



Research group: **Catálisis Ambiental y Energías Renovables**

<https://www.politecnicojic.edu.co/semilleros-camer>



Working Paper

OBTENCIÓN, CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y EVALUACIÓN DE GRANOS DE CAUCHO RECICLADO PARA SU USO EN OBRAS DE PAVIMENTACIÓN

Alba N. Ardila A.^{a*}, Gina Hincapié-Triviño^b Erasmo Arriola-Villaseñor^a, Guilliania Agudelo Buitrago^c

^a *Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables, Semillero en Gestión Sostenible del Recurso Hídrico (GESREH), Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Colombia.*

^b *Universidad Nacional de Colombia-Bogotá, Facultad de Ciencias, Departamento de Química. Estado Sólido y Catálisis Ambiental (ESCA), Carrera 30 No. 45-03, Bogotá, Código Postal 111321, Colombia.*

^c *Conasfaltos, Centro de Producción, Bello Autopista Norte.*

* Alba Nelly Ardila Arias: anardila@elpoli.edu.co

RESUMEN

Se obtuvieron dos muestras (A y B) de granos de caucho reciclado y se analizaron sus características fisicoquímicas para verificar su uso en obras de pavimentación, además se evaluó su uso potencial en dicho campo. El rango de tamaños de partícula de la muestra A fue desde 2000 μm (malla 10 ASTM) a 2360 μm (malla 8 ASTM) fue de 2000-2360 μm (mallas ASTM 10 y 8 respectivamente) Los polvos de caucho fino correspondientes a y de la muestra B mostraron designaciones más pequeñas, estos materiales oscilaron típicamente en tamaños de partícula desde 128 μm (malla 120 ASTM) hasta 180 μm (malla 80 ASTM) de 128-180 μm (malla ASTM 120 y 80 respectivamente). Dichos materiales fluyen libremente sin presencia de grumos. Además, no se observó a simple vista la presencia de partículas de metal no ferroso. Por otro lado, el contenido de partículas metálicas ferrosas presentes en ambos materiales fue menor del 0.01 % en peso. Ambos materiales contienen alrededor del 0.98 % de humedad en peso y son de flujo libre. La gravedad específica para la muestra A y B fue 0.95 y 0.42, respectivamente, lo que indica que sólo la muestra A cumple con esta especificación, ya que la gravedad específica del caucho debe ser de 1.15 ± 0.05 . Estos resultados indican que las especificaciones de la muestra A cumplen para ser usado como un ligante de asfalto para su uso en la construcción de pavimentos. Además, la muestra B puede utilizarse tanto en escenarios deportivos como para la construcción de canchas sintéticas. La obtención de granos de caucho reciclado para su uso en obras de pavimentación es de gran importancia, ya que además de mejorar las propiedades termo mecánicas y fisicoquímicas de las mezclas asfálticas, es una alternativa económica y ambientalmente amigable.

Palabras clave: llantas recicladas, escenarios de construcción, asfalto.

ABSTRACT

Two samples (A and B) of recycled vulcanizate particulate rubber were obtained and its physicochemical requirements were evaluated for use in the construction of pavements. The range in particle sizes of the sample A was from 2000 μm (10 ASTM mesh) to 2360 μm (8 ASTM mesh). Fine rubber powders corresponding to the sample B showed designations smaller, these materials ranged in particle sizes from 128 μm (120 ASTM mesh) to 180 μm (80 ASTM mesh). The ground

**Working Paper**

recycled tire rubbers no contain visible nonferrous metal particles and no more than 0.01 % ferrous metal particles by weight. Both materials contain about 0.98 % moisture by weight. The specific gravity for the sample A and B was 0.95 and 0.42, respectively, this indicate that only the sample A complies with this specification for asphalt-rubber binder, since the specific gravity of the rubber shall be 1.15 ± 0.05 . These results indicate that the specifications of the sample A cover asphalt binder for use in the construction of pavements. In addition, the sample B can use in sports scenarios as for the construction of synthetic courts. The production of recycled vulcanizate particulate rubber is important, since in addition to improving the thermo-mechanical and physicochemical properties of asphalt mixtures, it is an economically and environmentally friendly alternative.

Key words: recycled vulcanizate particulate rubber, construction scenarios, asphalt.

INTRODUCCIÓN

Las llantas son implementos usados ampliamente en el campo automotor, sin embargo, el problema del manejo y la disposición de las llantas usadas en América Latina y en el mundo en general, en la actualidad es un tema de gran interés que les concierne no sólo a las autoridades ambientales sino también a la comunidad en general. La disposición final de las llantas usadas representa un problema estético, técnico, económico, ambiental y de salud pública. (Pacheco et al. 2012, Cao 2007). El almacenamiento de las llantas en grandes cantidades presenta el inconveniente de que ocupan mucho espacio, además, son difíciles de compactar en un relleno sanitario, haciendo este proceso costoso y poco viable. La alta demanda de estos implementos y la dificultad que se tiene para su almacenamiento y disposición, ha llevado a que parte del manejo que se realiza con las llantas consiste es la quema incontrolada e inconsciente de este residuo, liberando gases tóxicos al ambiente como CO, SO₂, NO₂ y compuestos orgánicos volátiles, al igual que contaminantes peligrosos como hidrocarburos policíclicos aromáticos, dioxinas, furanos, benceno, bifenilos policlorados y metales pesados, entre otros, los cuales al hacer parte de las aguas, el suelo y el aire generan impactos negativos considerables al medio ambiente, afectan la salud de las personas y la estabilidad de los ecosistemas en general (Angelín et al. 2015, Blessen et al. 2016, Pacheco et al. 2012, Yesilata et al. 2009).

En Colombia se estimó un consumo 5.3 millones de llantas para el año 2016, equivalente a 72.000 toneladas aproximadamente (Dinero 2017). Aunado a esto, en julio de 2010 mediante la Resolución 1457 se establecieron los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, en los que se obliga a los productores e importadores a disponer de condiciones para un manejo adecuado de estos desechos, sin embargo, todavía no se cuenta con una amplia infraestructura para el aprovechamiento de dicho residuo (Cardona y Sánchez 2011).

Las llantas presentan una estructura compleja formada por diversos materiales como caucho natural y sintético (40-45 %), un encordado de acero y negro de carbón (27-33 %), vulcanizado con azufre (1.5-2.5 %), fibra textil y algunas sustancias químicas. Existen diversos componentes en los neumáticos, los cuales pueden ser renovados para múltiples usos, por ejemplo, el caucho se recupera en un 70 % aproximadamente y se convierte en materia prima para asfalto, jardinería, pistas atléticas y tapetes, entre otros, para muchas industrias, como excelente sustituto ecológico y

**Working Paper**

además, reduce costos de producción por su bajo precio (Ali-Shah et al. 2013, Pacheco et al. 2012).

Por otra parte, la industria de la construcción de vías enfrenta diversos problemas relacionados con el suministro y las propiedades de su materia prima principal (el asfalto) y la dependencia de esta con el petróleo. El asfalto es un sólido que se deriva de la mezcla de hidrocarburos y minerales, principalmente el bitumen, los cuales tradicionalmente se obtienen de la fracción más pesada o “residual” del proceso de destilación fraccionada del petróleo, siendo estos los que tienen el punto de ebullición más alto en dicho proceso, con propiedades fisicoquímicas, termo-mecánicas y termodinámicas variables que están relacionadas con las propiedades del crudo del cual se obtuvo dicho asfalto (Amaya y Prieto 2008, Ángulo y Duarte 2005, Blessen et al. 2016, Galvis, 2014).

El asfalto para la construcción de carreteras (carpeta asfáltica) presenta varios inconvenientes como la sensibilidad a la temperatura de este material, puesto que aquel que presenta buen comportamiento a temperaturas altas $> 40^{\circ}\text{C}$, no lo hacen a bajas temperaturas $< 0^{\circ}\text{C}$, adicionalmente el aumento en la carga de trabajo ocasionado por el incremento vehicular, han provocado de forma general que la vida útil de las vías se vea frecuentemente comprometida y especialmente cuando se presentan variaciones de las temperaturas ambientales. Sumado a esto es importante denotar que dicha industria requiere de miles de toneladas anualmente para cubrir la demanda de asfalto proveniente de recursos no renovables (53 mil toneladas mensuales para el 2016 en Colombia, ligado a la disposición y precios del petróleo. (Múnera 2012, Galvis, 2014)

Adicionalmente, se ha demostrado que la adición de diferentes polímeros, mediante procesos de interacción entre las moléculas de dichos polímeros y los componentes del asfalto, modifican las propiedades fisicoquímicas y termo-mecánicas, y se ha logrado obtener mezclas asfálticas de alta calidad, resistentes y durables incluso en condiciones de cargas excesivas y de temperaturas ambientales extremas (Múnera 2012). De esta forma, cuando el caucho granulado proveniente de llantas recicladas se adiciona al asfalto se obtiene un material denominado generalmente como arena plástica que a su vez es la materia prima para la obtención de pavimentos de alta resistencia y durabilidad. Se ha reportado (Amaya y Prieto 2008), que de esta forma se obtienen mezclas más estables tanto a bajas como a altas temperaturas, se disminuye el envejecimiento, fisuramiento, costos de mantenimiento, ruido y mejoran la capacidad de cohesión, impermeabilización, proporciona elasticidad y resistencia a la fatiga, compactación y trabajabilidad, entre otros. (Amaya y Prieto 2008, Ángulo y Duarte 2005).

De acuerdo con lo anterior, es claro que resulta una alternativa atractiva no sólo para aumentar la calidad de la carpeta asfáltica sino también una oportunidad económica al utilizar materia prima de desecho que no depende exclusivamente de la oferta de los recursos petroquímicos, y que a su vez, ofrece una opción de remediación ambiental al gran problema de la disposición final de las llantas usadas. (Amaya y Prieto 2008) lo cual permite dar solución a diferentes conflictos, tecnológicos, económicos, energéticos, ecológicos y de suministros de materia prima entre otros (Múnera 2012). De acuerdo con la literatura (ASTM D5603-01 2001, ASTM D5644-01 2001, ASTM D6114/D6114M-09 2009) se sabe que un 15 % en peso de caucho es necesario para proporcionar propiedades aceptables en los asfaltos para la construcción de vías. Siendo un valor de referencia debido a la complejidad del asfalto según las propiedades del crudo del cual proviene. Esta norma establece los requisitos mínimos que deben cumplir las mezclas asfálticas en caliente con asfalto modificado con grano de caucho reciclado para su uso en las obras de pavimentación.

**Working Paper**

Así, en el presente trabajo se muestra el proceso para la obtención de granos de caucho reciclado y su caracterización fisicoquímica con el fin de que se cumplan con las especificaciones técnicas establecidas en la normatividad para su uso en materiales para pavimentación y se realizaron pruebas para evaluar y verificar el uso potencial de los materiales obtenidos en dicho campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de los granos de caucho reciclado

El proceso de obtención de los granos de caucho reciclado a partir de llantas recicladas fuera de uso, se realizó en colaboración con la empresa Ekogroup Colombia S.A.S, para lo cual dicha empresa llevó a cabo la recolección, transporte y recepción de las llantas usadas acorde con la normatividad colombiana (Resolución 1457 de 2010 Capítulo III de las obligaciones de los productores, literales c y d), seguidamente, se realizó una clasificación de la materia prima de acuerdo con sus características para obtener dos tamaños de granulometría diferentes (A y B). Posteriormente, se procedió a hacer el desvenado, separación del caucho, generación de tiras de diferentes tamaños y finalmente la trituración y/o pulverización del material. Cada uno de estos procesos se realizó con maquinaria fabricada en la República Popular de China, con una capacidad de 2000 toneladas al año, entre las características cuenta con: cortadora de anillo de llantas, cortadora en tiras, cortadora en trozos, separadora del acero, trituradora, separador magnético y separador de fibra de Nylon.

Para el proceso de desvenado, cada una de las llantas se ubicó sobre una máquina en la cual se separaron los aros laterales de ambas caras de la llanta. Posteriormente, dichos aros fueron dispuestos en una máquina separadora para retirar completamente el material de caucho del material de acero, obteniendo dos materiales totalmente independientes y limpios. Las carcasas de las llantas fueron direccionadas a la máquina de tiras, la cual convirtió dicho material en tiras cortas de acuerdo con el tamaño de las llantas. Las tiras generadas fueron direccionadas a la máquina corta tiras la cual se encargó de sacar los trozos de caucho. Tanto el material de caucho obtenido de los aros laterales como los trozos de llanta obtenida del corte de las tiras de las carcasas fueron sometidos en la máquina trituradora, la cual se encargó de dar finalmente la granulometría a los granos de caucho reciclado obtenidos.

Caracterización fisicoquímica de los diferentes productos granulares

Propiedades como la granulometría y la gravedad específica se analizaron en ambos productos granulares (A y B), de acuerdo con los métodos ASTM D1817-05, ASTM D5644-05 y ASTM D792. El contenido de metales ferrosos se determinó por pesaje de dicho material previamente extraído por separación magnética en una muestra de 50 g. El contenido de metales no ferrosos se determinó por inspección visual.

Por otro lado, se realizó un análisis termogravimétrico de ambos productos granulares usando un equipo TGA Q500 TA Instruments con el objetivo de determinar el contenido de humedad, material volátil, carbono fijo y cenizas. El análisis se realizó bajo el siguiente programa de calentamiento: equilibrio a 30°C con nitrógeno gaseoso, posteriormente un calentamiento hasta 120 °C bajo atmosfera del mismo gas con una rampa de calentamiento de 40°C/min, se obtuvo una primera

Working Paper

isoterma por 12 min y seguidamente se calentó hasta 800 °C con una rampa de 40 °C/min, se obtuvo una segunda isoterma por 10 min, finalmente usando aire se obtuvo la tercera isoterma por 15 min. Adicionalmente, se determinó la composición elemental en ambas muestras usando un analizador elemental Leco modelo TruSpec.

El análisis de carbono, hidrógeno y nitrógeno fue realizado bajo atmósfera de helio a 1050 °C y el análisis de azufre fue llevado a cabo bajo atmósfera de oxígeno a 1350 °C. Finalmente, se cuantificó el porcentaje de metales como Si, Fe, Cu, Mn y Zn usando un espectrofotómetro de absorción atómica marca Agilent modelo 240 FS, previo a esto los materiales fueron sometidos a un proceso de calcinación y digestión ácida. Además, se evaluó visualmente la presencia de metales no ferrosos. Actualmente, se está analizando el contenido de acero, el contenido de fibra y la autoinflamabilidad de ambos materiales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Figura 1** se muestra el material obtenido con los dos tamaños de granulometría diferentes (A y B). Los productos granulares son de color negro, con suave olor característico al caucho, flexibles y no compactos. Dichos materiales fluyen libremente sin presencia de grumos. Además, no se observó a simple vista la presencia de partículas de metal no ferroso. Por otro lado, el contenido de partículas metálicas ferrosas presentes en ambos materiales fue menor del 0.01 % en peso.



Figura 1. Material granular A, Material granular B.

De acuerdo con los análisis de granulometría, aproximadamente el 95 % de la totalidad del material granular A obtenido, tiene tamaños de partícula entre 2000 μm (malla ASTM No. 10) y 2360 μm (malla ASTM No. 8). Dicho material se encuentra entre los productos catalogados por la norma (ASTM D5603-01 2001, ASTM D5644-01 2001, ASTM D6114/D6114M-09 2009) como polvos de goma gruesos (designaciones de 425 μm (malla ASTM No. 40) o mayor). Por otra parte, el 85 % del peso total del material granular B corresponde a tamaños de partículas alrededor de 180 μm (malla ASTM No. 80) y el porcentaje restante contiene una granulometría de 128 μm (malla ASTM No. 120). De acuerdo con la norma este producto corresponde a polvos finos de caucho (designaciones menores que 425 μm). Lo que significa que en relación al parámetro de tamaño se obtuvieron granos de caucho reciclado con granulometrías adecuadas para su uso en obras de pavimentación,

Working Paper

ya que de acuerdo a la normatividad internacional (ASTM D5603-01 2001, ASTM D5644-01 2001 ASTM D6114/D6114M-09 2009), no debe haber partículas de caucho retenidas en el tamiz de 2.36 mm (malla ASTM No. 8).

Adicionalmente, la gravedad específica para las muestras A y B fueron 0.95 y 0.42, respectivamente, así, dicha propiedad para la muestra A es aproximadamente el doble que para la muestra B. Donde, la muestra B no cumple con el valor propuesto en la literatura para esta propiedad, ya que la norma establece que la gravedad específica para este tipo materiales debe ser 1.15 ± 0.05 cuando se van a destinar para su uso en obras de pavimentación (ASTM D5603-01 2001, ASTM D5644-01 2001, ASTM D6114/D6114M-09 2009).

Los resultados de análisis termogravimétrico de los dos productos con granulometrías diferentes, indica que la muestra A posee una humedad alrededor del 0.73 % (de dónde sale este dato?) en peso, mientras que la muestra B evidenció un 0.98 % de humedad en peso, lo que significa que esta última muestra no cumple con lo establecido en la normatividad, ya que el grano de caucho reciclado debe contener menos de 0.75 % de humedad en peso (ASTM D5603-01 2001, ASTM D5644-01 2001, ASTM D6114/D6114M-09 2009).

En la **Tabla 1** y la **Figura 2** se muestran los resultados obtenidos en los análisis termogravimétricos de las muestras A y B respectivamente. De acuerdo con estos resultados ambas muestras analizadas presentan un bajo contenido de humedad (< 1.0 %), lo cual representa una ventaja dado que no tendrían que someterse a un proceso de secado exhaustivo si quiere utilizarse en alguna aplicación. Por otro lado, el alto contenido de carbono fijo encontrado (entre 25.6 y 27.5 %), sugiere que las muestras presentan una alta proporción de estructuras aromáticas, las cuales las convierten en un producto altamente resistente a la degradación. Adicionalmente, los valores correspondientes a material volátil (61.5 y 62.9 %) confirman que dichos materiales, al someterse a altas temperaturas (> 800 °C), representan un peligro tanto para los seres vivos como para al ambiente, lo que hace el proceso de incineración de este material altamente perjudicial. Por último, el alto contenido de cenizas (entre 8.7 y 9.1 %), indica que las muestras están conformadas por óxidos de diferentes metales como hierro, manganeso y silicio, lo cual fue comprobado con los análisis de Espectroscopía de absorción atómica realizados.

Tabla 1. Resultados de análisis próximo de la muestra A.

Parámetro	Muestra A (%)	Muestra B (%)
Humedad	0.73	0.98
Material volátil	61.5	62.9
Carbono fijo	25.6	27.5
Cenizas	8.7	9.1

Los resultados obtenidos en el análisis elemental (C = 76.8 %, H = 6.2 %, N = 1.8 %, O = 14.2% y S = 1.0 %) corroboran los resultados obtenidos por termogravimetría, ya que la alta proporción de carbono y baja proporción de oxígeno e hidrógeno es indicativo de la presencia de estructuras

Working Paper

aromáticas altamente organizadas. Por otra parte, el contenido de 1.0 % de azufre es un resultado esperado para una muestra que sufrió un proceso de vulcanización.

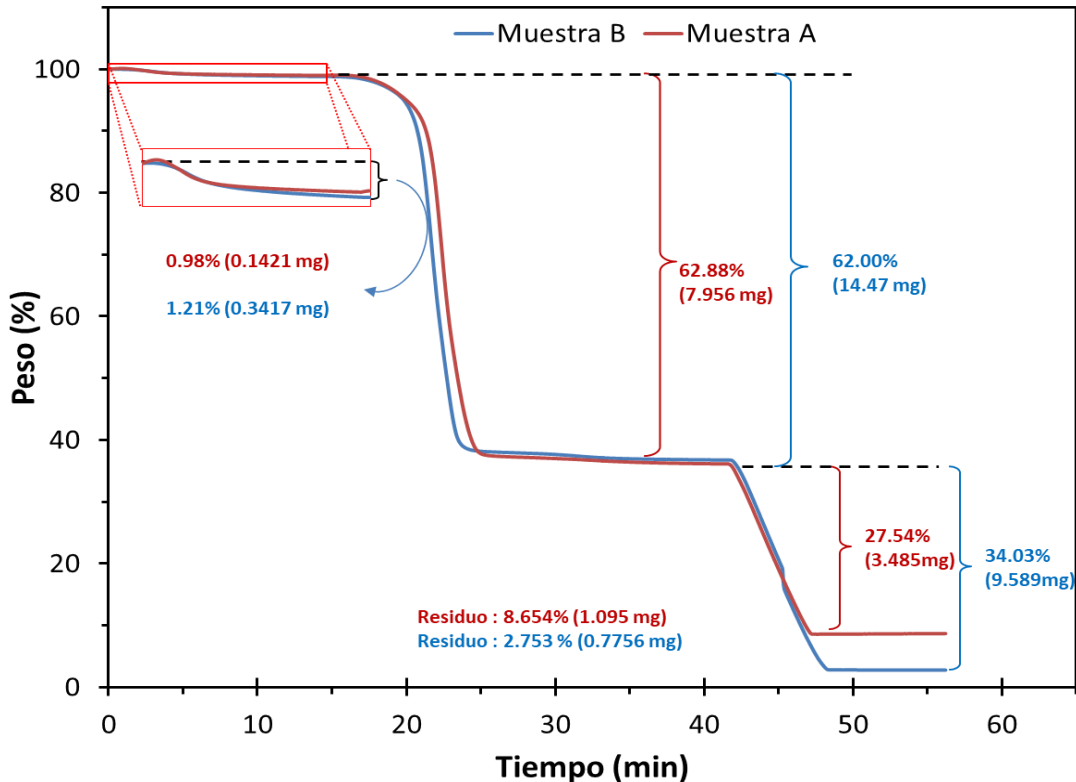


Figura 2. Termograma de las muestras A y B.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica obtenida hasta el momento para los granos de caucho reciclado, se podría afirmar que el producto granular A cumple con los requisitos mínimos que debe tener este tipo de productos para su utilización en mezclas asfálticas en caliente con asfalto modificado con grano de caucho reciclado para su uso en obras de pavimentación. Además, la caracterización fisicoquímica del producto granular B lo convierte en un producto ideal para escenarios deportivos como para la construcción de canchas sintéticas.

Pruebas de Verificación y evaluación para su aplicación en pruebas de pavimentación

Se realizaron pruebas con asfalto proveniente de ECOPETROL (60/70), el cual se modificó por vía húmeda con el caucho en polvo mencionado anteriormente; esto con la finalidad de desarrollar pavimentos que con las técnicas de pavimentación utilizadas en el país puedan llegar a ser de menor impacto negativo con el medio ambiente y más duraderas. Estas alternativas, son de gran relevancia, por un lado por el manejo de desechos sólidos y por otro lado producir mezclas asfálticas en caliente con asfalto modificado que mejoran el desempeño y vida útil del pavimento del país; en CONASFALTOS S.A. se implementó el uso de mezclas asfálticas con asfalto modificado con caucho reciclado de llanta y materiales pétreos de dichas canteras; en este trabajo se presentan los resultados obtenidos del análisis para la determinación del grado de desempeño

Working Paper

(Grado PG) del asfalto modificado el cual aumenta en comparación con el De un asfalto convencional, de forma similar se presentan los resultados de la producción y aplicación de la mezcla con dicho asfalto en obra.

Incorporación de Caucho en Asfalto: Proceso Por Vía Húmeda

En este proceso, se unen los granos de caucho con el cemento asfáltico para producir una mezcla modificada llamada asfalto-caucho, que es usada de la misma manera que un ligante modificado. Este proceso se encuentra definido en la norma ASTM D8-88 (Tejada 2013).

La fabricación de asfalto-caucho consiste en la mezcla de los granos de caucho, usualmente de tamaño máximo 0.85 mm, con el cemento asfáltico en un tanque con agitación. Generalmente, el porcentaje de adición de caucho es entre 10-24 % con respecto al peso del ligante (Tejada 2013). Para promover la unión del asfalto y el caucho, es necesario establecer una temperatura y un tiempo de reacción dentro del tanque. Usualmente, la mezcla es formulada a temperaturas entre 180-210° C por 1 a 4 horas (Tejada 2013).

Dentro de los requerimientos del proceso húmedo, se establece que el tanque agitador debe estar en terreno, ubicado junto a la planta asfáltica. Una vez que el asfalto-caucho alcance los parámetros requeridos, especialmente la viscosidad de la mezcla, se incorpora, en un proceso continuo, al mezclador de la planta asfáltica para unirse con los agregados pétreos (Tejada 2013).

Entre los principales beneficios que se obtienen usando asfalto-caucho como ligante modificado mediante vía húmeda, está la reducción de la susceptibilidad térmica, además de mejorar el comportamiento a fatiga y al envejecimiento debido a los altos contenidos de ligante asfalto-caucho (entre 6.5 y 7.5 % con respecto a los agregados), sin que se vea perjudicada la resistencia a las deformaciones plásticas. Cabe destacar que al usar caucho como modificador del ligante, aumenta la viscosidad, permitiendo mayor flexibilidad a bajas temperaturas y mejor estabilidad a altas. Una de las desventajas del método por vía húmeda, es su alto costo inicial, debido a que es necesario incorporar equipos especiales en el proceso de producción y de mezclado del ligante con el caucho. Por otro lado, el aumento de la viscosidad produce dificultades en la manipulación y en la aplicación, haciendo que se requieren mayores temperaturas de mezclado y de compactación (Ramírez 2006).

Mecanismos de Reacción del Asfalto-Caucho

Cuando cemento asfáltico y GCR se mezclan, hay una interacción entre los materiales. Esta interacción, se define como la reacción asfalto-caucho, se ve afectada por una serie de variables. Específicamente, la reacción está influenciada por la temperatura a la que se produce la reacción de fusión, la longitud de tiempo que la temperatura elevada a la que permanece, el tipo y la cantidad de energía mecánica que se le aplica a la mezcla, el tamaño y la textura del GCR y el componente aromático de la cemento asfáltico. La temperatura, el tiempo y la energía mecánica de mezcla son parámetros del proceso utilizados para añadir el GCR. Dependiendo del proceso seleccionado, estos parámetros pueden ser ajustados (dentro de límites) para lograr el producto deseado (Heitzman 1992).

Working Paper

La reacción en sí se compone de dos procesos simultáneos: digestión parcial del caucho en el betún por un lado y, por otro, adsorción de los aceites aromáticos disponibles en este último dentro de las cadenas poliméricas que son los principales componentes de la goma, tanto naturales como sintéticas (Lo Presti et al., 2012. Los polímeros de caucho natural son más reactivos con el cemento asfáltico que los polímeros de caucho sintético. Cada grupo de cadenas de polímero imparte características particulares en el ligante modificado (Heitzman 1992).

Análisis del asfalto por grado de desempeño (PG)

En la **figura 3**, se consignan los resultados del grado PG, que se realiza a un asfalto modificado con grano de caucho reciclado en Conasfaltos S.A., los cuales dieron datos del asfalto original y del asfalto modificado, Se pudo concluir que el asfalto modificado con GCR aumentó su grado de desempeño PG de 64-22 a un 88-28 lo cual le da características para ser usado en niveles de tránsito "E" (Designación extremadamente alta según la norma AASHTO M332-14) para condiciones típicas de niveles de tránsito mayores de 30 millones de ejes equivalentes y hasta velocidades menores a 20 km/h. En dicha tabla se consignan las temperaturas de mezcla y compactación con las cuales se produce la mezcla y todos los ensayos mecánicos que soportan la calidad del asfalto obtenido en producción.



Figura 3. Partículas de caucho hinchado, (I, deshinchada), (II, partícula hinchada), (III, Parte inflamada, comenzará a despolimerizarse) y (IV, despolimerización de partículas) (Lo Presti et al 2012).

En la **figura 4** se aprecia la aplicación de la mezcla con asfalto modificado con caucho reciclado in-situ en la Autopista norte Medellín calzada oriental, K2+990 - K3+212 carril izquierdo, K2+990 - K3+182 carril derecho; en la **figura 5a)** se aprecia la aplicación de la mezcla en las coordenadas mencionadas, en la **figura 5b)** se puede ver mediante una cámara termográfica la temperatura de la mezcla durante su aplicación la cual debe ser homogénea en toda su aplicación y no tener variaciones extremas, la temperatura aproximada fue de 160°C.

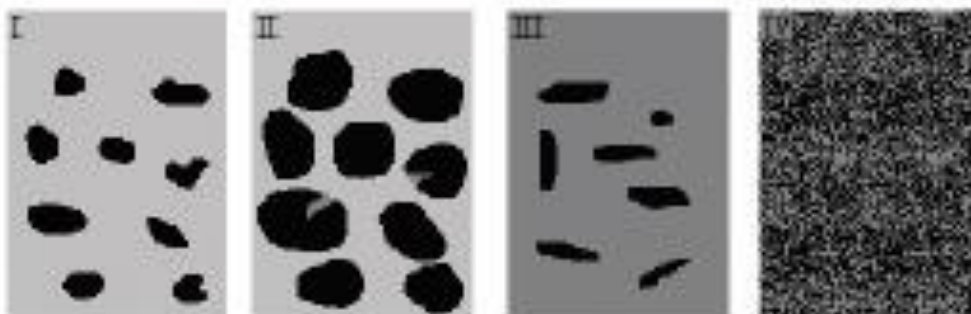


Figura 4. Partículas de caucho en la matriz aglutinante (Lo Presti et al. 2012).

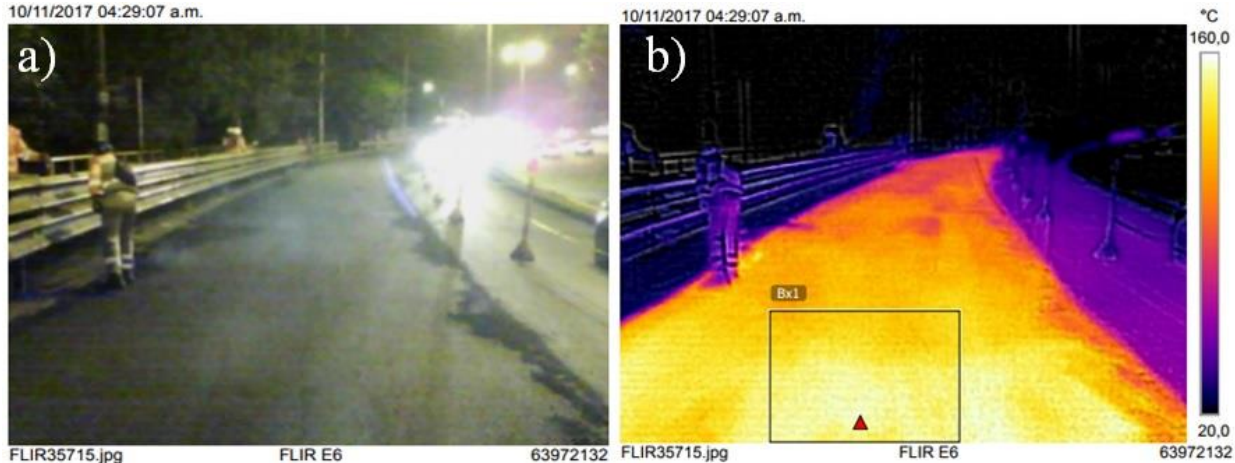
Working Paper

Figura 5. Pavimentación de vías utilizando la mezcla con caucho reciclado (MGCR-19) en Medellín-Colombia, a) durante la aplicación de la mezcla, b) evaluación de la temperatura in situ.

CONCLUSIONES

- El producto granular A cumple con los requisitos mínimos que debe tener este tipo de productos para su utilización en mezclas asfálticas en caliente con asfalto modificado con grano de caucho reciclado para su uso en obras de pavimentación.
- La caracterización fisicoquímica del producto granular B lo convierte en un producto ideal para escenarios deportivos como para la construcción de canchas sintéticas.
- El co-procesamiento y aprovechamiento de residuos de llantas evita el impacto que ocasiona su manejo inadecuado y contribuye a conservar el medio ambiente.
- La obtención de granos de caucho reciclado para su uso en obras de pavimentación es de gran importancia, ya que además de mejorar las propiedades termo mecánicas y fisicoquímicas de las mezclas asfálticas, es una alternativa económica y ambientalmente amigable.
- Se concluye que el uso de grano de caucho reciclado para la modificación de asfaltos, mejora en gran medida las propiedades del asfalto, logrando alcanzar un PG 88-22, mientras que el asfalto original estaba en un PG 64-22.
- Con la metodología empleada en Conasfaltos S.A. para la modificación de los asfaltos con caucho reciclado, se ha logrado por parte de la empresa Conasfaltos S.A. obtener mezclas asfálticas de alto rendimiento las cuales se han aplicado en diferentes vías de la ciudad; con estas mezclas especiales, se da más vida útil al pavimento y se evita hacer reemplazo de vías tan constantemente.

AGRADECIMIENTOS

**Working Paper**

Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y al Ministerio de Ciencia y Tecnología por la financiación del proyecto de investigación titulado “Valorización integral de residuos posconsumo e industriales para el desarrollo de materiales con potencial catalítico bajo un enfoque de economía circular - Código Registro: 82312”, aprobado en la “Convocatoria 890, Convocatoria para el fortalecimiento de CTel en Instituciones de Educación Superior (IES) Públicas, Mecanismo 1” de 2020, presentado por la alianza integrada por el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid representado por el Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER), la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín representada por el grupo de investigación Ciencia y Tecnología de Materiales (CTM) de la Facultad de Minas, la Universidad Industrial de Santander representado por el grupo de investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA), el Tecnológico de Antioquia representado por el grupo de investigación Ciencias Básicas Aplicadas (CBATA) y la Universidad de Antioquia representada por el grupo de investigación en Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente (QUIREMA); designado como entidad ejecutora al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

BIBLIOGRAFÍA

Dinero (2017). El promisorio futuro del negocio de las llantas en Colombia [en línea]. <http://www.dinero.com/edicion-impres/negocios/articulo/cifras-del-mercado-de-las-llantas-en-colombia-2017/244544> 15/122017

Ali Shah, A., Hasan, F., Shah, Z., Kanwal, N., y Zeb, S. (2013). Biodegradation of natural and synthetic rubbers: A review. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 83, 145-157. DOI: 10.1016/j.ibiod.2013.05.004

Ángulo R.A., Y Duarte A.J.L. (2005). “Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos”. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Físicoquímicas. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga, Colombia, 94 pp.

Amaya R.C.P. y Prieto C.M.R. (2008). Comparación de los resultados de la modificación de asfalto con poliestireno y llanta triturada obtenidos de procesos de mezcla manual y de mezcla con el dispersor de asfaltos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, 222 pp.

Angelín A.F., Andrade M.F.F., Bonatti R., Cecche L.R.C., Gachet-Barbosa L.A., y Osório W.R. (2015). Effects of spheroid and fiber-like waste-tire rubbers on interrelation of strength-to-porosity in rubberized cement and mortars. *Constr. Build. Mater.* 95, 525-536. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.166

ASTM (2001). ASTM Standards D5603-01. Standard classification for rubber compounding materials-recycled vulcanizate particulate rubber. ASTM International. (Reapproved 2015). DOI:10.1520/D5603-01R15

**Working Paper**

ASTM (2001) Standards D5644-01. standard test methods for rubber compounding materials-determination of particle size distribution of recycled vulcanizate particulate. ASTM International. (Reaprovado 2013. DOI:10.1520/D5644

ASTM (2009). ASTM Standars D6114/D6114M-09. Physical requirements for asphalt-rubber binder (Withdrawn 2018). ASTM International. 2009. DOI: 10.1520/D6114_D6114M-09

Resolución 1457 (2010) Resolución 1457 Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y adaptación a otras disposiciones Capítulo III de las obligaciones de los productores, literales c y d. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, República de Colombia. 29 de julio de 2009

Blessen S.T., Ramesh C.G., Vinu J.P. (2016). Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. J. Clean. Prod. 112, 504-513. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.046

Múnera O. J.C. (2012). Modificación Polimérica de Asfaltos. Tesis de Maestría, Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 120 pp.

Pacheco-Torgal F., Ding Y., y Jalali S. (2012). Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview. Constr. Build. Mater. 30, 714-724. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.11.047

Tejada G.P.G, F. J. (2013). Innovación y desarrollo en las mezclas asfálticas en la red de carreteras del estado. Revista Carreteras, de La Asociación Española de Carreteras 4a Época No. extraordinario, 12–22.

Galvis R. & Cia S.A. (2014). Bucaramanga – Colombia: Ecopetrol aumentará producción de asfalto en 2015. [en Ipinea]. <http://www.vanguardia.com/actualidad/colombia/248660-ecopetrol-aumentara-produccion-de-asfalto-en-2015>, 20/01/2018

Juan A. Conesa, Araceli Gálvez, Fernán Mateos, Ignacio Martín-Gullón, Rafael Font. Organic and inorganic pollutants from cement kiln stack feeding alternative fuels. Journal of Hazardous Materials 158 (2008) 585-592.

Cardona L., y Sánchez M. (2011). Dyna Aprovechamiento de Llantas Usadas Para La Fabricación de Pisos Decorativos. Proyecto de grado para obtener la Especialización en PML. Universidad de Medellín, Medellín, Colombia, 79 p.

Cao, W. (2007). Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process. Constr. Build. Mater. 21(5), 1011–1015. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.02.004

Yesilata, B., Isiker, Y., & Turgut, P. (2009). Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces Constr. Build. Mater. 23 (5), 1878–1882. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.014



Research group: **Catálisis Ambiental y Energías Renovables**

<https://www.politecnicojic.edu.co/semilleros-camer>



Working Paper

RAMÍREZ, Palma Náyade Irene: Estudio De La Utilización De Caucho De Neumáticos En Mezclas Asfálticas En Caliente Mediante Proceso Seco. Chile 2006. Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil Náyade Irene Ramírez Palma, Profesor Guía: Gabriela Muñoz Rojas. Universidad De Chile. Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas Departamento De Ingeniería.
Norma AASHTO M332-14

ARIZONA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, The Chemical and Physical Properties of Asphalt-Rubber Mixtures, ADOT-RS-14(162), July 1977.

HEITZMAN, Michael. Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. Federal Highway Administration, Office of Engineering Office of Technology Applications. Washington. D.C. 20590. FHWA-SA-92-022. May1992.

LO PRESTI, Davide.; AIREY, Gordon.; and PARTAL, Pedro. Manufacturing terminal and field bitumen-tyre rubber blends: the importance of processing conditions. SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures. Nottingham Transportation Engineering Centre, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom Complex Fluid Engineering Laboratory, Universidad de Huelva, Huelva, Spain. 2012.

SOON-JAE Lee *, CHANDRA K. Akisetty, SERJI N. Amirkhanian. The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements. Department of Civil Engineering, Clemson University, Clemson, SC 29634-0911, United States. Available online 7 June 2007.

FEITEIRA, Jose Luis. PICADO, Luis. Mezclas bituminosas con caucho, Calculo del porcentaje de Caucho, XVI CILA 20-25 de 2011 (Congreso Ibero-Latinoamericano de Asfalto).

G. R. MORRIS AND C. H. MCDONALD, Asphalt - Rubber Membranes Development, Use, Potential, undated (early 1970's).