



USO DE POLÍMEROS EN ASFALTO: UNA REVISIÓN

USE OF POLYMERS IN ASPHALT: A REVIEW

Jorge Ronaldo, Bobadilla Peña¹; Jhayro Jhoel, Tigre Acosta²;

Franklin Luis, Tesen Muñoz³; Sócrates Pedro, Muñoz Pérez⁴

Recibido 20/07/2021: Aprobado: 28/11/2021

DOI: <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.7>

RESUMEN

Los avances en la tecnología del asfalto conllevan a la búsqueda de materiales alternativos, que en la actualidad aporten mejorar sus propiedades y al mismo tiempo contribuyan con reducir la contaminación del medio ambiente. En el presente documento de recopilación literaria de artículos realizada entre los años 2015 – 2021 en diferentes bases de datos, con el objetivo de conocer los beneficios en las propiedades de las mezclas asfálticas, como el tamaño óptimo, porcentaje de las partículas y las mejoras al incorporar polímeros. Se revisaron 50 artículos indexados en la base ESBCO, Science Direct, ProQuest, Scielo, IOP Science, Scopus y WorldWideScience, sobre el uso de polímeros en mezclas asfálticas, con las palabras claves polímeros de caucho en asfaltos, recycled rubber in asphalt mixtures, influence of rubber size on asphalt, caucho para mezcla asfáltica, caucho reciclado; con las cuales se obtuvo más información con respecto al tema, concluyendo en esta investigación que al incorporar el polímero presenta mejoras en las propiedades mecánicas del asfalto teniendo en cuenta el porcentaje de polímero a agregar.

Palabras clave: *mezclas asfálticas; polímeros; caucho reciclado*

¹Jorge Ronaldo, Bobadilla Peña. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Señor de Sipán. Perú. Correo: bpenajorgeronal@crece.uss.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1385-1800>

²Franklin Luis, Tesen Muñoz. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Señor de Sipán. Perú. Correo: tmunozfranklilu@crece.uss.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3387-0339>

³Jhayro Jhoel, Tigre Acosta. Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad Señor de Sipán. Perú. Correo: tacostajhayr@crece.uss.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8303-4342>

⁴Sócrates Pedro, Muñoz Pérez. Docente en la Universidad Señor de Sipán. Perú. MSc. en Ciencias de la Tierra con Mención en Geotecnia Correo: msocrates@crece.uss.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>

ABSTRACT

Advances in asphalt technology lead to the search for alternative materials, which currently contribute to improve their properties and at the same time contribute to reducing environmental pollution. In this document of literary compilation of articles carried out between the years 2015 - 2021 in different databases, with the aim of knowing the benefits in the properties of asphalt mixtures, such as the optimal size, percentage of particles and improvements to the incorporate polymers. Fifty articles indexed in the ESBCO, Science Direct, ProQuest, Scielo, IOP Science, Scopus and WorldWideScience database were reviewed, on the use of polymers in asphalt mixtures, with the keywords polymers of rubber in asphalt, recycled rubber in asphalt mixtures, Influence of rubber size on asphalt, rubber for asphalt mix, Recycled Rubber; with which more information was obtained regarding the subject, concluding in this research that incorporating the polymer presents improvements in the mechanical properties of the asphalt, taking into account the percentage of polymer to be added.

Keywords: *asphalt mix; polymers; recycled rubber*

1. INTRODUCCIÓN

El asfalto es muy beneficioso en cuanto a la función que cumple, lo cual es una alternativa de vital importancia en la construcción de pavimentos. Sin embargo, para la producción de pavimentos se propone de manera parcial incrementar polímeros como es el caucho reciclado que puede modificar la estructura de manera más favorable, mejorando las propiedades físicas y mecánicas del asfalto. Ahora bien, la problemática que se presenta en los pavimentos asfálticos es su baja vitalidad a la fatiga y a su alteración persistente; causada por la incorrecta dosis de ligantes - agregados, su interacción, el método de colocación, combinación y la compactación de las uniones asfálticas, así como el comportamiento de sus materiales ante los cambios de temperatura [1].

La utilización del caucho reciclado, se empleó en asfaltos modificados teniendo como objetivo reducir los impactos negativos en el medio ambiente, se hace una actitud oportuna de este tipo de materiales cuando termina su vida útil [2]. El reciclaje de polímeros es la solución al problema que se presenta en las combinaciones asfálticas, entre las cuales se tiene el material termoplástico con excelentes propiedades térmicas y mecánicas, buen desempeño, buena resistencia química y también tiene menor resistencia al impacto, pero la del caucho es alta y sus propiedades mecánicas son bajas [3]. La tecnología para reparar materiales asfálticos con caucho se viene investigando de tiempo atrás, en la década de 1840 apareció en Inglaterra el primer copyright de un ligante asfáltico modificado con caucho natural y en la década de 1960, Charles H. Mac Donald encontró una manera de incorporar caucho de llantas recicladas (GCR) al asfalto, y a dicha mezcla se le nombro asfalto-caucho [4].

El rendimiento del asfalto modificado con GCR depende de la estructura del caucho en el

asfalto, se investigaron los efectos de la temperatura de curado, el tiempo de mezcla y el cizallamiento sobre el desarrollo de la estructura química y morfológica del caucho granulado en el asfalto [5]. A lo largo del tiempo, la cifra de automóviles en las ciudades ha incrementado, de igual forma la rapidez en la cual circulan y las cargas admitidas, en las estructuras de pavimento su durabilidad se ha visto limitada y de igual manera su vida útil se ha visto reducida considerablemente debido a los diferentes climas y microclimas a las cuales están sometidas [6]. La eliminación de neumáticos usados es problema importante tanto para organismos públicos como para empresas que tratan residuos sólidos, lo cual motivó a buscar soluciones que permitan reutilizarlos, como por ejemplo en las carreteras y mejorar el rendimiento y las propiedades mecánicas de la mezcla para lograr una infraestructura de transporte sostenible [7].

Existen varias maneras para hacer carreteras más sostenibles y poder brindar soluciones para reducir el impacto ambiental que genera el efecto invernadero provocado por los neumáticos desechados, promoviendo la sostenibilidad del desarrollo de la construcción urbana, siendo una construcción alternativa de forma viable y respetuosa con el medio ambiente [8]. Las vías son sometidas a esfuerzos cada vez mayores por lo cual se ha implementado el pavimento rectificado con caucho reciclado de coches mezclado a distintas temperaturas y frecuencias, mejorando las propiedades del material ofreciendo soluciones a los problemas ambientales [9]. El uso de caucho granulado (CR) para modificar mezclas asfálticas se estudiado ampliamente a diferencia de agregado de hormigón reciclado (RCA) donde se realizaron pocos estudios, investigaciones demostraron que las mezclas elaboradas con asfalto modificado CR no muestran mejor daño por humedad que las mezclas hechas sin él mismo, en cambio sí aumenta el porcentaje de RCA aumenta la resistencia a la fatiga [10].

Los polímeros son materiales para poder modificar los asfaltos por sus propiedades físicas, químicas y altas características de compatibilidad, pueden ser elastómeros los cuales mejoran el comportamiento del asfalto y mezcla asfáltica antes de los ciclos de carga y descarga, elastómeros termoplásticos que a altas temperaturas tiene una conducta termoplástica y a bajas temperaturas una conducta elástica [11]. El empleo de polímeros como modificadores ha sido escaso tal vez por sus costos o también es posible que se deba a las condiciones de mezclado, en general los asfaltos modificados se utilizan cuando las necesidades de determinadas propiedades están por encima de aspectos económicos [12]. El uso del polímero ya sea como el caucho triturado, son materiales que permiten el mejoramiento significativo en el uso de pavimentos asfálticos, reduce los impactos ambientales negativos de mezclas

asfálticas aportando un desarrollo sostenible en la construcción de pavimentos.

La modificación del asfalto con caucho de neumáticos aumenta el rendimiento y las propiedades mecánicas en comparación con el aglutinante natural, ya que el caucho brinda una mejor resistencia a la solidez, aumenta la vida útil y se usa como alternativa que ayuda en la reducción de costos [13]. El uso del caucho reciclado y el polietileno molido como modificadores, mostró aumento a la resistencia; caucho triturado, residuos plásticos, materiales reciclados y fibra de vidrio se ha utilizado en la industria del asfalto para reducir los problemas ambientales y ahorrar los recursos naturales para las próximas generaciones [14]. Para disminuir el deterioro y aumentar la durabilidad a largo plazo del pavimento flexible, las capas bituminosas deben mejorarse con respecto al rendimiento y resistencia a la deformación permanente, fatiga asociada a cargas y envejecimiento [15].

El caucho granulado como material reciclado en el asfalto ha adquirido cada vez más interés en las últimas temporadas por los beneficios ambientales y mejoras de propiedad en el asfalto virgen aglutinante. Tiene excelentes propiedades físicas y además existen muchos beneficios como: excelente resistencia al agrietamiento, mayor durabilidad, menor mantenimiento, menor ruido de la carretera, etc. [16]. Para proteger el medio ambiente, uno de las más beneficiosas formas es reciclar material agregándole a la construcción de pavimento, donde la aplicación de caucho granulado en la industria del pavimento asfáltico recibe más atención en varios países porque este material proporciona buenas propiedades mecánicas y rendimiento funcional del pavimento, además de ser una forma competente de tratar este producto de desecho [17]. Los polímeros como el caucho reciclado se encuentran entre los modificadores de asfalto más relevantes debido a su condición para mejorar la rigidez, la conducta viscoelástica y la permanencia a diversas temperaturas. Por lo tanto, las mezclas modificadas con polímeros exhibieron una notable resistencia al agrietamiento térmico, formación de surcos, así como daños por agua y fatiga [18].

Por tanto, considerando que este tema es de gran importancia, en el presente artículo se ha recopilado información explícita y necesaria para poder entender cómo actúa el polímero de caucho triturado en los asfaltos.

2. DESARROLLO

En el presente artículo de revisión se realizó un estudio empleando 50 artículos indexados, haciendo una búsqueda en las diferentes bases de datos de los últimos 7 años desde el 2015 hasta el 2021, referido al tema de usos de polímeros en el asfalto. La recopilación de los

artículos en las bases de datos fue distribuida de la siguiente manera; 6 artículos son de EBSCO, 6 de ProQuest, 5 de Scielo, 9 de IOP Science, 6 de Scopus, 13 de ScienceDirect, 5 de WorldWideScience (WWS). Para la búsqueda con respecto a todos los artículos se han empleado las siguientes palabras claves:

asfalto modificado con polímeros de caucho triturado, caucho para mezcla asfáltica, recycled rubber for asphalt mixtures, rubber polymer modified asphalt, recycled rubber polymers into asphalt, recycled rubber additive for asphalt, asphalt mixes modified with recycled rubber, rubber for asphalt mix, recycled rubber in asphalt mixtures, influence of rubber size on asphalt, polímeros de caucho en asfaltos, caucho reciclado, aditivo de caucho reciclado para asfaltos, recycled rubber in asphalt mixtures, asphalt mixes with recycled rubber, caucho para mezcla asfáltica, "asfalto" + " caucho", polimeros en asfalto, recycled rubber in asphalt mixtures, tire rubber for flexible pavements, recycled rubber additive for asphalt, Use of rubber in asphalt mix, recycled rubber for asphalt mixtures, use of polymers in asphalt, use of rubber in asphalt mix, optimal size of rubber in asphalt mix.

A partir de la información obtenida podemos apreciar que la Tabla 1 muestra de forma más detallada y concisa, la recopilación de los artículos encontrados en las diversas bases de datos según su año de publicación.

Tabla 1. Artículos obtenidos según la base de datos y año de publicación. Fuente: los autores.

Base Datos	AÑO DE PUBLICACIÓN							Total
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
ScienceDirect	-	2	-	-	2	6	3	13
EBSCO	2	-	-	2	1	1	-	6
ProQuest	1	-	1	1	1	1	-	5
Scielo	-	1	-	2	-	2	-	5
Scopus	-	-	-	1	2	2	2	7
IOP Science	-	-	-	1	4	3	1	9
WWS	1	-	-	2	1	-	1	5
Total								50

Con la información recopilada y actualizada desde el año 2015 al 29 de junio del 2021 en las diferentes bases de datos, y filtrada durante todo el proceso de búsqueda, se excluyeron algunos artículos porque no mostraban relación con el tema a investigar. Para visualizar un proceso más detallado de la búsqueda revisar la Tabla 2.

Tabla 2. Tabla de búsqueda realizada en las bases de datos. Fuente: los autores.

BASE DE DATOS	PALABRA CLAVE	DOCUMENTOS SIN FILTRO	FILTRO DE LA BUSQUEDA	DOCUMENTOS CON FILTRO	DOCUMENTOS SELECCIONADOS
ProQuest	asfalto modificado con polímeros de caucho triturado	3	Texto completo / artículos evaluados por expertos	2	1
	caucho para mezcla asfáltica	14	Revistas Científicas	5	2
	Recycled rubber for asphalt mixtures	1079	Revistas Científicas	746	2
ScienceDirect	rubber polymer modified asphalt	1741	Review articles / Engineering	108	1
	recycled rubber polymers into asphalt	1138	Review articles / Engineering/	77	1
	Recycled rubber additive for asphalt	1020	Engineering	516	2
	Asphalt mixes modified with recycled rubber	1106	Engineering	650	1
	Rubber for asphalt mix	2601	Engineering	1621	1
	Recycled rubber in asphalt mixtures	1497	Engineering	816	3
	Influence of rubber size on asphalt	2367	Engineering	1396	4
WWS	polímeros de caucho en asfaltos	310	Modified Asphalt	84	5
EBSCO	Caucho Reciclado	5	Publicaciones Académicas	4	2
	Aditivo de caucho reciclado para asfaltos	31	Publicaciones Académicas	17	1
	recycled rubber in asphalt mixtures	15	Publicaciones Académicas	14	2
	asphalt mixes with recycled rubber	6	Asphalt	3	1
Scielo	caucho para mezcla asfáltica	3	Ingenierías	3	2
	"asfalto" + " caucho"	7	Ingenierías	6	2
	Polímeros en asfalto	5	Ingenierías	4	1
IOP Science	recycled rubber in asphalt mixtures	15	Articles	13	5
	tire rubber for flexible pavements	5	Articles	4	2
	recycled rubber additive for asphalt	6	Journal of Physics : Conference Series	1	1
	Use of rubber in asphalt mix	51	Articles	41	1
Scopus	Recycled rubber for asphalt mixtures	124	Engineering	95	1
	Use of polymers in asphalt	1721	Engineering	1331	1
	Use of rubber in asphalt mix	443	Engineering	360	3
	optimal size of rubber in asphalt mix	5	Engineering	5	1
	recycled rubber in asphalt mixtures	120	Engineering	93	1

2.1. Caucho Reciclado

Se han realizado modificaciones en pavimentos de caucho reciclado implicando la existencia en un orden limitado de temperaturas, resistencia, propiedades, debido a que cada polímero

crea un ámbito específico en el asfalto. En los estudios realizados, tanto el caucho desvulcanizado como el polibutadieno sintético (PB) se utilizaron como modificadores de asfalto. El PB se diluyó preliminarmente en biodiésel, no puede agregarse como polímero sólido porque a temperaturas elevadas, tiende a reticularse, por lo cual se le agregó caucho reciclado con gránulos de 0-0,4 mm y 0-0,8 mm [19]. Otra investigación evidencia que se utilizó muestras vulcanizado termoplástico dinámico (TDV) extraído del polietileno reciclado posconsumo y caucho de llantas trituradas (GTR) en proporciones de 3, 4, 5, 6, 7%, para proveer una efectividad en el asfalto [20]. En otras, se encontró que cuando el ligante puro se modifica con 4 %, 8% y 10% de polietileno de baja densidad, polietileno de alta consistencia y caucho reciclado, el nivel de rendimiento aumenta de 64° C a 70° C [21].

Por otro lado, en otro estudio se diseñaron y prepararon varios aglutinantes de caucho en migajas recicladas (CRM) que contenían 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 15% y 20% de gránulos de caucho en peso de los aglutinantes, se realizaron las pruebas de Marshall y huella de rueda para obtener el contenido óptimo para la estabilidad Marshall y reducir la profundidad de surco [22]. Adicionalmente se añadió una cantidad de CR del 10% al 12% en peso de aglutinante integrado en el proceso terminal de caucho granulado (CRTB), para observar la resistencia al agrietarse por debilidad de las mezclas apoyándose en los programas PP-VECD y Pavement ME [23]. Así mismo, se agregó independientemente al aglutinante base tres contenidos de caucho de neumáticos (4%, 8% y 12% en peso) y un contenido fijo de plástico (4% en peso) que se cortaron en trozos pequeños y agregados directamente al aglutinante para elaborar el asfalto convencional modificado de plástico-caucho para mejorar el módulo complejo y la resistencia a la formación de surcos de las mezclas de aglutinantes [24].

2.2. Porcentaje del Caucho

Las características microestructurales del caucho granulado reciclado tienen un impacto sobre el rendimiento una vez que se mezcla con aglutinante, los porcentajes de caucho desmenuzado fueron del 5% y el 10% en peso del aglutinante base. La consistencia del aglutinante de caucho se mantuvo a lo largo de todo el análisis [25]. Se realizaron pruebas comparativas en aglutinantes de asfalto de caucho de mezcla terminal (TB) con 8% y 12% de caucho reciclado utilizando el aglutinante simple y encontraron que el grado a altas temperaturas se mejoró en uno y dos grados respectivamente en comparación con el asfalto simple [26]. En un estudio de la modificación de las características del asfalto incorporando caucho fino (FR) y residuos plásticos (WP), donde los agregados finos fueron reemplazados con los siguientes porcentajes para WP de 0, 2, 4, 6, 8 y 10%, FR de 1, 2, 3, 4 y 5%; se

concluyó que el contenido óptimo de FR es del 2% como porcentaje en volumen de áridos finos y 4% de polietileno de baja densidad como porcentaje en peso de agregados finos [27].

En un estudio realizado se agregaron contenidos de caucho en porcentajes de 0,2%,0,4%, 0,6%, 0,8% y 1 % en peso de agregados con betún para cada tamaño de caucho a una temperatura de mezcla de aproximadamente 160°C, determinando la fluencia, una mayor longevidad y su sostenibilidad del pavimento [28]. El aglutinante de asfalto modificado con caucho en migajas (CRM) con 15-20% de CR produjo un rendimiento óptimo con respecto a la formación de surcos, la fatiga, el agrietamiento y mejorando significativamente la trabajabilidad [29]. Mediante la incorporación de CR se buscaba determinar una mejora en la propiedad de la viscosidad dinámica en el betún, para lo cual se incorporó 15% de CR a una temperatura de acondicionamiento (165 °C) logrando obtener una viscosidad más alta [30].

Asimismo, se muestra en la Tabla 3 los porcentajes de caucho reciclado más relevantes que se agregaron a las mezclas asfálticas, y mejoras obtenidas en sus rendimientos según el porcentaje que se les agregó.

Tabla 3. Tabla de búsqueda realizada en las bases de datos. Fuente: los autores.

Porcentaje de caucho reciclado	Mejoras	Referencias
	Con el 5% son mejoras insignificantes	
5 y 10 %	Con el 10% mejora la resistencia al agrietamiento y una recuperación alta en la fluencia de tensión múltiple (MSCR)	[25]
	El 8% ayudo a mejorar un poco a altas temperaturas	
8% y 12%	El 10% mejoro el rendimiento a altas temperaturas y la ductilidad	[26]
	Con el 3 % coincide una estabilidad más alta	
3% y 6 %	Con el 6% lleva a una reducción de la estabilidad	[27]
15% y 20%	Mejora la reducción de surcos, la fatiga y agrietamiento	[29]

2.3. Uso de Caucho Reciclado para la Mejora de las Propiedades de las Mezclas Asfálticas

En un estudio realizado en los laboratorios demostró que la estabilidad aumentó al requerirse tiempo de curado más prolongado, también demostró que el caucho en migajas más fino produce menos huecos en las mezclas lo que está estrechamente relacionado con la durabilidad de las mezclas [31]. En la investigación realizada por Medina y ayudantes se

demonstró que las propiedades viscoelásticas de la mezcla con asfalto modificado presentan una recuperación de fluencia elástica del orden del 56% frente al 40% en el caso de la mezcla con asfalto convencional CAP 50/70, y la prueba de barrido de amplitud lineal (LAS) muestran que el asfalto modificado es menos susceptible a la fatiga que el asfalto convencional [32]. El uso de CR en mezclas asfálticas conduce a un aumento más favorable en todas las categorías de impacto, las cuales son más pronunciadas en el caso del caucho desvulcanizado porque se requieren tratamientos químicos adicionales. Debido a la elasticidad del caucho, el asfalto engomado generalmente recupera la deformación después de la fase de compactación [33]. Ya que el caucho triturado reciclado tiende a mejorar las propiedades mecánicas, se podría llevar a cabo una investigación en lo cual el caucho reemplace al agregado pétreo y de esta forma podríamos verificar si el caucho triturado puede ser usado como modificación brindando una mayor vida útil al pavimento.

Mohammed en su estudio observó que las mezclas que contienen un 9% de cauchos de neumáticos reciclados tienen más valores de resistencia a la tracción en comparación con los convencionales, la resistencia a la tracción aumentó inicialmente al agregar porcentajes más bajos [34]. La investigación realizada por Norhidayah mostró que la adición de caucho granulado, especialmente aquellos con un tamaño más fino y con un contenido más alto, parecía mostrar una mejor resistencia a la formación de surcos en comparación con la mezcla convencional [35]. Por otro lado, Dhoska y ayudantes en los resultados de la prueba de penetración se evidenció la mejora de las propiedades del asfalto al disminuir los resultados de 73 mm para el convencional a 61 mm para caucho de neumático reciclado modificado el betún (RTR-MB). Los resultados del punto de ablandamiento se han incrementado de 49°C para el asfalto convencional a 57°C para RTR-MB [36].

2.4. Tamaño Óptimo del Caucho Reciclado en las Mezclas Asfálticas

En una investigación se empleó un aglutinante asfáltico modificado con caucho triturado 0,15% del peso de mezcla y con un tamaño de partícula de 2,36mm, tuvo un comportamiento positivo en sus propiedades mecánicas con una mayor resistencia en la rigidez de fluencia a baja temperatura [37]. Por otro lado, se realizó un diseño de mezclas asfálticas con caucho en diferentes porcentajes y tamaños para verificar en que tanto influye este producto en la resistencia a la deformación en la cual demostró que partículas CR menores de 0,6 mm de tamaño y porcentaje del 2% tiene excelente rendimiento anti-deformación [38]. En otra, se realizó una evaluación presentando un análisis para aumentar la adherencia y reducir la deformación del pavimento semiflexible, utilizando porcentajes de aditivo al 3%, 4%, 5% del

peso total de las llantas de desecho de goma, y zeolita natural para reemplazar el cemento en el mortero de relleno con porcentajes de 0%, 5%, 15% y 25%, aplicando el método Marshall para determinar si cumplían con los estándares de Bina Marga, demostrando una mejora en las propiedades del pavimento semiflexible en un porcentaje de 5% del neumático de goma y 15% de contenido de zeolita [39]. De la recopilación de información, se puede considerar que el tamaño de las partículas de 6 mm brinda mejores resultados en lo que se refiere a las propiedades mecánicas, resistencia a la fatiga, menor alteración y mayor resistencia a carga. Pudiéndose afirmar que, el caucho en partículas pequeñas tiende a mejorar la vida útil del pavimento.

Mientras que en otro estudio se menciona haber utilizado un aditivo modificado con miga de goma CR del 5% del peso total de la mezcla, y con tamaños de partículas de 0,075 mm, 0,15 mm y 0,3 mm, ejecutando una prueba de resistencia al arrastre indirecto, en la que se demostró que al incrementar el tamaño del CR mejoró la fuerza del asfalto, en un porcentaje óptimo de 0,3 mm [40]. Como se puede observar en la Tabla 4, las investigaciones realizadas evidencian que los porcentajes más bajos y las partículas de menor tamaño muestran un mejor comportamiento en las mezclas asfálticas.

Tabla 4. *Tamaño óptimo de caucho utilizado y sus mejoras según investigadores. Fuente: los autores.*

Porcentaje de caucho	Tamaño de particular (mm)	Mejoras	Referencias
5 %	0,3	Mejoró la fuerza en el asfalto	[40]
2%	0,6	Excelente rendimiento antideformación	[38]
0,15 %	2,36	Mayor resistencia en la rigidez en bajas temperaturas	[37]

2.5. Rendimiento del Caucho Reciclado Según el Tipo de Asfalto

En un estudio realizado se muestra que los polímeros a una dosificación de 1,5% en adición del asfalto aumenta el rendimiento óptimo, y esta modificación es trabajada a temperaturas de 180 °C – 185°C con la finalidad de permitir que dichos polímeros se vuelvan solubles dentro del asfalto [41]. En otra investigación se llevó a cabo debido a los problemas que se presentan en pavimentos asfálticos en China, durante el servicio empleo un modificador de caucho granular y fibra polimérica resultando que tienen un mejor comportamiento en la resistencia al agrietamiento [42]. En otro contexto, debido al impacto de la formación de hielo en las carreteras se propuso una tecnología que utiliza partículas de caucho de poliuretano elástico (PRPE), con una dosificación optima del 24,6% del peso de aglutinante, para determinar este

valor se probaron las propiedades mecánicas adhesivas, durabilidad, rendimiento para romper el hielo, y rugosidad considerando fricción de neumático y superficie de pavimento [43].

Otro estudio reflejó que para la eliminación de los neumáticos se usa el método de trituración con fin de evitar que estos sean quemados para evitar el CO₂, resultado de ese proceso se obtiene el polvo de neumáticos y es empleado para producir mezclas asfálticas modificadas lo que no solo puede resolver la presión de los residuos de frotamiento en el medio ambiente, sino que también mejora el rendimiento del pavimento mediante el proceso de curado [44]. Por otro lado, se demostró que para mejorar la resistencia a los surcos de la mezcla asfáltica TB, se sometió a una prueba de 60° C determinando la resistencia a la deformación en altas temperaturas de la mezcla, incorporando asfalto modificado compuesto y polímeros de vía seca, logrando una mejora en la propiedad anti-formación de surcos [45]. Se estudió también, que para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas modificadas, han trabajado con caucho triturado en porcentajes de 20%, 40% y 60% del peso de la mezcla, en el cual tiene sus desventajas y ventajas tanto en los porcentajes que se está incorporando ya que al 60% tiene una resistencia a la humedad, pero hay una desventaja que disminuye el módulo de rigidez, en cambio con el 20% de caucho aumenta la rigidez [46].

2.6. Métodos Utilizados en las Mezclas Asfálticas

El procedimiento de Marshall posee como objetivo determinar la capacidad óptima del pavimento para una mezcla determinada de agregados y relleno mineral que cumplan con los requisitos de las normas correspondientes, que después se llevaran a la máquina de prueba de estabilidad Marshall para la compresión y posterior ruptura de las muestras [47]. El método de la resistencia a la deformación permanente se caracteriza mediante ensayos triaxiales, la cual se realiza con una muestra cilíndrica que se somete a una carga de confinamiento y una carga axial; la relación de fluencia y la deformación permanente se obtienen como la media de los resultados de tres probetas [48].

El método de la mecánica de la fractura predice la vida a fatiga de las mezclas asfálticas, también divide el proceso de falla por fatiga en la etapa de iniciación y propagación de la fisura. La fisura inicial se producirá después de que la mezcla asfáltica haya experimentado un largo proceso de fatiga, lo que significa que la vida de inicio de una fisura por fatiga es muy larga [49]. El método ARwet consiste en mezclar caucho triturado de llantas reciclados y betún en un tanque de mezcla in situ para permitir la interacción entre los componentes de 45 a 60 min a temperaturas entre 190 y 218 C, algunos autores mencionan que hay 2 procesos de ARwet: proceso húmedo sin agitación y el proceso húmedo de alta viscosidad [50].

3. CONCLUSIÓN

La revisión literaria permitió identificar investigaciones en las que se expone que, al adicionar partículas de caucho a las mezclas asfálticas, mejora las propiedades mecánicas, en lo que es la resistencia a la formación de surcos, resistencia a la tracción, mayor resistencia a la rigidez de fluencia, resistencia al agrietamiento, y una mayor vida útil de la mezcla. Así mismo, se encontró que los porcentajes óptimos que están entre los parámetros de 10% a 20%, brinda una mejora en la resistencia a la fatiga, resistencia a carga, resistencia al agrietamiento, teniendo en cuenta el porcentaje de caucho a agregar en las mezclas asfálticas. Y que el tamaño óptimo se encuentra en el parámetro de 0,3 a 2,36 mm que se pueden utilizar al agregar caucho en las mezclas asfálticas. Por consiguiente, existen diversos métodos que se pueden utilizar, como es la metodología de Marshall y el método de la resistencia a la deformación permanente, que permiten determinar el comportamiento y rendimiento de dichas mezclas asfálticas al agregar el caucho reciclado.

4. REFERENCIAS

- [1] A. Figueroa y E. Fonseca, “Estudio de material reciclado para reparar fisuras y su aplicación en un pavimento en Bogotá,” *Epsilon*, n° 24, pp. 89-121, 2015
- [2] G. Arroyave, S. Restrepo y D. Vasquez, “Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, n° 2, pp. 1 - 23, 2017
- [3] E. Ciro, J. Parra, M. Zapata y E. Murillo, “Effect of the Recycled Rubber on the Properties of Recycled Rubber/Recycled Polypropylene Blends,” *Ingeniería y Ciencia*, vol. 11, n° 22, pp. 173-188, 2015
- [4] Y. Yung, J. Cordoba y H. Rondón, “Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante modificada con residuo de llanta triturada (GCR),” *Revista Tecnura*, vol. 20, n° 50, pp. 106-118, 2016
- [5] H. Yao, S. Zhou y S. Wang, “Structural evolution of recycled tire rubber in asphalt,” *Journal of Applied Polymer Science*, 2016
- [6] Y. Bustos, P. Sosa, N. Rodríguez y J. Calderón, “Fundamentos micro y macroscópicos de la modificación del asfalto convencional con polímeros: una revisión,” *Inventum*, vol. 13, n° 24, pp. 58 - 77, 2018
- [7] G. Martinez, B. Caicedo, D. González, L. Celis, L. Fuentes y V. Torres, “Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos,” *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 33, n° 1, pp. 41-50, Abril 2018

- [8] P. Arroyo, . R. Herrera, L. Salazar, Z. Giménez, J. Martínez y M. Calahorra, “A new approach for integrating environmental, social and economic factors to evaluate asphalt mixtures with and without waste tires,” *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 33, n° 3, pp. 301-314, Diciembre 2018
- [9] J. Mantilla y E. Castañeda, “Assessment of simultaneous incorporation of crumb rubber and asphaltite in asphalt binders,” *Revista DYNA*, vol. 86, n° 208, pp. 257-263, January - March 2019
- [10] M. Muniz , F. Quiñonez y H. Rondón, “Behavior of a hot mix asphalt made with recycled concrete aggregate and crumb rubber,” *NRC Research Press*, vol. 46, p. 544–551, 2019
- [11] D. Lozano, F. Molina, J. Ruge, L. Moreno y J. Bastidas, “Asphalts and modified dense asphalt mixtures with rubber of military boots,” *DYNA*, vol. 87, n° 212, pp. 120-128, 2020
- [12] R. Vila y J. Jaramillo, “Incidencia del empleo de polímeros como modificadores del asfalto,” *REVISTA LASALLISTA DE INVESTIGACIÓN*, vol. 15, n° 2, pp. 315-326, 2018
- [13] K. Haravindh y R. Bodapati, “Performance And Cost Analysis Of Modified Bitumen Binder For Flexible Pavement,” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 912, 2020
- [14] M. Ameri, R. Mohammadi, M. Mousavinezhad, A. Ameri, H. Shaker y A. Fasihpour, “Evaluating Properties of Asphalt Mixtures Containing polymers of Styrene Butadiene Rubber (SBR) and recycled Polyethylene Terephthalate (rPET) against Failures Caused by Rutting, Moisture and Fatigue,” *Frattura ed Integrità Strutturale*, n° 53, pp. 177-186, 2020
- [15] A. Wissam, “Using Crumb Rubber to Improve the Bituminous Mixes: Experimental Investigation of Rutting Behavior of Flexible Asphalt Mix for Road Construction,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1527, 2020
- [16] X. Cheng, Y. Liu, W. Ren y K. Huang, “Performance Evaluation of Asphalt Rubber Mixture with Additives,” *MDPI*, vol. 12, 2019
- [17] T. Khaled, “Study the effect of adding crumb rubber on the performance of hot mix asphalt,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 737, 2020
- [18] G. Moussa , A. Abdel y T. Abdel, “Efecto de las partículas de nanoarcilla en el rendimiento de la mezcla de hormigón asfáltico modificado con polietileno de alta densidad,” *Polimeros*, vol. 13, n° 434, 2021
- [19] B. Krzysztof , G. Barbara y M. Tadeusz , “Efecto del caucho reciclado en las propiedades del betún para carreteras,” *Hindawi*, vol. 2018, pp. 1 - 7, 2018

- [20] S. H. Kasanagh, P. Ahmedzade, A. Fainleib y T. Gunay, "Investigación de las propiedades físicas del aglutinante de asfalto modificado por polietileno reciclado y caucho de llantas molidas," *Revista internacional de ciencias arquitectónicas, civiles y de la construcción*, vol. 12, nº 6, pp. 585 - 589, 2018
- [21] I. Khan, S. Kabir,, M. Alhussain, y F. Almansoor, "Diseño de asfalto utilizando plástico reciclado y residuos de caucho granulado para la construcción de pavimentos sostenibles," *ELSEVIER*, vol. 145, pp. 1557 - 1564, 2016
- [22] A. Al-Rubaie y H. H. Joni, "Assessment the performance of asphalt mixtures modified with waste tire rubber at high temperatures," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1895, 2021
- [23] S. Kocak y M. Kutay, "Fatigue performance assessment of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using viscoelastic continuum damage analysis and AASHTOWare pavement ME design," *Construction and Building Materials*, vol. 248, 2020
- [24] Y. Ma, S. Wang, H. Zhou, W. Hu, P. Polaczyk, M. Zhang y B. Huang, "Compatibility and rheological characterization of asphalt modified with recycled rubber-plastic blends," *Construction and Building Materials*, vol. 270, 2021
- [25] H. Hyun , L. Moon-sup y L. Soon-jae, "Evaluación del desempeño de aglutinantes de asfalto modificado con polímeros (PMA) que contiene caucho de neumático molido (GTR)," *Springer*, vol. 12, pp. 215 - 222, 2018
- [26] L. Han, M. Zheng y C. Wang, "Estado actual y desarrollo de asfalto modificado con caucho para neumáticos de mezcla," *ELSEVIER*, vol. 128, pp. 399 - 409, 2016
- [27] F. Al adday, A. Awad y F. Alsaleh, "Low-cost pavement by using solid waste, recycled aggregates, crumb rubber, and waste plastic for rural road," *International Journal of GEOMATE*, vol. 20, nº 77, pp. 18-23, 2021
- [28] K. Murat, O. Volkan y E. Arzu , "A Study on the Rheological Properties of Recycled Rubber-Modified Asphalt Mixtures," *Hindawi Publishing Corporation*, vol. 2015, 2015
- [29] M. Reza, M. Ali, M. Tabesh, B. Nazeri y M. Shishehbor, "Rheological and environmental characteristics of crumb rubber asphalt binders containing non-foaming warm mix asphalt additives," *Construction and Building Materials*, vol. 238, 2020
- [30] I. Rodríguez, F. Tarpoudi, M. Chiara, L. Poulikakos y M. Bueno, "Microstructure analysis and mechanical performance of crumb rubber modified asphalt concrete using the dry process," *Construction and Building Material*, vol. 259, 2020
- [31] P. Wulandari y D. Tjandra, "The use of crumb rubber for replacing fine aggregate in cold mixture asphalt," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 615, 2019

- [32] L. Medina, M. Muniz de Farias y C. Recarey, “Evaluación reológica y mecánica de un aglutinante asfáltico modificado por polímeros,” *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 35, n° 2, pp. 170-181, 2020
- [33] S. Bressi, J. Santos, M. Orešković y M. Losa, “A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment,” *International Journal of Pavement Engineering*, 2019
- [34] H. Mohammed, “Sustainability of Asphalt Paving Materials Containing Different Waste Materials,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 454, 2018
- [35] H. Norhidayah, A. Ali, H. Mohd, M. Nor, M. Nurul, M. Nordiana, J. Ramadhansyah y Y. Nur, “Engineering properties of crumb rubber modified dense-graded asphalt mixtures using dry process,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 220, 2019
- [36] K. Dhoska, I. Markja y A. Pramono, “Analysis of recycled tire rubber modified bitumen in Albania for quality of the road construction,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 673, 2019
- [37] Y. Liang, D. Jones, J. Harvey y J. Buscheck, “Laboratory Evaluation of Rubberized Binder and Mix Containing a Low Content of Devulcanized Rubber Modifier,” *Scopus*, vol. 11, pp. 53-63, 2020
- [38] S. Unsiwilai y B. Sangpetngam, “Influences of particle size and content on deformation resistance of crumb rubber modified asphalt using dry process mix,” *Engineering Journal*, pp. 181-193, 2018
- [39] Hamzani, Munirwansyah, M. Hasan y S. Sugiarto, “Determining the properties of semi-flexible pavement using waste tire rubber powder and natural zeolite,” *Construction and Building Materials*, vol. 266, 10 Enero 2021
- [40] M. Bilema , M. Aman, N. Hassan, M. Haloul y S. Modibbo, “Influence of crumb rubber size particles on moisture damage and strength of the hot mix asphalt,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 2387-2391, 2021
- [41] A. Almusawi, B. Sengoz y A. Topal, “Investigation of Mixing and Compaction Temperatures of Modified Hot Asphalt and Warm Mix Asphalt,” *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 65, n° 1, pp. 72-83, 2020
- [42] J. Xin, J. Pei, M. Akiyama, R. Li, J. Zhang y L. Shao, “2019,” *Applied Sciences*, 2019
- [43] Y. Tengfei, H. Sen, M. Changpeng, Z. Jinchao, L. Jianrong y L. Yang, “Performance evaluation of asphalt pavement groove-filled with polyurethane-rubber particle elastomer,” *Construction and Building Materials*, vol. 292, 2021
- [44] W. Zhen, X. Xu, W. Xiaofeng, J. Huo, G. Haoyan y Y. Bo, “Performance of modified

asphalt of rubber powder through tetraethyl orthosilicate (TEOS),” *Construction and Building Materials*, 2021

- [45] Q. Huang, Z. Qian, M. Zhang y Y. Xue, “Experimental investigation of the road performance of terminal blend rubber asphalt mixture with different dry-way additives,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 629, Mayo 2019
- [46] S. Tahami, A. Mirhosseini, S. Dessouky, H. Mork y A. Kavussi, “The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process,” *Construction and Building Materials*, vol. 222, pp. 643-653, octubre 2019
- [47] I. Bakheit y H. Xiaoming, “Modification of the dry method for mixing crumb rubber modifier with aggregate and asphalt based on the binder mix design,” *Construction and Building Materials*, vol. 220, pp. 278-284, 2019
- [48] M. Sol, A. Jiménez del Barco, A. Hidalgo, F. Moreno, L. Saiz y M. Rubio, “Viability of producing sustainable asphalt mixtures with crumb rubber bitumen at reduced temperatures,” *Construction and Building Materials*, vol. 265, 2020
- [49] J. Yuan, S. Lv , X. Peng , L. You y M. Borges, “Investigation of Strength and Fatigue Life of Rubber Asphalt Mixture,” *MDPI*, vol. 13, 2020
- [50] L. Picado, S. Dias y J. Neves, “Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review,” *Construction and Building Materials*, vol. 247, 2020