

EFFECTOS DEL POLVO DE CAUCHO EN LA MODIFICACIÓN DE HORMIGÓN ASFÁLTICO COMO ALTERNATIVA AMBIENTAL EN CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

Julio Abel Loureiro Salabarría¹, Jorge Bienvenido Cevallos Bravo¹, Ana María Aveiga Ortiz¹, Ayda Mailie De La Cruz Balón¹

¹Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López" Carrera de Ingeniería Ambiental, Campus Politécnico Sitio El Limón vía a la Pastora. Calceta, Manabí, Ecuador. Email: julioabelloureiro@gmail.com, anitaaveigao@hotmail.com

Resumen

La investigación tuvo como objetivo evaluar los efectos del polvo de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso en la modificación de hormigón asfáltico como alternativa ambiental para la construcción de carreteras. Se determinó la dosificación de diseño de asfalto 60/70 para hormigón asfáltico convencional por el método Marshall. Para ello se realizaron tres tratamientos (P_1 , P_2 y P_3) variando la masa de asfalto respectivamente en porcentajes de (4,5; 5 y 5,5) % m/m del total de la probeta. El tratamiento de mejor resultado fue P_1 (5% m/m de asfalto) ubicando los parámetros (estabilidad, deformación, %VM y %VMA) dentro de lo establecido en la norma cubana (NC-54-223:90) con valores de (10,33 kN; 3,60 cm; 5,66%; 17%). La modificación del hormigón asfáltico se desarrolló por la vía húmeda, utilizando la dosificación seleccionada de diseño de asfalto (5% m/m de asfalto) para hormigón asfáltico convencional. Se siguió un diseño factorial 2², incorporando polvo de caucho en (12 y 14) % m/m con respecto a la masa total de asfalto y variando el tamaño de partícula en (177 y 420) μm . Se desarrollaron cuatro tratamientos con tres réplicas cada una, siendo un total de 12 unidades experimentales. El Trat₁ (12% PC-177 μm) mostró mejores resultados ante los ensayos del método Marshall entre los hormigones convencional y modificado, cumpliendo con los parámetros evaluados en las

especificaciones de la norma (estabilidad, deformación, %VM y %VMA) con valores de (10,33 k; 2,9 cm; 4,66%; 17%) y ofreciendo mayor durabilidad, plasticidad así como resistencia a la deformación.

Palabras claves: Método Marshall, hormigón asfáltico modificado, polvo de caucho

Summary

The objective of the research was to evaluate the effects of rubber dust from tires out of use in the modification of asphalt concrete as an environmental alternative for road construction. The asphalt design dosage 60/70 for conventional asphalt concrete was determined by the Marshall method. For this, three treatments were carried out (P1, P2 and P3) varying the asphalt mass respectively in percentages of (4,5; 5 and 5,5) % m / m of the total of the test piece. The best result treatment was P1 (5% m / m asphalt) locating the parameters (stability, deformation, % VM and % VMA) within the established in the Cuban norm (NC-54-223: 90) with values of (10,33 kN; 3,60 cm; 5,66%; 17%). The modification of the asphalt concrete was developed by the wet way, using the selected dosage of asphalt design (5% m / m of asphalt) for conventional asphalt concrete. A factorial design 22 was followed, incorporating rubber powder in (12 and 14) % m / m with respect to the total asphalt mass and varying the particle size in (177 and 420) μm . Four treatments were developed with three replicates each, with a total of 12 experimental units. Trat1 (12% PC-177 μm) showed better results before the Marshall method tests between conventional and modified concrete, complying with the parameters evaluated in the specifications of the standard (stability, deformation, % VM and % VMA) with values of (10,33 k; 2,9 cm; 4,66%; 7%) and offering greater durability, plasticity as well as resistance to deformation.

Keywords: Marshall Method, modified asphalt concrete, rubber powder

Introducción

La sociedad moderna según Joskowicz *et al.*(2010), genera grandes cantidades de residuos no peligrosos como los neumáticos fuera de uso (NFU), estos se componen esencialmente de caucho sintético o natural, negro de carbono, óxido de Zinc, acero, material textil y otros aditivos. Los neumáticos son diseñados para resistir condiciones mecánicas y meteorológicas extremas Cano *et al.*(2007), pero al convertirse en residuos se hacen prácticamente indestructibles por el paso del tiempo. Los NFU no generan ningún peligro inmediato, pero su eliminación de manera inapropiada, puede contaminar gravemente el medioambiente.

El almacenamiento de los NFU Reschner (2008) crean entornos favorables para la reproducción exponencial de mosquitos, su uso como combustible, produce grandes volúmenes de gases de efecto invernadero a la atmósfera, además de ser un material químico capaz de contaminar el suelo y los diferentes cuerpos aguas

Una alternativas con gran beneficio ambiental para la reutilización de los NFU, es el proceso de triturado Campaña *et al* (2015), el cual constituye la primera etapa del reciclaje, donde se separa el caucho en forma de polvo del resto de los demás componentes. Dentro de los usos más comunes para el polvo de caucho (PC) Pelizzoni *et al* (2013), podemos encontrar su incorporación como materia prima para pavimentos deportivos y de seguridad, en hierba artificial, como aislante acústico y antivibratorio, en pistas de atletismo, industria del calzado y la industria automovilística.

Otra alternativa ambientalista que se ha difundido Botasso *et al* (2008), es la utilización de PC en la modificación de mezclas asfálticas. Esta permite absorber elevados volúmenes de dicho material y a la vez mejora significativamente Rondón *et al* (2007), las características que presentan los hormigones asfálticos convencionales como; la rigidez, la resistencia bajo carga monotónica, al ahuellamiento, a la fatiga, al envejecimiento, y disminución de la susceptibilidad térmica.

Los pavimentos asfálticos con la incorporación de PC procedente de NFU Expósito (2013), vienen siendo aplicados de forma satisfactoria en numerosos países como; Estados Unidos, Suecia, Portugal, Italia y España desde hace algunas décadas.

La incorporación del PC a hormigones asfálticos se puede desarrollar por tres métodos Gonzalez (2013), Expósito (2013); vía húmeda, vía seca y la mixta. En el proceso húmedo, el PC se adiciona al asfalto caliente con tamaños de partículas (TP) por debajo de 1 mm y preferentemente por debajo de 0,5 mm con dosificaciones que deben estar entre (6-15) % del asfalto total a utilizar. El proceso seco, incorpora el PC al agregado pétreo como una porción de agregado fino antes de mezclarse con el asfalto y se han utilizado TP en el rango de (1-1,25) mm con porcentajes inferiores al 1% sobre la mezcla total. El proceso mixto unifica las dos técnicas anteriormente citadas, colocando PC tanto al asfalto caliente como al agregado pétreo.

Dada la importancia de reciclaje al PC proveniente del triturado de NFU, la investigación tuvo como objetivo, evaluar los efectos del PC en la modificación de hormigón asfáltico como alternativa ambiental para la construcción de carreteras.

Las preguntas de investigación para este estudio se detallan a continuación:

1. ¿Cuál es el contenido de diseño de asfalto para el hormigón asfáltico convencional siguiendo las especificaciones de calidad de la norma cubana NC-54-223:90?
2. ¿Cuál combinación de % de PC y TP, producirá mejor hormigón asfáltico modificado que cumplan las especificaciones de calidad de la norma cubana NC-54-223:90?

Materiales y métodos

Ubicación

El trabajo se realizó en la Planta de Asfalto Giraldo Pacheco, del municipio Santa Clara, provincia Villa Clara, Cuba.

Materiales

La investigación fue de tipo experimental y los materiales empleados fueron; asfalto 60/70, materiales pétreos y polvo de caucho con características específicas mostradas en los **Cuadros 1- 3**.

Cuadro 1 Características de asfalto 60/70 procedente de la Refinería de petróleo Níco López, Ciudad de la Habana, Cuba

Ensayos	U.M	Valores de ensayos	Especificaciones
Peso específico	g/cm ³	1,03	1+
Penetración	mm	62	60/70
Punto de ablandamiento	°C	48	48/57
Punto de inflamación	°C	290	230+
Punto de combustión	°C	330	-
Penetración al residuo	%	96,6	70+
Pérdida de masa por calentamiento	%	0,10	-1
Índice de Penetración	-	-1,30	De-1 a+1

Fuente: Especificaciones de calidad norma cubana asfalto 60/70

Cuadro 2 Características de materiales pétreos procedentes de las Canteras Mariano Pérez, Villa Clara, Cuba

Caracterización	U.M	Cantidad
Terrones de arcilla	%	0,00
Partículas planas y alargadas	%	0,00
Peso específico corriente	g/cm ³	2,55
Peso específico aparente	g/cm ³	2,70
Peso específico saturado	g/cm ³	2,65
Absorción	%	2,60

Fuente: Presentación propia de los autores

Cuadro 3 Características del polvo de caucho de neumático Reencauchadora David Díaz Guadarrama, Villa Clara, Cuba

Componentes	U.M (%)	Fracción (mm)	%
Caucho y elastómero	48	< 0,25	8,7
Negro de carbono	22	0,25< x> 1,00	34,60
Metal	15	1,00< x> 1,25	33,60
Textil	5	1,25< x> 2,00	1,50
Óxido de zinc	1	2,00< x> 5,00	17,70

Azufre	1	> 5,00	3,90
Aditivos	8		
Total	100		100

Fuente: Presentación propia de los autores

Métodos

1. Método para determinar el contenido de diseño de asfalto 60/70 por el método Marshall para hormigón asfáltico convencional

El contenido de diseño de asfalto 60/70 para el hormigón asfáltico convencional en caliente, se determinó bajo el diseño, elaboración, ensayos de laboratorio y evaluación del método Marshall, aplicado por Reyes *et al* (2007).

El diseño de la mezcla, se realizó en tres tratamientos (probetas de hormigón asfáltico convencional (P)) con tres réplicas cada una, variando la masa de asfalto (A) en porcentajes de (4,5; 5 y 5,5) % m/m del total de la probeta respectivamente. Los materiales pétreos utilizados; piedra hormigón (PH), gravilla (GR) y polvo de piedra (PP), fueron dosificados en (20, 12 y 68) % m/m respectivamente del total de material pétreo adicionado y la granulometría utilizada fue de (20, 10 y 0,08) mm, establecido para este tipo de áridos.

La elaboración de probetas procedió ante lo expuesto por Figueroa *et al* (2007) donde todos los componentes de la mezcla (asfalto - materiales pétreos) fueron pesados en una balanza analítica de precisión marca Ohaus. Posteriormente los materiales pétreos se transfirieron a bandejas metálicas separadas para cada fracción de la muestra y calentados a una temperatura de 110 °C, en una estufa modelo ECFA, durante un tiempo de 30 minutos, se mezclaron en seco de forma manual y se formó un cráter en su centro, dentro del que se vertió la cantidad requerida de asfalto. Se mezclaron los materiales lo más rápido posible a temperatura de 160 °C hasta obtener una mezcla completa y homogénea.

Se compactó la mezcla a una temperatura de 150 °C con 75 golpes del martillo Marshall, por ambos lados de la probeta en moldes precalentados en baño maría a temperatura de 95 °C. Después de la compactación, las muestras se identificaron y dejaron enfriar a temperatura ambiente sobre una superficie horizontal lisa por un período de 24 horas.

Las probetas elaboradas se sometieron a ensayos de laboratorio en la prensa Marshall donde se cuantificaron las variables; densidad, estabilidad, deformación, % de vacíos de agregado mineral (%VMA) y % de vacíos de aire en mezcla (%VM).

La cantidad óptima de asfalto y materiales pétreos, se determinó evaluando los resultados de variables respuestas, a través de análisis gráfico y comparado con los criterios de calidad por norma cubana (NC-54-223:90) mostrados en el **Cuadro 4**.

Cuadro 4 Norma cubana de especificaciones de calidad Capa de Rodadura Semidensa y Tráfico Pesado (NC-54-223:90)

Parámetros de calidad	U.M	Especificaciones.
Esp NC-54-223:90		Valores óptimos.
Asfalto	%	4,5 – 5,5
Estabilidad	kN	9,2 – 12,4
Deformación	cm	2 - 4
Densidad	g/cm ³	2,357
Vacíos de agregado mineral	%	14 - 17
Vacíos de Mezcla	%	5 - 8

Fuente: Norma Cubana de Especificaciones de Calidad (NC-54-223:90)

2. Método para el diseño, elaboración, ensayos de laboratorio y evaluación de hormigón asfáltico modificado

Para el diseño de la mezcla de hormigón asfáltico modificado, se tomó el porcentaje de diseño de asfalto del hormigón asfáltico convencional como referencia y se modificó siguiendo un diseño factorial 2². Se incorporó PC asumiendo lo planteado por Expósito (2013) en (12 y 14) % m/m respecto a la masa total de asfalto a utilizar y se varió TP siguiendo lo recomendado por Gonzalez (2013) en (177 y 420) µm. Los tratamientos de hormigón asfáltico modificado fueron cuatro, con tres réplicas cada uno, siendo un total de 12 unidades experimentales.

La obtención del TP y el método de mezclado (asfalto – PC) se desarrolló siguiendo lo señalado por Campaña *et al* (2015) y modificado por los autores. El PC se separó en los TP preestablecidos (177 y 420) µm en mallas (80 – 40) de

la (U.S. Standar Sieve Series) respectivamente, en un tamiz del tipo W.S. Tyler. El mezclado (asfalto – PC) se implementó por la vía húmeda a través de un mecanismo de agitación con velocidad de 1750 r.p.m. y un tiempo de 30 minutos, empleando un agitador de paletas con medio de calentamiento a temperatura constante de 160 °C.

Los demás procedimientos de elaboración para los tratamientos de hormigón asfáltico modificado: dosificación de materiales pétreos, mezcla (asfalto modificado - materiales pétreos) así como la compactación de probetas, se desempeñaron análogamente al descrito para hormigón asfáltico convencional.

Los ensayos de laboratorio a los tratamientos se desarrollaron en la prensa Marshall de idéntica manera a las probetas de hormigón asfáltico convencional, donde se cuantificó cada una de las variables: densidad, estabilidad, deformación, %VMA y %VM.

La evaluación para los tratamientos se desarrollaron comparando resultados de las variables respuesta entre ellas y con las de hormigón asfáltico convencional respecto a las especificaciones de calidad de la norma cubana (NC-54-223:90) mostrados en el **Cuadro 4**.

Resultados y discusión

1. Determinación de la dosificación de diseño de asfalto para probetas de hormigón asfáltico convencional

En el **Cuadro 5** se resumen las cantidades (en masa) de los componentes (A, PH, GR y PP) utilizados para el diseño en cada una de las (P), variando porcentajes de (A) en (4,5; 5 y 5,5) % m/m del total de la probeta.

Cuadro 5 Cantidades de materias primas (en masa) y peso total de las probetas

Probetas	A (gr)	PH (gr)	GR(gr)	PP (gr)	Peso total (gr)
		20%	12%	68%	
P ₁ (4,5%)	54	229,2	137,52	779,28	1200
P ₂ (5%)	60	228,0	136,80	775,20	1200
P ₃ (5,5%)	66	226,8	136,08	771,12	1200

Fuente: Elaboración propia de los autores

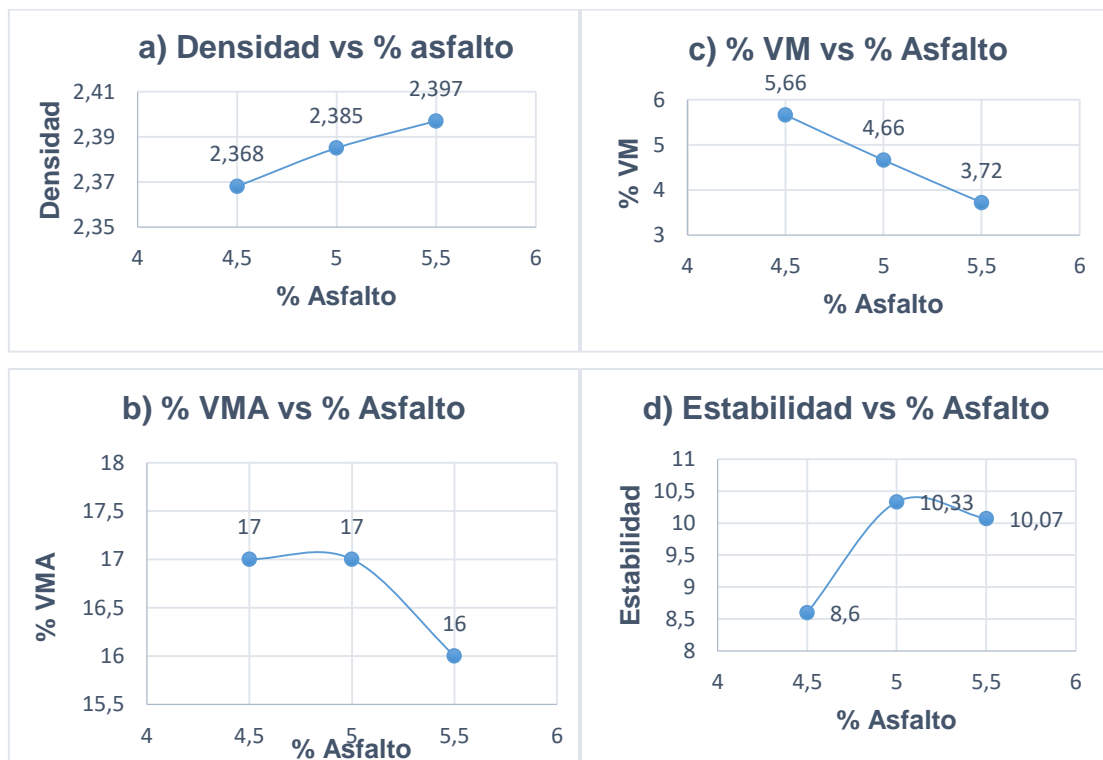
En el **Cuadro 6** se muestran los resultados de ensayos de laboratorio respecto a las variables Densidad, %VM, %VMA, Estabilidad y Deformación para cada una de las (P) con la variación de los porcentajes de (A).

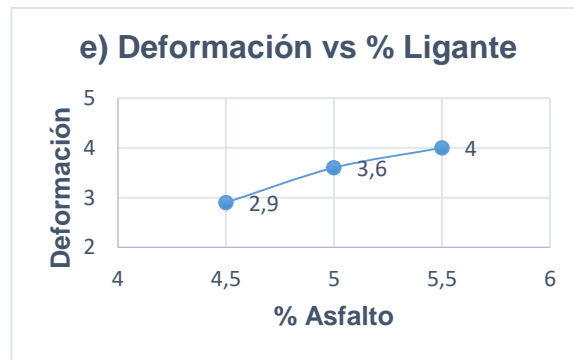
Cuadro 6 Resultados de ensayos de laboratorio por el método Marshall para probetas de hormigón asfáltico convencional

Probetas	A %	Densidad (g/cm ³)	VM %	VMA %	Estabilidad (kN)	Deformación (cm)
P ₁	4,5	2,368	4,66	17	8,60	2,90
P ₂	5	2,385	5,66	17	10,33	3,60
P ₃	5,5	2,397	3,72	16	10,07	4,00

Fuente: Elaboración propia de los autores

Gráfico 1 Representación de resultados del ensayo Marshall para probetas de hormigón asfáltico convencional a) Densidad, b) %Vacíos de Mezcla, c) %Vacíos de Agregado Mineral, d) Estabilidad, e) Deformación





Fuente: Elaboración propia de los autores

Los resultados de los ensayos del método Marshall se reflejaron en el **Cuadro 6** y se representaron en el **Gráfico 1**, donde se determinó la dosificación de diseño de asfalto haciendo el análisis de las curvas y las respectivas comparaciones con estándares de calidad de la (NC-54-223:90) resumidos en el **Cuadro 4**.

Como se puede observar en el **Cuadro 6** y **Gráfico 1**, el grupo P_1 , muestran las variables, %VMA, y deformación, con resultados de (17%; 2,90 cm) estableciéndose dentro de los rangos permisibles, pero las respuestas de la densidad, %VM y estabilidad alcanzaron valores de (2,368 g/cm³; 4,66%; 8,60 kN) alejándose a lo recomendado por la norma.

El caso del grupo P_3 , presentó los parámetros de estabilidad, deformación y %VMA, con resultados de (10,07 kN; 4,00 cm; 16%) ubicándose en los rangos establecidos. La densidad y %VM alcanzaron valores de (2,397 g/cm³; 3,72%) alejándose de los valores fijados por la norma.

Las P_2 obtuvieron mejores resultados, ubicando los parámetros estabilidad, deformación %VMA y %VM con valores de (10,33 kN; 3,60 cm; 17%; 5,66 %) dentro de los límites establecidos. La densidad alcanzó un valor de 2,385 g/cm³ y no coincidió con lo recomendado alejándose con una diferencia mínima.

Por otro lado, ninguno de los tres grupos de probetas P_1 , P_2 y P_3 cumplió con el parámetro de densidad, siendo 2,368 g/cm³ el resultado más próximo a lo normado perteneciente al grupo P_1 .

Se descartaron las probetas representadas por las P_1 y P_3 siguiendo los criterios del Método Marshall expuesto por Asphalt Institute MS-22 (1982), el cual indica, la eliminación de diseños de mezcla que no cumplan los estándares de máximos y mínimos fijados por la norma analizada.

Aunque la densidad difiere de lo establecido en el grupo P_2 (5% m/m de asfalto) se escogieron estas probetas, como la dosificación de diseño de asfalto para el

hormigón asfáltico convencional y para la de hormigón asfáltico modificado, por mantener cuatro de los cinco parámetros analizados (estabilidad, deformación %VMA y %VM) dentro de las especificaciones de calidad de la norma cubana (NC-54-223:90).

2. Diseño, elaboración y evaluación de probetas de hormigón asfáltico modificado

En el **Cuadro 7** se resumen las cantidades (en masa) de los componentes (A, PC, PH, GR y PP) utilizados para el diseño en cada uno de los (Trat), variando porcentajes de PC (12 y 14) % m/m del total de asfalto y TP (177 y 420) μm en el asfalto modificado al %5 m/m del total de la probeta.

Cuadro 7 Cantidades de materias primas (en masa) y peso total de tratamientos con PC (12 y 14) % m/m del total de asfalto y TP (177 y 420) μm en el asfalto modificado al %5 m/m del total de la probeta.

Probetas	A (gr)	PC (gr)	PH 20%	GR 12%	PP 68%	Peso total
Modificadas	5%		(gr)	(gr)	(gr)	(gr)
Trat ₁ (12% PC-177 μm)	52,8	7,2	228	136,8	775,2	1200
Trat ₂ (12% PC-420 μm)	52,8	7,2	228	136,8	775,2	1200
Trat ₃ (14% PC-177 μm)	51,6	8,4	228	136,8	775,2	1200
Trat ₄ (14% PC-420 μm)	51,6	8,4	228	136,8	775,2	1200

Fuente: Elaboración propia de los autores

En el **Cuadro 8** se muestran los resultados de ensayos de laboratorio para las variables Densidad, %VM, %VMA, Estabilidad y Deformación para cada tratamiento con variación del % de PC (12 y 14) % m/m del total de asfalto y TP (177 y 420) μm en el asfalto modificado al %5 m/m del total de la probeta.

Cuadro 8 Resultados del ensayo Marshall para tratamientos de hormigones asfálticos modificados

Probetas	Densidad	VM	VMA	Estabilidad	Deformación
Modificadas	(g/cm ³)	%	%	(kN)	(cm)
Trat ₁ (12% PC-177 μm)	2,370	5,45	17	11,13	3,02
Trat ₂ (12% PC-420 μm)	2,385	4,97	16	11,67	4,2

Trat ₃ (14% PC-177 μm)	2,360	5,98	17	12,73	2,67
Trat ₄ (14% PC-420 μm)	2,387	4,89	16	10,33	4,4

Fuente: Elaboración propia de los autores

Se analizaron los datos de los ensayos Marshall mostrados en el **Cuadro 8** y se observó una similitud en los resultados de las variables respuesta de los Trat₁ y Trat₃ y de igual modo para los Trat₂ y Trat₄.

Los Trat₁ y Trat₃, comparados con los Trat₂ y Trat₄ alcanzaron los siguientes resultados:

- La densidad en los Trat₁ y Trat₃ disminuyó respecto a los Trat₂ y Trat₄. Estos dos últimos tratamientos poseen densidades que difieren de lo normado (2,385; 2,387) g/cm³ respectivamente siendo el valor más alto para el Trat₄. Se observó que al aumentar el TP hubo una disminución de los %VM y consigo el volumen total de la probeta, provocando el aumento de la densidad. Esto concuerda con los resultados de densidad obtenidos en probetas por Joskowitz *et al* (2010), donde se adicionó PC 15 % m/m al asfalto venezolano 60/70 para la modificación de hormigón por la vía húmeda en caliente.
- Los %VM y %VMA en los Trat₂ y Trat₄ disminuyeron respecto a los Trat₁ y Trat₃. Los %VMA se encuentran dentro de los rangos permisibles pero los %VM difieren de lo normado. El aumento del % de PC y del TP actuaron sobre la disminución de los %VM, provocando exudación del asfalto cuando el hormigón se expone al tránsito por un periodo de tiempo determinado. Estos resultados obtenidos son similares a los de Figueroa *et al* (2007), para mezcla asfáltica modificada con poliestireno.
- La deformación en los Trat₂ y Trat₄ aumentó respecto a los Trat₁ y Trat₃ y se alejaron del límite máximo establecido por la norma. Se observó el aumento de la variable a medida que aumenta el TP y se vio más acentuado en el Trat₄ donde hubo un incremento del % de PC. La deformación deben ser lo suficientemente alta para acomodar adecuadamente el tránsito esperado pero no más altas de las que este exige establecida por la norma cubana (NC-54-223:90). Valores muy altos de deformación producen un pavimento demasiado plásticos con tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas de tránsito. Estos resultados concuerdan con lo mostrado por Rondón *et al*

(2010) donde obtuvo un aumento de la estabilidad en hormigón asfáltico al mezclar asfalto con desecho de polietileno.

Comparando el Trat₁ con el Trat₃, se alcanzaron los siguientes resultados:

- La densidad para el Trat₁ fue de 2,370 g/cm³ y para el Trat₃, alcanzó un valor de 2,360 g/cm³, este último muy cercano a lo establecido en la norma. La disminución de la densidad en el Trat₃, se vio asociado al incremento del % de PC, el cual influyó en el aumento de %VM. Este resultado coincidió con lo expuesto en la investigación de Campaña *et al* (2015), donde la densidad del hormigón asfáltico modificado descendió de (2,210 a 2,138) g/cm³ con el incremento del % de PC de (10 a 20) % m/m e igual TP.
- Los %VM y %VMA para los Trat₁ y Trat₃ tuvieron similares comportamientos, encontrándose dentro de los rangos permisibles por la norma. El % de PC no influyó manteniendo el TP en estas variables y asevera los resultados obtenidos por Figueroa *et al* (2007), donde se modificó mezcla asfáltica pero con la utilización de poliestireno.
- La estabilidad del Trat₁ cumplió con lo establecido mientras que el Trat₃ superó el límite máximo de lo normado con un valor de 12,73 kN. Este resultado fue debido al incremento del % de PC y la disminución del contenido de asfalto en la mezcla modificada, disminuyendo la capacidad ligante del asfalto, evitando que las partículas de agregado pétreo se desplacen unas respecto a otras. Este resultado fue muy parecido al obtenido por Rondón y Reyes (2009) donde se observó el aumento de la estabilidad en mezcla asfáltica modificada con el aumento del porcentaje de asfaltita como modificante.
- La deformación para los Trat₁ y Trat₃ se mantuvieron dentro de lo normado pero para el Trat₃ estuvo cercano al límite mínimo con un valor de 2,67 cm. Esta respuesta se debe a la disminución del contenido de asfalto, con el incremento del % de PC lo que disminuye su plasticidad. Por otro lado, considerando el elevado resultado de la estabilidad (12,73 kN) para Trat₃, se pudo clasificar como una mezclas demasiado frágil y rígida por sus valores bajos de deformación y altos de estabilidad, según lo expresado por Asphalt Institute MS-22 (1982).

Por todo lo anterior, se consideró al Trat₁, como el más favorable de los cuatro tratamientos, debido a que mantuvo los parámetros %VM, %VMA estabilidad y

deformación dentro de los límites permisibles, aunque la densidad fue de 2,370 g/cm³ y no coincidió con el valor recomendado. Por otro lado, los Trat₂, Trat₃ y Trat₄ no fueron considerados por incumplir los estándares reglamentados en la (NC-54-223:90), siguiendo los criterios del Método Marshall señalado por Asphalt Institute MS-22 (1982).

Las probetas del Trat₁ del hormigón asfáltico modificado exhibieron mejor desempeño en los ensayos de laboratorio respecto a las probetas P₂ del hormigón asfáltico convencional, debido a que:

- La densidad descendió y se acercó a lo establecido por la norma, brindándole una adecuada permeabilidad a la mezcla.
- La estabilidad, aumentó moderadamente dentro de lo requerido, lo que mejora el desempeño de la mezcla ante la deformación y proporciona una buena durabilidad al no ser extremadamente alto.
- La deformación disminuyó manteniéndose dentro de lo establecido, asegurando la tendencia a disminuir su plasticidad a elevadas cargas de tránsito.
- Los %VM disminuyeron pero no en gran medida dentro de los límites especificados sin afectación a la permeabilidad por la entrada de aire y agua, garantizando la durabilidad para este tipo de diseño.
- Los %VMA, se mantuvieron con valores idénticos en los dos tipos de mezclas, demostrando que no es necesario la variación en la dosificación de los agregados pétreos.

Los resultados obtenidos en la investigación demuestran las bondades que brinda la adición de PC de NFU como modificador de las mezclas de asfáltica. Una dosificación apropiada de PC con adecuado TP permite mejorar las propiedades de los hormigones asfálticos convencionales ofreciendo mayor durabilidad, plasticidad así como resistencia a la deformación.

Conclusiones

El grupo de probetas P₂ (5% m/m asfalto del total de la probeta) se escogió como la dosificación de diseño de asfalto para el hormigón asfáltico convencional y modificado. La densidad, tomó un valor de 2,385 g/cm³ fuera de lo establecido pero mantuvo los otros cuatro parámetros evaluados por el Método Marshall (estabilidad, deformación %VMA y %VM) dentro de las especificaciones de calidad de la norma cubana (NC-54-223:90), con valores de (10,33 kN, 2,9 cm, 17%, 4,66 %) respectivamente.

El grupo de probetas de hormigón asfáltico modificado con mejores resultados evaluados por el Método Marshall respecto a la norma cubana (NC-54-223:90), fueron las correspondientes al Trat₁ (12% PC-177 μm), con los parámetros (estabilidad, deformación, %VM y %VMA) con valores de (11,13 kN; 3,02 cm; 5,45%; 17%) respectivamente. La densidad fue de 2,370 g/cm³ y no coincidió con el valor recomendado pero se mantuvo muy cercano a lo establecido.

El conjunto de probetas de hormigón asfáltico modificado Trat₁ (12% PC-177 μm), se comportó con mayor efectividad ante las variables densidad, estabilidad, deformación, %VMA y %VM respecto a las probetas del hormigón asfáltico convencional (P₂). Esto indicó el potencial de reúso para el PC de NFU en mezclas asfálticas, puesto que elevó su calidad a mayor durabilidad, plasticidad y resistencia a la deformación.

Bibliografía

- Asphalt Institute MS-22 . (1982). *Principios de construcción de pavimentos de mezclas asfálticas en caliente*. Lexington, Estados Unidos .
- Bermejo, J., Gallego, J., y Saiz, L. (2014). *Guía para la fabricación de betunes con polvo neumático*. Madrid.
- Botasso, G., Rebollo, O., Cuattrocchio, A., y Soengas, C. (2008). Utilización de caucho de neumáticos en mezcla asfáltica densa en obras de infraestructura. *Infraestructura Vial*, 4-20.
- Campaña, K., Galeas, S., y Guerrero, V. (2015). Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. *Revista Politécnica*, 1.
- Cano, E., Cerezo, L., y Urbina, M. (2007). *Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso*. Madrid: Elecé Industria Gráfica.
- Expósito, S. (2013). Mezclas asfálticas con polvo de caucho NFU: Evaluación acústica en servicio. *Carreteras*, 96-124.

- Figuroa, A., Reyes, F., D, H., Jiménez, C., y Bohórquez, N. (2007). Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. . *Ingeniería e Investigaciones*, 5-15.
- GALLEGO MEDINA, J. (2001). Mezclas bituminosas modificadas por adición de polvo de neumáticos. *CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS (CEDEX)*.
- Gonzalez, J. P. (noviembre de 2013). Innovación y desarrollo en las mezclas asfálticas en la Red de Carreteras del Estado. *Carreteras*, 14.
- Joskowicz, P., Villegas, C., Arias, L., Escobar, J., Landa, L., Corredor, G., y Noriega, J. (2010). Ligantes asfálticos venezolanos modificados con polvo de neumáticos fuera de uso . *5to Congreso de venezolano asfalto* , 1-13.
- Norma Cubana. Especificaciones de Calidad Capa de Rodadura Semidensa y Tráfico Pesado. NC-54-223:90.* (1990). Cuba.
- Pelizzoni, J., Fumagalli, S., Quarleri, R., y Blanco, E. (2013). AVANCES DE DISEÑO DE PROTOTIPO DE EQUIPO DETROZADO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO PROVENIENTES DE LA EXPLOTACIÓN MINERA. *VIº Congreso Argentino de Ingeniería Industrial*.
- Reschner, K. (2008). *Scrap Tire Recycling* . Obtenido de A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods : http://entire-engineering.de/Scrap_Tire_Recycling.pdf
- Reyes, F., Madrid, M., y Salas, S. (2007). Mezclas asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsas de leche con asfalto 80-100). *Infraestructura vial* , 25-34.
- Rondón, H., Fernández, W., y Castro, W. (2010). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). *Revista Ingeniería de Construcción*, 83-94.
- Rondón, H., Rodríguez, E., y Moreno, L. A. (2007). RESISTENCIA MECÁNICA EVALUADA EN EL ENSAYO MARSHALL DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE ELABORADAS CON ASFALTOS MODIFICADOS CON DESECHOS DE POLICLORURO DE VINILO (PVC), POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD) Y POLIESTIRENO (PS). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 92- 104.