

# Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores

Campaña O.\*; Galeas S.\*; Guerrero V.\*

\*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador  
e-mail: {kleber.campana; salome.galeas; victor.guerrero}@epn.edu.ec

**Resumen:** Las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho se utilizan para obtener pavimentos cuyas propiedades de durabilidad aumentan los tiempos entre mantenimientos y reducen su costo total. En este trabajo se describen los procesos seco y húmedo empleados para obtener asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de uso automotriz. También se presentan las propiedades Marshall y de desempeño que evidencian los beneficios del este tipo de asfalto. Para la mezcla asfalto-polvo de caucho por el proceso húmedo se obtuvieron tres mezclas con 10, 15 y 20 wt % de polvo de caucho en relación al bitumen. Para la mezcla seca se añadió 1, 2 y 3 wt % de polvo de caucho en relación al agregado asfáltico. Para evaluar las mezclas asfálticas producidas se efectuaron las pruebas de gravedad específica máxima teórica, densidad de mezclas asfálticas (método RICE), densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos. Para evaluar el desempeño de las mezclas se obtuvo el módulo de rigidez, la resistencia a la fatiga y la deformación dinámica. De los resultados obtenidos se puede observar 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. Los resultados obtenidos son un punto de partida para posteriores investigaciones sobre los beneficios del asfalto modificado con polvo de caucho y su aplicabilidad en Ecuador.

**Palabras clave:** Bitumen, propiedades Marshall, densidad bulk, asfalto modificado, método RICE, polvo de caucho.

**Abstract:** Asphalt mixtures modified with crumb rubber are used to obtain pavements with durability properties that increase the time between maintenance and reduce their cost. This article describes the dry and wet processes used for preparation of asphalt modified with crumb rubber obtained from recycled car tires. The durability and Marshall properties are also presented, and demonstrate the benefits of these mixtures. Three crumb rubber-asphalt mixtures were prepared using 10, 15 and 20 wt % of rubber powder compared to bitumen. For the dry process asphalt mixtures, 1, 2 and 3 wt % of crumb rubber compared to the asphaltic aggregate were used. Theoretical maximum specific gravity, density of asphalt mixtures (RICE method), bulk density (unit weight), and percentage of voids of the compacted or loose aggregates tests were developed in order to evaluate the asphalt mixtures. The durability tests performed were those used to determine the stiffness modulus, fatigue resistance and dynamic creep. From the results, it is noticeable that there are better properties of fatigue resistance in the wet process modified asphalt with 20 wt % of crumb rubber compared to bitumen, while the higher modulus and dynamic creep was obtained for the wet process modified asphalt with 10 wt % of crumb rubber. The results are a starting point for further research on the benefits of modified asphalt with rubber powder and its applicability in Ecuador.

**Keywords:** Bitumen, Marshall properties, bulk density, modified asphalt, RICE method, crumb rubber.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso de polvo de caucho en mezclas asfálticas ha sido acogido en Estados Unidos al menos desde inicios de los sesenta por el Departamento de Transporte de Arizona. Desde entonces este tipo de material ha sido adoptado alrededor del mundo [7]. Los beneficios del asfalto modificado con polvo de caucho se evidencian en la mejora de las propiedades de durabilidad ya que previene el agrietamiento del cemento asfáltico, mejora la adherencia en

superficies mojadas para disminuir su incidencia en accidentes de tránsito y ayuda a reducir el ruido que se transmite a través del pavimento. Además, se puede citar el beneficio ambiental que representa el tener una aplicación para el caucho triturado de los neumáticos que han sido desechados al final de su vida útil. Los dos métodos estudiados en este trabajo para la incorporación de polvo de caucho en el cemento asfáltico son el proceso por vía seca y proceso por vía húmeda. En el proceso seco, el polvo de caucho es incorporado al agregado pétreo como una porción

de agregado fino antes de mezclarse con el asfalto. En el proceso húmedo, el polvo de caucho se adiciona al ligante; es decir, al asfalto caliente cuando su viscosidad es relativamente baja y permite la mezcla [12].

Las propiedades del asfalto modificado con polvo de caucho son muy sensibles al proceso de mezcla, que depende de factores externos como temperatura de la mezcla, tiempo y velocidad de agitación, y factores internos como cantidad y tamaño de partícula del polvo caucho, tipo de asfalto, tipo y pureza del polvo de caucho [13]. Un aspecto de relevante importancia en la mezcla húmeda es el mecanismo de agitación, que debe ser de alto cizallamiento con el fin de lograr la digestión total del polvo de caucho en el bitumen, evitando la turbulencia y la separación de las fases del asfalto modificado [8].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo este trabajo se emplearon polvo de caucho, asfalto y agregados pétreos. Estos materiales se usaron para obtener mezclas asfálticas modificadas con caucho mediante los procesos seco y húmedo.

### 2.1. Materiales

El polvo de caucho usado en el estudio fue proporcionado por una empresa dedicada al reciclaje de neumáticos automotrices en la ciudad de Quito. El polvo de caucho empleado para mejorar las propiedades del cemento asfáltico debe cumplir ciertas especificaciones que se encuentran establecidas en la norma NTE INEN 2680:2013 [10]. La norma establece los siguientes puntos:

- El caucho reciclado debe contener menos del 0.75 % de humedad en peso y libre de flujo. La gravedad específica de este caucho debe ser de  $1.15 \pm 0.05$ .
- El caucho reciclado no debe contener partículas visibles de metales no ferrosos y no más de 0.01 % en peso de partículas de metales ferrosos.
- Se recomienda que todas las partículas de caucho tengan un tamaño capaz de pasar por el tamiz de 2.36 mm (No. 8)

Además, es necesario evaluar la degradación del polvo de caucho a la temperatura de ensayo (175 °C) [10].

La humedad de la muestra de caucho se determinó mediante una termobalanza OHAUS modelo MB45 con resolución de 0.01 %. La cantidad de material ferroso presente en el polvo de caucho se determinó pesando una muestra con y sin partículas metálicas presentes. Estas partículas metálicas se removieron con ayuda de un electroimán construido para el efecto. Las masas se midieron empleando una balanza analítica con resolución de 0.1 mg marca SHIMADZU. Para determinar la degradación por temperatura del caucho se empleó un analizador termogravimétrico (TGA) marca TA Instruments modelo Q500. Para la gravedad específica se

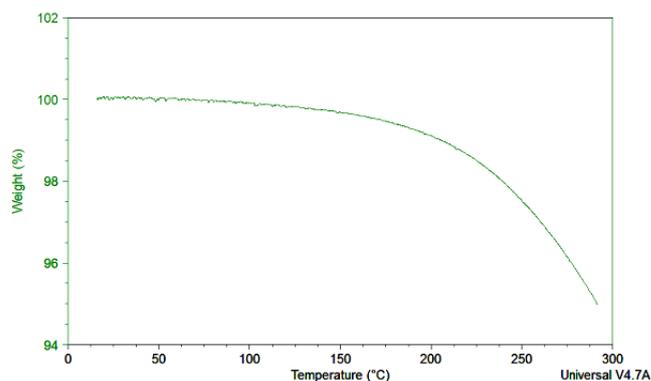
determinó la densidad de la muestra de caucho mediante el método hidrostático.

En la Tabla 1 se muestran los resultados del análisis del polvo de caucho empleado para la mezcla. En la Fig. 1 se presenta la curva de pérdida de masa de una muestra de polvo de caucho de neumáticos automotrices reciclados, obtenida usando el analizador termogravimétrico TGA.

**Tabla 1.** Resultados del análisis del polvo de caucho usado en la obtención de mezclas asfálticas modificadas mediante los procesos seco y húmedo

Humedad en el polvo de caucho	Gravedad específica	Caucho tamizado Tamiz No. 8 (2.36 mm)	Contenido de material ferroso
(%)		(%)	(%)
0.41	1.17	100	0.011

En la Fig. 1 se puede apreciar que la pérdida de masa del polvo de caucho a una temperatura de 175 °C es de alrededor de 0.7 %. Esto permite afirmar que el polvo de caucho se puede incorporar al asfalto sin que exista una significativa degradación térmica.



**Figura 1.** Degradación del polvo de caucho obtenida mediante TGA

Respecto al asfalto, éste debe cumplir con los requerimientos de la norma NTE INEN 2515:2010[9]. El asfalto de clasificación AC-20 así como los agregados pétreos para el proceso seco fueron proporcionados por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (MTOPE) y cumplían con los requerimientos de la norma citada. Los análisis fueron realizados por la empresa CONSERMIN S.A. y los resultados fueron aceptados por el Laboratorio de Suelos y Materiales del MTOPE-Quito.

### 2.2 Métodos

#### 2.2.1 Mezclas de asfalto-caucho por proceso seco

En el proceso seco el caucho reciclado es mezclado con los agregados pétreos antes de adicionar el cemento asfáltico. Los granos de caucho se consideran como un árido más, o como sustituto de una pequeña parte del agregado fino. Mediante este proceso, el caucho pasa de ser un árido elástico a ser un modificador del ligante en la mezcla asfáltica. A este proceso de interacción se le llama digestión del caucho [6]. Para obtener la mezcla con asfalto-caucho por el proceso

seco se sigue el procedimiento establecido por Segobia [12]. Así:

- Se prepara la granulometría de los agregados pétreos, para lo que se emplea gravilla de 3/8 de pulgada (74 %) y 3/4 de pulgada (26 %) del total de agregado pétreo.
- Se calientan los agregados en un horno a temperatura entre 170 y 210 ° C.
- Se establece que las proporciones de caucho a utilizar serán de 1, 2 y 3 wt %, en relación al peso de los áridos.
- Se mezclan los agregados calientes con la cantidad de caucho correspondiente, y se los coloca en el horno entre 150 y 190 ° C por aproximadamente 5 minutos para que el caucho aumente su temperatura.
- Se adiciona el asfalto, previamente calentado a la temperatura de mezclado, a la mezcla de agregados con caucho y se mezcla durante 2 a 3 minutos.
- Se coloca la mezcla asfáltica durante un periodo de digestión. Al finalizar la digestión se retira la mezcla del horno y se remueve el material.
- Se compacta la mezcla caliente en moldes Marshall precalentados para obtener las briquetas a ensayar. La compactación se lleva a cabo a una temperatura 10 ° C más baja que la de digestión, con 75 golpes del martillo Marshall, por ambos lados de la probeta.
- Se deja reposar por 24 horas antes de extraer la probeta del molde. La probeta se remueve a temperatura ambiente.

En este trabajo se obtuvieron mezclas con un porcentaje de adición de caucho de 1, 2 y 3 wt % en relación al peso del agregado. El porcentaje de asfalto en las mezclas es de 6.1 wt % respecto del agregado más el caucho añadido. Este porcentaje de asfalto en las mezclas se tomó como referencia y corresponde a la cantidad de asfalto usada en un pavimento empleado por una contratista local en un proyecto vial desarrollado recientemente en Ecuador. La temperatura de digestión se fijó en 170 ° C y el tiempo de digestión en 2 horas, de acuerdo con lo recomendado en la bibliografía. En la Tabla 2 se presenta las cantidades de material usadas en las mezclas. Para obtener las mezclas se partió de 4500 g de agregados. Esta masa se definió considerando la cantidad de probetas que se debían preparar.

**Tabla 2.** Cantidades de agregados, asfalto y caucho utilizadas para preparar tres muestras para el proceso seco

Mezcla		Muestra A	Muestra B	Muestra C
Masa de agregados	(g)	4500	4500	4500
Porcentaje de caucho	(%)	1	2	3
Masa de caucho	(g)	45	90	135
Porcentaje de asfalto	(%)	6.1		
Masa de asfalto	(g)	277.25	280	282.73

En la Fig. 2 se puede observar la preparación del material por el proceso seco. Las briquetas de ensayo fueron fabricadas en el Laboratorio de Suelos y Materiales del MTOP-Quito.



**Figura 2.** Proceso seco de mezcla asfalto-polvo de caucho

### 2.2.2 Mezclas de asfalto-caucho por proceso húmedo

En el proceso húmedo, el asfalto es pre-mezclado con el caucho a una temperatura elevada (175-210 ° C) y se mezcla en condiciones específicas [8]. Para la mezcla del polvo de caucho y asfalto se requiere un mecanismo de agitación de alto corte con una velocidad de alrededor 2000 r.p.m. y el tiempo de mezcla es alrededor de 4 horas [11]. Esta mezcla se efectuó en condiciones de laboratorio empleando un agitador de paletas Heidolph RZR2021 con 40-2000 (min<sup>-1</sup>) de velocidad.



**Figura 3.** Proceso húmedo de mezcla asfalto-polvo de caucho

Mediante una plancha de calentamiento Thermo Scientific Climarec se mantuvo la mezcla asfáltica a 175 ° C agitándose dentro de un recipiente térmicamente aislado y monitorizado mediante un sensor con termocupla tipo K. En la Fig. 3 se observa el equipo empleado para mezclar polvo de caucho y asfalto.

Inicialmente se obtuvieron tres composiciones de la mezcla, para observar su homogeneidad y detectar dificultades en el proceso, como humeo y generación de espuma. En la Tabla 3 se presentan las composiciones porcentuales y en peso de polvo de caucho mezcladas con el asfalto. En la Tabla 4 se muestran los resultados de la evaluación cualitativa de estas mezclas.

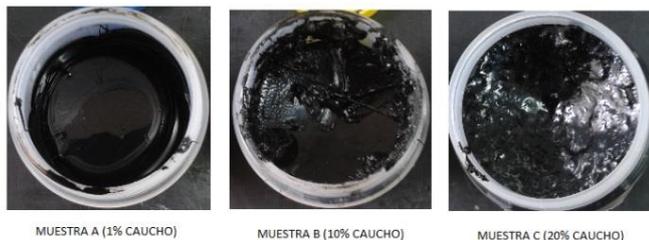
**Tabla 3.** Cantidades de asfalto y polvo de caucho usadas para evaluar cualitativamente el proceso de mezclado

Muestra	Polvo de caucho		
	Asfalto (g)	(g)	(%) de mezcla
A	92.57	0.93	1
B	129.54	12.95	10
C	182.83	36.56	20

**Tabla 4.** Evaluación cualitativa del proceso de mezcla asfalto-polvo de caucho

Muestra	Humeo	Espuma	Mezcla
A	No se evidencia	No se evidencia	Homogénea
B	No se evidencia	No se evidencia	Homogénea
C	No se evidencia	No se evidencia	Homogénea

Una vez transcurridos 7 días luego de efectuar las pruebas de incorporación de polvo de caucho a muestras de asfalto, no se observan cambios físicos en el asfalto modificado. Las muestras son estables. En la Fig. 4 se pueden observar las muestras de las mezclas obtenidas después de 7 días, sin que se presente alguna anomalía apreciable.



**Figura 4.** Muestras de mezcla asfalto-polvo de caucho estables después de 7 días desde su procesamiento.

Tomando como base los resultados de los ensayos cualitativos, se siguió el procedimiento para obtener tres mezclas húmedas de asfalto-polvo de caucho (10, 15 y 20 wt % de polvo de caucho en relación al peso del asfalto). Estas muestras fueron combinadas con los agregados pétreos en el laboratorio del MTOP-Quito y se elaboraron briquetas siguiendo un procedimiento similar al empleado en el proceso seco de mezcla citado anteriormente. Se llegaron a obtener tres briquetas de ensayo para cada composición de mezcla húmeda utilizando aproximadamente 300 g de asfalto modificado con caucho. En la Tabla 5 se presentan las composiciones de las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho.

**Tabla 5.** Cantidades de asfalto y caucho utilizadas para preparar tres muestras mediante el proceso húmedo

Mezcla		Muestra A	Muestra B	Muestra C
Masa de asfalto	(g)	303.2	300.7	301.1
Porcentaje de polvo de caucho	(%)	10	15	20
Masa de caucho	(g)	30	45	60

Para comparar el desempeño de las mezclas asfálticas modificadas con el del asfalto sin modificar se consideró como referencia un pavimento empleado recientemente en un proyecto vial en Ecuador. Para este material se empleó un 6,1

wt % de asfalto como ideal para la mezcla con los agregados pétreos.

### 2.3. Ensayos para determinar las propiedades Marshall

#### 2.3.1 Gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas asfálticas (método RICE)

La gravedad específica teórica máxima y la densidad de mezclas asfálticas son propiedades importantes, cuyos valores dependen de la composición de la mezcla en términos del tipo y cantidad de agregados y de los materiales asfálticos. Estos valores son usados para calcular el porcentaje de vacíos en una mezcla de pavimento asfáltico en caliente compactada que sirve para calcular la cantidad de asfalto absorbido por los poros internos del agregado en una mezcla asfáltica en caliente. Estos valores son importantes para el proceso de compactación de mezclas asfálticas para pavimentos. El procedimiento para determinar la gravedad específica máxima y la densidad de las mezclas asfálticas (método RICE) se encuentra descrito en la norma ASTM D2041-11 [2].

#### 2.3.2 Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos

La densidad bulk es la relación entre la masa de un volumen unitario total de un agregado, el cual incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de vacíos entre las partículas. Este ensayo cuyo procedimiento se encuentra descrito en la norma ASTM D1188-07 [1] sirve para determinar valores de densidad bulk, que son utilizados en muchos métodos de selección de proporciones para mezclas de agregados.

### 2.4 Ensayos de desempeño

#### 2.4.1 Módulo de rigidez

La rigidez de las mezclas de asfalto-agregado es de suma importancia en la determinación de la calidad de un pavimento y es esencial para el análisis de la respuesta del pavimento ante la carga de tráfico. El ensayo se hace bajo los parámetros de la norma ASTM D6648-08 [13].

#### 2.4.2. Resistencia a fatiga

Las propiedades a fatiga de la mezcla asfáltica son importantes debido a que uno de los modos de falla es la fisuración por fatiga. Las pruebas de flexión (a 2,3 y 4 puntos) se utilizan para caracterizar la fatiga de las mezclas asfálticas. Estas pruebas consisten en someter una viga de mezcla asfáltica a flexión repetida hasta la falla. De dichas pruebas se obtienen las leyes de fatiga y módulos de rigidez a fatiga. El ensayo se hace bajo los parámetros de la norma ASTM D7460-10 [5].

#### 2.4.3 Deformación dinámica

El ensayo de deformación dinámica es desarrollado para

estimar el potencial ahuellamiento de las mezclas asfálticas, definiéndose como ahuellamiento a la depresión canalizada en la huella de circulación de los vehículos. Esta prueba se realiza de acuerdo con los procedimientos descritos en la norma ASTM D7405-10a [4].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Resultados de los ensayos para determinar las propiedades por el método Marshall.

En las Tablas 6 y 7 se pueden apreciar los resultados de las pruebas para determinar las propiedades Marshall de las mezclas asfálticas con polvo de caucho obtenidas por el proceso seco y húmedo respectivamente. En la Tabla 8 se pueden observar los resultados de las pruebas hechas en el asfalto sin modificar.

**Tabla 6.** Densidad bulk y gravedad específica RICE para el material utilizado en la fabricación de briquetas con asfalto modificado por el proceso de mezcla seca. (Fuente: Laboratorio de Suelos y Materiales del MTOP-Quito)

Polvo de caucho (%)	Peso aire (g)	Peso agua (g)	Peso saturado superf. seco (g)	Dens. bulk (g/cm <sup>3</sup> )	Gravedad esp. (RICE) (g/cm <sup>3</sup> )	Estab. correg. (lb.)	Flujo
1	1092	588	1093	2162	2377	3611	17
1	977	521	978	2138		3500	12
1	926	487	927	2105		2368	12
2	1140	608	1142	2135	2334	3483	18
2	1160	625	1161	2164		4210	13
2	1062	566	1064	2132		3220	15
3	1163	615	1165	2115	2329	2361	17
3	1114	586	1118	2094		2445	14
3	1074	562	1078	2081		2530	13

**Tabla 7.** Densidad bulk y gravedad específica RICE para el material utilizado en la fabricación de briquetas con asfalto modificado por el proceso de mezcla húmeda. (Fuente: Laboratorio de Suelos y Materiales del MTOP-Quito)

Polvo de caucho (%)	Peso aire (g)	Peso agua (g)	Peso saturado superf. seco (g)	Dens. bulk (g/cm <sup>3</sup> )	Gravedad específica (RICE) (g/cm <sup>3</sup> )	Estab. correg. (lb.)	Flujo
10	1254	703	1268	2219	2354	5981	18
10	1129	626	1137	2209		6885	18
10	1154	638	1162	2202		6358	16
15	1289	715	1299	2207	2383	5310	15
15	1038	576	1049	2195		5458	17
15	1094	600	1103	2175		5060	14
20	1137	625	1144	2191	2375	4995	12
20	1141	625	1152	2165		4127	13
20	1060	582	1075	2130		4232	12

**Tabla 8.** Densidad bulk y gravedad específica RICE para la mezcla asfáltica sin modificar, con 6.1 wt % de asfalto (Fuente: CONSERMIN S.A.)

Peso aire (g)	Peso agua (g)	Peso saturado superf. seco (g)	Densidad bulk (g/cm <sup>3</sup> )	Gravedad específica (RICE) (g/cm <sup>3</sup> )	Estab. correg. (lb.)	Flujo
1245	694	500	2311	2409	3123	12

Comparando los resultados se tiene que el valor de densidad bulk que más se aproxima al valor de la mezcla sin modificar corresponde al asfalto modificado por proceso húmedo con 10 % de polvo de caucho mezclado en asfalto y difiere en un 4.37 %. En cuanto al valor de la gravedad específica (método RICE) se tiene que el valor que más se aproxima al valor de la mezcla sin modificar corresponde al asfalto modificado por proceso húmedo con 15 % de polvo de caucho mezclado en asfalto y difiere en un 1.08 %.

De los resultados anteriores se puede concluir que los asfaltos modificados obtenidos tienen valores menores de densidad bulk y gravedad específica (método RICE) con respecto a los valores proporcionados por una empresa contratista local para la mezcla asfáltica sin modificar usada como referencia. La estabilidad y el flujo son significativamente superiores en las mezclas asfálticas modificadas mediante el proceso húmedo, especialmente cuando se emplean 10 y 15 wt % de polvo de caucho.

#### 3.2 Resultados de los ensayos de desempeño para las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho

Los ensayos de desempeño fueron realizados por el Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. En la Tabla 9 se presentan los resultados de los ensayos de desempeño realizados. Estos ensayos permitieron determinar el módulo de rigidez a 20 °C, tanto a deformación constante como a esfuerzo constante, las repeticiones en el caso de fatiga a esfuerzo constante y la deformación dinámica a 40 °C. En el caso de mezclas obtenidas mediante el proceso seco se observó que cuando la cantidad de polvo de caucho añadida era de 2 y 3 wt %, el módulo de rigidez a deformación constante se redujo sustancialmente, al punto que no pudo ser registrado. Esta baja rigidez que impedía el uso práctico de estos materiales hizo que no se continúe con los demás ensayos.

Analizando los resultados obtenidos de las pruebas de desempeño se puede decir que se obtienen mejores propiedades con las mezclas realizadas por el proceso húmedo. Esto se puede deber a que se tiene mayor homogeneidad en las fases permitiendo la coalescencia entre el polvo de caucho y el asfalto de mejor manera que en el proceso seco.

El contenido de caucho con el cual se obtuvieron los mejores resultados de resistencia a la fatiga, módulo de rigidez y deformación dinámica es para la mezcla húmeda con el 20 wt

% de polvo de caucho añadido. Por otro lado, la adición de polvo de caucho en las mezclas asfálticas disminuye la deformación dinámica. Esto mejora las propiedades de la mezcla para contrarrestar el defecto de depresión o ahuellamiento.

**Tabla 9.** Resultados de los ensayos de desempeño realizados en las briquetas de cemento asfáltico modificado con polvo de caucho mediante el proceso seco y húmedo. (Fuente: Laboratorio de Carreteras de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil).

MEZCLA SECA				
Polvo de caucho	Módulo rigidez a deformación constante	Módulo rigidez a esfuerzo constante de 500 kPa	Resistencia a la fatiga a esfuerzo constante de 500 kPa	Deformación dinámica a 40 °C
(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)
1	1115	-	-	-
1	1039			
1	969			
2	Fuera de rango de medición	-	-	-
2				
2				
3	Fuera de rango de medición	-	-	-
3				
3				
MEZCLA HÚMEDA				
Polvo de caucho	Módulo rigidez a deformación constante	Módulo rigidez a esfuerzo constante de 500 kPa	Resistencia a la fatiga a esfuerzo constante de 500 kPa	Deformación dinámica a 40 °C
(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)
10	6314	5355	1771	0.65
10	7794			
10	7143			
15	5644	4359	1254	0.35
15	5328			
15	6211			
20	6672	5072	2409	0.24
20	6982			
20	7078			

#### 4. CONCLUSIONES

La gravedad específica y la densidad de las mezclas asfálticas obtenidas tanto mediante el proceso seco como el húmedo son ligeramente inferiores a las del asfalto sin modificar. Esto está asociado con mayores volúmenes vacíos en el asfalto modificado y mayor permeabilidad en las mezclas modificadas.

En el proceso seco de adición de polvo de caucho en la mezcla asfáltica se evidencia experimentalmente que el tiempo de digestión debe ser de al menos 2 horas. Esto permitiría que el caucho interactúe con el ligante, modificando la reología del asfalto original.

El módulo de rigidez en función de la temperatura y la velocidad de aplicación de la carga es una relación entre la tensión aplicada y la deformación resultante. En las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho el valor del módulo es mayor. Esto se traduciría en menores espesores del pavimento asfáltico y conlleva a un ahorro por concepto de volumen de material en el diseño de una obra vial.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten afirmar que la modificación de asfalto ecuatoriano usando polvo de caucho proveniente de neumáticos reciclados representa una valiosa oportunidad para obtener pavimentos con mejores propiedades que los tradicionales. Estos pavimentos podrían tener mayor duración y menores costos de mantenimiento.

#### REFERENCIAS

- [1] Standard test method for bulk specific gravity and density of compacts bituminous mixtures using coated samples, ASTM D1188-07, 2007.
- [2] Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures, ASTM D2041/D2041M-11, 2011.
- [3] Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR), ASTM D6648-08, 2008.
- [4] Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM D7405-10a; 2010.
- [5] Standard test method for determining fatigue failure of compacted asphalt concrete subject to repeated flexural bending, ASTM D7460-10, 2010.
- [6] M. Gallego, J. De Val, (2010, Mayo) "Efecto del empleo de caucho de neumáticos usados por vía seca en las características de las mezclas bituminosas en caliente", Transportationresearchboard, ID 01189667, pp. 8-10.
- [7] M. Ibrahim, H. Katman, M. Karim, S. Koting, N. Mashaan (2013, Octubre). "A review on the effect of crumb rubber addition to the rheology of crumb rubber modified bitumen" [Online] *Volumen 2013, ID 415246*, pp.1-8., Disponible en: <http://www.dx.doi.org/10.1155/2013/415246>
- [8] D. Lo Presti, G. Airey, P. Portal, "Manufacturing terminal and field bitumen-tire rubber blends: the importance of processing conditions," SIV-5th international congress – Sustainability of road infrastructures, Sciencedirect, Septiembre, 2010.
- [9] Productos derivados del petróleo. Cemento asfáltico (clasificación por viscosidad), Requisitos, NTE INEN 2515:2010, 2010.
- [10] Productos derivados del petróleo. Asfalto modificado con caucho reciclado. Requisitos e inspección, NTE INEN 2680:2013, 2013.
- [11] P. Sebaaly, G. Bazi, D. Weitzel, D. Bush. "Long term performance of crumb rubber mixtures in Nevada", Proc. Asphalt rubber conference, Brazilia, 2003.
- [12] R. Segobia, "Estudio del efecto de la variación de la granulometría del caucho en mezclas asfálticas por vía seca", Memoria para optar por el título de ingeniero civil, Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2007.
- [13] G. Way, "Recycled tire engineering and research foundation", The waste and resources action programme, Paper R-9.
- [14] S. Xhian, B. Huang, (2008, Junio) "Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: an overview; construction and building materials", paper S0950061813010490.