

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

MODIFICACIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIPO III ADICIONANDO POLVO DE CAUCHO DE NEUMÁTICOS USADOS, MEDIANTE UN PROCESO HÚMEDO

Carlos Ortiz ¹

MODIFICATION OF A TYPE III ASPHALTIC MIXTURE BY ADDING RUBBER POWDER OF USED TIRES THROUGH A HUMID PROCESS

Recibido el 16 de julio de 2019; Aceptado el 11 de mayo de 2020

Abstract

A type III asphaltic mixture was analyzed by adding rubber powder of used tires, through a humid process, in order to know the influence of recycled rubber powder, in the deformations of an asphalt mixture that can be used in the paving of roads, using layers or briquettes. In order to achieve this goal, rubber powder was characterized by a granulometric analysis using the normal distribution statistical method; the dynamic behavior of the asphalt-rubber mixture was analyzed by the Marshall method stated in the Covenin 2000-87 norm for roads; by determining the adequate percentage of rubber in the modified mixture; for this, rubber percentages of 5, 10 and 15 % w, respectively, were established at 150°C and 170°C. Granulometry obtained was 1,6mm diameter, and it was used for the analyses included in the norm; this determined that 5% of rubber addition at 170°C temperature results a mixture with better properties, such as: flexibility increase, fissure appearance delay and impermeability increase.

Keywords: humid process, modified asphalts, powder rubber.

¹ Departamento de Procesos Químicos, Universidad Politécnica Territorial del Oeste de Sucre "Clodosbaldo Russiàn", Venezuela.

* *Autor correspondal:* Carlos Ortiz. Departamento de Procesos Químicos, Universidad Politécnica Territorial del Oeste de Sucre "Clodosbaldo Russian". Carretera Nacional Cumaná-Cumanacoa, Km. 4. Cumaná, estado Sucre. A.P. 6101. Venezuela. Email: ortizcordova@hotmail.com

Resumen

Se analizó una mezcla asfáltica tipo III adicionando polvo de caucho de neumáticos usados, mediante un proceso húmedo, con el propósito de conocer la influencia del polvo de caucho reciclado, en las deformaciones de una mezcla asfáltica que pueda ser usada en la pavimentación mediante capas o briquetas. Para llevar a cabo este fin se caracterizó el polvo de caucho por medio de un análisis granulométrico empleando el método estadístico de distribución normal; se analizó el comportamiento dinámico de la mezcla asfalto-caucho por el método Marshall establecido en la Norma COVENIN 2000-87 para carreteras; determinándose el porcentaje adecuado de caucho en la mezcla modificada. Para ello, se establecieron porcentajes de caucho de 5, 10 y 15 % en masa, a 150°C y 170°C, respectivamente. Se obtuvo una granulometría de 1,6 mm de diámetro, la cual fue empleada para los análisis contemplados en la norma, obteniendo que a 5% de adición de caucho a una temperatura de 170°C resultó una mezcla con mejores propiedades tales como: aumento de la flexibilidad, retardo de la aparición de fisura y aumento de la impermeabilidad.

Palabras clave: asfaltos modificados, polvo de caucho, proceso húmedo.

Introducción

El principal inconveniente de los neumáticos residuales, es su disposición final o reutilización, dado que la mayoría de ellos terminan en sitios inadecuados o en vertederos, algunos de ellos clandestinos o en su mayoría no cumplen con las normas sanitarias para recibir ese tipo de residuos. Esto interviene de manera negativa en la compactación, permeabilidad del suelo y ocasionan problemas de estabilidad en los vertederos.

A inicios de los años setenta, se ha introducido el polvo de caucho a las mezclas asfálticas en los Estados Unidos, y desde entonces se ha empleado este material en el mundo (Ibrahim *et al.* 2013), hasta encontrarnos que en España es obligatoria la disposición de un importante porcentaje del polvo de neumáticos fuera de uso en pavimentos nuevos (Marcozzi, 2010).

En búsqueda de soluciones al problema de estos residuos, Agnusdei *et al.* (2010), afirman que en las mezclas asfálticas utilizadas en pavimentos, se pueden incorporar una parte importante del caucho de contenido en los neumáticos desechados. Ramírez (2006), asevera que la adición de caucho proveniente de neumáticos a las mezclas asfálticas es una forma de reciclar estos residuos y mejorar las propiedades del pavimento. Según la autora, cuando es incorporado caucho proveniente de neumáticos usados a las mezclas asfálticas, éstas se modifican de manera que aportan al pavimento mejores características, entre ellas: mejor respuesta al cambio térmico, incremento en la resistencia a la formación de grietas o fisuras debido a la agotamiento y al envejecimiento; de esta manera, se concede un aporte significativo alargando la vida útil del pavimento, lo que trae como consecuencia la disminución de los costos por mantenimiento.

De acuerdo al estudio realizado por Campaña *et al.* (2015), quienes trabajaron con mezclas de polvo de caucho del 10, 15 y 20% en masa con relación al bitumen total de la mezcla, observaron que existen mejores propiedades de resistencia a la fatiga en el asfalto modificado por proceso húmedo con 20 wt % de polvo de caucho con relación al bitumen, mientras que el mayor módulo de rigidez y deformación dinámica se obtuvo para asfalto modificado por proceso húmedo con 10 wt % de polvo de caucho.

Esta investigación se desarrolló mediante un proceso por vía húmeda, este consiste en mezclar el polvo de caucho con el ligante para producir una mezcla asfalto-caucho. Ramírez *et al.* (2014), indican que la proporción de caucho en las mezclas húmedas varía entre 10 al 20% en masa con relación al ligante total de la mezcla; además, el grado de modificación del ligante en este tipo de procesos, depende del tamaño y textura de los granos del caucho, la proporción, el tipo de cemento asfáltico, grado de agitación, tiempo y temperatura de mezclado.

La solución al problema que se plantea con los neumáticos fuera de uso, pasa necesariamente por la búsqueda de vías capaces de valorizar adecuadamente este residuo bajo condiciones económicas aceptables y en cantidades suficientes como para hacer frente al elevado número de toneladas que se generan anualmente, así lo expresa Olivares (2016).

En este estudio se propone analizar una mezcla asfáltica tipo III adicionando polvo de caucho usado, utilizando un proceso húmedo; con este objetivo se busca aportar soluciones en cuanto a minimizar el almacenamiento directo o disposición no adecuada de los neumáticos usados.

Metodología

Para realizar el estudio de la incorporación de polvo de caucho mediante vía húmeda se utilizó polvo de caucho donado por una empresa de reciclaje. Como pretratamiento, este material se sometió a un proceso de secado hasta obtener una humedad de 0.68% en peso, posteriormente se eliminaron las bandas y partículas metálicas que conforman los neumáticos, logrando remover 99.989% en peso de material metálico.

El estudio granulométrico se llevó a cabo utilizando un equipo de tamizado, con tamices de diferentes tamaños de aberturas, con el fin de seleccionar con que diámetro de las partículas de caucho previamente molido. Para llevar a cabo esta operación, se colocaron los tamices ordenados desde el de mayor abertura en el tope y los demás en orden decreciente. Las partículas de tamaño menor que la abertura de un tamiz pasan al tamiz inferior, hasta encontrar un tamiz cuya abertura no es suficiente para que pueda pasar. Se logran separar así las partículas de acuerdo con su tamaño.

Se establecieron temperaturas de digestión de 150°C y 170°C, valores que se encuentran definidos por Asphalt Institute (1983), de mezclas asfálticas en caliente (rango: 140–170°C)

Se analizaron muestras por triplicado para porcentajes de 5%, 10% y 15% en masa de polvo de caucho en relación al ligante (mezcla cemento asfáltico-caucho).

Preparación del ligante (mezcla de cemento asfáltico-caucho)

Se utilizó cemento asfáltico suministrado por una empresa de servicios petroleros, en la tabla 1 se presentan las características del cemento asfáltico.

Tabla 1. Características del cemento asfáltico

Propiedad	Unidades	Resultados	Rango
Viscosidad Cinemática	CST	520.0	350-900
Punto de Inflamación	°C	238.0	232
Gravedad API	API	4.7	50
Penetración	NM/10	68	
Peso Especifico	N/A	1.0389	

Para la elaboración de la muestra patrón se utilizó 5.3% de cemento asfáltico, mientras que para las muestras con 5%, 10% y 15% en masa de polvo de caucho en relación con el ligante (mezcla de cemento asfáltico-caucho), se adicionó 4.9%, 4.7% y 4.4% en masa de cemento asfáltico respectivamente. En la tabla 2, se muestran los porcentajes en masa de cemento asfáltico de polvo de caucho en relación al ligante.

Tabla 2. Características del cemento asfáltico

	Muestra patrón	150°C			170°C		
% polvo de caucho (en relación al ligante)		5	10	15	5	10	15
% cemento asfáltico	5.3	4.9	4.7	4.4	4.9	4.7	4.4

En una plancha de calentamiento se colocaron recipientes metálicos con el cemento asfáltico manteniendo la temperatura constante a 150°C. Cada uno con diferentes porcentajes en masa de polvo de caucho: 5%, 10% y 15%, se mezclaron a una velocidad de 1720 r.p.m. por un período de

60 minutos. De igual manera se preparó el ligante modificado con las mismas concentraciones de polvo de caucho a una temperatura de 170°C.

Preparación de la mezcla patrón.

Se preparó una mezcla patrón, con el fin de comparar la variación de las propiedades de esta mezcla al añadirle diferentes porcentajes de caucho. Esta mezcla se realizó a las temperaturas de 150°C y 170°C definidas para el proceso en caliente. Tanto la mezcla patrón, como en las mejoradas con caucho, se utilizaron los mismos materiales pétreos y cemento asfáltico.

Preparación de la mezcla con liqantes.

Se seleccionaron los agregados de acuerdo a su granulometría, considerando los rangos establecidos en la norma venezolana Covenin 87:2000, para mezclas asfálticas tipo III. Se añadieron los agregados previamente calentados a 150°C ó 170°C, en correspondencia con la temperatura de trabajo. Luego se mezcló por un periodo de 15 segundos para la adherencia del agregado con el asfalto modificado.

Método de ensayo para determinar las propiedades Marshall.

Para elaborar las briquetas, se colocó un molde caliente en una mesa y se situó en su fondo el papel parafinado o papel de filtro. Se vertió 1200 gr de la mezcla en el molde, removiendo 15 veces en el interior, y se aliso la superficie de la mezcla hasta obtener una forma ligeramente redondeada. La temperatura de mezclado antes de la compactación estuvo a 142°C (cuando la mezcla se preparó a una temperatura de 150°C) y 163°C (cuando la mezcla se preparó a una temperatura de 170°C). Posteriormente se situó el molde de mezcla sobre el pedestal de compactación (martillo) y se aplicó el número necesario de golpes de compactación, para este caso 75 veces cada briqueta, golpeado con el pedestal.

Subsiguientemente, se invirtió el molde con la briqueta sobre la placa de base y se aplicó el mismo número de golpes en el lado contrario de la briqueta. Finalizada la compactación se dejó enfriar la briqueta hasta que no se produjo deformación al sacarla del molde.

Procedimientos para ensayos físicos

Densidad

Se pesó cada briqueta. Posteriormente se sumergieron en un envase para obtener su peso en agua. Luego, se retiraron las briquetas del agua se secaron y se pesaron nuevamente para obtener así el valor del peso específico saturado con superficie seca (sss).

Estabilidad y Flujo

Se colocaron las briquetas en un baño de María a una temperatura de 60°C por un período de tiempo de 30 minutos. Posteriormente se procedió a ajustar las briquetas al equipo de carga.

Luego se aplicó la carga a cada briqueta de manera que se produjera una deformación a velocidad constante de 2 pulgadas por minuto hasta que produjera la ruptura o fractura debido a la tracción. El punto se define por la carga máxima obtenidas. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60°C se anotó como valor de estabilidad Marshall.

Determinación del peso específico de una mezcla asfáltica (RICE)

Se pesaron 2000 gr una muestra de mezcla asfáltica previamente enfriada a temperatura ambiente se colocó en un envase y se le agregó agua hasta la mitad. Se cerró el envase y se conectó a una bomba al vacío por 30 minutos. Transcurrido este período del tiempo, se apagó la bomba adicionándole agua al envase removiendo un poco la muestra; se volvió a cerrar el frasco, luego se conectó nuevamente a la bomba de vacío y se dejó de igual manera en un período de tiempo de 30 minutos. Finalizado el ensayo se enrasa el envase con agua a una temperatura de 25°C, se pesa para obtener así el valor de peso + muestra + agua. Se obtuvo el peso específico por diferencia de pesos. Para el cálculo se emplea la ecuación 1.

$$RICE = \frac{A}{(A+B)-(C+D)} \times \frac{dw}{d_w^{25^{\circ}}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Dónde:

A= Masa del aire de la muestra seca, g

B= masa del picnómetro lleno con agua a la temperatura de ensayo, g.

C= masa del picnómetro lleno con agua y muestra a temperatura de ensayo, g.

D= corrección por expansión térmica de asfalto, g.

dw= densidad del agua a temperatura de ensayo, g/cm³

d²⁵_w= densidad del agua a 25°C, g/cm³

Resultados

En la tabla 3, se observa el resultado de la granulometría, evidenciando que en el tamiz # 30, el tamaño de la partícula esta tabulada en la abertura del tamiz superior a este.

Para el estudio estadístico de las partículas de un lecho se asumió que la distribución aleatoria (al azar) está bien representada por la ley de Gauss, la cual proporciona una relación entre el valor del carácter estudiado y su frecuencia. En la figura 1, se representa la distribución normal del tamaño de las partículas, en ella se observa que mediante este método se obtuvo un diámetro de 1.6 mm, para las partículas de caucho, las cuales fueron las que se utilizaron para tal estudio, debido que la cantidad de partículas retenidas en el tamiz # 30 fue mayor, con una frecuencia relativa de 66.6 %.

Tabla 2. Granulometría del caucho triturado

Tamiz Usado	Peso(g) Retenido Acumulado	% Pasante	Diámetro (di')	Frecuencia Relativa (Xi)	Abertura del tamiz
Nº 4	19.8	93.4	2.37	6.6	4.74
Nº 8	20.2	93.3	3.55	6.7	2.36
Nº 30	200	33.4	1.48	66.6	0.60
Nº 50	34.1	88.6	0.45	11.4	0.30
Nº 100	17.6	94.1	0.23	5.9	0.15
Nº 200	6.3	97.9	0.11	2.1	0.074

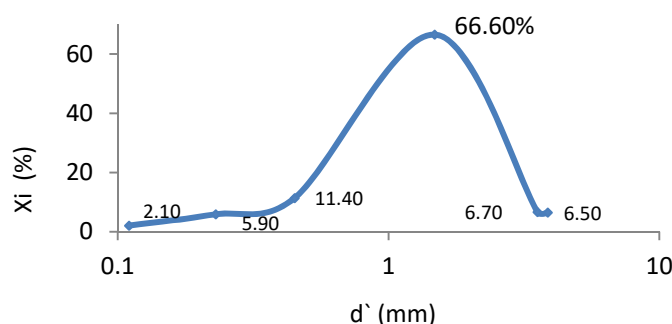


Figura 1. Curva de distribución normal o diferencial del tamaño de las partículas.

Resultados de las propiedades Marshall

En la tabla 4, se observan los resultados obtenidos del promedio simple aplicado a los triplicados de cada ensayo. En ella se presenta la variación del porcentaje de cemento asfáltico con respecto a la temperatura de mezclado a distintos porcentajes en masa de adición de caucho (5%, 10% y 15%).

Se puede visualizar que la muestra patrón le fue agregado un porcentaje de cemento asfáltico de 5.3 % y el resto de agregados. Las muestras calentadas a 150°C reportan 4.9% de cemento asfáltico (mezcla con 5% de caucho), 4.7% de cemento asfáltico perteneciente a la mezcla con 10% de caucho y 4.4% de cemento asfáltico perteneciente a la mezcla de 15% de cemento. Para las muestras calentadas a 170°C se reportaron los mismos porcentajes en masa de cemento asfáltico para cada una de las muestras con 5%, 10% y 15% de caucho.

Tabla 4. Densidad, vacíos totales, peso específico (RICE), estabilidad y flujo obtenido de las briquetas fabricadas con asfalto modificado con distintos porcentajes en peso de polvo de caucho (5%, 10% y 15%), mediante un proceso de mezcla húmeda a distintas temperaturas (150 °C y 170°C).

% cemento asfáltico	Temperatura						
	150°C			170°C			
	0%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Densidad (g/m ³)	2347	2235	2215	2166	2228	2205	2080
Vacíos totales	4.3	5.1	6.5	10.5	5.2	7.7	14.9
Peso específico (RICE) (gr/cm ³)	2454	2354	2369	2420	2350	2390	2445
Estabilidad (lb.)	2087	4579	3317	2141	5115	3125	2222
Flujo	13	12	10	9	12	10	9

De acuerdo a estos resultados, se observa que los vacíos totales aumentan considerablemente; esta tendencia puede ser debida a que se disminuye el porcentaje de cemento asfáltico para las diferentes temperaturas como también la densidad, lo que puede ocasionar que el agua y el aire pueden acceder rápidamente hacia la mezcla, y se acelere el proceso de oxidación produciendo el fenómeno de transformación de las resinas de asfáltenos; perdiéndose gran parte de la ductilidad y adherencia del cemento asfáltico, es decir, un envejecimiento prematuro de la mezcla asfáltica.

Por otra parte, la muestra patrón obtuvo una densidad de 2347 gr/m³, valor alto en comparación a las mezclas con aditivo de polvo de caucho, siendo la mezcla correspondiente a 5% en masa de adición de polvo de caucho a la temperatura de 150°C la que obtuvo un valor más cercano a la briketa patrón, igual a 2235gr/m³. Esto se puede deber, a que a mayor temperatura el caucho modifica sus propiedades reológicas, modificando también la densidad.

En este sentido, la tendencia registrada en el comportamiento de la densidad, se coteja con lo reportado con Agnusdei *et al.* (2010), quienes destacan que al aumentar la proporción de caucho y la temperatura a la mezcla, la densidad disminuye; esto puede ser, que mayor temperatura la mezcla modificada tiende a ser más viscosa

La briketa patrón reportó un valor del peso específico (RICE) de 2454 mientras que las muestras a 150°C el valor del rice varió desde 2354 para la mezcla con 5% en masa de adición de polvo de caucho, hasta 2420 para la mezcla de 15% en masa de adición de polvo de caucho. Un comportamiento análogo se puede observar para la temperatura de mezclado a 170°C. Es apreciable que para ambas temperatura de mezclado se mantiene un comportamiento similar, obteniéndose valores mayores del peso específico para las mezclas que contienen 15% de caucho y valores más cercanos al de la muestra patrón, para mezclas de 5% en masa de adición de polvo de caucho.

Es de considerar que del peso específico ayuda a determinar la cantidad de cemento asfáltico absorbido por los agregados de la mezcla, para así conocer la cantidad total o efectiva de cemento asfáltico requerida para la misma. A medida que se incrementa la cantidad de caucho a diferentes temperaturas de mezclado el rice aumenta, esto se puede deber, que a mayor porcentaje de polvo de caucho en la mezcla (ligante: cemento asfáltico-caucho), es mayor la cantidad de espacios vacíos en la briqueta, por consiguiente, el peso específico aumenta. Esto está en consonancia con lo descrito anteriormente, respecto a la tendencia observada en el cálculo de los vacíos totales, en las muestras analizadas.

Se obtuvo una estabilidad de 2087 lb para la briqueta patrón, mientras que para la modificada con un 5% en masa de polvo de caucho y a 150°C arrojó un valor de 4579 lb y para el mismo porcentaje a una temperatura de 17°C un valor de 5115 lb, mientras que para un 10% de caucho a 150°C y a 170°C arrojaron los valores de 3317 lb y 3125 lb respectivamente, para un 15% de adición de caucho a una temperatura de mezclado de 150°C la estabilidad disminuyó a 2141 lb y a 170°C arrojó un valor de 2222lb, es apreciable que en todas las mezclas aumenta la estabilidad al adicionar el polvo de caucho, en comparación al mínimo valor establecidos en la Norma COVENIN 2000-87 (≥ 1800 lb).

En la adición de 5% en masa de polvo de caucho a 150°C y 17°C se puede cotejar que la estabilidad aumenta en consideración a la muestra patrón, superando el valor mínimo de la norma venezolana COVENIN 2000-87, esto se puede deber, que al tener una cantidad adecuada de asfalto mezclada con el caucho permite envolver los agregados con películas más gruesas de cemento asfáltico modificado sin que se produzcan escurrimientos o exudaciones; mejorando el contacto entre partículas con una mejor resistencia al corte y una permeabilidad baja. Al incrementar la proporción de caucho disminuye la estabilidad; como ocurre en el caso de 10% y 15 %, esto se puede deber, a que no posee alta fricción interna para resistir las deformaciones causadas por las cargas impuestas ya se va disminuyendo la cantidad de asfalto y la densidad disminuye al agregar caucho a la mezcla.

La briqueta patrón posee un flujo de 13, a un 5% en masa de polvo de caucho; calentado a una temperatura de 150°C se tiene 11 pulgadas y para una temperatura de 170°C un flujo de 12 mientras que a un 10% de caucho a 150°C se obtuvo un valor de 10, de igual manera ocurrió para una temperatura de 170°C y para un 15% en masa de polvo de caucho arrojó un valor de 9 pulgadas a 150°C este mismo flujo se obtuvo para 170°C. Cabe destacar que el flujo representa la deformación en cuartos de milímetros, que ocurre desde el instante en que se aplica la carga hasta lograr la carga máxima.

Se observa en los resultados, que el flujo disminuye a medida que aumenta el porcentaje de caucho (esta tendencia también la reportan Agnusdei e losco, 2008), esto se puede deber, a que se disminuye el cemento asfáltico y cuando se tiene bajos contenidos de ligante en una mezcla mejorada con caucho estos son insuficientes para proporcionar una buena cohesión, junto a esto hay que decir que al aumentar la proporción de caucho este no reacciona con el cemento asfáltico, por lo que es más relevante el comportamiento elástico del caucho.

Conclusiones

De acuerdo la granulometría el diámetro de partículas de caucho obtenido fue de 1.6 mm. Las combinaciones de los agregados utilizados en la elaboración de la mezcla patrón (sin caucho) y a distintos porcentajes en masa de polvo de caucho (5%, 10% y 15%) se encuentran dentro de los límites establecidos en la Norma COVENIN 2000- 87 Parte I: Carreteras.

Para la elaboración de la mezcla patrón se utilizó 5.3% de cemento asfáltico, mientras que para 5%, 10% y 15% de adición de caucho se utilizó 4.9%, 4.7% y 4.4% de cemento asfáltico respectivamente.

Para una muestra patrón la densidad se encontró a 2347 gr/cm³, para un 5% de caucho a una temperatura de 150°C y 170°C las densidades arrojaron valores de 2235 gr/cm³ y 2228 gr/cm³ respectivamente; para un 10% masa de polvo de caucho a 150°C se obtuvo un valor de la densidad de 2215 gr/cm³, y a 170°C 2205 gr/cm³; para 15% masa de polvo de caucho a 150°C y 170°C se obtuvo una densidad de 2166 gr/cm³ y 2080 gr/cm³, respectivamente.

Los vacíos totales que se encontraron en la muestra patrón fueron de 4.3%. Para un 5% de caucho a 150°C y 170°C se obtuvo valores de vacíos totales de 5.1% y 5.2% respectivamente, mientras que para 10% de caucho a una temperatura de 150°C arrojó un valor de 6.5% y a 170°C un valor de 7.7% y para 15% de adición de caucho a 150°C y 170°C se obtuvieron valores de 10.5% y 14.9% respectivamente. Cumpliendo la muestra con 5% de caucho a 150°C y 170°C con las normas establecidas en la Norma Venezolana COVENIN 2000- 87.

Las estabilidades de la muestra patrón, como las elaboradas con adición de polvo de caucho a los distintos porcentajes (5%,10% y 15% en masa) cumplieron de acuerdo a los límites establecidas en la norma COVENIN 2000-87, presentando buenas estabilidades.

Los flujos para las muestras con adición de polvo de caucho a distintos porcentajes (5%, 10% y 15% en masa) cumplieron con los límites establecidos en la norma COVENIN 2000- 87, presentando buen flujo.

Referencias bibliográficas

- Agnusdei, J, losco, O. (2008) Durabilidad de mezclas asfáltica preparadas con ligantes modificados con polímeros. Comisión de Investigaciones Científicas. Buenos Aires: Lemit.
- Agnusdei, J., Marcozzi, R. Morea, F. (2010) Nuevas tecnologías sustentables aplicadas a la pavimentación asfáltica, *Anales LEMIT*, **III**(3), 9-14.
- Asphalt Institute (1983). Asphalt plant manual, Manual series Nº 3. Quinta Edición. USA: Asphalt Institute
- 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), Acceso el 15 de mayo de 2018, disponible en:
- COVENIN, Comisión Venezolana de Normas Industriales. (2000). Norma Covenin 87:2000, Parte I Carreteras. Caracas:Fondo Norma
[https://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen36/tomo3/Obtencion de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente.pdf](https://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen36/tomo3/Obtencion_de_Asfalto_Modificado_con_Polvo_de_Caucho_Proveniente.pdf)
- M. Ibrahim, H. Katman, M. Karim, S. Koting, N. Mashaan (2013) A review on the effect of crumb rubber addition to the rheology of crumb rubber modified bitumen, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2013**, 8 pp. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/415246>
- Marcozzi, R. (2010) Mezclas fabricadas a temperaturas reducidas vs. mezclas tibias, *Anales LEMIT*, **III**(3), 29-30.
- Olivares, D. (2016). *Planta de reciclaje de neumáticos de caucho. Comercialización de miga de caucho*, Tesis de Postgrado, Programa de Postgrado Economía y Negocios. Universidad de Chile. 102 pp.
- Ramírez, A., Ladino, I., Rosas, J. (2014) *Diseño de mezcla asfáltica con asfalto caucho Tecnología Gap Graded para La ciudad de Bogotá*. Tesis de Especialización en Ingeniería de Pavimentos, Universidad Católica de Colombia, 91 pp.
- Ramírez, N. (2006) *Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco*. Tesis de Grado, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 116 pp.