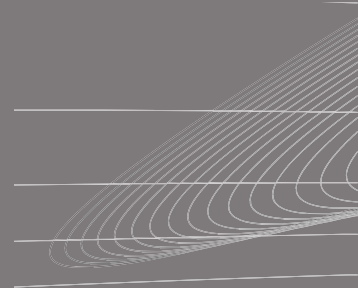
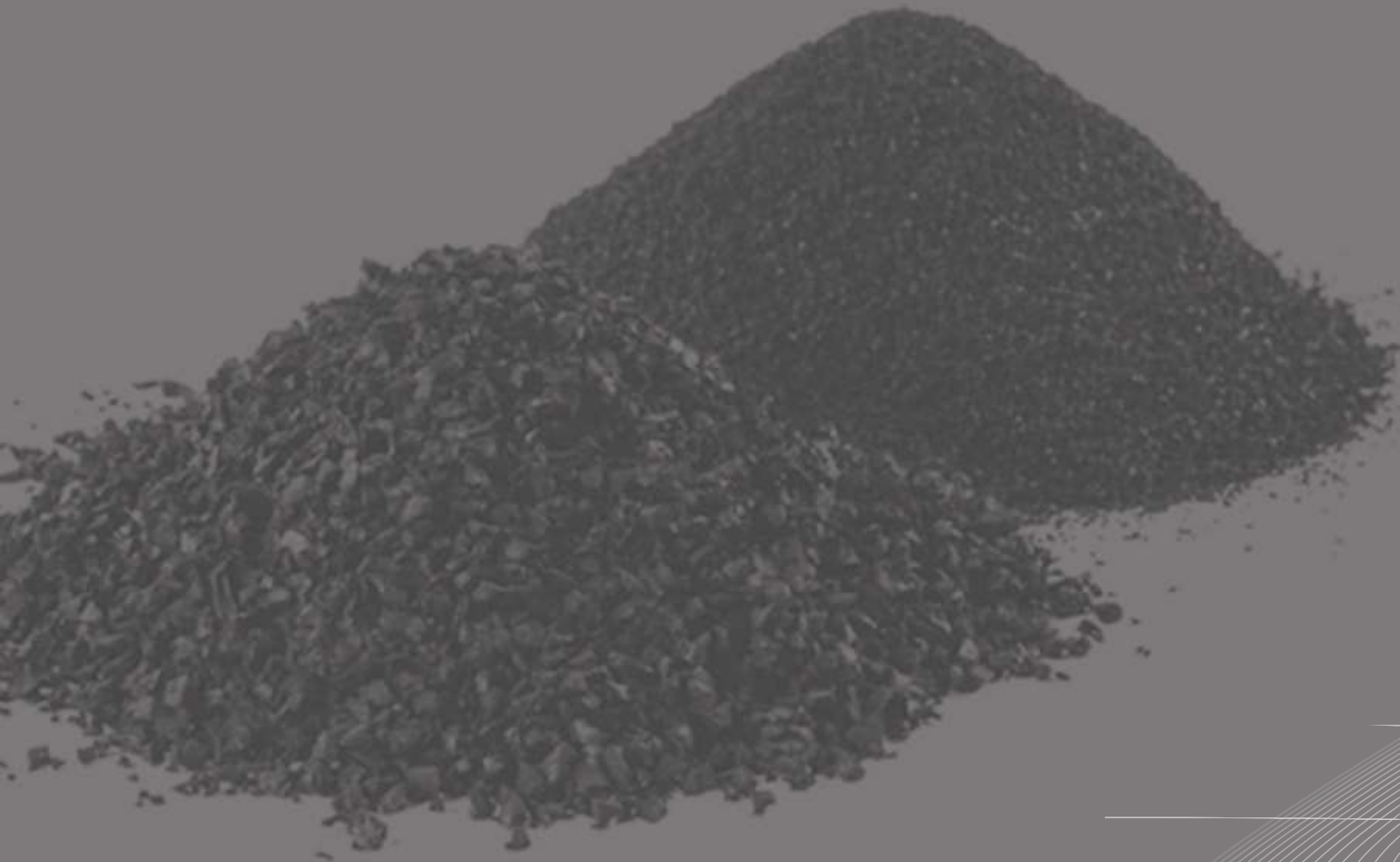


Granulares de caucho: uso e implementación como aditivo en concreto y pavimentos

Luis Carlos Fonseca Forero, Daniel Alonso Lancheros Coy,

María José Soto Montañez

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
Correo-e: Luis.fonsecaf@usantoto.edu.co



RESUMEN

Durante los últimos años ha existido un uso excesivo de materiales no renovables tales como el caucho, especialmente en el proceso de fabricación de neumáticos ya que este le proporciona propiedades mecánicas, físicas, de resistencia a la abrasión y ofrece una mayor durabilidad, habitualmente al cumplir su tiempo de uso las llantas son desechadas a los diferentes vertederos o por otro lado son incineradas, además cabe resaltar que este material elástico necesita un gran periodo de tiempo para lograr una degradación natural. Se han realizado múltiples estudios los cuales investigan la reutilización del caucho al final de su vida útil en diferentes campos, tales como aglutinantes o conglomerados, con el fin de crear nuevos componentes y aditivos para el sector de la construcción. El presente artículo relaciona diferentes investigaciones que se han realizado acerca del caucho tales como su origen, composición, propiedades, tratamientos y procesos de reutilización con el fin de proporcionar sus posibles usos en el sector de la construcción, para llevar esto a cabo es de gran importancia conocer los componentes, propiedades físicas, químicas y mecánicas del material antes, durante y después de los procesos de reutilización, ya que, por medio de una caracterización correcta del componente, se puede definir el aprovechamiento de este como agregado en los materiales de construcción.

Palabras claves: Caucho, elastómero, relleno, granulares, agregado, propiedades mecánicas, resistencia, durabilidad, procesos de reutilización, composición, vulcanización

Para citar este artículo: Fonseca-Forero, L.C., Lancheros-Coy, D.A., Soto-Montañes, M.J. "Granulares de caucho: uso e implementación como aditivo en concreto y pavimentos." In *L'Esprit Ingénieux*. Vol. 10-1, pp. 47 a 144.

ABSTRACT

In the last years has been an excessive use of non-renewable materials such as rubber, especially in the tire manufacture process due to its mechanical and physical properties, resistance to abrasion and greater durability, usually when the tires finish their useful life, are discarded or otherwise are burned, also is important to know that these materials need a long period to achieve a natural degradation. Several studies have been made to investigate about the reuse of rubber at the end of its useful life, such as binders or conglomerates, in order to create innovative materials for the construction sector. This article relates different researches that have been made about rubber such as its origin, composition, properties, treatments and reuse processes in order to provide its possible uses in the construction sector, for this it is of great importance to know the components, physical, chemical and mechanical properties present in the rubber before, during and after the reuse processes, since by means of a correct characterization of the material, can be known and make an appropriate use of the material like an aggregate in the construction material.

Keywords: Rubber, elastomer, filler, granular, aggregate, mechanical properties, strength, durability, reuse processes, composition, vulcanization.

RESUMO

Durante os últimos anos tem-se usado de forma excessiva materiais não renováveis como a borracha, especialmente no processo de fabricação de pneus, devido às suas propriedades mecânicas, físicas, resistência à abrasão e ao fato de oferecer maior durabilidade. Após cumprir seu tempo de uso os pneus são descartados em diferentes aterros ou são incinerados, é necessário notar que este material elástico precisa de um longo período de tempo para atingir a degradação natural. Foram realizados numerosos estudos que pesquisam a reutilização da borracha no final da sua vida útil em diferentes campos, tais como ligantes ou conglomerados, a fim de criar novos componentes e aditivos para o sector da construção. Este artigo relaciona diferentes pesquisas que foram realizadas sobre a borracha, nas que são tratados aspectos tais como a sua origem, composição, propriedades, tratamentos e processos de reutilização, a fim de proporcionar os seus possíveis usos no setor da construção. Para isso, é muito importante conhecer os componentes, propriedades físicas, químicas e mecânicas do material antes, durante e após dos processos de reutilização, uma vez que, por meio de uma correta caracterização do componente, é possível definir a sua utilização como um agregado nos materiais de construção.

Palavras-chave: Borracha, elastómero, enchimento, granular, agregado, propriedades mecânicas, resistência, durabilidade, processos de reutilização, composição, vulcanização

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo presentado por el ser humano a lo largo de los años ha sido importante para la supervivencia del mismo, siendo la tecnología uno de los factores que más relevancia tiene, la cual a medida que va teniendo mayor desarrollo va haciendo uso de nuevos materiales unos con mayor relevancia que otros pero que permiten aumentar los posibles inventos y mejorar la calidad de vida del hombre, dentro de los materiales que más importancia han tenido a lo largo de los años, ha sido el caucho.

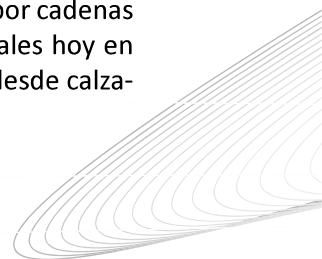
La relevancia del caucho se debe a la gran cantidad de objetos que se fabrican con este, en su gran mayoría indispensables para el diario vivir, la necesidad de usar el caucho para fabricar objetos ha venido en crecimiento, lo cual hace que este genere una gran cantidad de desechos que por la etapa que está pasando la humanidad y el cuidado del medio ambiente representa un problema de gran relevancia. Uno de los elementos que más desechos dejan son los neumáticos, los cuales son usados en la sociedad a diario siendo una compra aproximada anual tan solo en Colombia de 5,6 millones de neumáticos de los cuales en su gran mayoría son desechados y tirados a calles, avenidas, parques, incluso hasta terminan en cuerpos de agua, el caucho es uno de los materiales más contaminantes del planeta debido a que su composición los hace difíciles de degradar para el ambiente y los neumáticos hacen uso del 12% de la producción anual de este material, el problema radica en que el manejo que se le da a estos residuos no es el adecuado y su reutilización no alcanza a abarcar la gran cantidad de desechos por año, generan un problema medio ambiental que va a tardar en descomponerse hasta 1000 años.

Debido a este problema se han realizado estudios en los cuales se pueda reutilizar este material con el fin de reducir los desechos de estos y darles un nuevo uso, uno de los campos en los que más se ha podido dar nuevos usos al caucho es la construcción, esto debido a su composición y durabilidad lo cual lo hace un material potencial como alternativa para el agregado grueso, en lo cual las investigaciones se han enfocado en buscar el porcentaje de GCR es más factible en la construcción siendo el criterio más importante los beneficios que trae este sobre el material tradicional en las estructuras como en el pavimento, la forma en la que se han realizado los estudios ha sido por medio del uso de porcentajes pequeños los cuales van en función de la mezcla en la cual se estén usando, en los cuales se van exponiendo a diferentes factores que podrían alterar la composición del material en su estado final como son la temperatura, fuerzas compresión y tracción, durabilidad, entre otros.

2. ¿QUÉ ES EL CAUCHO?

El caucho es una sustancia natural la cual es obtenida por medio de un árbol llamado *Hevea brasiliensis* conocido como el árbol de caucho, este se obtiene por medio del látex que consiste en un líquido lechoso de color blanco el cual está presente en numerosas plantas, sin embargo, no todas producen la cantidad ni la calidad necesaria para la elaboración del caucho. (Lozano, Sierra, & Gellego, 2013)

Este material se caracteriza por su elasticidad, su resistencia eléctrica y la repelencia que este tiene con el agua, todo esto gracias a su microestructura ya que está conformado por cadenas elastoméricas. El caucho es fuente de numerosos productos que son fundamentales hoy en día en la sociedad, por medio de este material se fabrican herramientas que van desde calza-



do hasta neumáticos de cualquier medio de transporte, siendo este su componente principal. (Tzunun, 2007)

2.1 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL CAUCHO NATURAL

La Hevea Brasiliensis es la principal fuente de caucho, el cual es producido por la coagulación del látex que hace referencia al líquido lechoso obtenido de este árbol, cuando esta sustancia es procesada, se obtiene el caucho natural de manera que si actúa solo o mezclado con el caucho sintético (aquel que es obtenido del petróleo) (Castro, 2008) es utilizado para la elaboración de diversos productos como neumáticos para todo tipo de vehículo, artículos deportivos, borradores, mangueras, zapatos, guantes industriales, tapetes, pegantes y demás. (Espinal, Martínez, Salazar, & Barrios, 2005)

Para la elaboración del caucho como primer paso se realiza el cultivo del árbol (Hevea Brasiliensis), luego se pasa por un proceso de recolección del látex el cual sigue procesos de filtrado, acidificación, coagulación, laminación, secado y empaque, de esta manera se obtiene el caucho natural para así pasarlo por procesos los cuales son realizados por la industria, tales como: (Espinal, Martínez, Salazar, & Barrios, 2005)

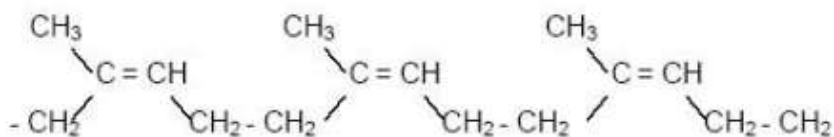
- Mezclado: en este se forma un compuesto por medio de la combinación de caucho sintético con caucho natural y otros aditivos que deben facilitar que la mezcla sea homogénea. (Struktol, 2014)
- Extrusión: es un proceso convencional de moldeado, en el cual se establece una forma fija al caucho, generalmente tubos huecos. (Strano, Rane, Briatico, & Di Landro, 2019)
- Calandrado: consiste en proporcionarle una forma al caucho, este proceso se emplea para la elaboración de láminas de caucho. (Rodríguez, 2005)
- Vulcanización: que se realiza para darle las características finales al producto, mejorando sus propiedades mecánicas, de tal manera que se aumente la elasticidad en el caucho y se disminuya su plasticidad. (Ortega, y otros, 2019)

2.2 ESTRUCTURA DEL CAUCHO NATURAL

El caucho natural está conformado por cis-1,4 polisopreno el cual es combinado con proteínas, lípidos y sales inorgánicas, estos en cantidades pequeñas. Por lo tanto, en su estructura se encuentra un polímero de cadena larga, en forma de espiral cuyo peso molecular es de 5×10^5 g/mol, el cual se encuentra en una etapa de continua agitación debido al doble enlace de carbono. (Castro, 2008)

Con el fin de mejorar las propiedades del caucho, se le agregan a este, otros materiales tales como suavizantes, los cuales mejoran la manejabilidad del caucho para el proceso de vulcanización; óxido de magnesio y zinc, funcionan como activadores reduciendo así el tiempo en el proceso de vulcanización y negro de humo para aportar mayor resistencia al material ante la abrasión y tensión. (Angulo & Duarte, 2005)

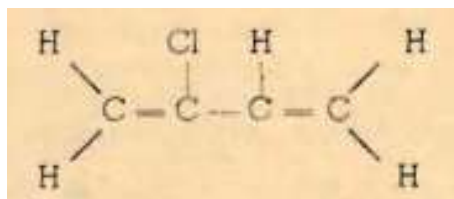
Figura 1. Composición química del caucho natural en forma de cadena



Fuente: materiales y compuestos para la industria del neumático. (Castro, 2008)

Las características anteriormente mencionadas llamó la atención de la industria tomando un protagonismo directo en la evolución del sector, en la antigüedad la obtención del material era compleja y países como Rusia, Alemania y Estados Unidos se dieron en la tarea en fabricar de manera sintética de materia prima, siendo así estados unidos el mayor beneficiado ya que encontró una mezcla de materiales que contaban con gran estabilidad comparado con el material que se había trabajado hasta esta época, dando conclusión, la utilización de los estabilizadores anteriormente mencionados. Uno de los principales adelantos que los científicos americanos es el reemplazo de una molécula de CH₃ por una de Cloro (Cl), este nuevo material obtuvo una gran aceptación por parte de la industria y fue nombrado neopreno. (Bekkedahl, 1946)

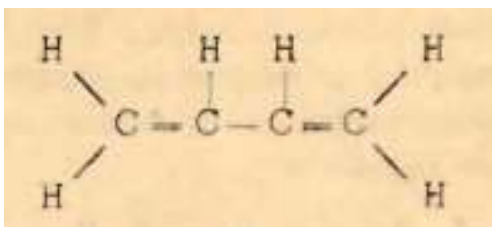
Figura 2. Composición química del caucho sintético (neopreno)



Fuente: caucho natural y sintético. (Bekkedahl, 1946)

Los países europeos se interesaban cada vez más en la realización de un material que presentara mejores comportamientos mecánicos llegando al punto de incluir moléculas de Hidrógeno (H), denominado como butadieno, su composición volátil lo cual genera un comportamiento semejante a la de un gas. (Bekkedahl, 1946)

Figura 3. Composición química del caucho sintético (butadieno)



Fuente: caucho natural y sintético. (Bekkedahl, 1946)

2.3 COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS NEUMÁTICOS

Los neumáticos son básicamente un componente de los vehículos, el cual le otorga la posibilidad de desplazarse. Su inventor fue el estadounidense Charles Goodyear quien descubrió que, por medio del proceso de vulcanización, se podía obtener mayor resistencia y la solidez

necesaria para poder realizar la fabricación de llantas en el año de 1880. Con el pasar de los años se han creado neumáticos para diversas situaciones y los diferentes tipos de vehículos existentes. (Cardona, 2016)

Dentro del mercado del caucho los neumáticos hacen uso del 60% de la producción, los tipos de cauchos usados para la fabricación de las llantas son cauchos naturales (NR), polibutadienos (BR), estireno-butadieno (SBR), polispermos sintéticos (IR); en la industria del caucho se usa solo un 30% del material de procedencia natural (NR), el resto son sintéticos de cualquier composición (Castro, 2008). A continuación, se presentan unas tablas con diferentes porcentajes para los materiales que componen un neumático de acuerdo al tipo de vehículo.

Tabla 1. Componentes generales de los neumáticos o llantas

Componentes	Tipo de vehículo		Función
	Automóviles % en peso	Camiones % en peso	
Cuchos	48	45	Estructural-deformación
Negro humo	22	22	Mejora oxidación
Óxido de zinc	1,2	2,1	Catalizador
Materia textil	5	0	Esqueleto estructural
Acero	15	25	Esqueleto estructural
Azufre	1	1	Vulcanización
Otros	12		Juventud

Fuente: materiales y compuestos para la industria del neumático. (Castro, 2008)

Tabla 2. Componentes de las llantas para vehículos y camionetas

Caucho natural	14 %
Caucho sintético	27%
Negro de humo	28%
Acero	14 - 15%
Fibra textil, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 - 17%
Peso promedio:	8,6 Kg
Volumen	0.06 m ³

Fuente: materiales y compuestos para la industria del neumático. (Castro, 2008)

Tabla 3. Componentes que componen las llantas para camiones y microbuses

Caucho Natural	27 %
Caucho sintético	14%
Carbón negro	28%
Acero	14 - 15%
Fibra, suavizantes, óxidos, antioxidantes, etc.	16 - 17%
Peso promedio:	45,4 Kg.
Volumen	0.36 m ³

Fuente: materiales y compuestos para la industria del neumático. (Castro, 2008)

En la siguiente tabla se puede observar los elementos químicos que forman las llantas o neumáticos, además del porcentaje en el cual se presentan.

Tabla 4. Composición química de los neumáticos de forma general

<u>COMPUESTO</u>	<u>% EN PESO</u>
Carbono	70 - 83
Hidrógeno	5,0 - 7,5
Azufre	1,2 - 1,9
Cloro	0,1 - 0,8
Oxígeno	5,0
Nitrógeno	1,5
Oxido de Zinc	1.2 - 2.7
Hierro	5,0 - 15,0
Residuo	5,0 - 5,7

Fuente: Reciclado de neumáticos para la fabricación de láminas impermeabilizantes en la construcción (Aguado , 2010)

Cada tipo de caucho posee propiedades distintas por lo tanto su comportamiento va a ser diferente; con relación a esto se presenta la siguiente tabla en la cual se puede observar el comportamiento frente a fuerzas de tensión y elongación; cabe resaltar que cada uno de los cauchos presentes en la tabla ya fueron sometidos al proceso de vulcanización.

Tabla 5. Comportamiento según el tipo de caucho

Elastómero	Resist. A la Tracc PSI	Elongación %	Densidad g/cm ³
Caucho natural	2,5-3,5	750-850	0,93
SBR	0,2-3,5	400-600	0,94
Neopreno	3-4	800-900	1,25
Silicona	0,6-1,3	100-500	1,1-1,6

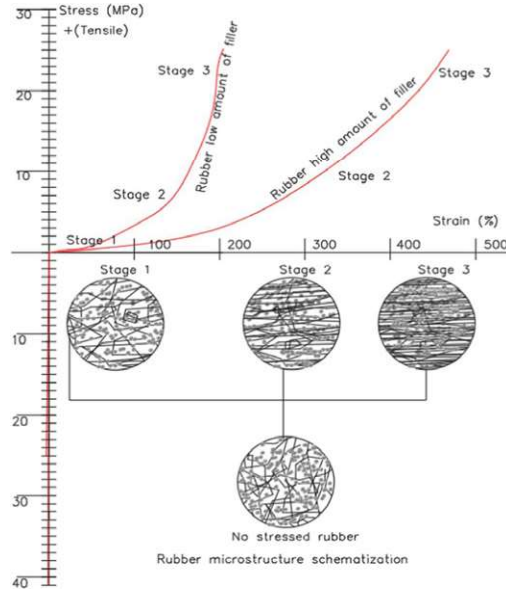
Fuente: materiales y compuestos para la industria del neumático. (Castro, 2008)

2.4 PROPIEDADES DEL CAUCHO

El caucho es un material el cual se compone principalmente por cadenas de enlaces tridimensionales llamadas elastómeros, los cuales tienen como función cristalizarse rápidamente al momento de presentarse el esfuerzo; además cuenta con rellenos que se encargan de aumentar la resistencia del caucho realizando una unión con los elastómeros, su tamaño es de grano fino, lo cual disminuye la presencia de vacíos y hacen que la deformación del material sea más controlada (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

De acuerdo a su comportamiento físico y químico este material se divide en termoplásticos y termoestables, en donde los primeros al presentar bruscos cambios de temperatura, causan que sus enlaces sufran rupturas presentado cambios en su comportamiento, caso contrario ocurre con los materiales termoestables, los cuales permiten un gran porcentaje de deformación y elasticidad. (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018).

Figura 4. Representación esquemática sobre la microestructura y deformación de dos tipos de caucho con diferente porcentaje de filtro.



Fuente: (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

En la anterior imagen se puede observar el comportamiento de las cadenas elastoméricas de un caucho en diferentes etapas de carga, donde estas sufren un alineamiento, tomando la orientación de la fuerza aplicada, produciendo que su deformación sea mayor y pueda recuperar su forma original fácilmente. Los cauchos que tienen mayor presencia de rellenos en su composición presentan una mayor capacidad de deformación y resistencia. (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

Conforme a lo explicado anteriormente, se establece que los elastómeros y rellenos son materiales principales en el caucho ya que estos cumplen misiones específicas en su comportamiento mecánico, la composición del material provoca alteración en los comportamientos en los esfuerzos presentados en las etapas de uso. (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

Los elastómeros son partículas de tamaño granular, su función consiste en transmitir los esfuerzos entre sus cadenas moleculares; uno de los elastómeros más usados es el caucho natural, debido a que ofrece una alta resistencia a la tracción y se cristaliza rápidamente a la hora de estar frente a un esfuerzo. (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

El relleno, es el material que se encuentra dentro de los elastómeros, el tamaño de sus partículas varía entre las micras y nanos, el más común es el carbón negro el cual mejora las condi-

ciones de resistencia del caucho, esto proporciona una mejora en su rigidez, en la resistencia a la tracción. (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

El porcentaje de relleno y elastómero es uno de los enigmas para los investigadores en los últimos años, donde tienen como objetivo buscar los porcentajes y materiales que puedan generar un caucho que ofrezca un mejor comportamiento al momento de someterlo a diferentes cargas de uso. El tamaño del relleno cumple una función directa con las propiedades mecánicas del material, este se encuentra en tamaños con rangos de micra por partícula, además se ha intentado la combinación de una variedad de materiales pétreos como la sílice y arcillas, las cuales trabajando junto al elastómero presentan una adecuada compactación ofreciendo resultados aceptables, esto con el fin de definirlos como materia prima, asimismo es importante tener en cuenta que la adición de gases oxidantes produce que las superficies de los elastómeros y de caucho obtengan una mayor rugosidad generando una mejora en la compactación y en la resistencia del material. (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

2.4.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CAUCHO

Estas propiedades están conectadas entre la energía liberada de la superficie del material terminado, la distancia entre sí de sus compuestos y las condiciones climáticas en las que el caucho fue desarrollado, ya que se encuentran múltiples investigaciones que dan como conclusión que la mezcla de cauchos a temperaturas aproximadas a los 100°C genera un material con una resistencia del 50% más alta a comparación de uno a temperatura ambiente. (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

De acuerdo a estudios realizados, los elementos que conforman los rellenos, la combinación de diferentes materiales tales como el estireno-butadieno, que hace parte de los elastómeros con la sílice precipitada, demostró una mayor capacidad de deformación. Por lo tanto, es de gran importancia tener una relación de relleno- elastómero compactada lo suficiente para que las cadenas de la microestructura se conecten entre sí y transmitan el esfuerzo de una mejor manera, para que de esta forma el material alcance deformaciones iguales o superiores a 300%, provocando que la longitud del material se triplique a su medida original; sin embargo la adición excesiva de rellenos tiene una consecuencia negativa con respecto a la deformación, ya que esta puede reducirse en un 50% aproximadamente y su módulo de ruptura disminuye un 22%; asimismo si se realiza una correcta elección de la cantidad de relleno a usar, se puede llegar a triplicar la resistencia a la compresión y tracción del material, ya que la resistencia de un caucho en la que su totalidad es igual a 1.8MPa y con la adición del relleno puede aumentar a 5.6MPa. (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

2.5 PROCESO DE VULCANIZACIÓN

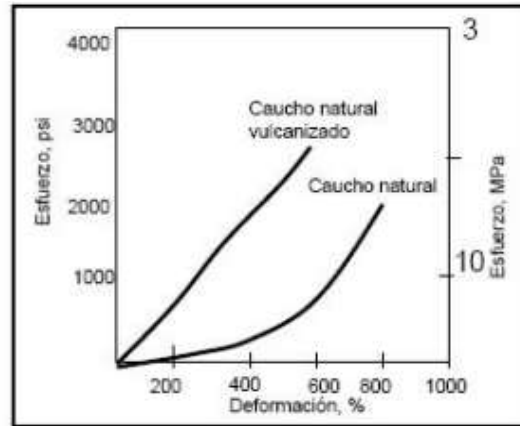
Cuando un caucho natural se encuentra sin vulcanizar, va a mostrar bajas propiedades de resistencia ya que este presenta un comportamiento plástico, el cual se refiere a que el material se va a deformar de manera permanente cuando este sea sometido a esfuerzos de tensión que superen su límite elástico. (Castro, 2008)

La vulcanización o curado es un mecanismo químico, este proceso consiste en la realización de un enlace entre las cadenas moleculares del caucho, para esto se utilizan agentes de vulcanización, estos son encargados de transformar un material amorfo sin entrecruzar en un com-

ponente cuyas moléculas elásticas permanezcan más unidas, de esta forma proporcionarle al material mayor elasticidad evitando que presente un comportamiento plástico. (Bellas, 2012)

En este proceso el caucho se convierte en un material elastomérico después de ser un termoplástico, lo cual genera que el material sea más estable, duro y le aporte mayor durabilidad y resistencia. (Castro, 2008)

Figura 5. Deformación vs esfuerzo del caucho natural vulcanizado y sin vulcanizar



Fuente: materiales y compuestos para la industria del neumático. (Castro, 2008)

El proceso de vulcanización se realiza por medio de la combinación de azufre y otros elementos, sometiendo el material a una temperatura adecuada, de esta manera este sufre diferentes cambios. El proceso se realiza a temperaturas comprendidas entre el punto de fusión del azufre y 160°C, sin embargo, cabe resaltar que los mejores resultados se obtienen usando una temperatura de 120°C, debido a que si este proceso se realiza entre 150°C y 160°C, se va a obtener un material con características diferentes, en el cual su elasticidad y aspecto han cambiado, por lo tanto es importante saber que el proceso de vulcanización depende de diferentes elementos como lo son: el tiempo, la temperatura, la presión, la cantidad de azufre a mezclar entre otros. (Realpe, 2014)

Cuando al caucho no se le ha realizado ningún proceso, su grado de vulcanización será cero; caso contrario ocurre cuando el material alcanza la máxima densidad de entre enlace de sus moléculas, en esta ocasión su grado de vulcanización corresponderá a 1; esto solamente ocurre cuando se usa adecuadas condiciones de tiempo y temperatura ya que estos dos factores son los que se encargan de determinar el grado de vulcanización. (Urrego, Velásquez, Giraldo, & Posada, 2017)

La reometría de vulcanización y la calorimetría diferencial de barrido son 2 dos métodos para determinar el grado de vulcanización; la segunda se basa en la parte exotérmica del proceso, los datos generados nos ayudan a calcular el calor que es liberado cuando se inicia la reacción, de esta manera se observa el avance del proceso de vulcanización desde que inicia el desprendimiento de calor hasta que finaliza. (Urrego, Velásquez, Giraldo, & Posada, 2017)

La reometría de vulcanización es un método que hace seguimiento al cambio en el torque que se le aplica al material para generarle una deformación, este va aumentando cuando el proceso de vulcanización prospera, por lo tanto, aumenta la densidad de los enlaces entre

las cadenas moleculares del caucho; por medio de este método se puede medir el cambio que ha tenido el torque durante el proceso, en consecuencia se logra determinar si durante el proceso existió alguna disminución en la rigidez del caucho. (Urrego, Velásquez, Giraldo, & Posada, 2017)

Mediante los dos métodos nombrados anteriormente, es posible conocer los tiempos necesarios para que aparezcan los primeros enlaces elásticos en el caso de la reometría y el momento en el que comienza la liberación de calor con la calorimetría diferencial de barrido, sin embargo, es importante tener en cuenta que estos tiempos dependen de los componentes acelerantes y la temperatura a usar en el proceso. (Urrego, Velásquez, Giraldo, & Posada, 2017)

2.6 MÉTODOS DE RECICLAJE DE CAUCHO

Existen varios métodos de aprovechamiento de caucho en los cuales se destacan los procedimientos criomecánicos, termo- mecánicos (se realiza molienda y mezclado de alta velocidad), mecánicos, “químico-mecánicos (desvulcanización, proceso criogénico de Trelleborg)”, químicos (con reactivos orgánicos e inorgánicos), biotecnológicos, entre otros. (Peláez, Velásquez, & Giraldo, 2017)

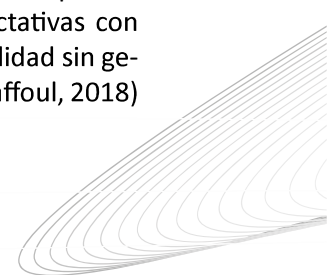
Es importante realizar una trituración al caucho, con el fin de que este llegue a obtener un tamaño granular y una forma regular, esto para lograr una reacción apropiada de su estructura vulcanizada frente a los aditivos químicos y agentes de expansión, de esta manera se alcanza una separación adecuada de diferentes componentes del caucho tales como fibras de acero, textiles y aditamentos metálicos. (Peláez, Velásquez, & Giraldo, 2017)

En el comercio se encuentra granos de caucho de diferentes tamaños en comparación al caucho virgen; el material reciclado presenta propiedades diferentes, ya que este trae una serie de ventajas como lo es disminuir el impacto ambiental, además en el campo de la economía reduce su precio hasta un 50%, en caso de que esté presente contacto con solventes, el caucho reciclado va a tener un mayor módulo de elástico, asimismo en los países en vía de desarrollo es fuente de empleo y en caso de trituración mecánica este puede utilizarse como matriz. (Peláez, Velásquez, & Giraldo, 2017)

Al utilizar mezclas de caucho reciclado con caucho virgen se llega a obtener ciertas ventajas, ya que su tiempo de proceso es menor por lo tanto se reduce el gasto de energía, también se obtiene mayor procesabilidad por calandro y extrusión, ya que para esta mezcla no se necesitan temperaturas tan altas lo que provoca un aumento en su producción y facilita su proceso, otro beneficio que se encuentra en esta mezcla es que el proceso de vulcanización es más eficiente al igual que su resistencia. Es importante mencionar que caucho reciclado evita la transpiración de gases tóxicos como el azufre que pueden estar presentes en materiales recién vulcanizados. (Peláez, Velásquez, & Giraldo, 2017)

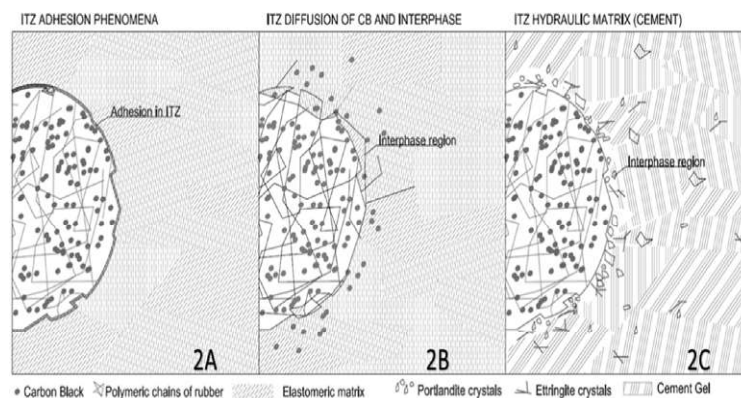
2.7 APLICACIÓN DEL CAUCHO GRANULAR EN LA CONSTRUCCIÓN

Al momento de darle un uso al caucho reciclado es importante tener en cuenta aspectos como la viabilidad económica, ambiental y técnica, para que se cumplan expectativas con respecto a su uso y tenga un comportamiento adecuado en el campo de sostenibilidad sin generar sobrecostos. (Flores Medina, Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)



En la construcción de vías (pavimento) y estructuras en materiales como el concreto, el caucho reciclado puede cumplir la función de agregado granular, ya que su uso puede aumentar la resistencia al impacto y a la fatiga. A pesar de esto, se generan pérdidas en el módulo de elasticidad del material y en su resistencia a la compresión. Una de las características que se presenta en la inclusión de materiales granulares de caucho en las estructuras es su comportamiento ante el uso y la preparación de la mezcla, como en el caso de los pavimentos, la inclusión de caucho genera un gran beneficio en la interconexión de materiales, esto generado por las altas temperaturas que maneja la mezcla asfáltica; para esta conclusión, se dio a conocer el enlace en la zona de transición interfacial, en la cual se observa por medio de imágenes de barrido de telescopio, cómo es la transición del caucho con el concreto y asfalto y cómo sus propiedades físicas y químicas llegan al punto de enlazarse con los materiales tradicionales. (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

Figura 6. Representación esquemática de diferentes zonas de transición interfacial



Fuente: (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

En la imagen anterior se puede observar los compuestos del caucho que poco a poco se van adhiriendo a los materiales tradicionales usados en el campo de la construcción, en la imagen 2B se muestra el comportamiento del asfalto y el caucho, donde gracias a las altas temperaturas, el caucho otorga varias partículas de sus elastómeros y rellenos para generar una migración de partículas al asfalto, provocando una unión de materiales que traen como consecuencia un aumento en la interacción de estos, por consiguiente se genera una mejora en su reacción ante los esfuerzos de servicios a los que se verá sometido; en la imagen 2C se observa cómo los yesos o el concreto hidráulico y el caucho tienen una unión equivalente en el óxido de calcio y sus rellenos, para mejorar esta transición se recomienda que la superficie del caucho cuente con la rugosidad suficiente para que las partículas del concreto se introduzcan en este, de esta manera la compactación y el tratado de materiales logran tener un mejor resultado; para aumentar la rugosidad se recomienda una cobertura de ácido de azufre, ya que esto produce pequeñas cavidades controladas en la superficie del material. (Flores Medina , Reyes Garcia, Haijarasouliha, Guadagnini, & Raffoul, 2018)

Otros usos que se le ha dado al caucho reciclado son en la elaboración de pisos antideslizantes, agregados impermeables para las paredes y los techos y como base de tapetes. (Peláez, Velásquez, & Giraldo , 2017)

Los asfaltos con agregados de caucho se han utilizado en múltiples países como bases en vías de tránsito liviano y en drenajes de subsuelo. En investigaciones realizadas a la elaboración de asfalto con caucho reciclado, se implementa un proceso de desvulcanización de este último,

esto para conservar casi al 100% la elasticidad del caucho y así mejorar su propagación en la matriz termoplástica, posterior a este proceso se realiza de nuevo una vulcanización con el fin de optimizar la relación interna entre la matriz y las partículas del caucho, de esta forma se incrementa el resultado esperado del asfalto con el nuevo agregado, además de la sensibilidad térmica y resistencia a la perforación. (Peláez, Velásquez, & Giraldo, 2017)

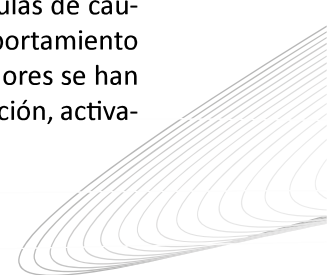
Cabe resaltar que, en la mayoría de las investigaciones realizadas, concluyen que a pesar de la disminución de propiedades como su densidad y optimizar propiedades como la resistencia al impacto, tenacidad, ductilidad y aislamiento acústico, se pueden obtener desventajas ya que se produce una disminución en la resistencia a la compresión y a la tracción. (Peláez, Velásquez, & Giraldo, 2017)

Sin embargo, existen investigaciones en las que se desarrolla un compuesto de cemento Portland agregándole cenizas producidas por la quema de carbón y caucho reciclado molido, en este estudio se evalúa el material mediante la realización de ensayos de flexión, compresión y absorción de agua; según los resultados obtenidos se evidencia que las propiedades de compresión disminuyen pero de manera controlada, esto se genera por la adición de partículas de caucho reciclado molido, ya que si estas se combinan simultáneamente con las cenizas propuestas se le otorga a la mezcla un mayor nivel de aplicación en el sector de la construcción. (Yilmaz & Degirmenci, 2009)

Para los residuos de caucho existen diferentes opciones viables que resultan ser más económicas, debido a que se le estaría dando una reutilización a ese material en el sector de la construcción e infraestructura, dado que Colombia es un país que vive en un constante crecimiento en este sector, como por ejemplo la reparación de vías terciarias, ya que estas equivalen al 70% de la red vial de este país. (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2014). Asimismo, se estaría reduciendo el impacto ambiental causado por las cantidades de llantas desechadas a nivel mundial; de igual manera en la actualidad se presenta gran contaminación auditiva, por lo tanto, se busca la implementación de nuevos materiales que logren absorber las ondas acústicas lo mejor posible, este es otro uso que se le da al caucho, ya que este cuenta con propiedades acústicas y según investigaciones se considera que es un material con un gran potencial en este campo. (Pfretzschner & Rodriguez, 1999)

En la industria se encuentra alta demanda de material polimérico, considerando que los granulados de caucho cuentan con bastante potencial para ser usados en la creación de polímeros, cada empresa realiza procedimientos diferentes para obtener comportamientos específicos y darles un uso respectivo; por ejemplo: realizan procedimientos termoestables, estos con el fin de mejorar su tenacidad, procedimientos termoplásticos, se realizan para tener elastómeros termoplásticos y demás. En estos tiempos el caucho reciclado se emplea en pedales y en el timón de los carros, lo cual ha tenido una respuesta favorable. (Ramarad, Khalid, Ratnam, Luqman, & Rashmi, 2015)

Sin embargo, para la mezcla de caucho reciclado con caucho natural es importante tener en cuenta la compatibilidad de los elementos que lo conforman, para esto, una alternativa puede ser el uso de adhesivos tales como resinas termoestables y matrices termoplásticas, de esta manera se tiene un mejor resultado en cuanto a la concordancia entre las partículas de caucho reciclado con la matriz polimérica del caucho natural, a pesar de ello, el comportamiento que se ha logrado no ha sido el esperado, por esta razón los diferentes investigadores se han dado a la tarea de someter este material a pruebas de vulcanización, desvulcanización, activa-



ción superficial con el fin de mejorar las cualidades tanto físicas como químicas del material. (Wang, Wang, Wu, & Zhang, 2015)

Cabe destacar que se ha implementado un nuevo análisis por medio de la irradiación de alta energía, esto con el fin de mejorar el comportamiento del caucho reciclado triturado con los componentes de la matriz de polietileno lineal de baja densidad (LDPE) y etilen-vinil-acetato (EVA). Como resultado se da a conocer que a medida que se aumenta la energía que se irradia sobre los elementos del material, se mejora la resistencia a la tracción, la deformación de ruptura, dureza y su tenacidad; esto se debe a que la irradiación de energía activa unas partes ubicadas en la superficie de las partículas del caucho, formando enlaces químicos con el LPDE y el EVA. (Mészáros, Bárány, & Czvikovszky, 2012)

2.8 PROCESO DE EXTRACCIÓN DEL GCR DE LAS LLANTAS

2.8.1 Proceso ambiental

Para el proceso de extracción del GCR de las llantas se debe separar del resto de los materiales que lo componen como el metal y el textil que dan forma al neumático, por tal motivo lo que se debe hacer es usar una serie de cortes con el fin de triturar el caucho que permite de forma más sencilla la separación de los metales, para la extracción del metal se usa un imán que va desde el inicio hasta el fin de la cinta transportadora y por su parte los textiles se desprenden por medio de una banda transportadora a la cual se adhieren y separan del GCR, para obtener el tamaño adecuado del GCR se pasan por tres molinos en línea y luego son dirigidos a un tamiz para separar los granulares que tienen el tamaño requerido para la mezcla asfáltica, como aporte al mantenimiento y vida útil de la maquinaria se deben hacer una serie de reparaciones a los molinos debido al desgaste de las cuchillas por el corte del metal (Díaz & Castro, 2017)

2.8.2 Proceso criogénico

Como su nombre lo indica en este proceso se usa nitrógeno, esto con el fin de reducir el tamaño al granular generado con el uso de un solo molino, el uso de un solo molino se debe a que el proceso de la extracción del GCR se facilita por la baja temperatura al que ha sido sometido el neumático al usar nitrógeno, en el proceso de separación de los metales y textiles se usan los mismos métodos implementados en el proceso ambiental, el fin de usar el proceso criogénico es la generación de granulares de tamaños más reducidos que los del proceso ambiental cambiando las propiedades del neumático, exponiendo el proceso a un bajo porcentaje de error (Díaz & Castro, 2017)

2.9 TIPOS DE MEZCLA EN ASFALTOS CON GCR

Para la realización de una mezcla asfáltica se deben tener en cuenta una serie de factores tales como la temperatura del mezclado y los tiempos que va a pasar para la realización de cada proceso, además de la calidad de la mezcla en el momento de la construcción de una vía, lo mismo sucede con el asfalto con agregados de GCR. Existen tiempos prudentes para lograr un mejor comportamiento y mayor resistencia de la mezcla, es de gran importancia tener en cuenta tanto el tamaño del granular de GCR como el momento en el que se realiza la mezcla y los componentes de la mezcla que se elaborara. (Díaz & Castro, 2017)

2.9.1 Mezcla por proceso de vía húmeda

El proceso de vía húmeda es el método más usado en la mezcla de asfalto con GCR, gracias a la facilidad de su realización y el gran número de investigaciones que se han realizado para este tipo de mezclado, el proceso comienza en el momento que se tienen los materiales listos (granos de GCR), el cemento asfáltico, material granular. Inicialmente se debe calentar el cemento asfáltico a temperaturas superiores a los 160 °C, ya con la mezcla a dicha temperatura se agrega el GCR y se mezcla en un tornillo sin fin por un tiempo de 45 minutos a 1 hora, simultáneamente el agregado pétreo es llevado a temperaturas cercanas a los 160°C y finalmente es mezclado, teniendo como resultado el material modificado óptimo para ser transportado a la zona a pavimentar, se recomienda que la temperatura de la mezcla se mantenga en rangos entre los 160°C- 190°C para obtener el correcto acople de componentes. (Díaz & Castro, 2017)

2.9.2 Mezcla por proceso de vía seca

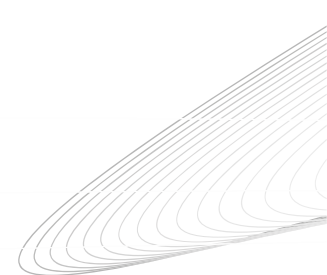
Este proceso no es muy usado actualmente por la poca investigación, además de generar altos índices de incertidumbre en los resultados presentados, las investigaciones proponen un uso máximo de 3% de GCR pero sin asegurar un comportamiento óptimo, para realizar este método se mezcla las partículas de GCR con el hormigón tradicional buscando una elevación en las temperaturas de los materiales pétreos y una fusión con los granulares de caucho, ya de forma posterior el cemento asfáltico está en su temperatura máxima lo que permite que la mezcla se pueda unir sin ningún tipo de máquina o método debido a que la unión se realiza de manera directa (Díaz & Castro, 2017)

2.10 ESTUDIOS DEL GCR

Para obtener el mejor comportamiento del material se tomó la decisión de realizar una búsqueda exhaustiva de información con el fin de definir las condiciones las cuales producen que el material modificado en este caso específico el asfalto con partículas de GCR actúe igual o mejor comparado con el asfalto tradicional. (Díaz & Castro, 2017)

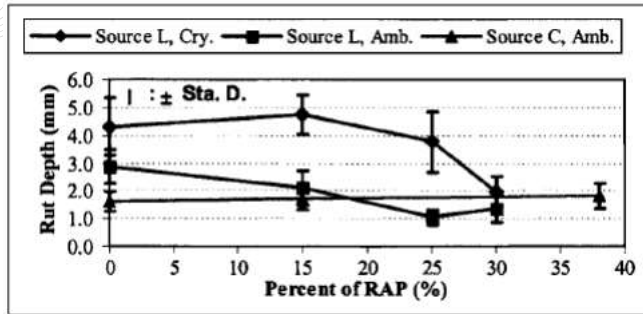
2.11 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL GCR

El investigador Xiao se propuso definir la mejor metodología de obtención de GCR además delimitar los porcentajes de presencia de granulares de caucho consiguiendo reducir la fatiga



de hundimiento o ahuellamiento que hace referencia a la deformación generada por los vehículos en un periodo de tiempo determinado. (Xiao, 2009) (Díaz & Castro, 2017)

Figura 7. Profundidad de la huella vs Porcentaje de GCR



Fuente: (Xiao, 2009)

Se usaron tres muestras para conocer y caracterizar el elemento que tenga un cambio con la implementación de diferentes metodologías de extracción, la primera con el método criogénico, la segunda con el método ambiental tradicional y la tercera con el método ambiental a una baja temperatura (Díaz & Castro, 2017)

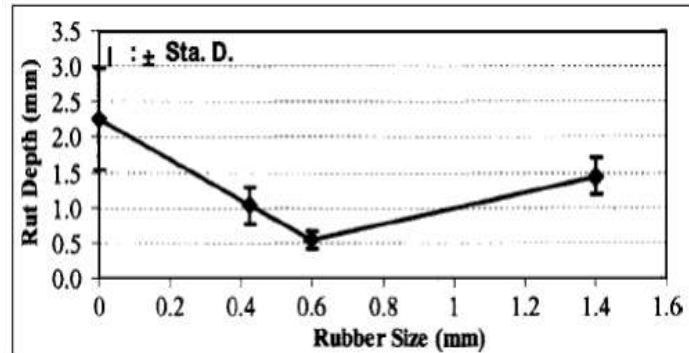
Como se puede observar el método que presenta mejor desempeño con respecto al porcentaje de GCR que fue definido en esta tabla como RAP por sus siglas en inglés, el que mejor se desempeñó fue el método ambiental tradicional, debido a que sin importar el porcentaje de partículas de caucho el ahuellamiento está en valores entre 1mm y 2mm, por otro lado, además teniendo en cuenta el modo de extracción y el comportamiento, el segundo que presenta mejores resultados es el método ambiental a bajas temperaturas con la presencia de 25% de material granular, el método criogénico presenta un bajo ahuellamiento hasta llegar al límite máximo de material permitido que es cerca al 30% de GCR, según Xiao, esto es causado por los cambios volumétricos del material debido a la variación de temperaturas a las que se expone el GCR ya que esto causa una variación considerable en su tamaño y al estar presente en mayor porcentaje genera una deformación mayor. (Díaz & Castro, 2017)

2.11.1 Tamaño y forma

Para determinar cuál es el tamaño y forma que permite obtener mejores propiedades tales como un desempeño óptimo, Xiao y Murat se enfocaron en comparar el menor ahuellamiento

y la resistencia a la tensión del asfalto respectivamente, esta última genera desplazamientos de material y un alto nivel de desgaste generado por el uso al pavimento. (Díaz & Castro, 2017)

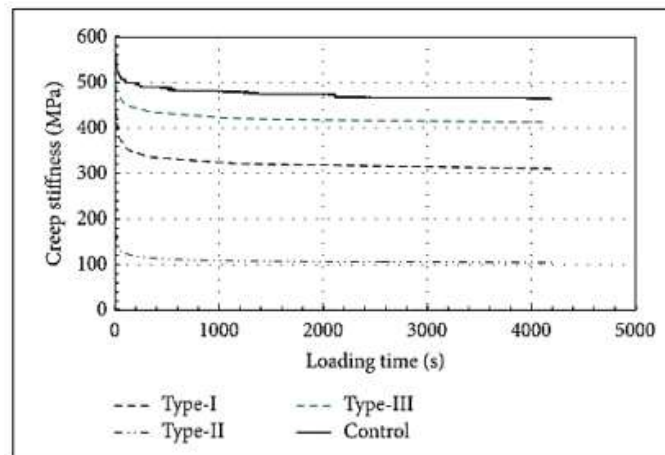
Figura 8. Profundidad de la huella vs tamaño del GCR.



Fuente: (Xiao, 2009)

Xiao tomó como referencia el tamaño de las partículas de GCR para de esta manera caracterizar el ahuellamiento presente en el material y los ubicó en la siguiente tabla, en la cual se puede concluir que el tamaño que genera menor ahuellamiento está en el rango de 0.5-0.7 mm (Díaz & Castro, 2017)

Figura 9. Resistencia a la tensión vs Tiempo de aplicación de carga



Fuente: (MURAT KARACASU, 2015)

Como se puede observar en las dos investigaciones la forma de las partículas de GCR son granulares, mientras que el tamaño difiere en 2 mm por tal motivo se debe determinar qué factor debe priorizarse en función de evitar el aumento del ahuellamiento y la resistencia a la tensión (Díaz & Castro, 2017)

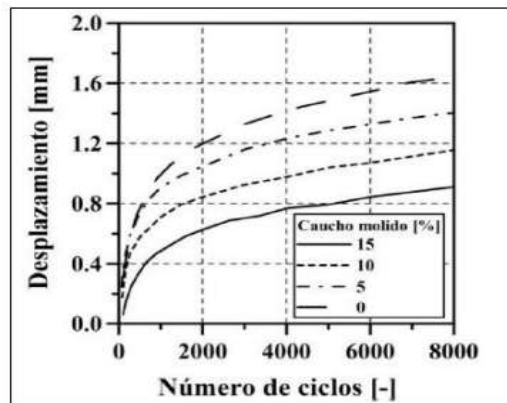
2.11.2 Porcentaje de GCR

Con el fin de determinar cuánto era el porcentaje de GCR más adecuado para agregar a la mezcla asfáltica, el científico Shen realizó un estudio en el cual se observa que según el por-

centaje presente en la mezcla asfáltica generaba una determinada deformación, mientras que a su vez Xiao hizo lo propio con el ahuellamiento. (Díaz & Castro, 2017)

Cuando se habla de deformación se debe hacer alusión al proceso en el que el asfalto se va moviendo causado por el desgaste provocado por el número de ciclos a los que se somete. (Díaz & Castro, 2017)

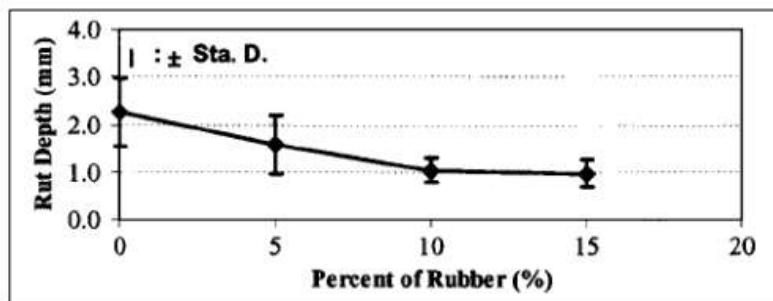
Figura 10. Resistencia a la Deformación permanente



Fuente: (Shen, 2007)

Como es apreciable en la gráfica Shen usó una serie de porcentajes de GCR en los que se encuentran valores que van desde 0% hasta 15%, en los cuales se observa que la presencia de material cumple un papel directamente proporcional al número de ciclos vs desplazamiento, concluyendo que un mayor porcentaje de GCR genera un aumento en el número de ciclos, lo que a su vez es traducido en un menor desplazamiento, por medio de los resultados obtenidos deduce que el porcentaje más óptimo para usar es del 15% de material granular de caucho, el cual es el máximo porcentaje que se recomienda a usar, todo debido a que la inclusión de un mayor porcentaje puede causar la pérdida de propiedades del asfalto. (Díaz & Castro, 2017)

Figura 11. Profundidad de la huella vs porcentaje de GCR

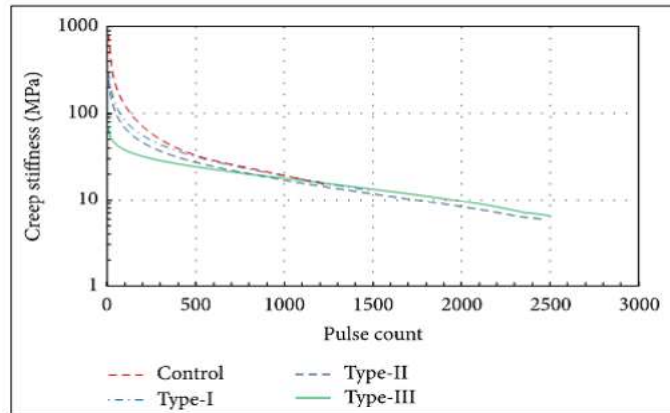


Fuente: (Xiao, 2009)

Por otro lado, Xiao realizó su estudio pertinente que le permitiera obtener un mejor desempeño que reduzca el ahuellamiento, Xiao usó los mismos porcentajes de GCR para su estudio del caso anterior, con el cual determinó que el mejor desempeño (menor ahuellamiento) iba a ser obtenido en el 15%. (Díaz & Castro, 2017). Siendo unánime la decisión por parte de los

dos investigadores, decidiendo que el mejor desempeño al agregar el GCR iba a ser de un 15% con respecto al peso de la mezcla. (Díaz & Castro, 2017)

Figura 12. Resistencia a la Tensión vs ciclos de carga



Fuente: (MURAT KARACASU, 2015)

Las siguientes tablas fueron realizadas por Murat en las cuales compara la resistencia en cada uno de los casos en los cuales relacionaba la comparación de la resistencia a la tensión del asfalto común con las resistencias a la tensión de los asfaltos modificados con las diferentes formas de grano y tamaño (Díaz & Castro, 2017)

En las anteriores gráficas se hace referencia a material tipo 1 y tipo 2, haciendo alusión al asfalto modificado, especificando que los dos tipos de material se caracterizan principalmente por la forma de presentación ya que el tipo 1 son granos que no superan el tamiz #40, de igual manera el tipo 2 cumple con la misma condición de tamaño, la diferencia es la presentación en forma de tiras irregulares y el tipo 3 hace referencia al asfalto modificado con GCR en forma granular con tamaño de partículas que superan el tamiz #40 y estos resultados son comparados con respecto a un asfalto tradicional para de esta manera tener veracidad en los resultados. (Díaz & Castro, 2017)

En la primera figura N° 9 se tiene como referencia el asfalto tradicional el cual presenta una resistencia a la tensión causado por el paso constante de vehículos siendo observable en la figura, es comparado con los asfaltos modificados dando como resultado que las características similares las presenta el material tipo 3 es decir con GCR que pasa el tamiz #40, en el parámetro de resistencia a la tensión el material tipo 3 presenta valores entre 470 Mpa y el tradicional alcanza 500 Mpa, el tipo 1 y tipo 2 mostraron deficiencia en este campo ya que los resultados no superan los 400 Mpa. (Díaz & Castro, 2017)

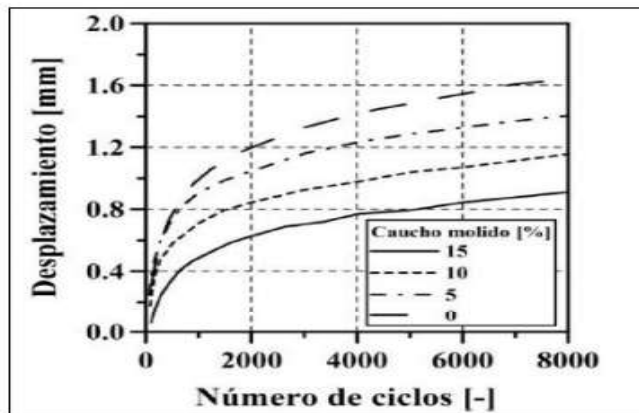
En la segunda gráfica Murat observa que de igual forma como sucedió en el caso anterior el que genera una mayor resistencia es el asfalto convencional, pero el asfalto modificado tipo 3 presenta una resistencia similar, como bonus permite un número mayor de ciclos de carga, las otras muestras son despreciables debido a los resultados obtenidos (Díaz & Castro, 2017). Por los resultados anteriormente mencionados se consideró que el tamaño y forma del GCR que presenta un mejor comportamiento es la granular frente al resto de los tipos de triturado y este con un tamaño menor a los 0,4 mm (Díaz & Castro, 2017)

Como se puede observar en las dos investigaciones la forma de las partículas de GCR son granulares, mientras que el tamaño difiere en 2 mm por tal motivo se debe determinar qué factor debe priorizarse en función de evitar el aumento del ahuellamiento y la resistencia a la tensión (Díaz & Castro, 2017)

2.11.3 Porcentaje de GCR

Con el fin de determinar cuánto era el porcentaje de GCR más adecuado para agregar a la mezcla asfáltica, el científico Shen realizó un estudio en el cual se observa que según el porcentaje presente en la mezcla asfáltica generaba una determinada deformación, mientras que a su vez Xiao hizo lo propio con el ahuellamiento. (Díaz & Castro, 2017). Cuando se habla de deformación se debe hacer alusión al proceso en el que el asfalto se va moviendo causado por el desgaste provocado por el número de ciclos a los que se somete. (Díaz & Castro, 2017)

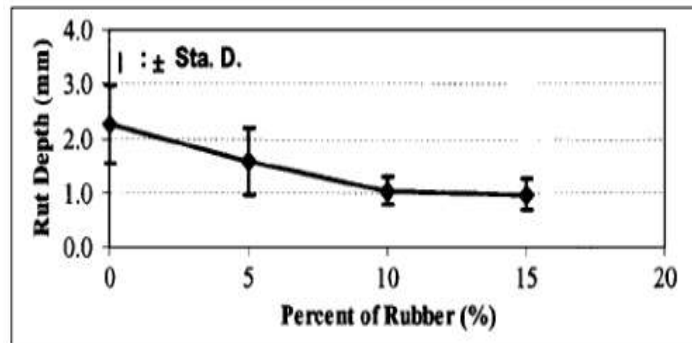
Figura 13. Resistencia a la Deformación permanente



Fuente: (Shen, 2007)

Como es apreciable en la gráfica Shen usó una serie de porcentajes de GCR en los que se encuentran valores que van desde 0% hasta 15%, en los cuales se observa que la presencia de material cumple un papel directamente proporcional al número de ciclos vs desplazamiento, concluyendo que un mayor porcentaje de GCR genera un aumento en el número de ciclos, lo que a su vez es traducido en un menor desplazamiento, por medio de los resultados obtenidos deduce que el porcentaje más óptimo para usar es del 15% de material granular de caucho, el cual es el máximo porcentaje que se recomienda a usar, todo debido a que la inclusión de un mayor porcentaje puede causar la pérdida de propiedades del asfalto. (Díaz & Castro, 2017)

Figura 14 Profundidad de la huella vs porcentaje de GCR



Fuente: (Xiao, 2009)

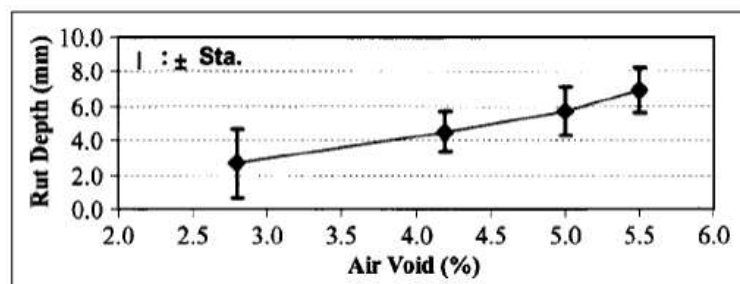
Por otro lado, Xiao realizó su estudio pertinente que le permitiera obtener un mejor desempeño que reduzca el ahuellamiento, Xiao uso los mismos porcentajes de GCR para su estudio del caso anterior, con el cual determinó que el mejor desempeño (menor ahuellamiento) iba a ser obtenido en el 15%. (Díaz & Castro, 2017). Siendo unánime la decisión por parte de los dos investigadores, decidiendo que el mejor desempeño al agregar el GCR iba a ser de un 15% con respecto al peso de la mezcla. (Díaz & Castro, 2017)

2.11.4 Contenido de vacíos de aire en la mezcla asfáltica

En el proceso de compactación del asfalto es posible que se presenten diferentes tipos de vacíos lo cual compromete el correcto funcionamiento del material, Xiao por medio de un estudio determinó la influencia del ahuellamiento con respecto a la presencia del aire en la mezcla y cómo este afecta el comportamiento mecánico del asfalto. (Díaz & Castro, 2017)

El contenido de vacíos hace referencia a la cantidad de aire que entra a la mezcla y es sacado en el momento de la compactación del asfalto en campo. Xiao realizó un estudio en el cual demostraba la forma en la que el ahuellamiento podría incrementar con respecto al porcentaje de aire presente en la mezcla, mientras que Lee determinó el material que iba a verse más afectado por el porcentaje de aire con respecto al ahuellamiento (Díaz & Castro, 2017)

Figura 15 Profundidad de la huella vs porcentaje de vacíos de aire

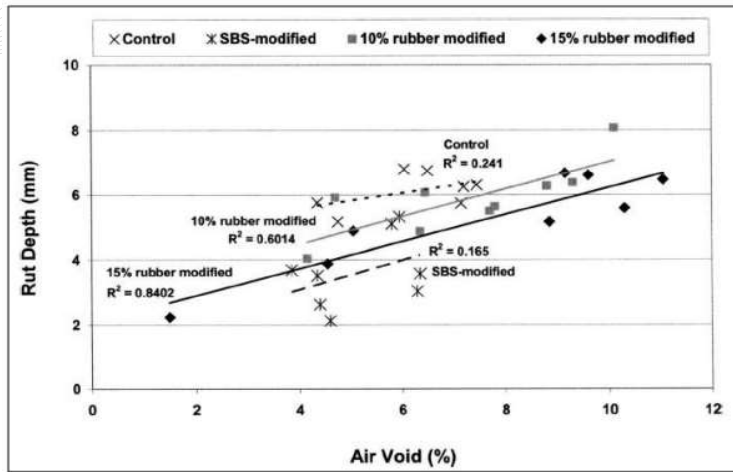


Fuente: (Xiao, 2009)

Xiao al observar los resultados logró comprobar que el aire almacenado en la mezcla puede afectar el ahuellamiento volviendo más propenso el asfalto a sufrir daños, por otra parte, la dificultad que tiene el hecho de extraer el aire en la compactación sin dañar la muestra es alto,

por ello Xiao optó por dejar un mínimo porcentaje (2,7%) de aire para que el asfalto tenga una mayor vida útil. (Díaz & Castro, 2017)

Figura 16. Profundidad de la huella vs porcentaje de vacíos



Fuente: (Shen, 2007)

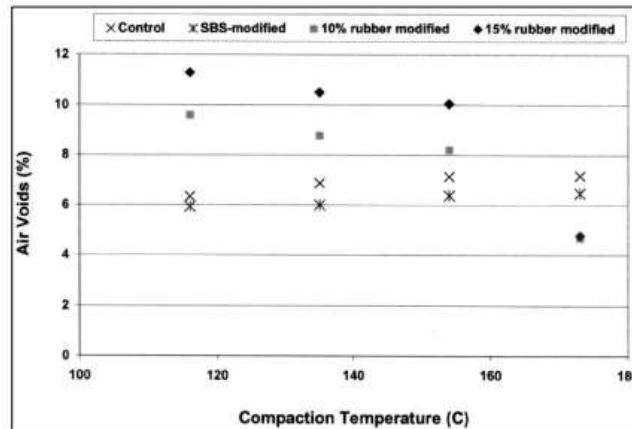
En la investigación elaborada por Lee, se analizó el asfalto convencional y materiales que modificaron el pavimento tales como el asfalto modificado con caucho natural, asfalto modificado con GCR en un 10% y asfalto modificado con GCR al 15%. (Díaz & Castro, 2017)

Por medio de la gráfica Lee pudo determinar que el material que menos ahuellamiento iba a sufrir por el porcentaje de aire era el caucho natural, además cabe mencionar que el que mejor comportamiento tuvo con menor porcentaje de aire fue el asfalto modificado con GCR al 15%, siendo incluso menor el ahuellamiento que en cada uno de los casos presentados con asfalto convencional. (Díaz & Castro, 2017)

2.11.5 Procesos Constructivos

Es de importancia conocer el proceso constructivo de cada uno de los pavimentos ya que este puede afectar el comportamiento del asfalto, por lo tanto, es de interés conocer la temperatura y el nivel de rodadura necesario para tener un mejor desempeño. En su investigación, Lee se enfocó en el porcentaje de aire que se iba a almacenar, esto de acuerdo a la temperatura que presenta la mezcla con diferentes tipos de asfaltos modificados y con el asfalto convencional para determinar su comportamiento, de esta manera observar si este logra desempeñarse de forma adecuada, todos los casos obtenidos por Lee son en el instante en el que el asfalto está siendo compactado (Díaz & Castro, 2017)

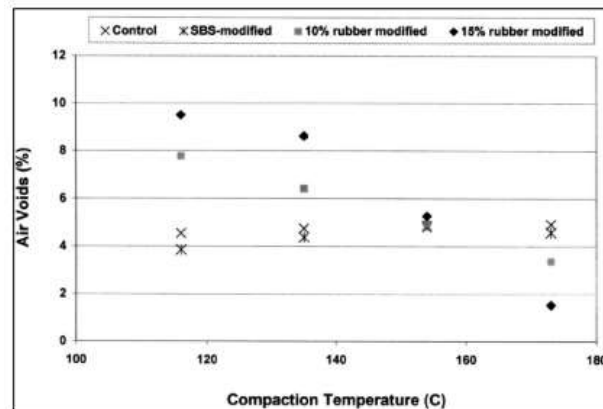
Figura 17. Porcentaje de vacíos vs temperatura de compactación. (nivel de giro de 30)



Fuente: (Lee, 2007)

En la tabla mostrada anteriormente, Lee observó que el mejor comportamiento presentado había sido por parte del asfalto convencional hasta los 160° de temperatura, debido a que el único caso en que el asfalto se comportó mejor fue a los 173°C, siendo esta una temperatura bastante alta para que llegue y sea compactado, por tal motivo Lee creyó que se debía al nivel de giro, en este caso 30, (el nivel de giro hace referencia al número de veces que es compactado el asfalto), por tal motivo decide que debe aumentar el nivel de giro a 70 y volver a realizar la comparativa de los materiales. (Díaz & Castro, 2017)

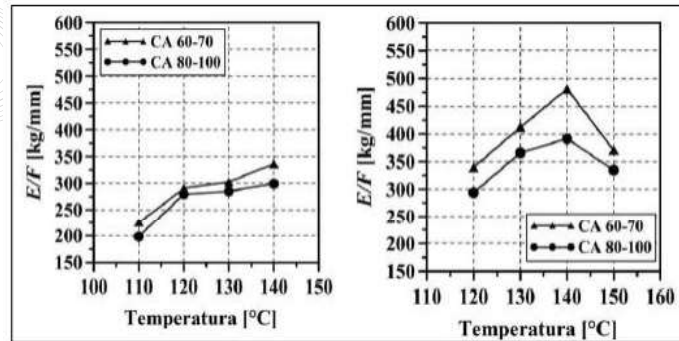
Figura 18. Porcentaje de vacíos vs temperatura de compactación. (nivel de giro de 70)



Fuente: (Lee, 2007)

En la gráfica anterior, Lee dio a conocer los datos obtenidos al haber aumentado el nivel de giro a 70, se puede observar que el porcentaje de aire disminuye en cada una de las temperaturas, siendo evidente que se obtiene un mejor comportamiento a los 160°C en la cual el GCR al 15% se comporta de la misma forma que el asfalto convencional por tal motivo Lee demostró que la temperatura más óptima es a los 155°C. (Díaz & Castro, 2017). En otros estudios, Rondón demuestra que la temperatura más adecuada para la compactación se encuentra en los 150°C, siendo esta la temperatura que permite tener una mayor resistencia mecánica por parte del asfalto. (Díaz & Castro, 2017)

Figura 19. Resistencia Mecánica vs Temperatura de Compactación



Fuente: (RONDÓN, 2015)

En la gráfica Rondón logra demostrar que a menor temperatura la resistencia mecánica del asfalto modificado es baja más su resistencia es superior a la del asfalto convencional, pero como se puede observar en la gráfica la temperatura a la cual se estabiliza la resistencia en los dos casos de estudio está entre los valores que van desde los 300 a 350 kg/mm (Díaz & Castro, 2017)

2.11.6 Consumo de llantas para el aprovechamiento en las mezclas asfálticas

En el caso de implementar los asfaltos modificados con GCR se debe tener un cálculo aproximado de la cantidad necesaria de material para poder construir el tramo de una vía, por ello se determina que para un km de capa asfáltica de 3,5 m de ancho para 3 y 33 cm de mezcla se necesitan de 2 y 27 toneladas respectivamente, cerca de 1553 neumáticos km/carril en una capa de 5 cm de espesor de asfaltos. (Díaz & Castro, 2017)

3. CONCLUSIONES

El material original sufre una serie de alteraciones en su comportamiento al realizarle procesos térmicos o de vulcanización, de esta manera se obtiene un componente con mejor desempeño mecánico y mayor calidad para ser usado como agregado en obras civiles.

El tamaño de los agregados tales como los rellenos son fundamental para que el caucho otorgue una mejor resistencia frente a las cargas a las cuales se va a someter.

El carbón natural tiene mejor desempeño como elastómero y el humo negro representa el relleno que mejor comportamiento tiene, esto gracias al tamaño de sus partículas las cuales se encuentran en los niveles de nanómetros, estos componentes también tienen un papel fundamental en la deformabilidad del material.

Hasta el momento solo se recomienda el uso del caucho como aditivo en concretos de baja resistencia ya que como se ha demostrado en múltiples estudios la generación de vacíos por el agregado genera que el concreto sea más permeables y presente grandes deformidades lo cual genera altos niveles de agrietamiento.

La presencia de granulares de caucho en mezclas asfálticas da beneficios en una serie de aspectos como lo son el ahuellamiento, porcentaje de aire, deformación, resistencia a la tensión, etc.

La adición de caucho en concretos presenta diferentes cualidades y otorga características de aislamiento acústico, ya que los gránulos de caucho reflejan los sonidos y la temperatura lo cual hace que funcione como aditivo en recubrimiento de estructuras.

El nivel de giro que permite la mezcla para que tenga una compactación adecuada en el asfalto modificado debe ser mayor con el fin generar una reducción en el porcentaje de aire acumulado en esta, esto debido a que el GCR modificado tiende a tener la capacidad almacenar mayor cantidad de aire a menores temperaturas, lo que indica más esfuerzo para extraer el aire.

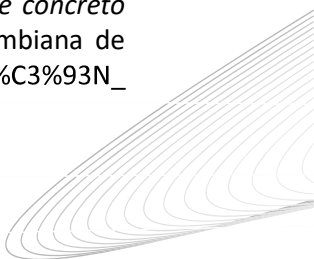
El aporte que hace al medio ambiente el uso de asfalto modificado con granulares de caucho reciclado es significativo, debido a la cantidad de neumáticos necesarios para un km de vía (aproximadamente 3100), por tal motivo se recomienda el aumento en esta práctica especialmente en lugares que se encuentren con problemas sanitarios, además, se evidencia implementación en vías de baja transitabilidad, ya que las propiedades del material aún están en estudio y por tal motivo no se conoce con certeza el tiempo de vida útil.

4. REFERENCIAS

- [1] Aguado , L. (2010). *Reciclado de neumáticos para la fabricación de láminas impermeabilizantes en la construcción*. Obtenido de Universidad politécnica de Madrid: http://oa.upm.es/5497/2/TESIS_MASTER_LUIS_AGUADO_ALONSO.pdf
- [2] Andrade, C. (Agosto de 2011). *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad*. Obtenido de Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción: <http://www.redalyc.org/pdf/4276/427639585001.pdf>
- [3] Angulo, R., & Duarte, J. (Agosto de 2005). *Modificación de asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos*. Obtenido de Universidad industrial de Santander: https://www.academia.edu/14221736/MODIFICACIÓN_DE_UN_ASFALTO_CON_CAUCHO_RECICLADO_DE_LLANTA_PARA_SU_APLICACIÓN_EN_PAVIMENTOS
- [4] Augusto, J., & Legarda , P. (2011). *Correlación entre el modulo de rotura y la resistencia a compresion del concreto fabricado con materiales pétreos*. Obtenido de Universidad de nariño: <http://sired.udenar.edu.co/4052/1/84720.pdf>
- [5] Bekkedahl, N. (1946). Caucho natural y caucho sintético. En B. Norman, *Caucho natural y caucho sintético* (págs. 53-64). Medellín : Revista facultad Nacional de agronomía .
- [6] Bellas, R. (Mayo de 2012). *Formulación y caracterización de materiales compuestos integrados por una matriz de caucho estireno-butadieno (SBR) reforzada con nanoarcilla*. Obtenido de Universidad de Coruña: <https://core.ac.uk/download/pdf/61906117.pdf>
- [7] Cardona, P. (2016). *Estudio de factibilidad para la creación de una planta de producción de granos de caucho (GCR) mediante el reciclaje de llantas fuera de uso*. Obtenido de

Universidad tecnológica de Pereira: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/6123/6581186132C268ef.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [8] Castañeda, A., Díaz, N., Gonzáles, E., Martínez, M., & Corvo, F. (2005). *Influencia de la penetración de iones cloruros en el hormigón armado a diferentes relaciones agua/cemento y condiciones de exposición*. Obtenido de Revista CENIC Ciencias Químicas: <http://www.redalyc.org/pdf/1816/181620511008.pdf>
- [9] Castro, G. (Diciembre de 2008). *Materiales y compuestos para la industria del neumático*. Obtenido de Departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A: https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Numatico.pdf
- [10] Díaz, C., & Castro, L. (2017). *repository usta*. Obtenido de repository usta: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2633/Diazcesar2017.pdf>
- [11] Espinal, C., Martínez, H., Salazar, M., & Barrios, C. (Marzo de 2005). *La cadena del caucho en Colombia*. Obtenido de Ministerio de agricultura y desarrollo rural observatorio agrocadenas Colombia: <https://conectarural.org/sitio/sites/default/files/documentos/La%20cadena%20del%20caucho%20en%20colombia%20una%20mirada%20global%20de%20su%20estructura%20y%20dinamica%201991-2005.pdf>
- [12] Flores Medina, N., Reyes García, Haijarasouliha, K., Guadagnini, M., & Raffoul, S. (2018). Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction. *Construction and Building Materials*, 884-897.
- [13] Lee, S. J. (2007). Laboratory Study of the Effects of Compaction on the Volumetric and Rutting Properties of CRM Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1079-1089.
- [14] Lozano, A., Sierra, G., & Gellego, J. (10 de Junio de 2013). *Efecto de la variación de la concentración de ácido fórmico y ácido acético en el proceso de coagulación del látex proveniente del caucho natural Hevea Brasiliensis*. Obtenido de Universidad de la Amazonia: <file:///C:/Users/cpe/Downloads/249-1103-1-PB.pdf>
- [15] Mészáros, L., Bárány, T., & Czvikovszky, T. (Septiembre de 2012). *EB-promoted recycling of waste tire rubber with polyolefins*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X11004567?via%3Dihub>
- [16] Ministeriodeambiente y desarrollo sostenible. (Noviembre de 2014). *Plan vías compatibles con el clima*. Obtenido de minambiente: http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Plan_nacional_de_adaptacion/Plan_V%C3%ADas-CC_V%C3%ADas_Compatibles_con_el_Clima.pdf
- [17] MURAT KARACASU, V. O. (2015). "A Study on the Rheological Properties of Recycled Rubber-Modified Asphalt Mixtures. *The Scientific World Journal*, 9.
- [18] Ortega, L., Cervený, S., Sill, C., Isitman, N., Rodríguez, A., Meyer, M., . . . Schwartz, G. (20 de Mayo de 2019). The effect of vulcanization additives on the dielectric response

- of styrene-butadiene rubber compounds. *Polymer*, 205-212. Obtenido de <https://www.sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0032386119303052>
- [19] Peláez, G., Velásquez, S., & Giraldo, D. (14 de febrero de 2017). *Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura*. Obtenido de Scielo: <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v27n2/0124-8170-cein-27-02-00027.pdf>
- [20] Pfretzschner, J., & Rodriguez, R. (1999). *Acoustic properties of rubber crumbs*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941898000099?via%3Dihub>
- [21] Ramarad, S., Khalid, M., Ratnam, C., Luqman, A., & Rashmi, W. (2015). *Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S007964251500033X?via%3Dihub>
- [22] Realpe, K. (Marzo de 2014). *Evaluación de la eficiencia de la planta productora de azufre de refinería estatal esmeraldas*. Obtenido de Universidad de Guayaquil: https://www.academia.edu/37763044/Evaluaci%C3%B3n_de_Eficiencia_de_la_planta_productora_de_azufre_de_refiner%C3%ADa_estatal_Esmeraldas
- [23] Rodríguez, V. (2005). *Proceso de bio desulfurización como mecanismo de manejo eficiente de los desechos de cauchos producidos por eterna S.A.* Obtenido de Universidad de los andes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22471/u263777.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [24] Rondón. (2015). MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON GRANO DE CAUCHO DE LLANTA. *ESTADO DEL CONOCIMIENTO Y ANÁLISIS DE UTILIZACIÓN EN COLOMBIA*.
- [25] Shen, J. A.-J. (2007). Characterization of Rejuvenated Aged CRM Binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 515-522.
- [26] Solis, R. (Abril de 2018). *Carbonatación natural del concreto a los cuatro años*. Obtenido de Universidad Autónoma de Yucatán: https://www.researchgate.net/publication/324413512_carbonatacion_natural_del_concreto_a_cuatro_anos
- [27] Strano, M., Rane, K., Briatico, F., & Di Landro, L. (2019). Extrusion of metal powder-polymer mixtures: Melt rheology and process stability. *Journal of Materials Processing Technology*. Obtenido de <https://www.sciencedirect-com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/science/article/pii/S0924013619302146>
- [28] Struktol. (4 de Noviembre de 2014). *Manual de caucho*. Obtenido de struktol: http://www.struktol.com/pdfs/Manual_del_caucho.pdf
- [29] Torres, H. (2014). *Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho*. Obtenido de Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito: https://www.academia.edu/15946905/VALORACI%C3%93N_
- 

- [30] Tzunun, L. (Junio de 2007). *Calidad de alfombra fabricada de desechos de hule natural*. Obtenido de Universidad de San Carlos de Guatemala: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1054_Q.pdf
- [31] Urrego, W., Velásquez, S., Giraldo, D., & Posada, J. (Diciembre de 2017). *Efecto del sistema de vulcanización en la red entrecruzada y en la reacción química de vulcanización del caucho natural*. Obtenido de Universidad EIA: https://www.researchgate.net/publication/324832471_Efecto_del_sistema_de_vulcanizacion_en_la_red_entrecruzada_y_en_la_reaccion_quimica_de_vulcanizacion_del_caucho_natural
- [32] Wang, S., Wang, Q., Wu, X., & Zhang, Y. (15 de Septiembre de 2015). *Asphalt modified by thermoplastic elastomer based on recycled rubber*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815300027?via%3Dihub>
- [33] Xiao, F. a. (11 de septiembre de 2009). *researchgate*. Obtenido de researchgate: https://www.researchgate.net/publication/269146611_HP-GPC_Approach_to_Evaluating_Laboratory_Prepared_Long-Term_Aged_Rubberized_Asphalt_Binders
- [34] Yilmaz, A., & Degirmenci, N. (Mayo de 2009). *Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X08003875?via%3Dihub>