

Asfaltos modificados con caucho reciclado para la mejora de carreteras terciarias del municipio de Pesca Boyacá

Modified asphalts with recycled rubber for improving tertiary roads in the municipality of Pesca Boyacá

Orlando Germán Posso Arévalo¹; Hugo Armando Montaña Sanabria²; Octavio Vega Castro³

1. Ingeniero Civil, Magister en Educación, Especialista Gerencia Integral de Obras, Especialización en Docencia Universitaria.
2. Ingeniero Civil.
3. Ingeniero Civil, Ingeniero Topográfico, Esp. Diseño Construcción y Conservación de Vías.

Cite this article as: O.Posso, H. Montaña, O. vega “ASFALTOS MODIFICADOS CON CAUCHO RECICLADO PARA LA MEJORA DE CARRETERAS TERCIARIAS DEL MUNICIPIO DE PESCA BOYACÁ”, Prospectiva, Vol. 22 N° 2 2024.

Recibido: 12/02/2024 / Aceptado: 05/07/2024

<http://doi.org/10.15665/rp.v22i2.3450>

RESUMEN

Este artículo presenta el resultado de la investigación sobre la evaluación de la viabilidad técnica de incluir gránulos de caucho reciclado en pavimentos de asfalto para el mejoramiento de las carreteras terciarias del municipio de Pesca, Boyacá. Se consideró que es posible reciclar y reutilizar el caucho, un material presente en productos de uso diario como llantas, alfombras, piezas mecánicas y calzado, entre otros. De hecho, al tener en cuenta la vida útil del pavimento y la reducción de los costos de mantenimiento, es necesario estudiar la incorporación del caucho de las llantas en la composición de capas de asfalto pavimentado de manera eficaz, técnica y económicamente viable.

Este trabajo se desarrolló en la República de Colombia, departamento de Boyacá, municipio de Pesca. Se tomó como referencia las vías terciarias del municipio, con una extensión aproximada de 150 km. El trabajo exploratorio de campo se ejecutó en el tramo denominado Peña San Juan, ubicado en la vereda Nocuata, dentro de la red vial terciaria de Pesca.

El resultado final de la investigación evaluó la viabilidad técnica de incluir gránulos de caucho reciclado en pavimentos de asfalto para el mejoramiento de las vías terciarias del municipio de Pesca, Boyacá.

Palabras clave: asfalto; pavimento; reciclaje; caucho; carretera.

ABSTRACT

This article presents the results of research on the evaluation of the technical feasibility of including recycled rubber granules in asphalt pavements for the improvement of tertiary roads in the municipality of Pesca, Boyacá. It was considered that it is possible to recycle and reuse rubber, a material found in everyday products such as tires, carpets, mechanical parts, and footwear, among others. In fact, taking into account the pavement's lifespan and the reduction in maintenance costs, it is necessary to study the incorporation of tire rubber into the composition of asphalt layers in an efficient, technically, and economically viable manner.

This work was carried out in the Republic of Colombia, Boyacá department, Pesca municipality. The tertiary roads of the municipality, with an approximate length of 150 km, were taken as a reference. The exploratory fieldwork was carried out on the section called Peña San Juan, located in the Nocuata village, within the Pesca tertiary road network.

The final result of the research evaluated the technical feasibility of including recycled rubber granules in asphalt pavements for the improvement of the tertiary roads in the municipality of Pesca, Boyacá.

Key words: asphalt; pavement; recycling; rubber; road

1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras son de suma importancia para la infraestructura vial de un país pues fomentan el desarrollo económico, social y cultural del mismo. Las exigencias que demandan los flujos vehiculares, el mal estado de las vías y los impactos ambientales negativos que genera la disposición inadecuada de las llantas fuera de uso, hacen necesario como alternativa el empleo del granulo de caucho reciclado-GCR como mejorador de las mezclas asfálticas para su uso en la construcción de pavimentos. En este sentido, evaluar la viabilidad técnica que éste aporta a los pavimentos, se convierte en el fin principal que se describirá en este artículo.

Conviene mencionar que “en Colombia, las carreteras están conformadas aproximadamente por 16.968 km de red de primer orden, 45.137 km de segundo orden y 142.284 km de tercer orden; es decir, la red vial terciaria tiene la mayor extensión en el territorio nacional.” [43]. En este sentido, al considerar el terreno objeto del estudio, se hace necesario mencionar que “para el año 2014, se estimaba que, de los 142.284 km de red terciaria, el 24% estaba en tierra, el 70% en afirmado y el 6% pavimentado y que aproximadamente el 25% del total estaba en buen estado.” [43] Lo anterior se puede observar detalladamente en la Tabla 1.

Tabla 1. Estado de las vías terciarias según su superficie / Condition of tertiary roads based on their Surface

Tipo de superficie	Longitud (km)	Estado %		
Tierra	34.148	36,6	29,9	33,5
Afirmado	99.599	42,0	46,1	11,9
Pavimento	8.537	32,5	28,0	39,5

Fuente: Tomado de [43]

En este contexto, el deterioro de las carreteras y la gestión vial encaminada a la intervención ocasional producen un impacto económico demasiado elevado, razón por la cual, es preciso considerar la posibilidad de mejorar las vías terciarias con pavimentos de asfalto económica y ambientalmente sostenibles. En concordancia, para renovar las mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos resulta conveniente incorporar una parte importante del caucho contenido en los productos desechados como los neumáticos.

También, cabe resaltar que uno de los mayores problemas ambientales que se está presentado en la actualidad es el manejo irresponsable de los desechos, lo cual, ocasiona el desuso de materiales potencialmente útiles, la contaminación del aire y del agua, el consumo de nuevas materias primas, entre otros. Con base en lo anterior, desde la ingeniería civil se puede contribuir con el cuidado del medio ambiente gracias al reciclaje y el uso de gránulos de cauchos reciclados como agregado en las mezclas asfálticas de pavimentado.

Por consiguiente, la investigación descrita en este artículo resalta la importancia de implementar y aprovechar gránulos de caucho reciclado como materia prima para proyectos de infraestructura vial en general. Esta iniciativa de investigación tiene como objetivo diseñar pavimentos incorporando caucho de neumáticos desechados en mezclas asfálticas en caliente, y realizar los correspondientes ensayos de laboratorio para compararlos con un diseño de mezcla asfáltica tradicional o convencional.

2. METODOLOGÍA

La metodología comprendió fundamentalmente tres enfoques. El primero de ellos consistió en la búsqueda de información en fuentes bibliográficas para establecer los resultados y avances obtenidos en investigaciones relacionadas con el tema abordado, junto con la normatividad aplicable. Esto incluyó la determinación del estado del arte y la consolidación de los parámetros de la normatividad vigente en el país para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente con GCR. Posteriormente, se generaron estudios técnicos complementarios en el tramo de vía seleccionado. Finalmente, como tercer enfoque, se realizó un análisis de los resultados obtenidos de los estudios técnicos.

3. RESULTADOS

3.1. Estado del Arte

El estado del arte presenta los resultados de investigaciones sobre asfaltos modificados con gránulos de caucho reciclado.

Ocampo, Caicedo, & González (2015) realizaron un estudio sobre mezclas asfálticas mejoradas con caucho molido proveniente de llantas. Evaluaron la caracterización de los materiales, el diseño y las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con agregados de caucho. Se utilizaron dos métodos de incorporación en la mezcla: proceso por vía húmeda y proceso por vía seca. Concluyeron que el GCR es un modificador potencial del ligante, mejorando su elasticidad y rigidez. Además, demostraron que se pueden usar granulometrías convencionales en las mezclas asfálticas con GCR, favoreciendo a la mezcla para que no se fisure fácilmente ni presente un riesgo excesivo de deformabilidad.

Lubo Gómez & Martínez Giraldo (2019) llevaron a cabo una investigación sobre asfaltos modificados con caucho en vías primarias de Santa Marta, Barranquilla y Bogotá entre los años 2012-2019. Su objetivo principal fue evaluar los procesos de modificación, así como las ventajas y desventajas de las mezclas asfálticas con caucho en pavimentos flexibles. Realizaron un análisis documental que identificó que la adición de GCR mejora la durabilidad y reduce los costos de mantenimiento, además de disminuir los impactos ambientales negativos gracias al reciclaje de llantas. Confirmaron que los métodos por vía seca y vía húmeda aumentan las propiedades mecánicas de los pavimentos. También destacaron que el asfalto es un material viscoelástico, presentando cambios en sus características según la temperatura.

Por último, Patiño & Rodríguez Ramos (2017) elaboraron un análisis sobre la problemática ambiental derivada de la inadecuada disposición de llantas usadas. Revisaron el uso del granulado de caucho reciclado, concluyendo que el polvo de caucho reciclado tiene múltiples aplicaciones en diversas industrias, incluyendo la mezcla asfáltica, la construcción y la recuperación de vías.

En resumen, el uso de gránulos de caucho reciclado en asfaltos mejora sus propiedades mecánicas y ambientales, con aplicaciones variadas y métodos de incorporación específicos.

3.1. Consolidación de los parámetros para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente con GCR.

√ Diseño de la mezcla asfáltica en caliente con GCR por vía húmeda

Para la investigación se implementó el método de diseño de mezcla Marshall con el fin de obtener la dosificación del cemento asfáltico y agregados pétreos, y teniendo en cuenta que se utilizará la mezcla asfáltica en caliente con GCR por vía húmeda, para los demás agregados de la mezcla y fórmula de trabajo se tendrán en cuenta las especificaciones técnicas del Instituto de Desarrollo Urbano 625-18 IDU [16], 620-18 [15], IDU 220-18 [13] y el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVÍAS.

El proceso que se realiza de mezcla por vía húmeda actualmente se usa para producir un ligante modificado conocido como asfalto caucho. El alcance del proceso se basa en incluir GCR en las mezclas asfálticas como un modificador del asfalto, preparada y colocada en caliente. El valor de modificación del asfalto depende de varios factores, entre los cuales se encuentran la cantidad de GCR donde este puede variar entre el 15% y el 20% por el peso total de la mezcla asfalto caucho dependiendo del tipo de ligante, la textura y el tamaño del GCR, el tiempo y temperatura de mezclado, el grado de agitación mecánica durante la reacción.

En Colombia la mezcla asfáltica en caliente con asfaltos modificados con caucho por vía húmeda posee unas especificaciones técnicas realizadas por el IDU Instituto de Desarrollo Urbano, en la ET 625-18 se muestran las especificaciones a tener en cuenta para la incorporación del GCR como modificador del asfalto, diseño de mezcla, obtención de la fórmula de trabajo, criterios de aceptación, agregados pétreos y llenante mineral, ligante asfáltico

a modificar, especificaciones y características del GCR, equipos necesarios para el proceso, requerimientos para la ejecución de trabajos, condiciones para el recibo de los trabajos, entre otros. En cuanto a los materiales granulares que hacen parte de la mezcla asfáltica con GCR se debe cumplir con la especificación técnica 620-18 del IDU [15], la cual guía o reglamenta lo concerniente a mezclas asfálticas en caliente, densas, semidensas, y gruesas, agregado fino, agregado grueso, entre otros.

√ Producción de asfalto modificado con GCR

Para producir una mezcla asfalto caucho homogénea y de calidad se deberá contar con los equipos necesarios y con la capacidad para cumplir con las variables de ET 625-18 del IDU [16]. Adicionalmente, la norma señala que si no se cumple con alguna de especificaciones se debe establecer el porcentaje de gránulos de caucho reciclado para modificar el ligante y comenzar con un proceso experimental. Otras recomendaciones a tener en cuenta son:

- Cuando se encuentra almacenado el asfalto caucho por encima 155° C y no es usado dentro de las 4 horas iniciales, el calentamiento de la mezcla asfalto caucho debe ser suspendido.
- El número máximo de ciclos de calentamiento de la mezcla no podrá ser superior a dos.
- La mezcla asfáltica con GCR no se puede almacenar, y para evitar que se separe el ligante y GCR se tiene que mantener en agitación constante.

√ Diseño de la mezcla con GCR

Según la ET 625-18 y la ET 600-18 del IDU [16] [14], antes de comenzar con el almacenamiento de los agregados y del ligante asfáltico modificado con GCR, se deben entregar muestras al interventor para su verificación y aprobación mediante ensayos de laboratorio. Una vez sean aprobados por parte del interventor el constructor podrá proceder a definir la fórmula de trabajo cumpliendo con cada una de las especificaciones técnicas, finalizando con la elaboración de un informe completo y detallado que incluya la fórmula de trabajo, los ensayos del asfalto modificado con GCR y de los agregados.

El diseño de la mezcla asfáltica con asfalto modificado, se desarrolla con la norma de ensayo INV E-748-13 método Marshall [36]. El equipo requerido para la producción de la mezcla asfáltica con GCR es:

- Una tolva para el almacenamiento del GCR, debidamente acondicionada para conservarlo libre de humedad y contaminantes nocivos.
- Un tanque de reacción capaz de calentar y sostener la temperatura requerida del cemento asfáltico para la reacción con el GCR.
- Un tanque de almacenamiento capaz de mantener la mezcla asfalto-caucho en agitación constante y a la temperatura de almacenamiento establecida. Esta unidad debe estar equipada con un equipo de control y registro de temperatura.
- La planta para la elaboración de la mezcla asfáltica con un asfalto modificado con GCR debe estar equipada con tuberías y bombas adecuadas para trabajar con un asfalto modificado.

Para la ejecución de trabajos el equipo mínimo es:

- Equipo de limpieza de la superficie.
- Equipo de transporte de la mezcla.
- Equipo para la extensión de la mezcla.
- Equipo de compactación.
- Equipo accesorio requerido para realizar todas las operaciones de cargue que necesite la ejecución de esta partida de trabajo.

Las principales condiciones para el recibo de trabajos con mezclas asfálticas con GCR que verifica el interventor son el control de tolerancias máximas permitidas, control de producción de la mezcla, calidad de los agregados pétreos

y de la llenante mineral, calidad del ligante asfáltico, calidad de los aditivos, y control de composición de la mezcla, este último cumpliendo con las especificaciones dadas en la siguiente tabla.

Tabla 2. Ensayos mínimos de verificación sobre mezcla asfáltica/ Percentages of Hot Mix Asphalt with CRG Used

Ensayo	Norma de Ensayo	Cantidad y frecuencia de ensayos por obra realizada		Criterio de Aceptación	
		Contratista de Obra	Interventor	Promedio Muestras	Determinación Individual
Composición					
Contenido de Asfalto (Nota 1)	INV E 732-13	3 de cada 800 m ²	2 de cada 800 m ²	+0,3%	+0,5%
Granulometría	INV E 782-13	2 de cada 800 m ²	1 de cada 800 m ²	NA	(Nota 2)
(1) La variación del promedio de los resultados para determinar el contenido asfalto se debe evaluar respecto del óptimo definido en la fórmula de trabajo, y el de cada ensayo individual respecto al valor promedio.					
(2) Las curvas obtenidas deben encontrarse dentro de los límites y tolerancias indicados en la Especificación					

Fuente: Tomado de [16]

Para el control de calidad específico de la mezcla asfáltica modificada con GCR se tomaron dos muestras por lote elaborado con el asfalto modificado con GCR, y se compactaron las briquetas con 75 golpes por cara, para luego verificar en el laboratorio el flujo y la resistencia en el ensayo Marshall, además de realizar los ensayos mínimos de verificación.

3.3. Estudios Técnicos y Análisis de los Resultados.

√ Ensayos de laboratorio para el diseño mezcla asfáltica en caliente con GCR por vía húmeda

La fabricación de probetas cilíndricas de mezcla asfáltica con GCR, se realizó de acuerdo a la norma de ensayo INV E-748-13 [36], cumpliendo con las características de los materiales y agregados.

Proceso. Se realizaron tres juegos de briquetas o probetas con porcentajes de GCR del 20%, 15%, y 10%, del contenido total de asfalto utilizado. Con las probetas elaboradas se determinó la estabilidad, flujo, análisis de densidad y vacíos; Teniendo en cuenta que para cada probeta se necesitan 1200 gramos, para cada juego de briquetas (tres 03) se prepararon 4000 gramos de mezcla asfáltica con gránulos de caucho reciclado por vía húmeda con los porcentajes de material que se señalan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Porcentajes de la mezcla asfáltica en caliente con GCR utilizados/ Percentages of hot asphalt mix with GCR used

4000 gramos de mezcla asfáltica con 20% GCR			
#	Material	%	Peso gr
1	Arena	15,0%	600
2	Agregado fino	32,5%	1300
3	Agregado grueso	47,0%	1880
4	Asfalto 5,5%	4,4%	176
4,1	GCR / asfalto	1,1%	44

Total		100,0%	4000
4000 gramos de mezcla asfáltica con 15% GCR			
#	Material	%	Peso gr
1	Arena	15,0%	600
2	Agregado fino	32,5%	1300
3	Agregado grueso	47,0%	1880
4	Asfalto 5,5%	4,675%	187
4,1	GCR / asfalto	0,825%	33
Total		100,0%	4000
4000 gramos de mezcla asfáltica con 10% GCR			
#	Material	%	Peso gr
1	Arena	15,0%	600
2	Agregado fino	32,5%	1300
3	Agregado grueso	47,0%	1880
4	Asfalto 5,5%	4,95%	198
4,1	GCR / asfalto	0,55%	22
Total		100,0%	4000

Fuente: Propia

Resultados de los materiales y/o agregados. El GCR se obtuvo mediante el proceso de trituración mecánica de residuos de llantas, cumpliendo con la especificación 220-18 del IDU [13].

Tabla 4. Especificación del GCR/Specification of the GCR

Especificación del grano de caucho reciclado					
#	Especificación	Ensayo	Ud.	Requisito	Evaluación
1	Tamaño máximo (tamiz No. 8)	_-----	mm	2,36	Cumple
2	Humedad, máximo	ASTM D1864	%	0,75	Cumple
3	Gravedad específica	ASTM D1817	_----	1,10 - 1,20	Cumple
4	Longitud partículas alargadas, máximo	_-----	mm	4,7	Cumple
5	Contenido de material no ferroso	_-----	_----	No visible	Cumple
6	Contenido de material ferroso, máximo	ASTM D5603	%	0,01	Cumple
7	Contenido de fibras textiles, máximo	ASTM D5603	%	0,50	Cumple
8	Contenido de polvo mineral, máximo	_-----	%	4,00	Cumple
9	Contenido de otros materiales extraños	_-----	%	0,25	Cumple

Fuente: Propia

Los ensayos de los agregados grueso, agregados finos, y cemento asfáltico fueron realizados previamente por los proveedores, se presenta en la tabla 5 un resumen de los ensayos realizados.

Tabla 5. Ensayos de los agregados / Tests of the aggregates.

Agregado grueso numeral 620.2.1.1 de et 620-18 del IDU			
#	Especificación	Ensayo	Evaluación
1	Desgaste los ángeles	INV E 218-13	Cumple Previamente
2	Micro deval. % máximo	INV E 238-13	Cumple Previamente
3	10% de finos	INV E 224-13	Cumple Previamente
4	Impureza en agregado. % máximo	INV E 237-13	Cumple Previamente
5	Partículas fracturadas mecánicamente	INV E 227-13	Cumple Previamente
6	Partículas planas y alargadas relación 1:5%	INV E 240-13	Cumple Previamente
7	Resistencia al pulimento	INV E 232-13	Cumple Previamente
8	Adhesividad	INV E 757-13	Cumple Previamente
Agregado fino numeral 620.2.1.2 de la et 620-18 del IDU			
#	Especificación	Ensayo	Evaluación
1	Contenido de arena natural	_----	Cumple Previamente
2	Geometría de las partículas	INV E 239-13	Cumple Previamente
3	Adhesividad	INV E 774-13	Cumple Previamente
Cemento asfáltico Et 200-18 IDU			
#	Especificación	Ensayo	Evaluación
1	Viscosidad a 60 °C, Pa-s	INV E 716-13	Cumple Previamente
2	Viscosidad a 135 °C, mm ² /s	INV E 717-13	Cumple Previamente
3	Punto de ablandamiento, °C	INV E 712-13	Cumple Previamente
4	Penetración, 0.1 mm	INV E 706-13	Cumple Previamente
5	Solubilidad en tricloroetileno, %	INV E 713-13	Cumple Previamente
6	Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland, °C	INV E 709-13	Cumple Previamente
Pruebas al residuo ensayo INV E 720-13			
7	Pérdida por calentamiento, %	INV E 709-13	Cumple Previamente
8	Penetración del residuo como % de la penetración original, 0.1 mm	INV E 720-13	Cumple Previamente
9	Incremento del punto de ablandamiento, °C	INV E 721-13	Cumple Previamente
10	viscosidad a 60 °C del residuo,Pa-s	INV E 712-13	Cumple Previamente
11	Ductilidad (25 oC, 5 cm/min), cm	INV E 716-13	Cumple Previamente
12	Contenido máximo de ceras, %	INV E 702-13	Cumple Previamente

Fuente: Propia

En las figuras 1, 2 y 3 se evidencian los resultados obtenidos durante el diseño de la mezcla asfáltica con GCR al 20%, 15% y 10%.

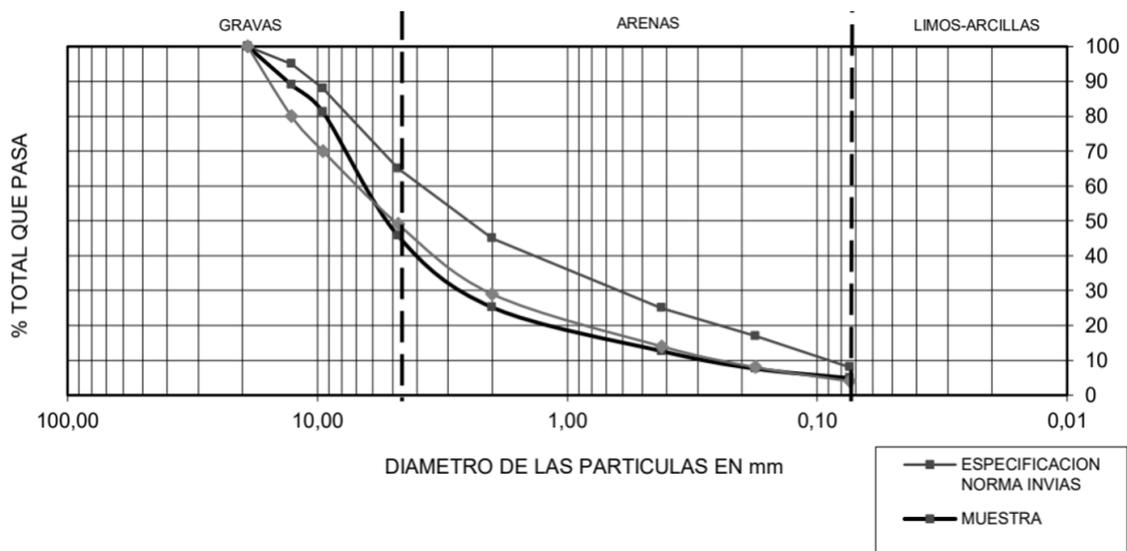


Figura 1. Gráfica de la mezcla asfáltica con 20% de GCR / Graph of the asphalt mixture with 20% GCR

Fuente: Propia

La gráfica muestra la distribución de tamaños de partículas en una mezcla asfáltica con un 20% de agregado de concreto reciclado (GCR).

Tiene un alto porcentaje de gravas que disminuye gradualmente. Las arenas Similar a las gravas pero con una pendiente menos pronunciada. Los limos y arcillas inicia con un alto porcentaje de paso y tiene una pendiente más suave. Esta curva es relevante para evaluar la composición de la mezcla asfáltica, lo que afecta su densidad, resistencia y otras propiedades críticas para el diseño y construcción de pavimentos

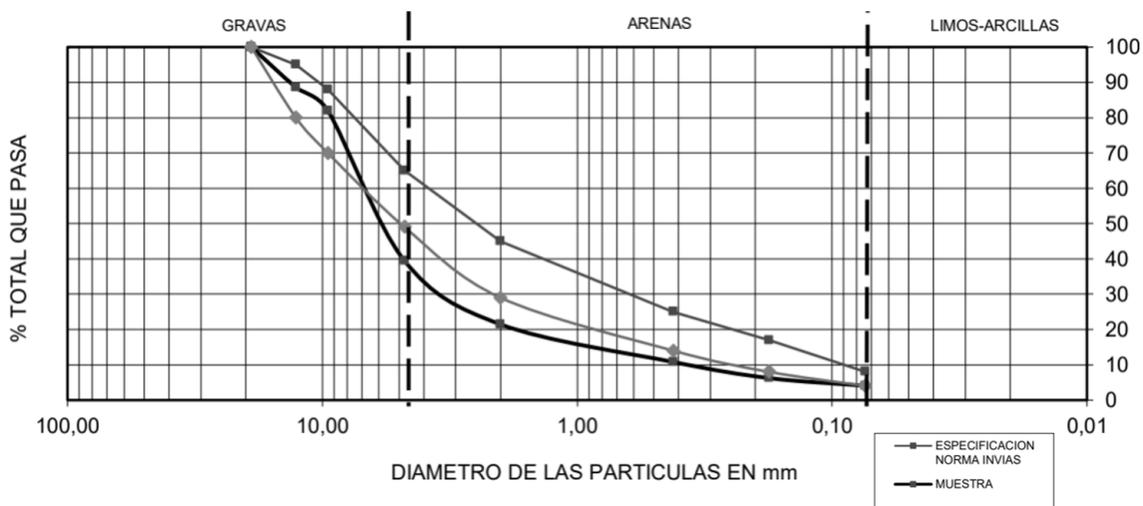


Figura 2. Gráfica de la mezcla asfáltica con 15% de GCR / Graph of the asphalt mixture with 15% GCR

Fuente: Propia

La gráfica muestra la distribución de tamaños de partículas en una mezcla asfáltica con un 15% de agregado de concreto reciclado (GCR).

Tiene un alto porcentaje de gravas que disminuye gradualmente. Las arenas Similar a las gravas pero con una pendiente menos pronunciada. Los limos y arcillas inicia con un alto porcentaje de paso y tiene una pendiente más suave. Esta curva es relevante para evaluar la composición de la mezcla asfáltica, lo que afecta su densidad, resistencia y otras propiedades críticas para el diseño y construcción de pavimentos

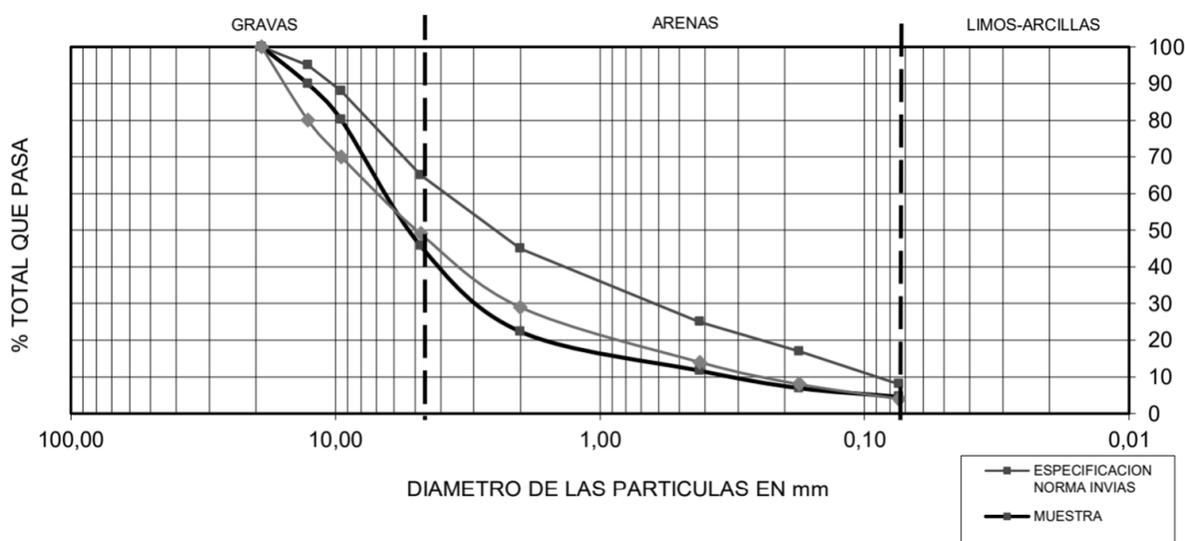


Figura 3. Grafica de la mezcla asfáltica con 10% de GCR / Graph of the asphalt mixture with 10% GCR

Fuente: Propia

La gráfica muestra la distribución de tamaños de partículas en una mezcla asfáltica con un 10% de agregado de concreto reciclado (GCR).

Tiene un alto porcentaje de gravas que disminuye gradualmente. Las arenas similar a las gravas pero con una pendiente menos pronunciada. Los limos y arcillas inician con un alto porcentaje de paso y tiene una pendiente más suave. Esta curva es relevante para evaluar la composición de la mezcla asfáltica, lo que afecta su densidad, resistencia y otras propiedades críticas para el diseño y construcción de pavimentos

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones del estudio indican varios hallazgos importantes sobre el uso de granúlos de caucho reciclado (GCR) en mezclas asfálticas. En términos granulométricos, se observa una franja gruesa comparada con las normas INVIAS, lo que sugiere que las mezclas con GCR pueden tener una textura diferente pero aceptable dentro de los estándares nacionales.

El contenido de asfalto se encuentra en un rango establecido entre 5.10% y 5.19%. Con la adición de GCR en diferentes porcentajes, se obtuvieron densidades bulk bajas, con valores muy próximos de 2.164, 2.333 y 2.313. Estas densidades son comparables con las encontradas en estudios similares en otras regiones, donde la adición de GCR también resultó en densidades consistentes y satisfactorias para la aplicación en pavimentos.

En cuanto a la estabilidad corregida, los resultados fueron superiores a los exigidos por las normas INVIAS. Con 20% de GCR se obtuvo una estabilidad de 902.4 kg, con 15% de GCR 1147.5 kg y con 10% de GCR 1291.4 kg, todos superiores a los 900 kg requeridos. Estos resultados coinciden con investigaciones internacionales que han mostrado mejoras significativas en la estabilidad de las mezclas asfálticas con GCR. Los flujos obtenidos con 20% de GCR fueron de 3.6 mm, ligeramente superiores al máximo permitido de 3.5 mm, mientras que con 15% y 10% de GCR los resultados se mantuvieron dentro del rango permitido por la norma.

Para obtener resultados favorables con la mezcla asfáltica en caliente con GCR por vía húmeda, es esencial seguir estrictamente todos los parámetros establecidos en las normas. Cualquier aditivo o agregado adicional, aunque sea mínimo, puede desestabilizar la mezcla. Este hallazgo es consistente con estudios similares que enfatizan la importancia de adherirse a las especificaciones técnicas para garantizar la calidad y durabilidad del pavimento.

En la revisión del estado del arte, se encontró que Colombia no ha realizado suficientes estudios sobre la implementación de GCR en mezclas asfálticas. Sin embargo, investigaciones internacionales demuestran que el uso de GCR mejora considerablemente las propiedades mecánicas de los pavimentos, abordando problemas como el agrietamiento, ahuellamiento y resistencia a la fatiga. Por lo tanto, técnicamente es viable obtener resultados favorables con la mezcla asfáltica en caliente con GCR por vía húmeda, siempre que se cumplan todos los parámetros normativos. La reacción adecuada entre el cemento asfáltico y el GCR es crucial para el éxito del proceso.

El grano de caucho reciclado de llantas usadas puede utilizarse de manera confiable para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, actuando como un modificador del ligante por vía húmeda. Los ligantes y mezclas con asfalto caucho no solo son efectivos desde una perspectiva técnica, sino que también representan una excelente alternativa ambiental para la disposición final de desechos de llantas.

Las propiedades mecánicas mejoradas con el uso de GCR incluyen una mayor resistencia a los fenómenos de fatiga y ahuellamiento, una mayor resistencia al agrietamiento por bajas temperaturas, y una mejor resistencia al envejecimiento y oxidación del ligante.

Además, las mezclas asfálticas con GCR se caracterizan por ser más flexibles a temperaturas extremas, haciéndolas menos susceptibles a cambios de temperatura. Estos beneficios se han corroborado en estudios similares, destacando la viabilidad y efectividad del uso de GCR en mezclas asfálticas a nivel mundial.

El caucho reciclado se encuentra presente en productos de uso diario, como llantas, alfombras, recubrimientos de cables, piezas mecánicas y calzado. La incorporación de GCR en las capas de asfalto pavimentado puede mejorar la eficiencia del pavimento, reducir los costos de mantenimiento y aumentar la vida útil de las carreteras terciarias.

Ventajas:

Sostenibilidad ambiental: El uso de GCR reduce la cantidad de neumáticos desechados y contribuye al reciclaje.
Mayor agarre: El asfalto con GCR tiene más agarre, lo que mejora la seguridad vial, especialmente en días de lluvia intensa.

Reducción de costos de mantenimiento: La vida útil prolongada del pavimento disminuye la necesidad de reparaciones frecuentes.

Desventajas:

Costo inicial: La mezcla asfáltica modificada con GCR puede tener un costo inicial ligeramente mayor.

Requerimientos técnicos: Se deben realizar estudios y pruebas para garantizar la correcta incorporación de GCR en la mezcla asfáltica.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017, Julio 06). Resolución 1326 de 2017, “Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de las llantas usadas y se dictan otras disposiciones.”
- [2] Gobernación de Boyacá. (2017, Febrero 06). Resolución No. 019, Por medio de la cual se modifica, se ajusta y se adiciona un anexo a la Resolución No. 113 e 22 de agosto de 2016, mediante la cual se adoptó la lista de precios unitarios fijos de Obra pública y de consultoría en el Departamento de Boyacá.

- [3] Alcaldía Mayor de Bogotá. (s.f). Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usados generados por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá. [Online]. Available: <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/0/Llantas.pdf>
- [4] Alcaldía Municipal de Pesca-Boyacá. (2019, Septiembre 16). Esquema de ordenamiento territorial. [Online]. Available: <http://www.pesca-boyaca.gov.co/contrataciones/mpcma0012019?q=EOT>
- [5] Archila Acelas, A. V., & Aparicio Jurado, M. F. (2018). Impactos ambientales derivados del proceso de pavimentación de vías de transporte en Colombia. Bucaramanga: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.
- [6] Castelán Sayago, E. (2008). Manual de carreteras. [Online]. Available: <https://docplayer.es/21391483-Realizada-por-eduardo-castelan-sayago.html>
- [7] Castro, G. (2008). Materiales y compuestos para la industria del neumático. Buenos Aires: FIUBA.
- [8] Díaz 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.
- [9] Dueñas Rodríguez, A. M., & Calume Figueroa, S. A. (2017). Recopilación y análisis sobre el uso del grano de caucho modificado (GCM) para la utilización por vía seca en el diseño de carpetas asfálticas en Bogotá. Universidad Santo Tomás.
- [10] Escobar, J. (2017, Mayo 30). “Solo el 25 por ciento de vías terciarias del país están en buen estado.” El Tiempo. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/vias-terciarias-de-colombia-en-mal-estado-93430>
- [11] C. Giordani y D. Leone, “Pavimentos,” Universidad Tecnológica Nacional, Santafe.
- [12] J. Henríquez Ulloa, “Pavimentos” [presentación de diapositivas], Slideshare, 14 de junio de 2014. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/roooooottt/pavimentos-clases-2014-l>
- [13] IDU, “ET 220-18. Grano de caucho reciclado para mezclas asfálticas en caliente,” Alcaldía Mayor de Bogotá: Instituto de Desarrollo Urbano, 2019.
- [14] IDU, “ET 600.18 Generalidades para riesgos y mezclas asfálticas,” Alcaldía Mayor de Bogotá: Instituto de Desarrollo Urbano, 2019.
- [15] IDU, “ET 620.18 Mezcla asfáltica en caliente, densa semidensa y gruesa,” Alcaldía Mayor de Bogotá: Instituto de Desarrollo Urbano, 2019.
- [16] IDU, “ET 625-18. Mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado con caucho por vía húmeda,” Alcaldía Mayor de Bogotá: Instituto de Desarrollo Urbano, 2019.
- [17] INVIAS, “Manual de Diseño Geométrico de Carreteras,” Instituto Nacional de Vías, 2008.
- [18] INVIAS, “INV E 224-13. Determinación del valor del 10% de los finos,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [19] INVIAS, “INV E 227-13. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [20] INVIAS, “INV E 232-13. Determinación del coeficiente de pulimento acelerado (CPA) de los agregados gruesos,” Instituto Nacional de Vías, 2012.

- [21] INVIAS, “INV E 237-13. Determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregados gruesos,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [22] INVIAS, “INV E 238-13. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato micro-deval,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [23] INVIAS, “INV E 239-13. Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [24] INVIAS, “INV E 240-13. Proporción de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en agregados gruesos,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [25] INVIAS, “INV E 702-13. Ductilidad de los materiales asfálticos,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [26] INVIAS, “INV E 706-13. Penetración de los materiales bituminosos,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [27] INVIAS, “INV E 709-13. Puntos de inflamación y de combustión mediante la copa abierta cleveland,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [28] INVIAS, “INV E 712-13. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola),” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [29] INVIAS, “INV E 713-13. Solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [30] INVIAS, “INV E 716-13. Determinación de la viscosidad del asfalto empleando viscosímetros capilares de vacío,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [31] INVIAS, “INV E 717-13. Determinación de la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [32] INVIAS, “INV E 720-13. Efectos del calor y del aire sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [33] INVIAS, “INV E 721-13. Efectos del calor y del aire sobre el asfalto en lámina delgada,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [34] INVIAS, “INV E 732-13. Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [35] INVIAS, “INV E 733-13. Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [36] INVIAS, “INV E 748-13. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato mars-hall,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [37] INVIAS, “INV E 757-13. Efecto del agua sobre las mezclas asfálticas sueltas,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [38] INVIAS, “INV E 774-13. Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método riedel-weber),” Instituto Nacional de Vías, 2012.

- [39] INVIAS, “INV E 782-13. Análisis granulométrico de los agregados extraídos en mezclas asfálticas,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [40] INVIAS, “INV E. 218-13. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina los ángeles,” Instituto Nacional de Vías, 2012.
- [41] INVIAS, “Análisis de precios unitarios,” Mezcla densa en caliente tipo MDC-19, 2019. [Online]. Available: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/analisis-precios-unitarios/9791-apus-boya-ca-2019-2>
- [42] O. Lubo Gómez y R. Martínez Giraldo, “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,” Santa Marta: Universidad Cooperativa de Colombia, 2019.
- [43] Ministerio de Transporte, “Plan nacional de vías para la integración regional PN VIR,” Bogotá: Diario Oficial, 2018.
- [44] M. Ocampo, B. Caicedo y D. González, “Mezclas asfálticas mejoradas con caucho molido proveniente de llantas usadas” [presentación de diapositivas], Slideshare, 3 de enero de 2015. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/hugoaliacor/mezclas-asfálticas-mejoradas-con-caucho-molido-proveniente-de-llantas>
- [45] Y. Ostos Mendivelso, Y. Ruiz Daza y G. Bernal, “Viabilidad financiera del proyecto de inversión para el reciclaje de llantas usadas en la ciudad de Bogotá,” Universidad Católica de Colombia, 2017.
- [46] V. Patiño y M. Rodríguez Ramos, “Llantas usadas: materia prima para pavimentos y múltiples ecoaplicaciones,” Revista Ontare, pp. 73-114, 2017.
- [47] A. Ramírez Villamizar, I. L. Ladino Rubio y J. P. Rosas Ramírez, “Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho tecnología GAP GRADED para la ciudad de Bogotá,” Universidad Católica de Colombia, 2014.
- [48] A. Reyes Curcio, N. Pellegrini Blanco y R. Reyes Gil, “El reciclaje como alternativa de manejo de los residuos sólidos en el sector minas de Baruta, Estado Miranda, Venezuela,” Revista de Investigación, vol. 39, no. 86, pp. 157-170, 2015.
- [49] M. Valenzuela, “El asfalto, en la conservación de pavimentos,” Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2003.
- [50] J. D. Villegas Camargo y L. M. Wilches Gómez, “Utilización de mezcla asfáltica natural (MAN), procedente de la Mina San Pedro, ubicada en el Municipio de Armero Guayabal, departamento del Tolima, Colombia, con adición de gránulo de caucho reciclado (GCR), para Re parcheo localizado. Reparcho ecológico,” Bogotá: Universidad Santo Tomás, 2019.