



USO DE POLVO DE CAUCHO DE LLANTAS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Ing. Ellen Rodríguez Castro

Correo electrónico: ellen.rodriguez@ucr.ac.cr

Jefe de Laboratorio de Ligantes Asfálticos, LanammeUCR

INTRODUCCIÓN

Desde el año 2007 Costa Rica intenta reducir el impacto de las llantas que se desechan a través del Decreto N° 33745-S “Reglamento sobre llantas de desecho” publicado en La Gaceta N° 92 del 15 mayo de 2007, y uno de los usos sugeridos es como agregado de pavimentos asfálticos, no obstante este objetivo no se ha alcanzado. Según el Reporte de Sostenibilidad 2014 de la empresa Bridgestone de Costa Rica, Fundellantas recolectó más de 163 771 llantas, pero esto representa solo un pequeño porcentaje de las llantas que se desechan.

Para poder procesar las llantas como componente de la mezcla asfáltica es necesario conocer su composición. El caucho natural o sintético es el componente principal, el cual tiene un encordado de acero y fibra textil. La composición varía dependiendo del tipo de llanta y del fabricante, pero en general los porcentajes se acercan a los detallados en la Tabla 1.

Además, las llantas tienen una gran cantidad de componentes químicos. Los principales se mencionan en la Tabla 2.

Existe una clasificación adicional que reúne los principales componentes en cuatro grandes grupos y fija límites de composición que dependen de la procedencia de la llanta como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 1. Composición de la llanta según el tipo

Componente	Composición	
	Llanta de carro liviano	Llanta de camión
Caucho natural	14 %	27 %
Caucho sintético	27 %	14 %
Negro de humo (carbono)	28 %	28 %
Acero	14-15 %	14-15 %
Otros Aditivos	16-17 %	16-17 %
Peso promedio (óxidos, etc.)	8,6 kg	45,4 kg

Fuente: Guía Práctica Sobre Re-Usos de Llantas Usadas Para Municipalidades

Tabla 2. Composición química de las llantas

Elemento o compuesto	Composición
Carbono (C)	70 %
Hidrógeno (H)	7 %
Azufre (S)	1,3 %
Cloro (Cl)	0,2-0,6 %
Hierro (Fe)	15 %
Óxido de Zinc (ZnO)	2
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	5 %
Cromo (Cr)	97 ppm
Níquel (Ni)	77 ppm
Plomo (Pb)	60 – 760 ppm
Cadmio (Cd)	5 – 10 ppm
Talio (Tl)	0,2 – 0,3 ppm

Fuente: Guía Práctica Sobre Re-Usos de Llantas Usadas Para Municipalidades.

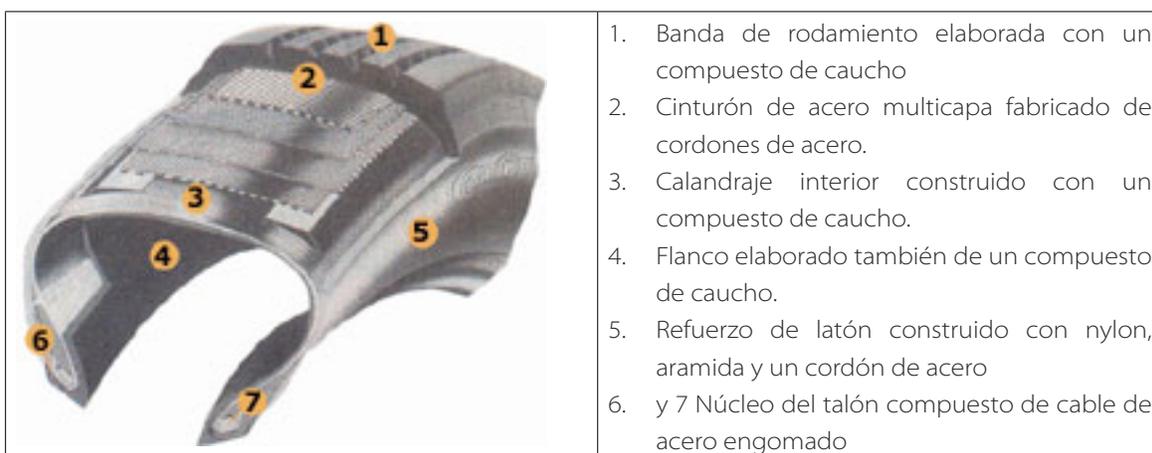
Palabras claves: caucho de llanta, vía seca, vía húmeda, asfalto modificado

Tabla 3. Composición de las llantas por grupos

Compuesto	Definición	Composición	
		Mínima	Máxima
Extracto cetónico	Cantidad de aceites, sulfuros libres, plastificantes y antioxidantes solubles en acetona, ácidos grasos y productos bituminosos	10 %	20 %
Polímero	De alto peso molecular como caucho natural vulcanizado, estireno butadieno, polibutadieno, entre otros	40 %	55 %
Negro de humo	Cantidad de antioxidantes	30 %	38 %
Cenizas	Contenido de polvo mineral (arcilla, ZnO, etc.)	3 %	7 %

Fuente: Rubber Manufacturers Association

Las llantas están estructuradas en capas concéntricas que le dan las características de resistencia y flexibilidad requeridas. En la Figura 1 se detallan las capas que conforman la estructura de la llanta y los materiales de los que está elaborada cada capa.



1. Banda de rodamiento elaborada con un compuesto de caucho
2. Cinturón de acero multicapa fabricado de cordones de acero.
3. Calandraje interior construido con un compuesto de caucho.
4. Flanco elaborado también de un compuesto de caucho.
5. Refuerzo de latón construido con nylon, aramida y un cordón de acero
6. y 7 Núcleo del talón compuesto de cable de acero engomado

Figura 1. Componentes de la estructura de las llantas.

(Fuente: <http://www.catech.fr>)

La estructura y composición de la llanta son factores que hay que considerar cuando se va a utilizar el caucho en pavimentos asfálticos.

TRITURACIÓN Y MOLIENDA

Para usar las llantas como aditivo o modificante en las mezclas asfálticas se debe reducir el material a un tamaño de partícula entre 0,5 mm y 2 mm, según la aplicación.

El proceso primario de la reducción de tamaño de la llanta es la trituración, que consiste en romper mecánicamente la llanta, retirando el acero por medio de un separador magnético o a través de un mecanismo extrusor. (4). De igual manera se debe separar la fibra, para lo que generalmente se utiliza una cinta balística, que separa la fibra por su masa y por su textura.

Los procesos secundarios para la reducción del tamaño de las partículas pueden clasificarse como proceso a temperatura ambiente, proceso criogénico y proceso de molienda vía

húmeda. El proceso a temperatura ambiente tiene dos modalidades. La primera es por granulación y la segunda es molienda. En ambos casos el caucho se muele hasta tamaños controlados por tamices. El caucho obtenido por el proceso ambiental, puede clasificarse según su tamaño como cortado, en astillas, en polvo y en migas. (8). El proceso se muestra en la Figura 2.

El proceso inicia con la trituradora preliminar (A) que reduce el tamaño de las llantas a unos 2,5 cm aproximadamente. La siguiente etapa (B) es el granulador que disminuye el tamaño de las partículas a 9,5 mm o menos. El acero se remueve magnéticamente y las fibras con una combinación de tamizadoras vibratorias y tamices (D). Las siguientes etapas están dedicadas a la reducción del tamaño de partícula hasta 0,85 mm o menos, según se requiera (10). El producto final dependerá de la cantidad de operaciones de molienda que se adicionen y si es necesario pulverizadores para obtener partículas entre (600-800) micrómetros.

El proceso de molienda criogénico utiliza nitrógeno líquido u otros medios para congelar los trozos de llanta triturados hasta $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y reducir al tamaño de partícula deseado quebrando el material (4)

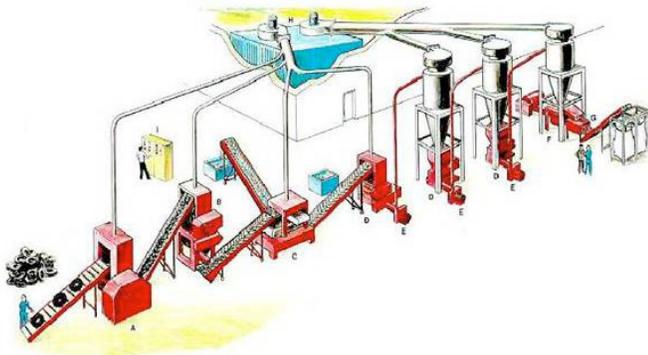


Figura 2. Ejemplo de proceso de molienda a temperatura ambiente.

Fuente: (Way B., Kaloush, & Prapoorna-Biligiri, 2011)

El proceso de molienda criogénico (ver Figura 3) utiliza nitrógeno líquido u otros medios para congelar los trozos de llanta triturados hasta $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y reducir al tamaño de partícula deseado quebrando el material.(4)

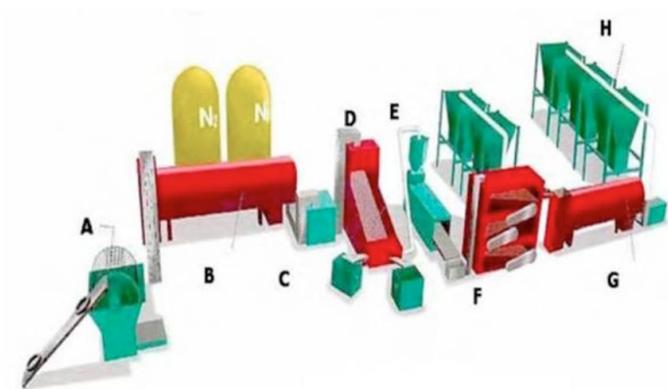
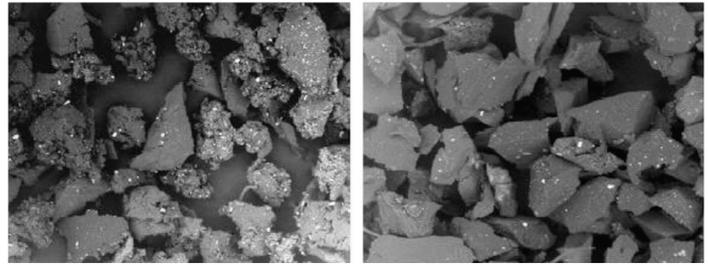


Figura 3. Ejemplo de proceso de molienda criogénica.

Fuente: (Way B., Kaloush, & Prapoorna-Biligiri, 2011)

Al igual que en caso anterior, la primera etapa (A) corresponde a la trituración de la llanta, los trozos se transportan a un túnel de enfriamiento (B). Cuando todos los polímeros del caucho alcanzan el punto de transición vítrea, se comporta como un vidrio, entonces se envían las partículas a un molino de martillo (C), donde las partículas se rompen en granulos de distintos tamaños. Al mismo tiempo se liberan las fibras y el acero (D). El siguiente paso es el secado de los granulos (E) para después ser clasificados por tamaño (F). (10)



a.

b.

Figura 4. Caucho molido a. aplicando el proceso a temperatura ambiente y b. aplicando el proceso criogénico.

Fuente (FHWA, 2014)

Uso del caucho en pavimentos flexibles

El caucho se utiliza en pavimentos asfálticos de dos maneras, como modificador del asfalto o como mejorador de la mezcla asfáltica. En el primer caso se conoce como proceso de vía húmeda y el segundo como vía seca.

El uso de polvo de caucho proveniente de llantas como modificador de asfalto fue desarrollado por Charles McDonalds en los años 60, para tratamientos superficiales y bacheos. En los años 70 su uso se extendió a Europa, principalmente en Bélgica y Francia.

En 1974 se utilizó en Barcelona, España y los estudios del Ingeniero Juan Gallego Medina impulsaron el uso del caucho desde 1990. Existen de igual manera experiencias en América Latina, específicamente en México y en Colombia. En Brasil, existen tramos de prueba, al igual que en Argentina desde el año 2002 y en Chile desde el año 2004. (8)

Desde 1997 la Asociación Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) establece especificaciones para el asfalto modificado con caucho a través de las normas ASTM D 6114 y ASTM D 8. De igual manera, México lo estandariza a través de la norma N-CMT-4-05-002-06.

Desde el 2007, en Madrid es obligatorio utilizar polvo de caucho en carreteras y una estudiante de doctorado del Departamento de Ingeniería Civil (Transporte y Territorio) de la Universidad Politécnica de Madrid fue galardonada en la II Edición de los "Premios a la Innovación en Infraestructuras Viarias" que concede la Plataforma Tecnológica Española de la Carretera (PTC) por la fabricación a menor temperatura de mezclas asfálticas que contienen polvo de caucho de neumáticos.

Por su parte, la Asociación de Pavimentos de Caucho (RPA, por sus siglas en inglés) indica que este tipo de pavimentos se ha utilizado en 40 estados de Estados Unidos y más de 25 países alrededor del mundo desde 1940. (9)

Esto indica que la adición del caucho a pavimentos asfálticos es una tecnología que se está fortaleciendo con el tiempo. Según la RPA en Estados Unidos se reciclan alrededor de 10 millones de llantas en técnicas de pavimentación asfáltica.(9).

Tanto para la vía húmeda como para la vía seca, el objetivo es la reacción entre el caucho y el asfalto: digestión del caucho en el asfalto, para lo cual se requiere temperaturas elevadas y un tiempo de digestión suficiente. El requisito anterior varía de acuerdo con la vía de incorporación que se utilice y con algunas otras condiciones se deben tomar en cuenta al seleccionar los métodos. (1)

Durante la interacción asfalto-caucho, las partículas de caucho absorben las fracciones aromáticas, por lo que aumentan de volumen. Alrededor del caucho se forma una capa blanda o gel que se desprende por el efecto de la agitación. Durante este mismo proceso el caucho se integra con el asfalto. Si la energía aplicada (agitación o temperatura) es muy alta o prolongada, la partícula de caucho desaparece en el seno de la matriz asfáltica. (1)

MATERIALES

Al igual que en cualquier otra mezcla asfáltica los materiales deben cumplir con parámetros de calidad. En el caso del agregado y el asfalto, los parámetros son ampliamente conocidos, por lo que no se hará referencia a ellos. Pero es

importante señalar que la selección debe responder a un diseño de mezcla que involucre todos los materiales. Existen varios manuales que describen los requerimientos para la utilización de asfalto y caucho en diferentes técnicas, como el "Asphalt Rubber Usage Guide" del Departamento de Transporte de California elaborado en el 2003 o el "Rubber Modified Asphalt Technical Manual" de Ontario, elaborado en el 2013.

Es importante hacer énfasis en que cada manual determina las propiedades de los materiales y de la mezcla dependiendo de las características del proyecto, de la técnica que se utilizará y de las características de los materiales base.

Caracterización del Caucho

Las principales características que se deben considerar, según la "Guía para la Fabricación de Betunes con Polvo Neumático" (1) son:

- Composición química: Para determinar el origen del caucho se utiliza la prueba de 14C (Carbono 14) que identifica el caucho natural.
- Densidad aparente: En general tiene un valor de 500 kg/m³ (0,5 g/mL), pero varía un poco dependiendo de la fuente de la llanta y de la granulometría.
- Granulometría: Pueden variar desde 3 mm a partículas muy pequeñas. Se recomienda un tamaño menor a 0,8 mm aproximadamente (pasando malla N° 20) para favorecer la digestión. Como el tamaño de los gránulos no es uniforme, es recomendable hacer un análisis granulométrico.

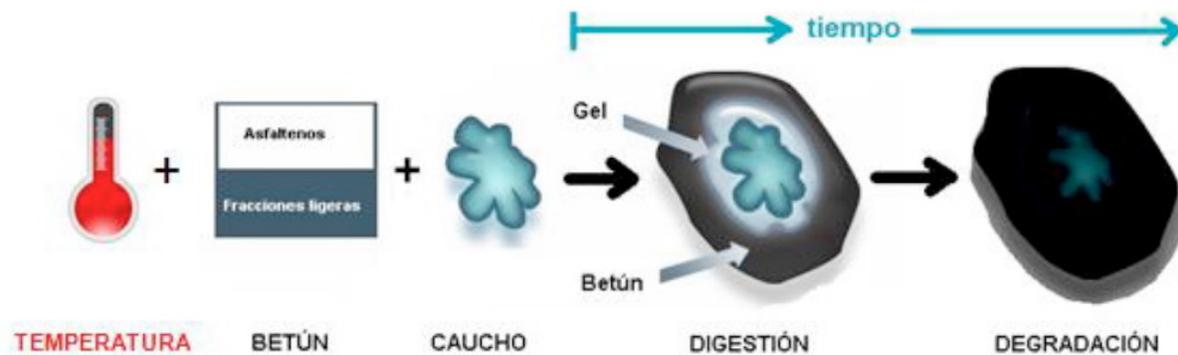


Figura 5. Proceso de digestión del caucho
Fuente: (Gallego-Medina, 2012)

- Contenido de acero o materiales ferromagnéticos: Para determinar el contenido de acero libre se puede aplicar el método establecido en la norma UNE-CEN/TS 14243:2012 EX, en la cual se extiende una capa de menos de 20 cm de 500 g de muestra y se pasa por la superficie un imán donde quedan adheridas las partículas.
- Contenido textil: La presencia de material textil se cuantifica durante el ensayo de granulometría pues las fibras textiles tienden a aglomerarse, por lo que se separan y se pesan.
- Contenido de impurezas: Se utiliza un método densimétrico que consiste en mezclar 150 g con una disolución salina hasta obtener una densidad de 1,25 g/mL, lo cual provoca que materiales como tierra, vidrio o partículas metálicas no magnéticas se precipiten.
- Contenido de humedad: Es similar al ensayo de determinación de humedad de suelos. Las diferencias radican en que la temperatura del horno es de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ y la muestra debe tener una masa mínima de 100 g.

INCORPORACIÓN DEL CAUCHO

Como se había mencionado anteriormente, el caucho se puede incorporar a la mezcla usando dos métodos, vía seca y húmeda. A su vez el de vía húmeda contempla dos opciones. A continuación se detallan los aspectos principales de cada método:

Vía seca

Consiste en la mezcla directa del caucho con los agregados, antes de incorporar el ligante al mezclador. Se considera el caucho como una fracción más del agregado o puede sustituir una pequeña parte del agregado fino. (2)

En general se agrega entre un 1 % y 3 % con respecto a la masa del agregado, con tamaños de partículas desde 2 mm hasta 6,3 mm, aunque algunos manuales recomiendan usar tamaños de partícula más pequeños para favorecer la digestión (3).

El caucho se mezcla con los agregados calientes y se combina con el asfalto en el tambor mezclador a una temperatura superior a la convencional, entre $160 ^\circ\text{C}$ y $180 ^\circ\text{C}$. También se requiere un tiempo de mezclado mayor. La mezcla debe estar almacenada por un tiempo suficiente para completar la digestión, este tiempo se debe determinar en el laboratorio,

pues depende del tipo de mezcla y de las características de los materiales. No se recomiendan temperaturas de compactación menores a $120 ^\circ\text{C}$, pues la alta viscosidad dificulta la trabajabilidad, asimismo se recomienda colocar la mezcla cuando la temperatura ambiental sea mayor a $10 ^\circ\text{C}$ (3). En la Figura 6 se muestra el esquema del proceso.



Figura 6. Proceso de adición del caucho por vía seca.

Fuente: www.rubberizedasphalt.org

A finales de la década de 1980, se desarrolla otra técnica conocida como genérica, que se utiliza para mezclas asfálticas densas en caliente. En este caso el caucho se adiciona como material fino. La granulometría total del caucho se divide en dos fracciones en la que la parte fina reacciona con el asfalto y la parte gruesa se comporta como un agregado elástico en la mezcla asfáltica. Al utilizar esta tecnología el caucho no puede exceder el 2 % del peso total de la mezcla.(8)

Otro método implementado en España es el convencional que utiliza granulometrías convencionales que no requieren cantidades excesivas de asfalto, se usa generalmente 2 % del peso total de los agregados. La granulometría del caucho es muy fina. (3).

Vía Húmeda

En este método el caucho se combina con el asfalto antes de mezclarlo con agregado. Esto requiere de sistemas de alimentación del caucho, tanques de calentamiento y agitación, tanques de reacción y a veces tanques de almacenamiento. (7)

Es una técnica extendida alrededor del mundo que inicia desde 1960 en Estados Unidos. Las especificaciones cambian en cada país o región ya que depende de las características de los materiales y de los tipos e mezclas que utilizan. (7)

La adición de caucho por vía húmeda se ha distinguido en los últimos años como: con agitación y sin agitación. (6). La primera se refiere al caucho adicionado al asfalto en el sitio de fabricación de la mezcla (Ver Figura 7) y el segundo se refiere al asfalto con caucho fabricado por un tercero.

Las condiciones de la vía húmeda con agitación varían alrededor del mundo, pero en general se utilizan temperaturas entre 175 °C y 200 °C y tiempos de mezclado entre 45 min y 60 min, dependiendo de la cantidad de caucho y del asfalto base (5). Si además se incorporan otros aditivos se debe variar la velocidad de agitación. (1).

Los rangos de dosificación del caucho y de tamaño de partícula son amplios, dependiendo de la aplicación. Según la Guía para la Fabricación de Betunes con Polvo Neumático, el rango de caucho varía entre 4 % y 22 % con respecto a la masa del asfalto con partículas de un tamaño máximo de 0,8 mm para todas las aplicaciones (1). En California en cambio, se piden contenidos de caucho mínimos de 15 % y máximos de 22 % con un tamaño de partícula menor a 2,36 mm. (7).

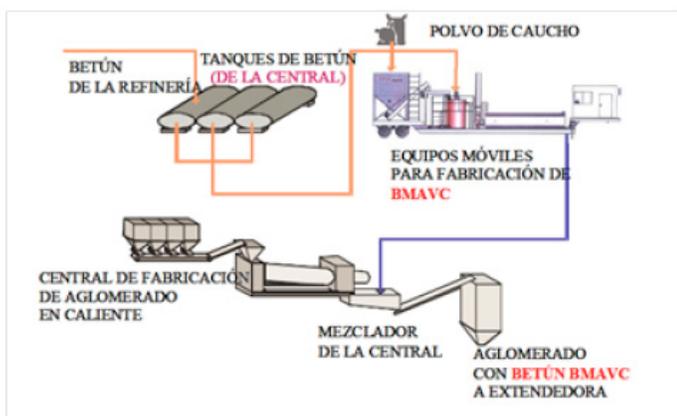


Figura 7. Proceso de adición del caucho por vía húmeda.

Fuente: (CEDEX, 2007)

Es importante mencionar que el aumento de la viscosidad implica que se incrementen las temperaturas de mezclado y compactación. (5)

La vía húmeda sin agitación corresponde a que la adición del caucho la realiza una empresa diferente a la que fabrica la mezcla. Este tipo de asfalto con caucho se elabora con un tamaño de

partícula menor a 0,6 mm para mejorar la estabilidad durante el almacenamiento y con porcentajes entre 5 % y 10 % de caucho, aunque puede variar dependiendo de los requerimientos del fabricante de la mezcla.

BENEFICIOS Y LIMITACIONES

Además de los beneficios ecológicos que provee la adición del caucho al asfalto, también hay importantes beneficios en el desempeño de la mezcla asfáltica, dentro de los cuales se pueden mencionar:

- El caucho aumenta el volumen del asfalto, lo cual permite envolver los agregados con películas más gruesas sin exudación.
- Se modifica la reología del asfalto aumentando la flexibilidad y resiliencia a altas temperaturas
- Se pueden usar en mezclas tibias.
- En algunos casos, se ha detectado reducción en el ruido y mejora en la fricción.
- Varios investigadores han demostrado la reducción de fatiga y reflejo de grietas, mayor resistencia a la deformación permanente y a la oxidación por envejecimiento.
- También se han detectado reducciones en los costos de mantenimiento.
- Existe amplia experiencia en el mundo con gran diversidad de técnicas.

Algunas de las limitaciones que se han identificado son las siguientes:

- Escasas fuentes de polvo de caucho (En Costa Rica no existen todavía).
- Se requieren altas temperaturas de mezclado y compactación, pero esto también se aplica para otros modificantes comerciales muy utilizados.
- Puede haber separación si se almacena sin agitación.
- Es recomendable usarlo después de 24 h de realizada la modificación para que se complete la digestión, sin embargo esto también se debe hacer para algunos otros modificantes.

- No es recomendable almacenarlo por períodos muy extensos.
- Es probable que se emitan olores y emisiones durante la producción y colocación.
- Aumenta la viscosidad del asfalto, lo cual puede dificultar la trabajabilidad.
- Se deben implementar nuevos ensayos para la calidad del caucho y del asfalto.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bermejo-Muñoz, J. M., Gallego-Medina, J., & Saiz-Rodríguez, L. (2014). Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático. Madrid: Signus Ecovalor.
2. Campaña, O., Galeas, S., & Guerrero, V. (2015). Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. *Revista Politécnica*, 36 (3).
3. CEDEX. (2007). Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas (Sexta ed.). (M. d. Centro de Publicaciones, Ed.) Madrid, España: CEDEX
4. Contreras Aguilar, A. (2013). Mejoramiento de mezclas asfálticas con granos de caucho reciclado. Tesis de grado, Universidad Veracruzana, Escuela de Ingeniería Civil.
5. FHWA. (2014). The Use of Recycled Tire Rubber to Modify Asphalt Binder and Mixtures. Washington: Federal Highway Administration
6. Hicks, R. G., Tighe, S., Tabib, S., & Cheng, D. (2013). Rubber Modified Asphalt. Technical Manual. (O. T. Stewardship, Ed.) Ontario.
7. Lo Presti, D. (2013). Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863-881.
8. Ramírez Palma, N. (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. Tesis de grado, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.
9. Rubber Pavement Association. (2015). Rubber Pavement Association. Recuperado el 14 de Marzo de 2016, de <http://www.rubberpavements.org/index.html>
10. Way B., G., Kaloush, K. E., & Prapoorna-Biligiri, K. (2011). Asphalt-Rubber Standard Practice Guide. Rubber Pavements Association, Phoenix.