo Internacional



4. Conclusiones

- Según los artículos encontrados en la revisión del estado del arte, demuestran que la adición del GCR a las mezclas asfálticas, independientemente del proceso (proceso seco o húmedo) mejora considerablemente los comportamientos mecánicos de los pavimentos y se obtienen beneficios, económicos y ambientales al implementarse.
- La información disponible sobre este método de mejoramiento de las mezclas asfálticas demuestra los altos avances internacionales, ya que presenta beneficios importantes como su vida útil y no es costoso su mantenimiento respecto al asfalto convencional.
- En la línea de tiempo se muestra que al pasar los años los diferentes e importantes avances en los materiales usados para la construcción de carreteras a nivel internacional y a nivel nacional que conlleva al desarrollo de una civilización avanzada.
- El mejoramiento de la infraestructura de los países del mundo es prioritario para su desarrollo socioeconómico aprovechando el caucho de las llantas que generan problemas ambientales y económicos en la sociedad.
- El reciclaje de llantas en Colombia había sido una actividad poco explorada por la falta de plantas trituradoras y recicladoras de llantas, razón por la cual no se ha podido implementar el uso de Grano de caucho en el asfalto en diferentes países.

Referencias Bibliográficas

- Alarcón, José Camacho, Deicy Herreño, I. (2019). “*VIABILIDAD DE USO DE ASFALTO CAUCHO EN LA REGIÓN DE TUNJA, COLOMBIA.*” 15.
- Andrés, B., Velásquez, R., Felipe, S., & Hernández, R. (n.d.). *DIAGNÓSTICO DE LAS VÍAS PRIMARIAS EN COLOMBIA, Y LA INTERVENCIÓN DE LA INGENIERÍA CIVIL PARA SU EJECUCIÓN Y MANTENIMIENTO.*
- Angulo Rodríguez, R. A., & Duarte Ayala, J. L. (2005). “MODIFICACIÓN DE UN ASFALTO MODIFICADO CON CAUCHO RECICLADO DE LLANTA PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS.” *Facultad de Fisicoquímicas*, 1–94.
- Borja Cervera, F. S. (2016). “INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA INCORPORANDO CAUCHO RECICLADO DE NEUMÁTICOS, CAJAMARCA, 2016.” *Facultad de Ingeniería*, 156.
- Cabezas Dulanto, V., & Mendoza Aguirre, C. fiorela. (2018). “Alternativa de diseño de mezcla asfáltica en caliente con polvo de caucho de NFU para la ciudad de Lima 2018.” *Universidad Cesar Vallejo*, 171.
- Cao, W. (2007). Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. *Construction and Building Materials*, 21(5), 1011–1015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.004>
- Carlos, R., Serrano, L., & Rodríguez López, A. D. (n.d.). *UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO.*
- Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada.* (n.d.). Retrieved October 1, 2020, from

- https://www.researchgate.net/publication/237043081_Caracterizacion_fisica_de_un_asfalto_modificado_con_poliestireno_y_llanta_triturada
- Castro Guillermo. (2007). *REUTILIZACION Y RECICLADO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO*.
- Chávez Alderete, J. C. (2000). “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DE ASFALTO CONVENCIONAL Y UNO MODIFICADO CON AGREGADO CAUCHO.” *Instituto Tecnológico de La Construcción*, 76.
- Chávez More, F. B. (2018). “Comparación en laboratorio de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas con caucho producidas mediante el proceso húmedo, seco y semi-húmedo.” *Universidad Politécnica de Madrid*, 50.
- Ciencia e Ingeniería Neogranadina apLICaCIONEs DE CauChO rECICLaDO: uNa rEvIsIóN DE La LITeRaTura applicaTions of recycled rubber: a liTeraTure review gabriel Jaime peláez arroyave * sandra milena velásquez restrepo ** diego hernán giraldo vásquez ****. (n.d.). <https://doi.org/10.18359/rcin.2143>
- Clasificación de las Carreteras*. (n.d.). Retrieved October 19, 2020, from <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/2706-clasificacion-de-las-carreteras>
- Convencionales, A. (n.d.). *UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL INVESTIGACIÓN DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON EL USO DE CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS Y SU COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICO CON LOS*.
- Correa Lesmes, C. A. (2018). “IMPLEMENTACIÓN DE MEZCLA ASFALTICA MODIFICADA CON GRANULO DE CAUCHO EN EL BARRIO SAN CARLOS DE LA LOCALIDAD DE TUNJUELITO.” *Universidad Militar Nueva Granada*, 48.
- Curva reológica del asfalto convencional del CIB | Download Scientific Diagram*. (n.d.). Retrieved September 30, 2020, from https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Curva-reologica-del-asfalto-convencional-del-CIB_fig1_40426063

Danae, E. L. (2014). "El diseño del suelo: el papel del pavimento en la creación de la imagen de la ciudad ". *Programa de Doctorado Espacio Público y Regeneración Urbana*, 417.

De Arquitectura, F. (2017). "CGR". *YUDY BIBIANA LADINO OYOLA ÁNGELA MARCELA RUBIANO QUIROGA UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA*.

Diaz Claros, C. M., & Castro Celis, L. C. (2017). *IMPLEMENTACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS PARA MEJORAR LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS Y GARANTIZAR PAVIMENTOS SOSTENIBLES EN BOGOTÁ* [Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf>

Durant Broden, J. (2017). "RELLENO ELASTOMÉTRICO PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS EN CLIMAS DE ALTURA MEDIANTE EL RECICLADO DE NEUMÁTICOS." *Universidad Nacional de Altiplano*, 125.

En, M., De, A., & Construcción, L. A. (n.d.). *INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA CONSTRUCCIÓN*.

Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. (n.d.). Retrieved September 29, 2020, from <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104457>

Estudio prenормativo y elaboración de una guía para prescriptores de pavimentos de caucho: primeros resultados - Dialnet. (n.d.). Retrieved October 1, 2020, from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4572864>

Estudio sobre el diseño y construcción de mezclas bituminosas en caliente con granos de caucho reciclado, empleando husos granulométricos españoles. (n.d.). Retrieved October 1, 2020, from https://www.researchgate.net/publication/45601748_Estudio_sobre_el_diseno_y_construccion_de_mezclas_bituminosas_en_caliente_con_granos_de_caucho_reciclado_empleando_husos_granulometricos_espanoles

Historia del uso de asfalto - EADIC - Cursos y Master para Ingenieros y Arquitectos. (n.d.). Retrieved September 29, 2020, from <https://www.eadic.com/historia-del-uso-de-asfalto/>

Influencia de la Temperatura de Compactación Sobre la Resistencia Bajo Carg...: Universidad Industrial de Santander. (n.d.). Retrieved September 29, 2020, from <http://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2095/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=d1e79ad5-9a98-45cf-9dcd-c45c724e023e%40sessionmgr103>

Jaimés Leal, L. A., & Torres Cervera, K. P. (2018). *APROVECHAMIENTO DEL GCR PARA LA ELABORACION DE ADOQUINES ECOLOGICOS COMO ALTERNATIVA A LA INDUSTRIA CONSTRUCTIVA.* 15.

Karacasu, M., Okur, V., & Er, A. (2015). A Study on the Rheological Properties of Recycled Rubber-Modified Asphalt Mixtures. *Scientific World Journal*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/258586>

Khan, I. M., Kabir, S., Alhussain, M. A., & Almansoor, F. F. (2016). Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction. *Procedia Engineering*, 145, 1557–1564. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.196>

Labrador, F. R., Técnico, I., & Públicas, O. (2019). “*Historia de los pavimentos urbanos.*”

Lo Presti, D. (2013). Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 49, pp. 863–881). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>

Lubo Gómez, O. A., & Martínez Giraldo, R. A. (2019). *Asfaltos modificados con cauchos en vías primarias en las ciudades Santa Marta, Barranquilla y Bogotá como alternativa de mejoramiento de la capa de rodadura de los pavimentos flexibles entre los años 2012-2019.* Facultad De Ingeniería Civil. Universidad Cooperativa De Colombia. Santa Marta. https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/15630/2/2019_asfaltos_modificados_cauchos.pdf

Maria Camacho Vega, D., & Helena Vargas Porras, L. (n.d.). *CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS.*

MODIFICACIÓN DE UN ASFALTO CON CAUCHO RECICLADO DE LLANTA PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS RICARDO ALBERTO ANGULO RODRÍGUEZ JOSÉ LUIS DUARTE AYALA - PDF Descargar libre. (n.d.). Retrieved September 30, 2020, from <https://docplayer.es/amp/31530597-Modificacion-de-un-asfalto-con-caucho-reciclado-de->

llanta-para-su-aplicacion-en-pavimentos-ricardo-alberto-angulo-rodriguez-jose-luis-duarte-ayala.html

Mora Campos, P. R. (2013). “*PROPUESTA ECONÓMICA, TÉCNICA Y OPERATIVA PARA LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA RECICLADORA DE LLANTAS DESECHADAS DE VEHÍCULOS PARA PRODUCIR POLVO DE CAUCHO Y COMERCIALIZARLO EN LA CIUDAD DE QUITO: CASO PRÁCTICO APLICACIÓN EN EL ASFALTO.*”

Moreno Anselmi, L. Á. (2013). “Comportamiento monotónico de mezclas asfálticas MDC-2 adicionadas con desecho de caucho-cuero.” *Noviembre 13*, 11.

Múnera, J. C., & Ossa, E. A. (2014). *Estudio de mezclas binarias Asfalto-Polímero Analysis of binary Bitumen-Polymer mixtures.*

Murillo, D. (n.d.). *MODIFICACIÓN DE UN ASFALTO CON CAUCHO RECICLADO DE LLANTA PARA SU APLICACIÓN EN PAVIMENTOS.* Retrieved October 1, 2020, from https://www.academia.edu/14221736/MODIFICACIÓN_DE_UN_ASFALTO_CON_CAUCHO_RECICLADO_DE_LLANTA_PARA_SU_APLICACIÓN_EN_PAVIMENTOS

Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. (n.d.). Retrieved October 1, 2020, from https://www.researchgate.net/publication/283266510_Obtencion_de_Asfalto_Modificado_con_Polvo_de_Caucho_Proveniente_del_Reciclaje_de_Neumaticos_de_Automotores

Osorio Baquero, I. (n.d.). *Artículos cortos Breve reseña histórica de las vías en Colombia.* <https://doi.org/10.16925/in.v10i17.880>

Pablo, J., & Ramírez, R. (n.d.). *DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA ASFALTO CAUCHO TECNOLOGÍA GAP GRADE DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA CON ASFALTO CAUCHO TECNOLOGÍA GAP GRADED PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ ARMANDO RAMÍREZ VILLAMIZAR INGRYD LORENA LADINO RUBIO.*

Palma, C. V., Ortiz Cisneros, J. C., Ávalos Belmonte, F., & Castañeda Facio, A. (2015). “Modificación de asfalto con elastómeros para su uso en pavimentos.” *Facultad de Ciencias Químicas*, 6.

- Pineda Rodriguez, Y. A., & Rey Moreno, F. A. (2012). "MEZCLAS ASFÁLTICAS DRENANTE MODIFICADA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO." *Universidad Piloto de Colombia*, 102.
- Ramírez Palma, N. I. (2006). *Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco*.
<http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104457>
- Ramos Lima, L. (2018). "USO DE RESIDUOS DE CAUCHO EN PAVIMENTOS DE ASFALTO: UNA REVISIÓN DE LITERATURA." 25.
- Ruiz Galeano, N. A., & Rodriguez Medina, B. (2016). "COMPORTAMIENTO, VIABILIDAD Y COSTOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO PARA LA FABRICACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA. *Universidad La Gran Colombia*, 49.
- Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos*. (n.d.). Retrieved October 1, 2020, from https://www.researchgate.net/publication/325732454_Trece_anos_de_continuo_desarrollo_con_mezclas_asfalticas_modificadas_con_Grano_de_Caucho_Reciclado_en_Bogota_Logrando_sostenibilidad_en_pavimentos
- Vista de Efecto del grano de caucho reciclado en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12*. (n.d.). Retrieved September 29, 2020, from <https://revistas.ufps.edu.co/index.php/respuestas/article/view/1810/1839>
- Vista de Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos / Ingeniería*. (n.d.). Retrieved October 2, 2020, from <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/reving/article/view/2376/3256>
- Www, W. : M. N., & Co. (n.d.). *LABORATORIO DE ENSAYOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA DE GRADACIÓN TIPO-I (IDU) CON ASFALTO MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR) DE MPI LTDA*. Retrieved October 16, 2020, from www.mpi.net.co

Apéndice

Apéndice A. Cuadro cronológico del proceso evolutivo del asfalto modificado con Grano de Caucho Reciclado (GCR) y sus incidencias en el desarrollo de la investigación del GCR según las fuentes bibliográficas consultadas.

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
González Herrera (1996, España)	Se profundiza en el conocimiento de la influencia del árido reciclado sobre las propiedades del nuevo hormigón. Se ha visto que la mayor absorción de estos áridos puede limitar su utilización si no se adaptan los procesos productivos a esta característica. Los resultados de la experimentación con mezclas porosas señalan que el efecto de gcr disminuye las pérdidas por desgaste del ensayo cántabro, aumenta la resistencia a la deformación plástica a 40°C obtenida mediante el ensayo de pista.
Chávez Alderete (2000, México)	El caucho de neumático es un caucho vulcanizado, que puede ser un modificador muy beneficioso en relación con carpetas de asfalto y este proceso es posible a través de dos procesos, es decir, a través del proceso "seco" o incluso "proceso húmedo"
Duarte Ayala (2005, Colombia)	El comportamiento del pavimento a altas temperaturas de servicio (>25°C) es apropiado que el asfalto modificado presente una viscosidad más alta con respecto al asfalto original, condición que es importante en el desempeño del bitumen en el pavimento, para evitar el ahuellamiento y la exudación del asfalto, y por consiguiente la disgregación de los áridos que

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
	constituyen la carpeta asfáltica. Se evidenció una mejora en la recuperación elástica por torsión de los asfaltos modificados, lo cual es importante ya que esta propiedad es una medida de la resistencia a la deformabilidad presente en el asfalto, por consiguiente, el AMC tendrá como características un mejor desempeño y durabilidad frente a las deformaciones permanentes o ahuellamientos.
Muñoz Rojas (2006, Chile)	El caucho reciclado obtenido de neumáticos desechados puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como un agregado (proceso seco) o como un modificador del ligante (proceso húmedo). Por otro lado, la utilización del caucho trae beneficios ambientales al valorizar un desecho como son los neumáticos y solucionar el problema de la disposición final de ellos, disminuyendo la contaminación.
Weidong Cao (2006, China)	Según el ensayo, la adición de caucho de neumáticos en el asfalto las mezclas que utilizan el proceso seco podrían mejorar las propiedades de resistencia a la deformación permanente a alta temperatura y agrietamiento a baja temperatura.
Figueroa Infante, Sánchez Castillo & Reyes Lizcano (2007, Colombia)	De acuerdo con los ensayos de penetración para el asfalto convencional, éste se clasificó como un asfalto de penetración 80/100, el cual se considera con alto grado de adherencia, de consistencia relativamente blanda y con una tendencia al ahuellamiento en una mezcla asfáltica. La reducción de la penetración y la ductilidad, y el incremento del punto de ablandamiento de los asfaltos modificados respecto al ligante asfáltico convencional, muestra que la llanta triturada actuó como agentes rigidizadores del cemento asfáltico logrando mayor consistencia en el material.

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
Wulf Rodríguez (2008, Chile)	<p>Las mezclas elaboradas con altas temperaturas presentaron un recubrimiento totalmente adecuado y no se presentó problema alguno, en el mezclado ni en la compactación.</p> <p>Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros, es contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes (roderas), pues los asfaltos modificados presentan una mayor recuperación de su forma, por lo tanto, menor deformación permanente de las mezclas que componen las capas de rodamiento.</p>
Figueroa Infante, Fonseca Santanilla & Reyes Lizcano (2008, Colombia)	<p>Se usó el método SARA y el análisis morfológico y micro morfológico del bitumen convencional y modificado. La caracterización fisicoquímica permitió establecer que el caucho empleado como polímero modificador mantienen y mejoran las propiedades elásticas del ligante, mientras que el caucho de llanta molida mejora propiedades como la susceptibilidad térmica, la resistencia a la fatiga, la inflamabilidad y la resistencia a los solventes.</p>
Rondón Quintana, Moreno Anselmi, Rodríguez Urrego & Lee Mariño (2009, Colombia)	<p>Se buscó evaluar el cambio que experimentan las propiedades mecánicas de mezclas densas en caliente tipo MDC-2 (de acuerdo con las especificaciones del Instituto Nacional de Vías - INVIAS) bajo carga monotónica y dinámica, cuando se adiciona un desecho de policloruro de vinilo (PVC) al cemento asfáltico (CA) por vía húmeda (el desecho se mezcla con el CA a alta temperatura) y al agregado pétreo por vía seca (se reemplaza parte del filler mineral por el aditivo).</p> <p>Los valores de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad del asfalto modificado permiten predecir menor ahuellamiento a altas temperaturas de servicio. La mezcla asfáltica modificada a bajas temperaturas de servicio puede tener</p>

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
	un comportamiento frágil, por lo tanto, inicialmente se recomienda su utilización en climas cálidos y realizar otras investigaciones para describir su comportamiento en clima frío.
Pineda Rodríguez & Rey Moreno (2012, Colombia)	Se hace una comparación entre el asfalto convencional y el asfalto modificado GCR, se observa en la comparación que la muestra de GCR proporciona una estabilidad, superando a la muestra convencional en un 64%.
Rondón Quintana, Molano Mora & Tenjo Lancheros (2012, Colombia)	Para el caso de las mezclas convencionales, se observa una disminución notable de dicha propiedad (entre 20% y 34%) cuando disminuye la temperatura de compactación en 30°C, con respecto a la de referencia, al decaer la temperatura de compactación, el mejor comportamiento en cuanto a resistencia mecánica bajo carga monotónica se refiere, lo experimentan las mezclas modificadas con GCR.
Mora Campos & Chicaiza Defas (2013, Ecuador)	La modificación de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito y se estudió que el costo/eje (Beneficio/Costo) puede disminuirse en un 20% y 57% cuando se modifica la mezcla con GCR.
Moreno Anselmi (2013, Colombia)	Se determinó el comportamiento monotónico de mezclas asfálticas MDC-2 condición de grano de caucho en relación con las mezclas asfálticas fabricadas convencionalmente, teniendo en cuenta los parámetros de estabilidad y deformación. El estudio empezó con la determinación del porcentaje óptimo de asfalto para las mezclas convencionales (asfalto 60/70) y para las mezclas con adición de caucho-cuero al 1, 2, 3 y 4% de asfalto por vía húmeda; en seguida se ejecuta el ensayo Marshall obteniendo en la prensa resultados de estabilidad y flujo para cada una de las muestras. De los resultados obtenidos se deduce

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
	<p>que el uso del desecho caucho mejora las propiedades mecánicas de la mezcla, viéndose reflejado en el aumento de la resistencia que presenta comparándolas con las mezclas asfálticas fabricadas convencionalmente.</p> <p>Las muestras MDC-2 fabricadas con caucho al 2% presentó mejor comportamiento que las fabricadas convencionalmente, con adición al 1, 3 y 4% con respecto a la Estabilidad.</p>
Lo presti (2013, Inglaterra)	<p>En términos de propiedades aglutinantes, las principales diferencias entre el asfalto convencional y el modificado con GCR son la viscosidad y su estabilidad, El estudio empezó con la determinación del porcentaje óptimo de asfalto para las mezclas convencionales (asfalto 60/70) y para las mezclas con adición de caucho-cuero al 1, 2, 3 y 4% de asfalto por vía húmeda; en seguida se ejecuta el ensayo Marshall obteniendo en la prensa resultados de estabilidad y flujo para cada una de las muestras.</p>
Múnera & Ossa (2014, Colombia)	<p>Estudiar las características térmicas al asfalto fue determinar los valores de su temperatura de transición vítrea (Tg). En general, la Tg se relaciona con la rigidez, la polaridad, el peso molecular y la aromaticidad de las estructuras moleculares del asfalto. El asfalto estudiado busca ser utilizado en aplicaciones de impermeabilización, en donde las sollicitaciones mecánicas no son tan exigentes como para aplicaciones en pavimentos. Sin embargo, las características de susceptibilidad térmica son importantes para condiciones normales de trabajo que pueden alcanzar hasta 60°C.</p>
Ramírez Villamizar, Ladino Rubio & Rosas Ramírez (2014, Colombia)	<p>Propone propuesta como diseño la ASSHTO-93, considerando que fue el método base para el Método de Diseño de Pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de Tránsito, del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). Además, que en el caso de</p>

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
	<p>los otros métodos como el del INVIAS, da una estructura muy baja, sobre todo en carpeta asfáltica, que no la hace cumplir con las solicitudes de los otros métodos como Shell e Instituto del Asfalto.</p>
<p>Murat Karacasu, Volkan Okur, & Arzu Er (2014, Turquía)</p>	<p>Para determinar el contenido óptimo de betún, las pruebas de estabilidad y de flujo de Marshall se realizan de acuerdo con las especificaciones ASTM D 1559-76. Se encontró que la proporción óptima de betún era 4.89% para el grado de penetración 50/70. El caucho desmenuzado seleccionado para esta investigación se produjo a partir del recauchutado de neumáticos de automóviles. Los materiales de caucho asfáltico reaccionado tienen propiedades drásticamente diferentes en comparación con el caucho asfáltico sin reaccionar. La resolución del caucho aumenta la viscosidad del betún y provoca efectos de unión y refuerzo.</p>
<p>Salvatierra Cerda (2014, Perú)</p>	<p>El caucho se puede incorporar en las mezclas bituminosas en caliente para mejorar sus propiedades reológicas, ya que el caucho presente en los neumáticos, tanto el de origen natural como el sintético, se compone en más del 50 % de polímeros elastoméricos.</p> <p>Mientras más alta la temperatura de digestión y más largo el tiempo en horno, el proceso de digestión mejora. En este caso, los mejores valores de resistencia conservada para esta mezcla se encuentran para la temperatura de 170 °C por dos horas, con contenidos de caucho de hasta el 1 %.</p>
<p>Llago Serrano (2015, España)</p>	<p>La dosificación del betún-caucho se debe tener en cuenta la composición del betún y del caucho, la granulometría, textura y dotación de las partículas de caucho y la temperatura y tiempo de mezclado. Los factores del CNR que influyen a las propiedades del ligante betún-caucho son la granulometría y la</p>

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
	<p>textura. Cuanto más fina sea la granulometría del material, mayor superficie ofrece al betún y consecuentemente más rápidamente reacciona (el tiempo de reacción es proporcional al cuadrado del diámetro de las partículas) y se consigue mayores aumentos de la viscosidad.</p>
<p>Pereda Rodríguez & Cubas Parimango (2015, Perú)</p>	<p>Se evalúan las ventajas y desventajas, costo/beneficio, que representa el uso de esta mezcla; las propiedades físico-mecánicas de éste y cómo contribuyen a la reducción de la deformación por fatiga del asfalto. En diferentes países vecinos esta técnica se está usando desde años atrás, con resultados exitosos que benefician a los usuarios y ayudan a la sostenibilidad del medio ambiente por usar llantas en desuso que son tiradas a los botaderos.</p> <p>El costo del Asfalto Modificado resulta ser 26.2 % más que el convencional, pero se compensa con la mayor durabilidad de la vía y el menor costo en mantenimiento.</p> <p>Queda demostrado mediante los ensayos realizados que la adición del polvo de llantas mejora el comportamiento físico-mecánico del asfalto convencional.</p>
<p>Victoria Palma, Ortiz Cisneros, Ávalos Belmonte & Castañeda Facio (2015, México)</p>	<p>A pesar del alto costo en la elaboración y las dificultades en la aplicación de AMP, el uso de éstos en sistemas de pavimentación proporciona a las mezclas grandes beneficios en cuanto a resistencia a la fractura, ahuellamiento, susceptibilidad térmica y permeabilidad, lo que conlleva a prolongar el tiempo de vida del pavimento.</p>
<p>Ruiz Galeano & Rodríguez Medina (2016, Colombia)</p>	<p>Se comprobó que uno de los factores que hacen elevar los costos de implementación del (GCR) a las mezclas asfálticas es el precio del asfalto ya que estas mezclas trabajan con mayor cantidad de asfalto-caucho; La mezcla que se usó para esta investigación contiene 7.3% de asfalto-caucho, la mezcla MDC-</p>

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
	<p>2 contiene 5.7%. La diferencia en precio por M3 entre la mezcla de asfalto-caucho y la mezcla convencional va entre \$70.000 y \$130.000 pesos dependiendo si se puede intervenir en alguno de los anteriores aspectos, pero se verá reflejado en los costos de mantenimiento y vida útil de la vía, ya que el precio por Kg del asfalto caucho es de \$1.780 pesos puesto en Bogotá, y el precio del asfalto convencional es de \$1.171 pesos puesto en Bogotá, la mezcla asfáltica con GCR presenta una recuperación axial inicial mayor que la mezcla MDC-2 para un rango de temperatura de 15°C, con una frecuencia de 7,5 HZ, pero esta recuperación axial inicial empieza a disminuir con relación al aumento de la temperatura y la frecuencia en comparación a la mezcla asfáltica convencional.</p>
<p>Calahorra, Giménez, Herrera, Martínez, Salazar (2016, Chile)</p>	<p>Proponen utilizar polvo de caucho, como sustituto del 10% del betún dentro de la carpeta asfáltica de la capa de rodamiento, manteniendo los áridos igual. Debido a esto se crean dos escenarios (con/sin caucho) para realizar una comparación de impacto ambiental, social y económico. La metodología utilizada es un estudio de caso, donde se realiza un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) desde la extracción de materiales (áridos, betún y caucho), pasando por el transporte requerido, la fabricación de la capa asfáltica, operación y mantención y según lo analizado existen diversos factores que hacen conveniente la opción de utilizar el caucho procedente de NFU en la construcción de pavimentos asfálticos. Una de las principales, es la reutilización de este caucho, ya que en la medida en que se recolectan y reciclan los NFU, se revalorizan sus componentes, lo que trae consigo un impacto ambiental, económico y social positivo. Se cumple el principio ambiental de jerarquía, reutilizando y reciclando los residuos, y se reduce el volumen de</p>

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
	<p>NFU destinados a ser depositados en vertederos. El empleo de residuos permite a su vez ahorros en recursos naturales. En la técnica de las mezclas fabricadas con BMAVC (Betunes modificados de alta viscosidad con caucho), se estima un aprovechamiento de 350 neumáticos de turismo por kilómetro de carril y por cada centímetro de espesor de mezcla bituminosa. Económicamente, se produce una disminución del 41,69% en los costos de mantención de la vía con pavimento con caucho, respecto de la vía con pavimento tradicional; además, una reducción del 4,03% en el caso de gastos de usuarios debido a mejor resistencia al agrietamiento, menor susceptibilidad a la temperatura y mayor resistencia al envejecimiento.</p>
Vega Zurita (2016, Ecuador)	<p>Se describe el proceso seco empleado para obtener el asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de llantas. Asimismo, para el diseño de las mezclas se utilizó el método Marshall, con el cual se podrá evidenciar los beneficios originados. Para la mezcla asfalto-caucho por el proceso seco se añadió el 1, 2 y 3% de polvo de caucho en reemplazo de una pequeña parte del agregado fino, para evaluar las mezclas asfálticas fabricadas se efectuaron las pruebas de gravedad específica máxima teórica, densidad de la mezcla asfáltica (método RICE), densidad Bulk (peso unitario), porcentaje de vacíos de los agregados compactados y se comprueba que al añadir el polvo de caucho reciclado a la mezcla asfáltica, la Estabilidad Marshall disminuye y a la vez el Flujo y contenidos de vacíos y ligante aumenta.</p>
Cervera Borja (2016, Perú)	<p>Se presenta los requisitos que el concreto bituminoso o asfáltico debe cumplir referente al ensayo Marshall, presentes en el Manual de Carreteras, la incorporación de PCR (partículas de caucho reciclado) influye de manera positiva la mezcla asfáltica</p>

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
	<p>en caliente, incrementando su estabilidad y mejorando la interrelación del flujo en un 2.6% y 2.3% respectivamente en relación con la mezcla patrón. Para esto se empleó 1% de PCR, ya que es la que mejor resultados muestra y cumple con las especificaciones técnicas del Manual de Carreteras.</p>
<p>Diaz Claros & Castro Celis (2017, Colombia)</p>	<p>En los estudios que se han realizado a pavimentos con GCR, se refleja que hay otros factores que afectan los comportamientos mecánicos. Estos factores tienen que ver con la temperatura de reacción del asfalto y el GCR, la granulometría de los agregados, la adición de aditivos y la implementación de otras técnicas de reciclaje de pavimentos. La economía, el medio ambiente, el transporte de un país, entre otros, son factores que se relacionan estrechamente con el estado de la infraestructura vial de un país.</p>
<p>Granados Noa & Sáez Alvan (2017, Perú)</p>	<p>Para la mezcla asfáltica convencional, se determinó el contenido óptimo de asfalto de 5.5%, con el cual se logró el mejor comportamiento mecánico de la mezcla, cumpliendo los requerimientos de diseño de acuerdo con el Manual de Carreteras –Especificaciones Técnicas Generales para Construcción</p> <p>El tiempo y temperatura de digestión debe cumplir con un mínimo necesario para que el caucho interactúe con el asfalto, modificando la reología del asfalto original y consecuentemente el comportamiento de la mezcla. A la temperatura de 170°C por un tiempo de digestión de 2 horas se obtuvo un mejor comportamiento de la mezcla modificada con caucho respecto a la mezcla convencional.</p>
<p>Durant Broden (2017, Perú)</p>	<p>Se determina la composición y temperatura adecuadas para la mezcla de asfalto-caucho, que debe cumplir con lo especificado en el Manual de Carreteras del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones,</p>

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
	<p>2014) Se ejecutaron Se hacen pruebas normadas por el MTC, tales como penetración, viscosidad rotacional de Brookfield, punto de ablandamiento y recuperación elástica y al haber incrementado la recuperación elástica del 40% para el asfalto virgen hasta un 81% para el asfalto modificado con caucho se concluye que todos los ligantes asfálticos mezclados con caucho presentan una mejor performance en climas fríos, mejorando la resistencia a la deformación permanente y por ende a la formación de fracturas.</p>
<p>Camacho vega & Vargas Porras (2017, Colombia)</p>	<p>Se describen los materiales granulares de la cantera “Agregados Santa Lucia” y el asfalto suministrado por Manufacturas y Procesos Industriales (MPI), siguiendo el procedimiento de las especificaciones señaladas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), comprobando que, si es factible utilizar la mezcla asfáltica modificada con goma de neumático, donde el módulo dinámico correspondiente a la mezcla fue de 4.800 Mpa, y para una mezcla convencional es del orden de 2.000 Mpa.</p>
<p>Ladino Oyola & Rubiano Quiroga (2017, Colombia)</p>	<p>Por el método Marshall se determina el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción de la mezcla, evidenciando una tolerancia de hasta 10% en la inclusión de grano caucho reciclado GCR, dentro de la composición del adoquín, más al comparar su resistencia a la compresión, por medio de la prueba de estabilidad y flujo, permitió estimar que la inclusión del 5% de GCR, es la mejor, permitiendo un buen comportamiento elástico con una resistencia a la compresión.</p>

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
G. Martínez, B. Caicedo, D. González, L. Celis & V. Torres (2018, Colombia)	<p>El efecto de la inclusión de GCR en las MDC es el de producir una mezcla menos rígida que el convencional hecho que contrasta con el objetivo de modificar asfaltos (método húmedo) con el cual se obtienen asfaltos con viscosidades mayores y generando mezclas con módulos igualmente mayores.</p> <p>La implementación de esta tecnología eco-sostenible ha involucrado el esfuerzo institucional durante varios años, agotando diferentes etapas de investigación y desarrollo, el cual ha sido exitoso debido al robusto apoyo técnico desde la academia, el personal técnico del sector público y del gremio de la construcción de carreteras</p>
Cabezas Dulanto & Mendoza Aguirre (2018, Perú)	<p>Por el método Marshall se determinan las proporciones más adecuadas para la mezcla asfáltica, así también se podrá establecer la estabilidad, densidad y la posible deformación de la mezcla del estudio por lo cual la adherencia de polvo de caucho de NFU, cumple satisfactoriamente con los parámetros de diseño dispuesto por la norma de carreteras.</p>
Correa Lesmes (2018, Colombia)	<p>El asfalto modificado con GCR mejora los problemas de ahuellamiento, disminuyendo los contenidos de vacíos de aire en las mezclas asfálticas acompañados de un proceso más intensificado de compactación la mezcla. Inicialmente, en los estudios encontrados, se refleja que el problema del ahuellamiento, entre otros factores, se ve favorecido por la falta de compactación, por lo cual la solución esperada es aumentar los ciclos, sin embargo, se demostró que al adicionar GCR estos ciclos pueden disminuir, ya que las partículas de caucho reciclado mejoran esta característica, con respecto de una mezcla asfáltica convencional.</p>
Valero Martínez, Zamora Álvarez, Natividad Vivó &	<p>Los ensayos realizados muestran la influencia de los factores sobre la capacidad de amortiguación. El espesor es la variable</p>

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
Cerdá Casanoves (2018, España)	con mayor influencia; a mayor espesor, mayor amortiguación a impactos. La relación existente entre el espesor y la amortiguación es de tipo cuadrático, lo que significa que en espesores pequeños un aumento de espesor significa un aumento considerable de amortiguación, mientras que en espesores grandes un aumento de espesor significa un aumento mucho menor de amortiguación.
Fernández & Ramos (2018, Brasil)	Un factor de gran importancia y deben ser evaluados es el valor de la implementación, ya que es aún mucho mayor en comparación con convencional asfalto en aproximadamente 30 a 40%, y que se produce debido a la falta de conocimiento de los incentivos fiscales y de negocios, es un proceso más costoso en comparación con el convencional, asfalto caucho presenta como característica aumentar la durabilidad y la flexibilidad del producto final, contribuyendo a la reducción de los costos de mantenimiento periódico ".
Chávez More (2018, España)	El empleo del GCR incrementa la vida útil de un pavimento cuando este se utiliza haciendo uso tanto del proceso húmedo, como del proceso seco, pero estos beneficios dependen de los usos granulométricos que se empleen.
Higuera Sandoval, Olarte Riaño & Soler Sánchez (2019, Colombia)	La investigación analizó el efecto del Grano de Caucho Reciclado (GCR) adicionado por vía seca, en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12, mediante el ensayo de resistencia a la deformación plástica normalizado por el Instituto Nacional de Vías INVIAS 2013. El análisis se realizó empleando la metodología Marshall con el diseño de una mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional y tres mezclas asfálticas tipo MD-12 con variaciones en la adición de GCR, los diseños preliminares y verificación de cada mezcla asfáltica se realizaron según lo establecido en las especificaciones

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
	<p>generales de construcción del Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011, obteniendo la respectiva fórmula de trabajo de cada mezcla asfáltica. Obteniendo comportamientos favorables en mezclas asfálticas con adición de 0.5% GCR, en las cuales se presentan disminuciones de hasta 5.3% en el ahuellamiento, respecto a la mezcla asfáltica convencional, además se destacan las mejoras que presentó la mezcla asfáltica en cuanto a resistencia a deformación plástica, ante la adición del grano de caucho reciclado por vía seca, por esta razón se recomienda emplearlo en mezclas asfálticas tipo MD-12 como parte del agregado fino y así obtener una mayor eficiencia desde el punto de vista mecánico, así como las mejoras en la vida útil del pavimento y la mitigación de los impactos ambientales que genera el mal manejo de llantas fuera de uso en el país.</p>
<p>Jaimes Leal & Torres Cervera (2019, Colombia)</p>	<p>Se desarrolla a partir de la hipótesis de agregados reciclados, Grano de Caucho Reciclado sustituyendo el agregado fino, se comprobó que al someter los adoquines al ensayo a compresión para una resistencia que fueron proyectados inicialmente, los adoquines no obtienen resultados provechosos.</p>
<p>(Goicochea Fernández (2019, Perú)</p>	<p>El comportamiento físico mecánico del asfalto convencional es mejorado con la adición de caucho de neumáticos reciclados; respecto a que disminuye su susceptibilidad térmica, aumenta su cohesión e incrementa su impermeabilidad; garantizando un buen desempeño de la capa de rodadura del pavimento.</p>
<p>Figueroa Infante & Fonseca Santanilla (2020, Colombia)</p>	<p>Se muestran los resultados del desempeño del pavimento flexible (ahuellamiento y fatiga) usando pavimento asfáltico reciclado-RAP y grano de caucho reciclado-GCR. Los dos tipos de materiales son residuos que provienen de diferentes procesos: el primero proviene del reciclaje de pavimento asfáltico y el</p>

Autor (Año, país)	Desarrollo de la investigación
	<p>segundo de las llantas en desuso por desgaste de diferentes vehículos.</p> <p>Debido a las diversas granulometrías que se consiguen durante los procesos de reciclaje in situ, la selección del RAP debe ajustarse a una granulometría para su reutilización, lo cual implica contar con la adición de material en los tamices en los cuales no se da cumplimiento a la granulometría.</p>
