

APROVECHAMIENTO DE PARTÍCULAS DE NEUMÁTICOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Catalina Díaz, Silvia Paola Recalde, Gonzalo Chiriboga, Jorge Medina
catalina_diaz22@hotmail.com; sprecald_h@hotmail.com; gonzalo_chiriboga@hotmail.com;
jmedina.25@iquce.edu.ec

Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería Química. Casilla 17-01-3972
Recibido: 15 abril 2013 Aceptado: 10 mayo 2013

RESUMEN

Investigación realizada en tres etapas, en la primera se identificaron las propiedades fisicoquímicas de las partículas, tales como: forma geométrica, densidades real y aparente, porosidad, contenido de caucho natural y área interfacial; en la segunda se estudió la reología de las mezclas caucho en asfalto, utilizando el viscosímetro Brookfield, variando tamaño, concentración de partículas y temperaturas. y la tercera fue una caracterización fisicoquímica de estas mezclas, siguiendo ensayos ASTM para productos asfálticos y contenido de parafinas.

De los resultados experimentales se puede concluir que, las partículas de 0,5 mm y concentración de 7,5% en peso es lo recomendable; mientras que de la caracterización ASTM se observa que las mezclas de 7,5 y 10,0% en peso presentan las mejores condiciones como carpeta asfáltica.

PALABRAS CLAVES: Reciclaje; neumáticos; caucho; partículas; área interfacial; asfalto; mezclas asfálticas; reología; caracterización de asfaltos.

ABSTRACT

The research was done in three stages. At the first one, we identified the crumb rubber's physical chemistry properties, such as: geometrical form, real and apparent density, porosity, content of natural rubber and interfacial area; at the second one, the rheological behavior of the mixes asphalt-rubber was studied using a Brookfield viscometer, varying size, concentration of particles and temperatures; and, at the third one, the physical chemistry characterization of these mixes was done following ASTM essays for asphalts products and content of paraffins.

According to the experimental result, we could conclude that the particles of 0,5 mm and concentration of 7,5% in weight are recommendable; the ASTM characterization define that the mixes of 7,5 and 10,0% in weight present the best conditions for the asphalt.

KEYWORDS: Recycling; tires; rubber; particles; interfacial area; asphalt; asphaltic mixture; rheology; characterization of asphalt.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente utilización de automotores para diferentes propósitos ha generado una enorme cantidad de neumáticos usados cada año. El almacenamiento o el desecho de los neumáticos usados contaminan el ambiente. Su resistencia contra la descomposición de cualquier tipo, su enorme necesidad de espacio para almacenarlos así como el desperdicio de las materias primas si no se usan, y el riesgo de incendio cuando están apilados, los convierten en un grave problema ambiental en muchos países.

Para solucionar la disposición final de neumáticos usados, que además de ser un problema ambiental es económico y de salud pública, que ha llevado a ciertas empresas como Amandus Kahl de Alemania, a construir maquinarias industriales para desintegrar neumáticos y obtener diferentes tamaños de partículas para diversas aplicaciones, ha motivado a la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador a incorporar este tema dentro de sus actividades de investigación.

En 1920 empezaron los estudios y las primeras pruebas de la modificación del asfalto con caucho molido, sin mucho éxito. El primer proceso de incorporación por vía húmeda fue llamado el proceso McDonald. Debido a los estudios realizados en 1960, por Charles McDonald, su estudio se basó en buscar una fórmula de tiempo/temperatura para la adición de caucho reciclado al asfalto.

En nuestro país, los agregados para carpetas asfálticas se han limitado al uso de material pétreo procedente de la desintegración mecánica de rocas de canteras, arena de río y en pequeñas cantidades arena silícica.

Dada la composición de los neumáticos y cierta afinidad con el asfalto, hace intuir que al incorporarle partículas de neumáticos usados desintegradas, éstas absorberán los aceites, lo que

permitirá mejorar las propiedades mecánicas del asfalto destinado para la construcción de carpetas asfálticas. Esta suposición puede verificarse con la ayuda de estudios reológicos y la caracterización fisicoquímica de las mezclas asfálticas mediante ensayos ASTM.

Los resultados indican que las partículas de 0,5 mm tienen la mayor área interfacial que es de: $5.657,85 \text{ m}^2/\text{m}^3$, y que la concentración de 7,5% en peso de partículas agregadas al asfalto indican un mejor contacto superficial asfalto-caucho, generando mejores propiedades reológicas por su equitativa dispersión en el seno del asfalto; además, muestran características pseudoplásticas y al aumentar la temperatura se acercan al comportamiento newtoniano. De la caracterización se concluye que las mejores mezclas son aquellas con 7,5 y 10,0% en peso de caucho, por su estabilidad térmica, elasticidad e índice de penetración.

2. COMPOSICIÓN DE LOS NEUMÁTICOS

Un neumático automotriz moderno es un producto compuesto de hasta 34 componentes distintos, cada uno de los cuales puede ser a su vez un material compuesto. Aparte de las diferencias de diseño y tamaño, los neumáticos en general son un producto homogéneo con una composición promedio¹ que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Composición de los neumáticos referido a la masa total

COMPONENTE	PORCENTAJE EN PESO
Caucho natural o sintético	48
Negro de humo	23
Cable de acero	18
Bandas textiles	3
Otros productos químicos	8

3. EL ASFALTO

Generalmente se denomina asfalto a determinadas sustancias de color oscuro que pueden ser líquidas, semisólidas o sólidas, compuestas esencialmente de hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono o tricloroetileno la mayor parte; y procedentes de yacimientos naturales u obtenidas como resultado del procesamiento de determinados crudos de petróleo por destilación o extracción y cuyas propiedades físicas y químicas los hacen aptos para múltiples aplicaciones.

4. REOLOGÍA

La Reología es la rama de la Física que estudia las propiedades de deformación y fluencia de la materia, como la viscosidad, elasticidad, ductilidad, fragilidad, entre otras.

De acuerdo con la ley de Newton de la viscosidad, al representar gráficamente el esfuerzo cortante, τ_{yx} , en función de la velocidad de deformación, $-(dv_x/dy)$, para un fluido newtoniano, debe obtenerse una línea recta que pasa por el origen de las coordenadas, y cuya pendiente es la viscosidad del fluido a cierta temperatura y presión. La ecuación de esta ley es la siguiente:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} \quad (1)$$

Donde:

τ_{yx} , es el esfuerzo cortante.

μ , es la viscosidad del fluido.

$\frac{dv_x}{dy}$, es la velocidad de deformación.

5. EL CAUCHO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

La incorporación de estos materiales permite formar una red polimérica tridimensional en el interior del asfalto y de esta manera modifica y mejora sus propiedades mecánicas que permiten absorber gran parte de la energía de deformación que sufren las carpetas asfálticas al estar sujetas a esfuerzos extremos, causados por la acción de los agentes atmosféricos, la heterogénea calidad de

los materiales que se emplean y el hecho de no tener en consideración las condiciones climáticas del lugar.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Caracterización fisicoquímica de las partículas

- Tamizado utilizando los tamices de la serie Tyler.
- Determinación de la densidad real.
- Determinación de la densidad aparente de las muestras y la porosidad de lecho que forman.
- Determinación del contenido de cenizas en las muestras por calcinación.
- Determinación de caucho natural.
- Determinación de la geometría de la partícula según DIN 4022.

6.2. Mezcla asfalto-caucho

- La incorporación de partículas de neumáticos en el asfalto convencional se realizó mediante calentamiento de éste con ayuda de un agitador de paletas.
- La caracterización reológica se realizó según la norma ASTM D2196, Método A.

6.3. Caracterización fisicoquímica del asfalto base y las mezclas asfálticas

Los diferentes ensayos fisicoquímicos se realizaron de acuerdo con las normas ASTM que se indican a continuación.

- | | |
|--|-------------|
| – Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s | ASTM D-5 |
| – Viscosidad Saybolt, SSF a 135 °C | ASTM D-88 |
| – Viscosidad Cinemática a 135 °C | ASTM D-2170 |
| – Punto de Inflamación en Copa Abierta Cleveland | ASTM D-92 |
| – Ductilidad a 25 °C, 5 cm/min | ASTM D-113 |
| – Solubilidad en Tricloroetileno | ASTMD-2042 |
| – Pérdida de la Masa por Calentamiento 163 °C, 5 rpm | ASTM D-1754 |
| – Punto de Ablandamiento | ASTM D-36 |

- Contenido de Asfaltenos ASTM D-3279
 – Determinación del Contenido
 de Parafinas EN 12606-1

7. RESULTADOS

Los resultados del presente trabajo se presentan en las diferentes tablas y en representaciones gráficas, que se indican a continuación:

Tabla 2. Caracterización física de las partículas

Tamaño mm	ρ_{real}	$\rho_{parente}$	ϵ_1	τ_1	ϵ_2	τ_2	$a_1, m^2/m^3$	$a_2, m^2/m^3$
0,5	1,1623	0,3835	0,6700	0,3300	0,6709	0,3291	5657,8484	5642,042
0,5-2	1,1661	0,3683	0,6842	0,3158	0,6797	0,3203	2165,7740	2196,108
2-4	1,1630	0,4143	0,6438	0,3562	0,6484	0,3516	1017,8477	1004,558
4-6	1,1658	0,4073	0,6506	0,3494	0,6576	0,3424	598,9719	586,966

Tabla 3. Caracterización química de las partículas

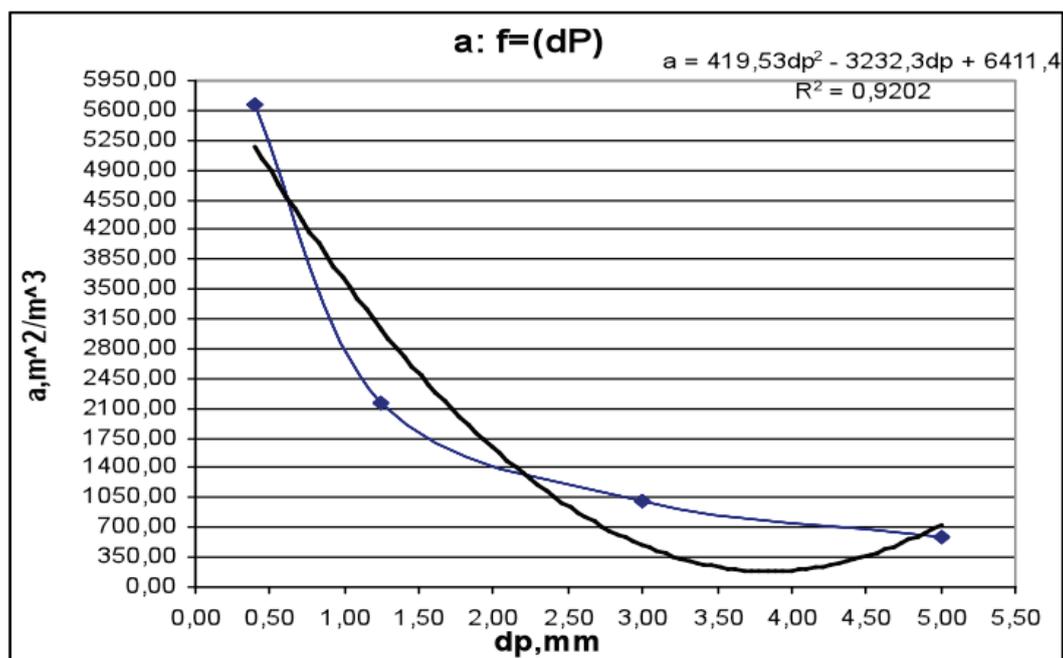
Tamaño mm	% ceniza	% Caucho natural	% Caucho Sintético
0,5	9,3887	6,0343	93,966
0,5-2	7,5818	8,9945	91,005
2-4	13,5809	5,0755	94,924
4-6	12,2343	4,9148	95,085

Tabla 4. Resultados de los ensayos fisicoquímicos comparativos de las diferentes muestras

ENSAYO	UNIDAD	Teórico	Mezcla %			
			0%	5%	7,5%	10%
Penetración	1/10 mm	90,00	91,33	53,11	52,22	50,77
Viscosidad Saybolt	SSF	201,00	198,80	---	---	---
Viscosidad	cP	---	---	2183,33	4241,67	7525,00
Punto de inflamación	°C	256,00	256,00	263,67	265,00	263,00
Ductibilidad	cm					
150,00	133,33	11,33	11,27	10,33		
Pérdidas por calentamiento	%	0,07	0,1614	0,0374	0,0114	0,0844
Densidad relativa	60/60 °F	1,0129	1,0129	1,0709	1,0923	1,1035
Punto de ablandamiento	°C	47,00	49,67	52,67	56,33	63,00
Solubilidad de tricloroetileno	%	99,96	99,61	94,41	92,1650	89,6190
Parafinas	%	---	1,5312	1,4549	1,4166	1,3783
Asfaltenos	%	---	16,21	14,81	17,39	20,35

Tabla 5. Especificación de las mezclas asfalto-caucho, según ASTM D6114-97

Ensayos	Asfalto Caucho				Mezcla %		
	Límite	Asfalto Tipo I	Asfalto Tipo II	Asfalto Tipo III	5%	7,5%	10%
Viscosidad Aparente 135°C, cP Standard Test Method ASTM D2196	min	1500	1500	1500	800	1550	2025
	max	5000	5000	5000			
Penetración 25°C, 100g. 5s Standard Test ASTMD3	min	25	25	50	53,11	52,22	50,77
	max	75	75	100			
Punto de Ablandamiento 25°C. Standard Test ASTM D36	min	57,2	54,4	51,7	52,67	56,33	63,00
	max	---	---	---			
Punto de Inflamación, °C Standard Test ASTM D93	min	232	232	232	263,67	265,00	263,00
	max	---	---	---			
Perdidas por calentamiento, % Standard Test ASTM D1754	min	---	---	---	0,0374	0,0114	0,0844
	max	1	1	1			

**Figura 1.** Área interfacial en función del diámetro de partícula

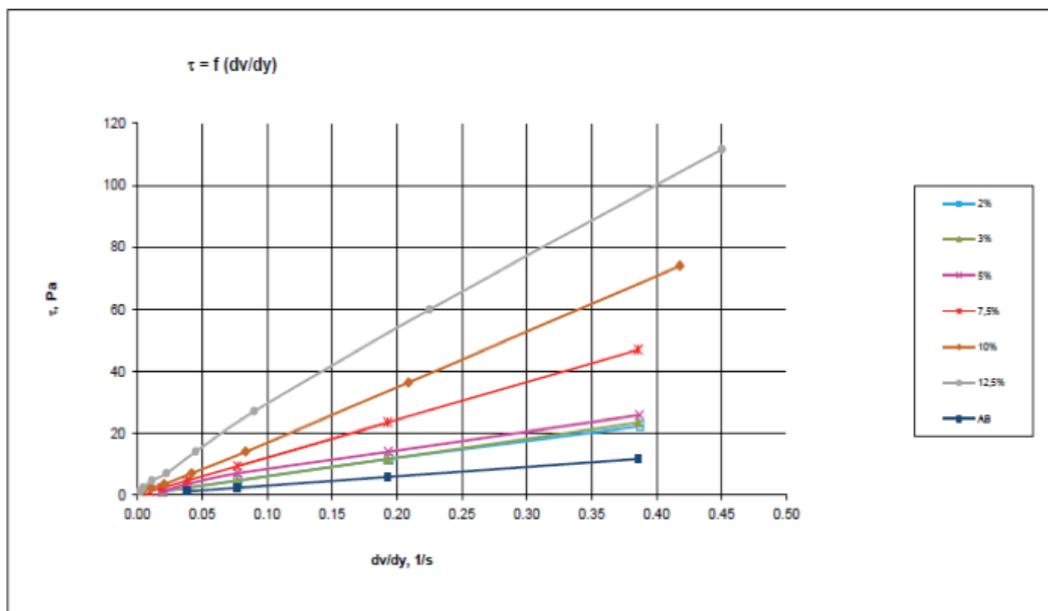


Figura 2. τ en función de dv/dy ; partículas de caucho de 0,5 mm, a 150 °C

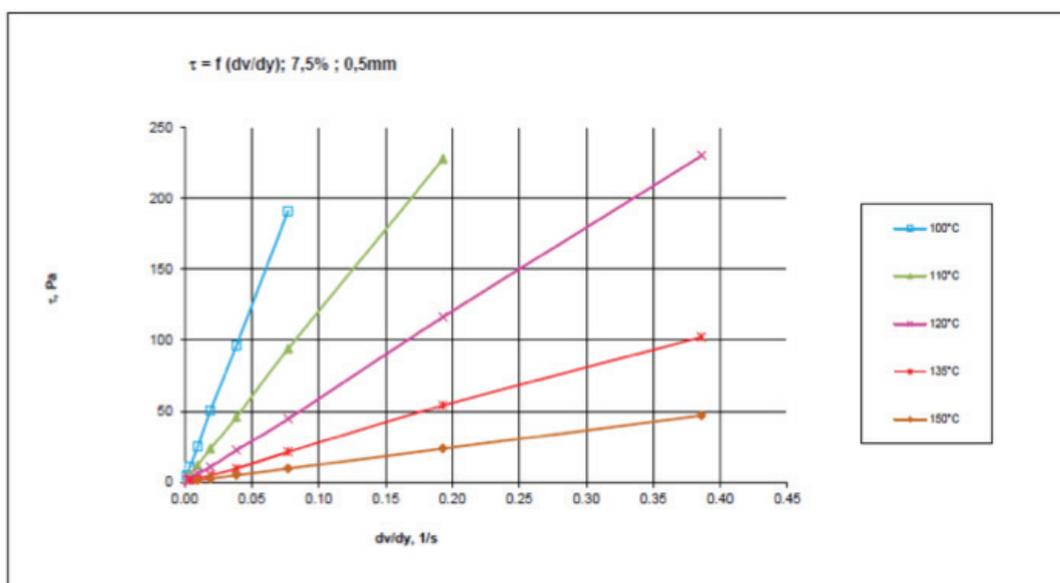


Figura 3. τ en función de dv/dy , concentración y diámetro de partículas: 7,5% y 0,5 mm a diferentes temperaturas

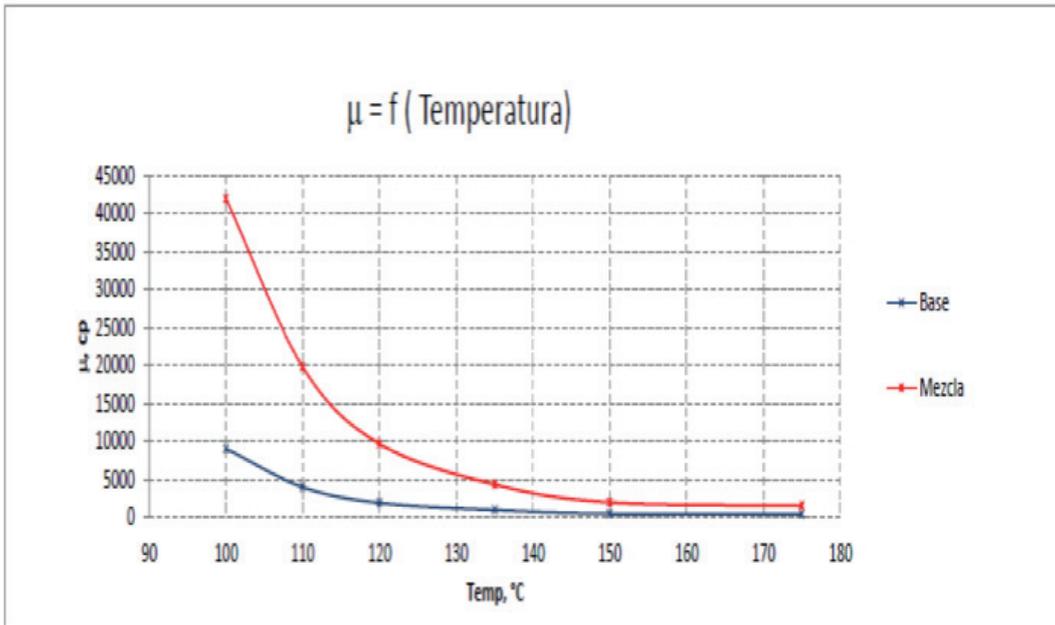


Figura 4. Perfil de viscosidad del asfalto y mezcla asfáltica

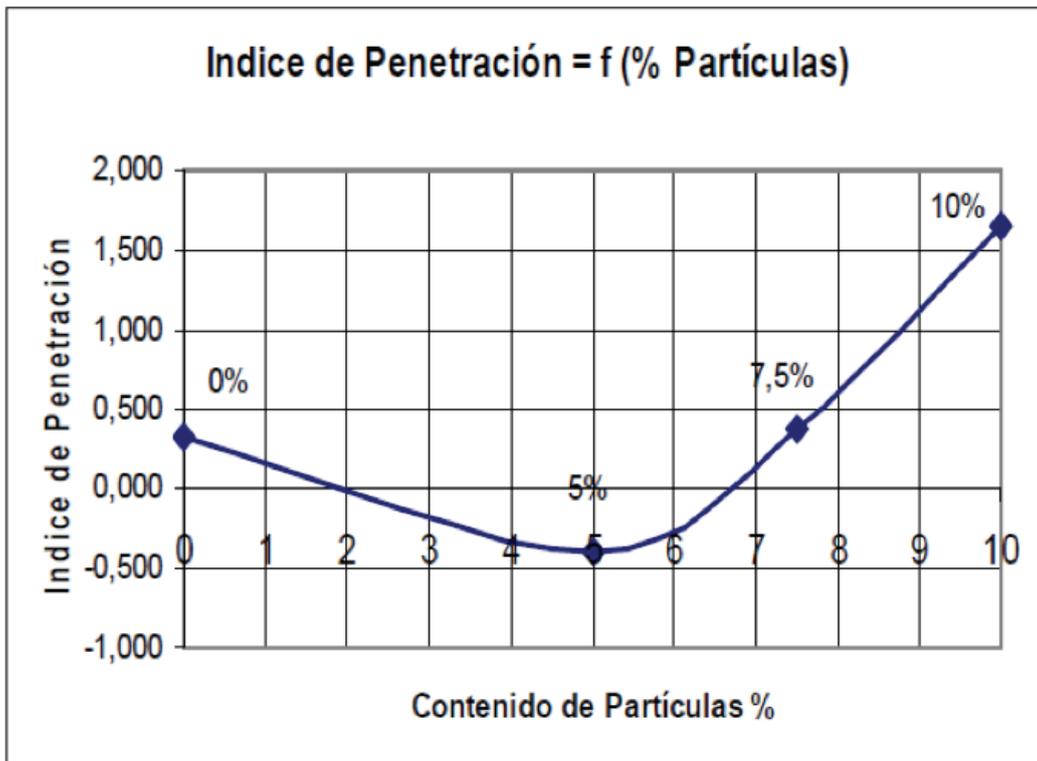


Figura 5. Índice de penetración

Tabla 6. Modelos matemáticos, Ley de la Potencia; 7,5% 0,5 mm.

Temperatura, °C	Ecuación, τ, Pa	R^2
100	$\tau = 2480,0 \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,993}$	0,999
110	$\tau = 1180,0 \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,994}$	1,000
120	$\tau = 581,2 \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,995}$	0,999
135	$\tau = 262,3 \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,998}$	0,997
150	$\tau = 121,8 \left(\frac{dv}{dy}\right)$	1,000

8. DISCUSIÓN

- La esfericidad de las partículas se la determinó por comparación con figuras geométricas. Las que eran muy pequeñas se las observó en el microscopio y corresponden a valores de esfericidad de: 0,5 – 0,7 (esfericidad para sólidos triturados).
- El área interfacial se determinó considerando la teoría de esfericidad.
- La porosidad del lecho que forman las partículas, se determinó por dos métodos diferentes, el primero depende de la densidad real y aparente, y el segundo del volumen hueco del lecho. Los resultados obtenidos muestran que por cualquiera de estos métodos es posible determinar la porosidad, además, esto confirma que el líquido que se usó para la caracterización es el adecuado.
- Para el estudio reológico se utilizaron partículas de tamaños comprendidos entre 0,5 a 6 mm, y concentraciones desde 2 a 12,5% en peso; con los resultados se graficó $\tau = f(dv/dy)$ para cada concentración de partículas. Se aprecia que las partículas de menor tamaño presentan curvas que tienden a la misma trayectoria, lo que implica que existe una mejor dispersión determinante por su factor de acomodo.
- La mezcla caucho – asfalto reduce la susceptibilidad térmica y aumenta la viscosidad; sin embargo, altas viscosidades producen dificultades en la manipulación y en la aplicación.
- Con respecto a la composición del asfalto base, la presencia de asfaltenos fue del 16%, lo que indica la cantidad de aromáticos presentes; el 84% restante corresponde a los mal-

tenos dentro del cual se incluye 1,53% de parafinas y el resto a compuestos nafténicos con un pequeño número de anillos aromáticos. Este mismo criterio se extendería para evaluar la composición de las mezclas tomando en cuenta el porcentaje que representan las partículas de caucho.

- El estudio de los resultados y las tendencias de las curvas comparativas conduce a diferentes interpretaciones y generalizaciones, como por ejemplo, la penetración disminuye en forma proporcional al contenido de las partículas; esto indica un aumento de la dureza del asfalto y de su consistencia con un valor aproximadamente de 50 mm. Esto se debe posiblemente a que la aguja pasaba por puntos donde se encontraba el caucho impidiendo que ésta le atravesara, o en su defecto, porque el caucho es un material que absorbe los aceites del asfalto que disminuye los espacios entre las micelas y aumenta la compactación, evitando el paso de la aguja.

9. CONCLUSIONES

- La superficie específica de las partículas de caucho, disminuye con el aumento del tamaño de la partícula, es decir, las partículas más pequeñas presentan la mayor área superficial.
- El factor de acomodo de las partículas es una propiedad que influye en la caracterización de los lechos porosos, pues si no se tiene cuidado al colocarlas en la probeta, estas se acomodan de tal forma que el lecho se compacta obteniendo resultados erróneos.
- El asfalto base procedente de la Refinería Estatal de Esmeraldas es de grado III y tiene un comportamiento pseudoplástico, defini-

do por el modelo matemático de Ostwald de Waele, denominado Ley de la Potencia. Al aumentar la temperatura su comportamiento se acerca a newtoniano.

- Los valores de concentración de 7,5% en peso y 0,5 mm de tamaño de partícula agregada al asfalto modifican sus características reológicas dándole mayor estabilidad debido a la equitativa dispersión en la mezcla, formando un sistema cuasi homogéneo.
- Uno de los resultados más importantes fue el índice de penetración, puesto que correlaciona la penetración (consistencia) con el punto de ablandamiento (susceptibilidad térmica), lo que permite establecer un criterio de la viabilidad del uso de las mezclas asfálticas como ligante en la construcción de carreteras; puesto que todas las mezclas están dentro del rango $-2 < IP < +2$ especificado como flujo viscoso y elástico adecuado para ser usado en autopistas.
- Del estudio realizado se concluye que, las mejores mezclas son aquellas que contienen 7,5% y 10% en peso de partículas, porque poseen una composición y elasticidad que mejoran las propiedades mecánicas de las mezclas y además cumplen con todas las especificaciones de la ASTM D 6114-97 que regula las mezclas asfalto-caucho.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su gratitud al ingeniero Marco Crespo por la ayuda con bibliografía y el suministro de partículas de caucho usado. De igual manera al Prof. Dr. Ing. Diego Larsen de la Universidad Nacional de la Plata-Argentina por su asesoramiento científico.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA, M. *Influencia del contenido de parafina en el comportamiento reológico de los asfaltos*. Trabajo de graduación. Ingeniero Químico. Universidad Central del Ecuador. Escuela de Ingeniería Química. Quito, 2002. 183 p.
- ASTM, American Society of Testing and Materials. *Annual Book of Standard Petroleum Heavy Products*. Philadelphia: ASTM, 1998.
- BRAVO, R.; AVECILLAS, L. *Regeneración de caucho a partir de neumáticos usados*. Trabajo de graduación. Ingeniero Químico. Universidad Central del Ecuador. Escuela de Ingeniería Química. Quito, 1974. 189 p.
- COSTA López, J. et al. *Curso de Química Técnica*. Barcelona: Editorial Reverté S.A., 1985. 440 p.
- DIN, Deutsches Institut Für Normung. *Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel-Bestimmung des Paraffingehaltes- Teil 1: Destillationsverfahren*. Deutsche Fassung EN 12606-1: Deutschland, 2007.
- OLAZÁBAL, P. et al. *Análisis del efecto térmico en la reología de asfaltos modificados*. Archivo PDF. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, 2005.
- TRAXLER, R. *El asfalto composición, propiedades y usos*. 1° edición. México: Compañía Editorial Continental S.A., 1961.