

El icopor y el caucho como modificadores de mezclas drenantes

Fredy Alberto Reyes Lizcano* / **Karina Liset Rodríguez Gallego**** / **Ana Sofía Figueroa Infante*****

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de la investigación experimental para el mejoramiento de una mezcla asfáltica drenante a partir de la adición de caucho e icopor para optimizar el comportamiento de la capa de rodadura y simultáneamente preservar el medio ambiente, utilizando desechos no biodegradables. Éste diseño de mezcla drenante con adición de polímeros, pretende encontrar el máximo contenido de vacíos posible compatible con una buena resistencia a las cargas del tráfico, a partir del uso de agregados, asfalto de alta calidad, una granulometría especial y una óptima dosificación en el laboratorio.

Palabras clave: mezclas drenantes, pavimentos, icopor, llanta, mezclas asfálticas modificadas.

POLYSTYRENE AND RUBBER AS MODIFIERS OF DRAIN MIXTURES

ABSTRACT

This article presents the results from the research on the improvement of a drain asphalt mixture from polystyrene and rubber that optimises the behaviour of the surface layer and, at the same time, preserves environment, using non-biodegradable waste. This drain mixture design with polymer addition is intended to correct as many mistakes as possible and offer good resistance to traffic loads by using aggregates, high-quality asphalt, a special granular balance, and an optimal measuring in the laboratory.

Key Words: drain mixtures, pavement, polystyrene, rubber, modified asphalt mixtures.

1 Artículo vinculado al proyecto de investigación «Nuevos materiales para carreteras. Mezclas asfálticas modificadas». Pontificia Universidad Javeriana-Universidad de La Salle.

* Ingeniero Civil, PhD. Grupo de investigación CECATA, Pontificia Universidad Javeriana. Correo electrónico: fredy.reyes@javeriana.edu.co

** Ingeniera Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

*** Ingeniera Civil, MS., Grupo de investigación INDETEC, Universidad de La Salle. Correo electrónico: afigueroa@lasalle.edu.co

Fecha de recepción: junio 30 de 2006.

Fecha de aprobación: agosto 22 de 2006.

INTRODUCCIÓN

Debido a que las mezclas drenantes poseen una alta porosidad y bajo módulo elástico, se introducen tiras de caucho de llanta e icopor como elemento de refuerzo haciendo parte del agregado. A través de estos nuevos componentes, se busca mejorar las características deficientes de la misma.

Hoy en día la contaminación con desechos no biodegradables, la escasez del asfalto debido a la disminución de reservas petrolíferas del mundo y la búsqueda de nuevos materiales que den una alternativa al manejo ambiental y económico de las mezclas asfálticas drenantes, han puesto a los investigadores en la tarea de modificar las mezclas con el ánimo de dar respuesta a las solicitudes del tráfico respecto a la resistencia y la durabilidad de un pavimento.

La modificación de las mezclas asfálticas se realiza desde hace más de 20 años para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a las mezclas convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito, reducción de las deformidades permanentes, aumento de la rigidez, disminución de las fisuras térmicas por fatiga y aumento de su elasticidad.

Muchos polímeros son fabricados a partir del petróleo; al reciclar caucho, se disminuye el consumo de un recurso no renovable, así como la enorme contaminación originada en la obtención de los mismos. De esta manera, la inclusión de polímeros (como el icopor y el caucho) en los pavimentos, con-

tribuye a disminuir el volumen de materiales no biodegradables que van a parar a los rellenos sanitarios y finalmente contaminan el medio ambiente.

Las investigaciones realizadas en Colombia han determinado que los municipios disponen sus basuras aproximadamente de la siguiente manera: el 32% en los rellenos sanitarios mecánicos o manuales, 15% en los cuerpos de agua y el resto en botaderos a cielo abierto.²

Bogotá arroja sus basuras al Relleno Sanitario Doña Juana, las cuales ascienden aproximadamente a 6000 toneladas. Los plásticos y los cauchos que componen el 19% de los residuos, especialmente los constituidos por polipropileno, tardan mucho tiempo en descompuestos por la naturaleza, esto es, entre 100 y 1000 años y dependen de la exposición de los mismos al aire, generando contaminación ambiental con daños, en ocasiones irreversibles.³

En esta investigación se propone una solución económica y viable para el uso de estas basuras en la mezclas de pavimentos.

MARCO CONCEPTUAL

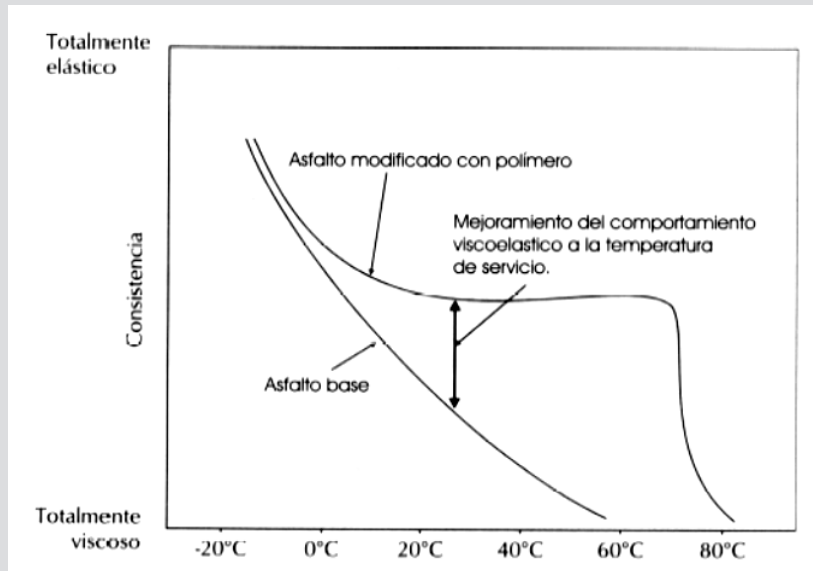
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

El asfalto. Los asfaltos desarrollan muchas propiedades dentro de una mezcla asfáltica, pero no siempre estas características suplen las necesidades de diseño de una vía. Debido a esto, se modifican a través de polímeros entre otros, y dadas estas modificaciones, éste responde de maneras distintas (ver Gráfico 1).

² Véase: <<http://www.desde-abajo.org>>. Prensa independiente colombiana.

³ Para mayor información: <<http://www.barrameda.com.ar>> ¿Cuánto tiempo demora la naturaleza en transformar?

GRÁFICO 1. EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE UN POLÍMERO SOBRE LA SUSCEPTIBILIDAD TÉRMICA DEL ASFALTO.



Fuente: Montejo, A. Ingeniería de pavimentos para carreteras.

Para saber cual es el comportamiento inicial de un asfalto, es necesario conocer su procedencia y las propiedades que tiene en forma natural. Entre estas características se encuentra la ductilidad, el punto de llama, la penetración, el peso específico, etc.

El asfalto utilizado en este proyecto, fue un AC 80-100, debido a la facilidad de obtención del mismo y a que es uno de los más utilizados⁴ en las vías colombianas. Este asfalto proviene del Complejo Industrial de Barrancabermeja, se ajusta la penetración, el punto de ablandamiento y el punto de chispa, mediante la adición de distintas cantidades de gasóleo de los mismos crudos.

Los agregados. El agregado constituye entre el 90 y 95% en peso y entre el 75 y 85% en volumen en la mayoría de las estructuras de pavimento. Esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor determinante en el comportamiento del pavimento.

Para la elaboración de las mezclas asfálticas se trabajó una granulometría PA 12, es decir, para mezclas drenantes (ver Tabla 1).

El caucho. El caucho es un hidrocarburo de gran importancia que se obtiene del látex de ciertos árboles de la zona tropical.

TABLA 1. GRANULOMETRÍA PARA UNA MEZCLA DRENANTE PA 12 (ESPAÑA).

Tamiz	Tamiz (m)	% Retenido
3/4"	0,019	0
1/2"	0,0127	15
3/8"	0,009	16
Nº 4	0,005	45
Nº 10	0,025	8
Nº 40	0,006	7
Nº 200	0,0008	4
Fondo		5

4 Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia (ASOPAC).

FIGURA 1. RIPIO DE LLANTA. (CAUCHO).



En Colombia se están empleando los elastómeros termoplásticos de estireno-butadieno-estireno (SBS) que según las experiencias en otros países mejora sustancialmente la resistencia a la deformación y el fisuramiento asociado a las cargas del tránsito (fatiga) y a cambios térmicos, mejora la adhesividad de los agregados y también favorece la resistencia al envejecimiento (Montejo, 2001).

Según el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA) el mayor volumen de llantas usadas generadas por el parque automotor en Bogotá D.C. se utiliza para aprovechamiento energético fundamentalmente como combustible en los hornos de producción de panela en el Noroccidente de Cundinamarca; un menor volumen se lleva a labores de reencauche, y una cantidad mínima es usada en actividades de regrabado, uso artesanal, entre otras aplicaciones menores.

Para el desarrollo de este proyecto, se utilizó como polímero de adición a la mezcla asfáltica caucho de desecho producido en el proceso de reencauche que la empresa renovadora de llantas hace a las llantas que han sido desechadas y que se encuentran como

material contaminante en el ambiente (ver Figura 1). Para que el caucho se incorpore a las mezclas asfálticas la metodología que se abordó es la *vía seca* tanto para la mezcla del caucho, como del icopor, debido a que el proyecto se enfocó al mejoramiento de la mezcla asfáltica como un todo y no al cemento asfáltico en particular.

Las partículas de caucho que se utilizaron, comúnmente son llamadas ripio cuyo tamaño varía de 0,0238 m a $74 \mu\text{m}$, las partículas superiores a 0,02 m son de forma alargada y las menores empiezan a presentar formas redondeadas. Los tamaños utilizados en la mezcla son partículas que pasan al tamiz N° 10 (0,025 m) y se retienen en el tamiz N° 40 (0,0063 m).

FIGURA 2. ICOPOR EMPLEADO EN EL ESTUDIO.



El icopor. El poliestireno, conocido popularmente con el nombre de *icopor*, es un polímero vinílico, resultado de la polimerización⁵ del estireno monómero (ver Figura 2).

Estructuralmente, el poliestireno, es una larga cadena hidrocarbonada, con un grupo fenilo unido

⁵ Es un proceso químico por el cual, mediante calor, luz o un catalizador, se unen varias moléculas de un compuesto generalmente de carácter no saturado llamado monómero para formar una cadena de múltiples eslabones, moléculas de elevado peso molecular y de propiedades distintas, llamadas macromoléculas o polímeros.

cada dos átomos de carbono. Es producido por una polimerización vinílica por radicales libres, a partir del monómero estireno.

El poliestireno, en general, posee elasticidad, cierta resistencia al ataque químico, buena resistencia mecánica, térmica, eléctrica y baja densidad.

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron perlas de icopor que pasan el tamiz N° 10 y se retienen en el tamiz N° 40.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El método utilizado para el diseño de la mezcla drenante consiste en la fabricación de briquetas tipo Marshall, que fueron utilizadas para el desarrollo de ensayos de desgaste y análisis dinámico.

Este método se empleó para dosificar mezclas en caliente de agregados pétreos y cemento asfáltico con o sin adición de llenante mineral. Los pesos respectivos del material para cada porcentaje de asfalto se pueden observar en la Tabla 2.

Para el desarrollo del ensayo, se determinó la temperatura a la cual debe calentarse el cemento asfáltico y además se estableció la temperatura a la cual deben encontrarse los agregados en el momento de adicionarle el asfalto. Para la obtención de éstas temperaturas, se elaboró una curva de calibración para el cemento asfáltico en la que puede apreciarse la variación de su viscosidad con la temperatura a través del viscosímetro de Brookfield. Las temperaturas correspondientes a 170 + 20 y 280 + 30 centígrados para temperatura de mezclado y temperatura de compactación fueron mínimo 145 °C y 135 °C respectivamente.

TABLA 2. DOSIFICACIÓN PARA BRIQUETAS MARSHALL.

% de Asfalto aplicado a la mezcla				5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	7,0%
Tamiz	% pasa (Especificado)	Granulometría de diseño	% retenido	Peso del Material (g)	Peso del Material (g)	Peso del Material (g)	Peso del Material (g)	Peso del Material (g)
3/4"	100	100	0	0	0	0	0	0
1/2"	70-100	85	15	171,0	170,1	169,2	168,3	167,4
3/8"	58-80	69	16	182,4	181,4	180,48	179,5	178,5
#4	18-30	24	45	513	510,3	507,6	504,9	502,2
#10	10-22	16	8	91,2	90,7	90,24	89,7	89,3
#40	6-13	9	7	79,8	79,4	78,9	78,5	78,1
#200	3-6	5	4	45,6	45,4	45,1	44,8	44,6
Fondo			5	57,0	56,7	56,4	56,1	55,8
Asfalto				60,0	66,0	72,0	78,0	84,0
Total				1200,0	1200,0	1200,0	1200,0	1200,0

RESULTADOS ENSAYO DE CÁNTABRO

La tecnología de las mezclas drenantes ha logrado mejoras decisivas y los españoles han contribuido significativamente al respecto. Ellos desarrollaron

el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste, que es un procedimiento que ha facilitado el desarrollo y optimización de la composición y comportamiento de este tipo de mezclas asfálticas. En esencia este ensayo consiste en introducir la probeta Marshall

fabricada con la mezcla porosa en la máquina de los ángeles y someterla, sin ningún tipo de carga abrasiva, a 300 revoluciones del tambor.

Durante el ensayo, la probeta de mezcla se va erosionando y desgastando, determinándose al final del ensayo la pérdida de peso de la probeta, la pérdida por desgaste al Cántabro, se expresa en tanto por ciento del peso inicial como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\%P = \frac{P1 - P2}{P1} 100$$

Donde:

%P = pérdida por desgaste al Cántabro

P1 = peso inicial de la probeta (g)

P2 = peso final de la probeta (g)

El ensayo se realiza a una temperatura constante de 18 ó 25°C. Hay que procurar que al realizar el ensayo las probetas estén dentro de un rango de ± 2°C de la temperatura seleccionada.

Para obtener los porcentajes óptimos de icopor y de caucho, se utilizó el ensayo de Cántabro como uno de los criterios de selección. Los rangos que se tuvieron en cuenta para trabajar este ensayo, fueron obtenidos a través de experiencias pasadas.

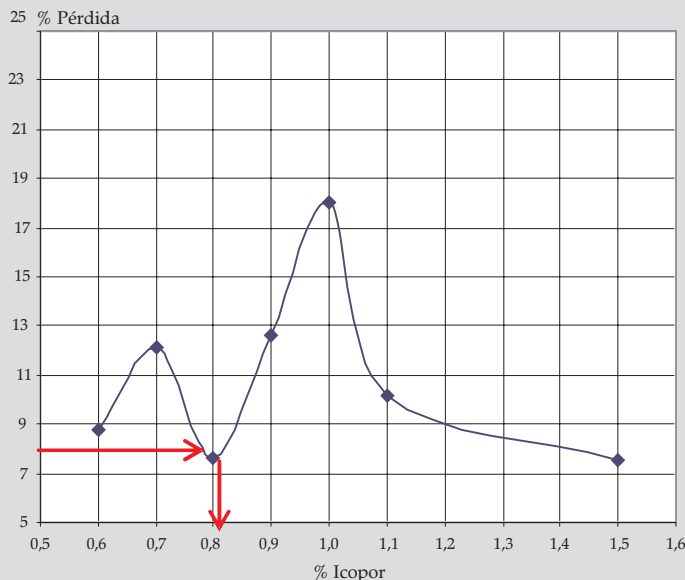
Para obtener un rango de porcentaje de icopor sobre la mezcla, se observaron los resultados obtenidos por Andrea Cuellar en su trabajo de grado «Estudio comparativo de las leyes de fatiga de una mezcla cerrada 0/10, con y sin adiciones de icopor», en el cual la variación de la adición de icopor va desde 0,1-0,8 %. En los resultados la variación del comportamiento de la mezcla solo comienza a observarse con un comportamiento confiable a partir del porcentaje de 0,6%, debido a esto, el rango definido para desarrollar este ensayo, se tomó desde 0,6% hasta 1,1% con variaciones de 0,1% y un valor adicional de 1,5%.

Teniendo estos resultados, se hizo la gráfica correspondiente (ver Gráfico 2).

TABLA 3. RESULTADOS ENSAYO DE CÁNTABRO PARA MEZCLA CON ADICIÓN DE ICOPOR.

Muestra N°	Icopor (%)	Cántabro		
		Peso inicial	Peso final	Pérdida
		(g)	(g)	(%)
1	0,60	1122,47	1024,15	8,76
2	0,70	1122,46	986,40	12,11
3	0,80	1130,08	1044,15	7,62
4	0,90	1086,56	949,23	12,64
5	1,00	1048,83	859,85	18,01
6	1,10	1097,43	985,61	10,20
7	1,50	1130,43	1045,20	7,54

GRÁFICO 2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CÁNTABRO PARA LA MEZCLA CON ADICIÓN DE ICOPOR.



En el Gráfico 2 se observa el valor óptimo de adición de icopor verificando el menor porcentaje de desgaste y teniendo en cuenta que el valor máximo admisible en un ensayo de Cántabro es del 25% en peso.

Para la obtención del porcentaje óptimo de caucho, se realizó una recopilación de información acerca de los rangos escogidos a través de otras

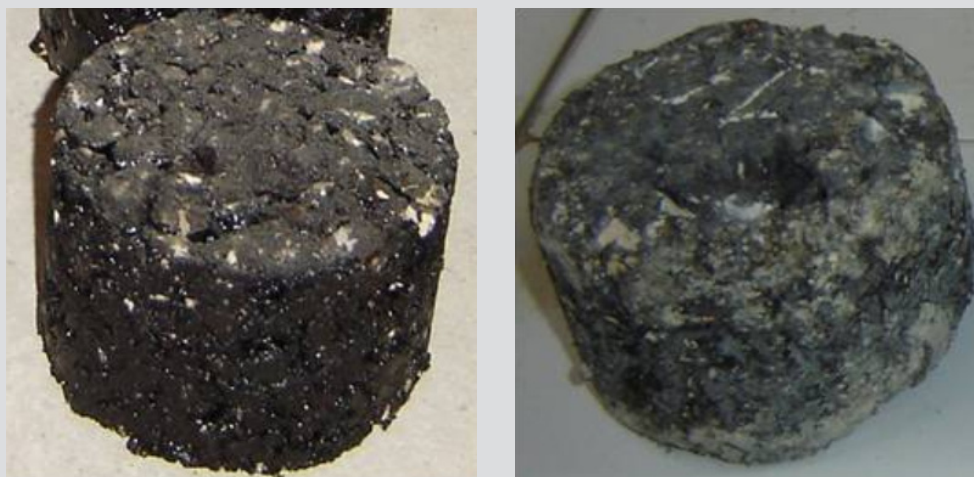
investigaciones y se encontró, que los valores comúnmente trabajados oscilaban entre 0,5% y 2%, siendo este último muy alto y poco recomendable⁶. Teniendo en cuenta esto, se realizó el ensayo para el mismo rango de datos, y variando el porcentaje en 0,5 %. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4. Ver los resultados dibujados en la Gráfica 8.

TABLA 4. RESULTADOS ENSAYO DE CÁNTABRO PARA MEZCLA CON ADICIÓN DE CAUCHO.

Briqueta Nº	Caucho (%)	Espesor Briqueta (mm)	Peso (g) Seca en aire	Cántabro		
				Peso inicial	Peso Final	Pérdida
				(g)	(g)	(%)
1	0,50	71,85	1112,57	1112,57	985,65	11,41
2	0,75	70,29	1132,44	1132,44	1022,47	9,68
3	1,00	71,37	1119,53	1119,53	1025,34	8,40
4	1,50	70,46	1115,46	1115,46	1035,21	7,18
5	2,00	73,20	1150,80	1150,80	1066,42	7,33

6 Medina, J. y Val Menús, M. *Efecto del empleo de caucho de neumáticos usados por vía seca en las características de mezclas bituminosas en caliente*. Congreso Andaluz de Carreteras. España, 1998.

FIGURA 3. REGISTRO DE LAS PROBETAS MARSHALL EN EL ENSAYO DE CANTABRO PARA LA MEZCLA CON ADICIÓN DE CAUCHO.



A través de estos resultados, se obtuvo que el valor óptimo de adición de icopor es de 0,8% y para el caucho de 1,5% del peso en agregados respectivamente, ya que la mezcla con estos porcentajes de adición, presenta el menor desgaste.

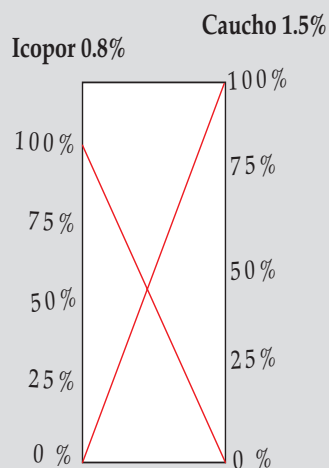
Luego de obtener los valores óptimos de adición de cada uno de los polímeros, se procedió a realizar la mezcla de los dos polímeros en porcentajes diferentes a través de las siguientes combinaciones:

	ICOPOR	CAUCHO
a.	25%	75%
b.	50%	50%
c.	75%	25%
d.	100%	0%
e.	0%	100%

Estos porcentajes se tomaron respecto al valor óptimo de cada uno de los polímeros, es decir, que cuando se habla de un 25% de icopor y un 75% de caucho, este porcentaje se calcula a partir del valor óptimo de cada polímero respectivamente.

Es importante destacar, que no existe información respecto a la mezcla de polímeros de este tipo en un diseño asfáltico, por lo tanto la inexistencia de información genera un campo de investigación muy amplio. Debido a esto, los resultados que se obtuvieron en este proyecto permitieron encontrar un punto de corte frente a dos polímeros empleados (ver Gráfico 14).

GRÁFICO 3. ESCALA GRÁFICA DE LOS POLÍMEROS MEZCLADOS.



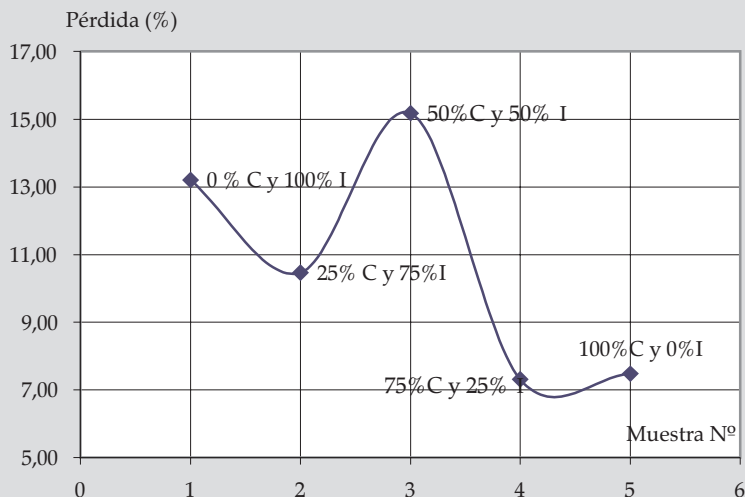
Una vez obtenidos los valores en peso de los materiales, se fabricaron las briquetas tipo Marshall para cada porcentaje de polímero. Por cada porcentaje se fabricaron 3 probetas, para un total de 15. Las 15

probetas fueron sometidas al ensayo de Cántabro, teniendo los siguientes resultados (ver Tabla 5 y Gráfico 4):

TABLA 5. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CÁNTABRO PARA LA MEZCLA CON DOS POLÍMEROS (CAUCHO E ICOPOR).

Muestra No.	Adición	Espesor Briqueta (mm)	Cántabro		
			Peso inicial	Peso Final	Pérdida
			(g)	(g)	%
1	0% C y 100 I	70,03	1167,40	1013,25	13,20
2	25% C y 75% I	69,54	1148,70	1028,43	10,47
3	50% C y 50% I	71,49	1157,13	981,53	15,18
4	75% C y 25% I	69,53	1167,37	1062,93	7,31
5	100% C y 0% I	69,12	1182,37	1065,92	7,48

GRÁFICO 4. RESULTADOS DEL ENSAYO DE CÁNTABRO PARA LA MEZCLA CON DOS POLÍMEROS (CAUCHO E ICOPOR).



Observando el Gráfico 4, es claro que la mayor pérdida por desgaste se presenta en la biqueta con un contenido de 50% de caucho y 50% de icopor, sin embargo, este resultado se encuentra dentro del rango permitido por las especificaciones⁷ que requieren que el máximo porcentaje de desgaste no debe sobrepasar el 25% en peso de la muestra.

Luego se fabricaron nuevas briquetas con las mismas especificaciones con las que se trabajó en Cántabro y se sometieron al ensayo de módulo dinámico elástico y los resultados obtenidos se describen en el siguiente aparte de este artículo.

7 Norma NLT-159/86: España.

MÓDULO DINÁMICO ELÁSTICO

La prueba se realiza sobre los dos diámetros perpendiculares. El valor del módulo corresponde al

promedio de los dos valores, con una variación permisible entre -20 y +10%, en caso de no cumplir con ese rango de variación, esos datos son descartados (ver resultados en las tablas 6, 7 y 8).

TABLA 6. MÓDULOS ELÁSTICOS PARA UNA TEMPERATURA DE 25 °C Y 2,5 Hz DE FRECUENCIA.

Polímero adicionado		Módulo Elástico (MPa) 1	Módulo Elástico (MPa) 2	Variación (%)	Promedio
% Caucho	%Icopor	Frecuencia de 2,5 Hz			
25	75	1805	1702	-5,7	1754
25	75	1108	955	-13,8	1032
25	75	1341	1400	4,4	1371
					1385
50	50	879	981	11,6	-
50	50	926	947	2,3	937
50	50	844	855	1,3	850
					893
75	25	755	879	16,4	
75	25	567	453	-20,1	-
75	25	887	1020	15,0	954
					954
0	100	2409	2423	0,6	2416
0	100	1659	1704	2,7	1682
0	100	1564	1712	9,5	1638
					1912
100	0	493	583	18,3	-
100	0	450	415	-7,8	433
100	0	634	546	-13,9	590
					511

TABLA 7. RESULTADOS DE MÓDULOS DINÁMICOS ELÁSTICOS PARA UNA TEMPERATURA DE 25 °C Y 5,0 Hz DE FRECUENCIA.

Polímero adicionado		Módulo Elástico (MPa) 1	Módulo Elástico (MPa) 2	Variación (%)	Promedio
% Caucho	%Icopor	Frecuencia de 5 Hz			
25	75	2230	2596	16,4	-
25	75	1613	1322	-18,0	1468
25	75	1955	1865	-4,6	1910
					1689
50	50	1238	1363	10,1	1301
50	50	1214	1366	-11,1	1290
50	50	1129	1288	14,1	-
					1295
75	25	1233	1143	-7,3	1188
75	25	772	703	-8,9	738
75	25	1235	1170	-5,3	1203
					1195
0	100	2653	3021	13,9	-
0	100	2359	2170	-8,0	2265
0	100	2145	2253	5,0	2199
					2232
100	0	769	728	-5,3	749
100	0	618	665	7,6	642
100	0	1047	1067	1,9	1057
					816

TABLA 8. RESULTADOS DE MÓDULOS DINÁMICOS ELÁSTICOS PARA UNA TEMPERATURA DE 25 °C Y 10 Hz DE FRECUENCIA.

Polímero adicionado		Módulo Elástico (MPa) 1	Módulo Elástico (MPa) 2	Variación (%)	Promedio
% Caucho	%Icopor	Frecuencia de 10 Hz			
25	75	1824	1817	-0,4	-
25	75	1905	1824	-4,3	1865
25	75	1817	1911	5,2	1864
					1864
50	50	3166	3139	-0,9	3153
50	50	2081	2146	3,1	2114
50	50	2562	2427	-5,3	2495
					2587
75	25	1738	1716	-1,3	1727
75	25	997	1040	4,3	1019
75	25	1609	1556	-3,3	1583
					1655
0	100	3686	3565	-3,3	3626
0	100	2837	2788	-1,7	2813
0	100	2877	2645	-8,1	2761
					3066
100	0	903	1041	15,3	-
100	0	1028	1008	-1,9	1008
100	0	1414	1472	4,1	1472
					1240

Finalmente, observando los resultados obtenidos en el ensayo de Cántabro y de módulos dinámicos elásticos, se analizó el comportamiento de las distintas combinaciones de caucho e icopor, en el cual la menor pérdida por desgaste estaría dada para la combinación de 75% caucho y 25% icopor (ver Gráfico 4), sin embargo, se observa que para los valores de módulos dinámicos, estos se encuentran bajos respecto a estudios precedentes donde se obtenían valores alrededor de 2500 MPa de módulo dinámico elástico para una frecuencia de 10 Hz. Debido a

esto, se optó por seleccionar un porcentaje con 50% de caucho y 50% de icopor el cual presenta el valor de módulo más alto (ver Gráfico 10), y además, el porcentaje de desgaste en el ensayo de Cántabro para esta combinación, se encuentra dentro del valor admisible. Este valor se eligió con el fin generar una mezcla con mejores valores de módulo.

Por otra parte, en el desarrollo del análisis de resultados se cometieron errores; esto se presentó en la obtención del valor óptimo de caucho, es decir, que

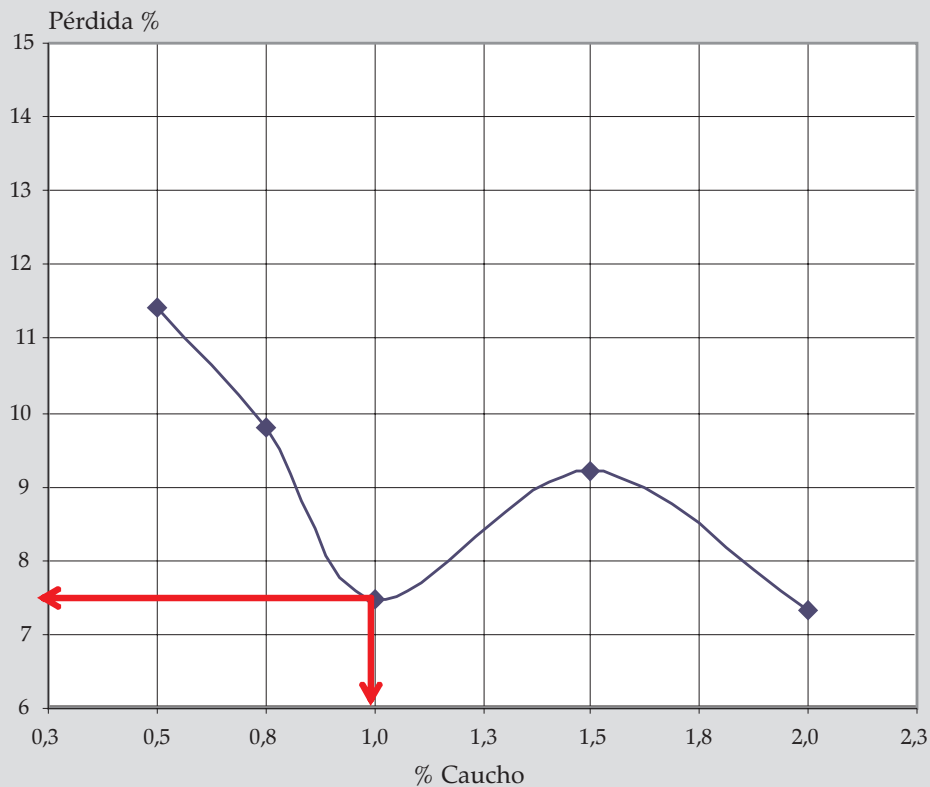
todos los ensayos elaborados bajo este resultado, no se encuentran en un valor óptimo. Por lo tanto, la selección del dato de valor óptimo de la mezcla de los dos polímeros (caucho e icopor), tampoco es óptima respecto a los criterios de selección señalados anteriormente. Es importante aclarar, que el procedimiento que se llevó a cabo si es correcto, pero,

en el análisis de resultados no se tuvo en cuenta los valores desfasados o que se encontraban notoriamente alejados de la media de los otros. A continuación se presenta el valor con el que se debió haber trabajado para la fabricación de las probetas de ahuellamiento y fatiga (ver Tabla 9).

TABLA 9. RESULTADOS DESCARTANDO VALORES ABERRANTES DEL ENSAYO DE PÉRDIDA POR DESGASTE AL CÁNTABRO, PARA UNA MEZCLA CON ADICIÓN DE CAUCHO.

Briqueta N°	Caucho (%)	Cántabro		
		Peso inicial (g)	Peso Final (g)	Pérdida %
1	0,5	1110,40	976,40	12,07
2		1109,80	983,83	11,35
3		1117,50	996,71	10,81
<u>Prom.</u>	<u>0,50</u>	<u>1112,57</u>	<u>985,65</u>	<u>11,41</u>
2	0,75	1110,82	1002,06	9,79
3		1128,20	1065,56	5,55
<u>Prom.</u>	<u>0,75</u>	<u>1119,51</u>	<u>1033,81</u>	<u>9,79</u>
1	1	1099,79	1021,04	7,16
3		1121,40	1034,23	7,77
<u>Prom.</u>	<u>1,00</u>	<u>1110,60</u>	<u>1027,64</u>	<u>7,47</u>
1	1,5	1116,55	1014,18	9,17
3		1123,76	1019,41	9,29
<u>Prom.</u>	<u>1,50</u>	<u>1120,16</u>	<u>1016,80</u>	<u>9,23</u>
1	2	1161,11	1076,47	7,29
2		1141,88	1080,77	5,35
3		1149,42	1042,03	9,34
<u>Prom.</u>	<u>2,00</u>	<u>1150,80</u>	<u>1066,42</u>	<u>7,33</u>

GRÁFICO 5. VALORES REALES DE PÉRDIDA POR DESGASTE VS POLÍMERO ADICIONADO.



Observando el Gráfico 5, se puede percibir que el valor que presenta menor desgaste, es la mezcla con un porcentaje de adición del 1,0% de caucho, a diferencia del valor obtenido en el análisis inicial del ensayo de Cántabro, donde el valor óptimo era de 1,5% de caucho. Conociendo este resultado, las dosificaciones hechas para las probetas empleadas exceden en el 50% el valor óptimo de adición, lo cual afecta todos los resultados. Sin embargo, el resultado de desgaste al Cántabro del valor óptimo seleccionado, se encuentra dentro del rango de datos admitido por las especificaciones, con lo cual se puede afirmar, que este valor de 1,5% de caucho, es un dato que a fin de cuentas busca la mayor utilización del caucho dentro de una mezcla asfáltica, con el objeto de generar un aporte a un problema ambiental como es la reutilización de polímeros de este

tipo, los cuales tienen altos períodos de degradación.

AHUELLAMIENTO

El Gráfico 6 presenta las curvas de ahuellamiento para cada uno de los tipos de mezcla, dentro de los cuales se puede observar que a medida que hay un aumento de la cantidad de caucho, la mezcla presenta un mayor ahuellamiento. Es importante destacar, que los antecedentes que existen respecto a este tipo de investigaciones, corroboran que el icopor se comporta mejor que el caucho, y además se observa mejor comportamiento de la mezcla con adición de caucho e icopor, respecto a la curva de ahuellamiento del caucho (ver gráficos 7 y 8).

GRÁFICO 6. RESULTADOS DE AHUELLAMIENTO.

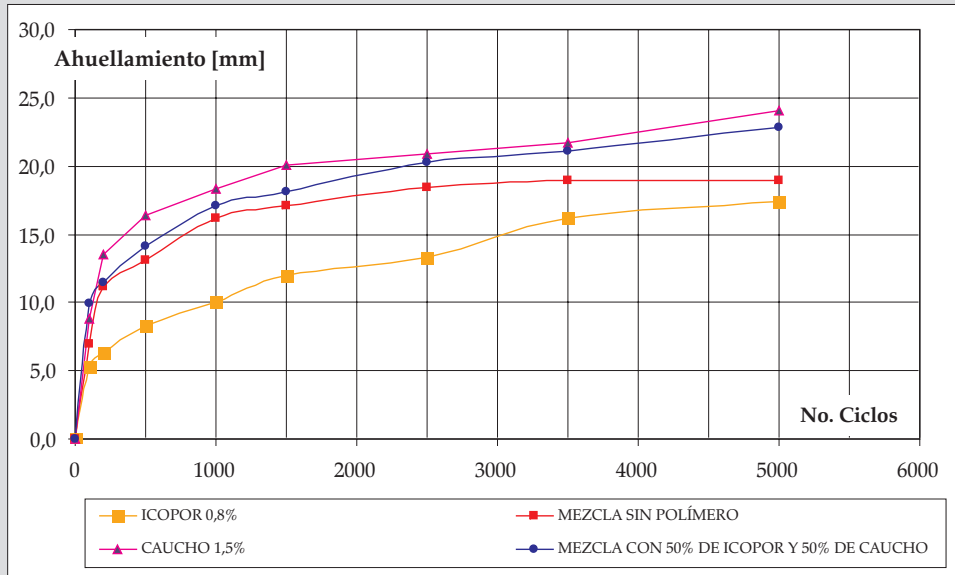
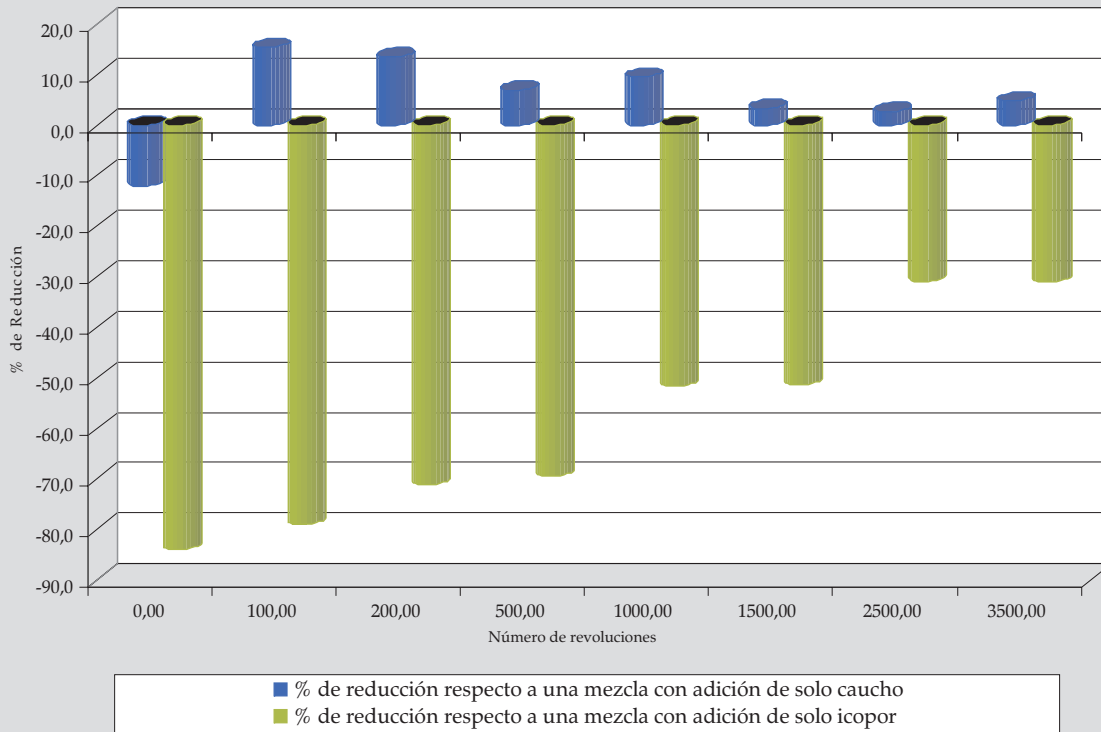


GRÁFICO 7. MEJORA EN AHUELLAMIENTO DE UNA MEZCLA CON ADICIÓN DE CAUCHO E ICOPOR RESPECTO A UNA MEZCLA CON ADICIÓN DE UN SOLO POLÍMERO.

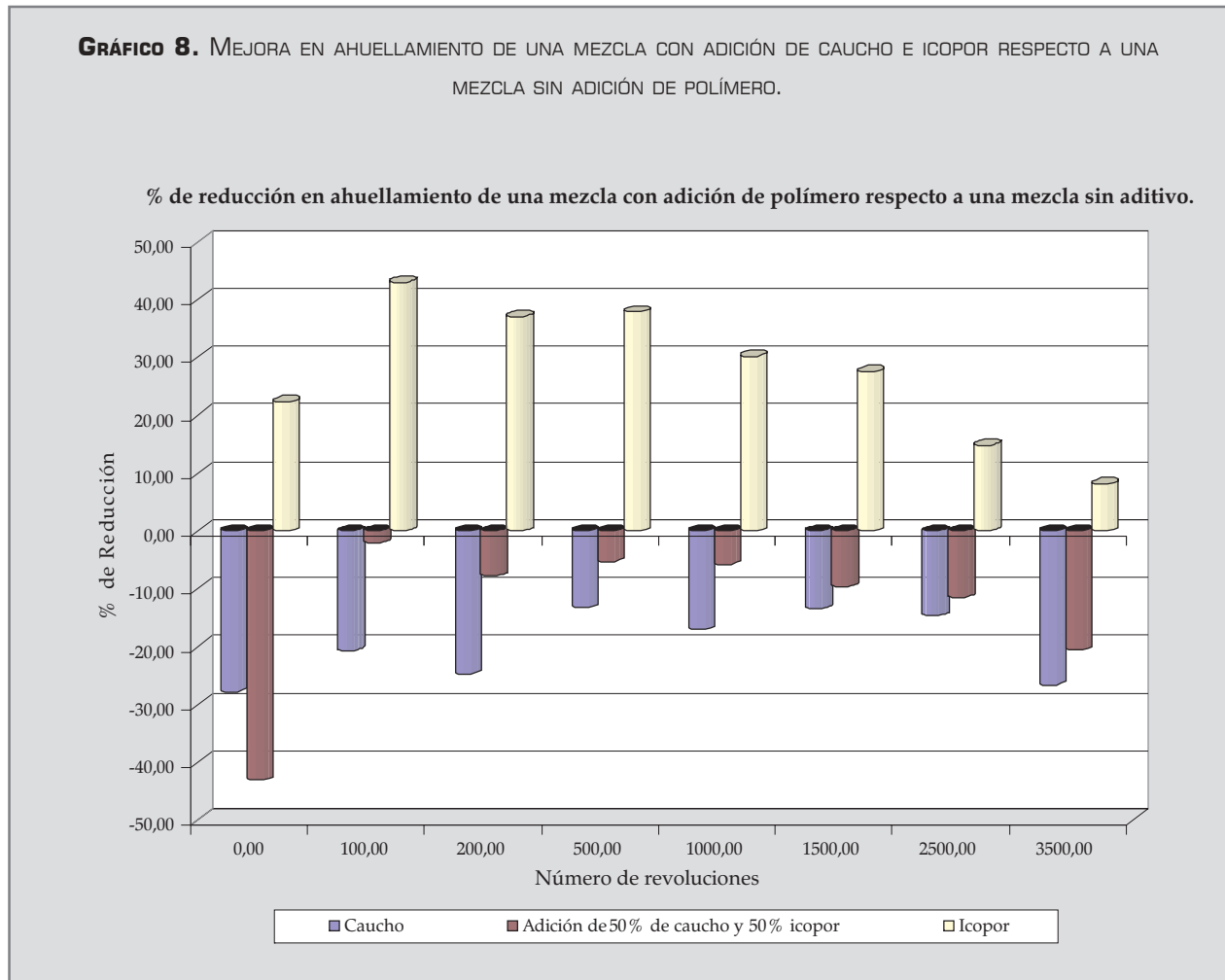
% de reducción en ahuellamiento de una mezcla con adición de 50 % de caucho y 50% de icopor, respecto a una mezcla con adición de un solo polímero



El Gráfico 7 muestra que la mezcla con adición de 50% de caucho y 50% de icopor, tiene un 10% de reducción al ahuellamiento respecto a la mezcla que tiene una adición de 1,5% de caucho (ver barras oscuras), mientras que si se compara respecto a una

mezcla con adición de 0,8% de icopor, no hay reducción alguna (ver barras claras). Aquí se muestra claramente el aporte del icopor respecto al ahuellamiento en una mezcla asfáltica.

GRÁFICO 8. MEJORA EN AHUELLAMIENTO DE UNA MEZCLA CON ADICIÓN DE CAUCHO E ICOPOR RESPECTO A UNA MEZCLA SIN ADICIÓN DE POLÍMERO.



FATIGA

El ensayo de fatiga se realizó para una frecuencia de 10Hz, a temperatura ambiente y a las deformaciones de 150×10^{-6} m, 220×10^{-6} m y 300×10^{-6} m.

Los resultados presentados a continuación, representan el comportamiento de cada una de las mez-

clas ensayadas en el laboratorio. Cada una de las gráficas, debe presentar una tendencia hacia abajo, ya que se considera la falla por fatiga cuando la respuesta del material llega al 50% del registro inicial, sin embargo, cuando la briqueta se rompe y no llega al 50% del registro inicial, también se da por fallada, siempre y cuando, la falla se encuentre a $\frac{3}{4}$ de la base, de lo contrario, esta briqueta es descartada.

Mezcla con adición de icopor. En la mezcla con adición de caucho e icopor, se observa que a medida que hay mayor deformación, disminuye el número de ciclos requeridos para la falla de la briqueta. Es importante destacar, que estas briquetas no llegaron al 50% de deformación, que es el criterio de falla, sino que se rompieron debido a la aplicación de la repetición de carga y a la rigidez de la mezcla.

Mezcla con adición de caucho. En la mezcla con adición de solo Caucho, se muestra un comportamiento constante, la tendencia de las gráficas no muestra una disminución en el porcentaje de deformación, es decir, que continúa recibiendo carga sin dar evidencia de falla.

Mezcla con adición de 50% caucho y 50% icopor. La gráfica con adición de 50% caucho y 50% icopor se presenta un comportamiento extraño, debido a que las repeticiones de carga que resistió antes de la rotura, fueron menores que las repeticiones que resistieron las briquetas a una deformación de 300×10^{-6} m.

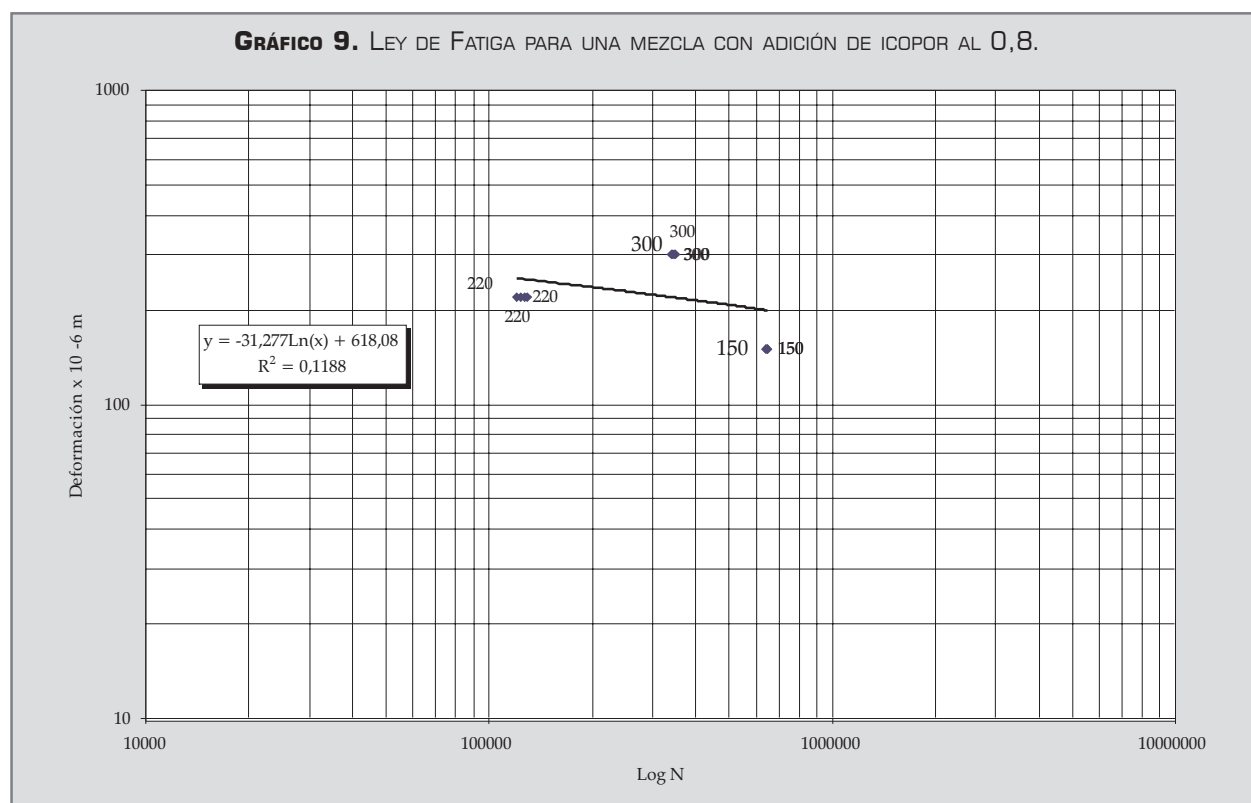
Mezcla sin aditivo. Las briquetas sin aditivo presentaron un mal comportamiento. Estas briquetas se rompieron muy rápidamente. Vale la pena realizar ensayos de contrastación (ver Tabla 10).

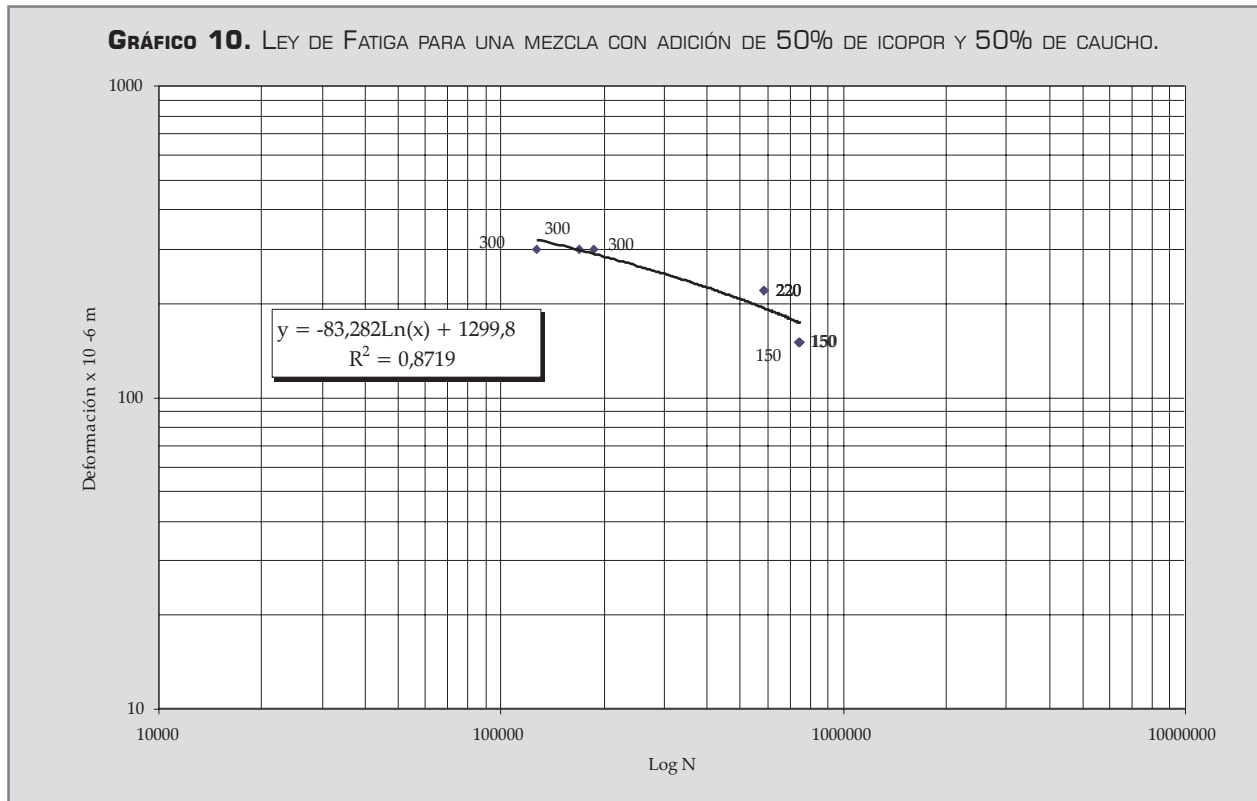
TABLA 10. NÚMERO DE CICLOS EN EL MOMENTO DE LA FALLA PARA CADA UNA DE LAS MEZCLAS DE TRABAJO.

Adición	Deformación X 10^{-6} m	Nº Ciclos de falla	Tipo de Falla	% Eo/ Emax
0,8% Icopor	150	703800	Rotura	0,69
	220	711000	Rotura	0,77
	300	126564	Rotura	0,65
1,5% Caucho	150	> 1500000	No presentó falla	0,82
	220	> 1500000	No presentó falla	0,81
	300	> 1400000	No presentó falla	0,89
50% Caucho y 50% de icopor	150	712746	Rotura	0,87
	220	87804	Fatiga	0,57
	300	426300	Rotura	0,82
Sin polímero	150	114792	Rotura	0,71
	220	103392	Rotura	0,70
	300	> 6000000	Rotura	0,83

La Tabla 10 muestra los resultados de deformación para cada una de las probetas ensayadas, y se puede observar que las briquetas con icopor, producen rápidamente valores de falla, lo que indica que esta adición genera rigidez en la mezcla. Pero lo contrario ocurre, cuando se adiciona caucho, ya que la incorporación de este polímero (ripio de llanta), permite que la mezcla resista mayor número de ciclos por carga, por lo tanto, se puede afirmar que adicionar caucho a una mezcla asfáltica, da como resultado un mejor comportamiento respecto a la fatiga.

Teniendo todos estos resultados, se procedió a obtener las leyes de fatiga para cada una de las mezclas regidas por la norma NFP 98-260-1 (150-210-300/100mm), sin embargo, solo se pudo desarrollar este cálculo para las briquetas de icopor y para las briquetas con los dos polímeros (50% de caucho y 50% de icopor), ya que las otras briquetas no presentaron un comportamiento adecuado dentro del ensayo.





Los resultados que muestran las leyes de fatiga, son comparables a través de la pendiente que entrega la línea de tendencia utilizada en las gráficas 30 y 31, es decir, que a menor pendiente mejor comportamiento. Observando esto, la mezcla con adición de 50% caucho y 50% icopor tiene mejor comportamiento que la mezcla de solo icopor, sin embargo existe un criterio de aceptación de los datos, el cual indica que una ley de fatiga es válida, siempre y cuando el valor de varianza (R^2) de los datos, sea aproximadamente de 0,9. Por lo tanto, en la gráfica 31 podemos observar que este dato, es muy bajo respecto a lo exigido. Es por esto que esta ley de fatiga no puede ser considerada en la comparación de datos.

Estos resultados de poca confiabilidad se pudieron ocasionar debido a mala fabricación de las probetas,

errores en la dosificación, fisuraciones de las briquetas en el momento de ser cortadas para dimensionarlas, condiciones variables de temperatura, etc. Es por esto, que para poder obtener una ley de fatiga que rijas el comportamiento de la mezcla con adición de caucho e icopor, es necesario generar más puntos en la gráfica, es decir, hacer más ensayos a otras deformaciones, o en último caso, repetir el ensayo.

Estudios precedentes⁸ como el desarrollado por Robert Lunddtrom, Hervé Di Benedetto y Ulf Isacsson, muestran la importancia de generar un nuevo criterio de falla para los ensayos de fatiga. Este estudio, presenta situaciones de ensayos de fatiga donde la curva de falla nunca llega a un valor de 50% de deformación. Debido a este comportamiento de la mezcla, se hace necesario desarrollar

⁸ Para mayor información: *Influence of Asphalt Mixture Stiffness on Fatigue Failure*. Robert Lunddtrom, Hervé Di Benedetto y Ulf Isacsson. *Journal of Material in Civil Engineering*. November/December 2004.

una ecuación que rijan el comportamiento de probetas que generan datos de fatiga casi constantes, lo que pudo haber pasado en varias de las probetas ensayadas. Por lo tanto, si el criterio de falla de las briquetas se dieran por número de ciclos, las probetas aunque tuvieran un comportamiento constante, se les podría generar una ley fatiga, teniendo en cuenta, que para el uso de este criterio, se necesitarían muchas muestras para tener confiabilidad en el procedimiento.

CONCLUSIONES

La incorporación de un desecho como el ripio de llanta (caucho) en la mezcla y el icopor, es una alternativa viable para la reutilización y disminución en el ambiente de productos nocivos para la salud humana como lo es el poliestireno, ya que este tipo de polímeros tienen largos períodos de degradación.

A pesar de que el dato de adición de caucho seleccionado no se encontraba en el valor óptimo que se había estipulado a través del criterio de menor desgaste, este resultado busca, la mayor utilización de caucho dentro de una mezcla asfáltica, y de esta manera, aportar una alternativa viable de reciclaje de materiales nocivos al medio ambiente.

De acuerdo con los resultados del ensayo de fatiga, se obtuvo una mezcla que gracias a su granulometría y a la combinación de polímeros, presenta mejor comportamiento frente a las mezclas que solo utilizan icopor. La adición del caucho dentro de la mezcla asfáltica generó mejor comportamiento a pesar de que la dosificación de esta mezcla no se encontraba en una combinación óptima (ver Tabla 10).

La incorporación de icopor hace la mezcla más rígida; mejora los resultados de ahuellamiento. Debido a esto, la mezcla con adición de 50% de caucho y

50% de icopor, se mejoró en un 10% respecto a la mezcla que solo utilizaba caucho.

El uso de icopor dentro de la mezcla asfáltica generó en los resultados de módulos Dinámicos Elásticos un mejor comportamiento (ver Gráfico 10). El valor de módulo dinámico elástico, es la relación de esfuerzo-deformación, lo que corrobora, que al adicionar icopor en la mezcla, ésta se comportaba de manera más rígida, es decir, se deformaba menos, por lo tanto, los valores de módulos dinámicos aumentaban.

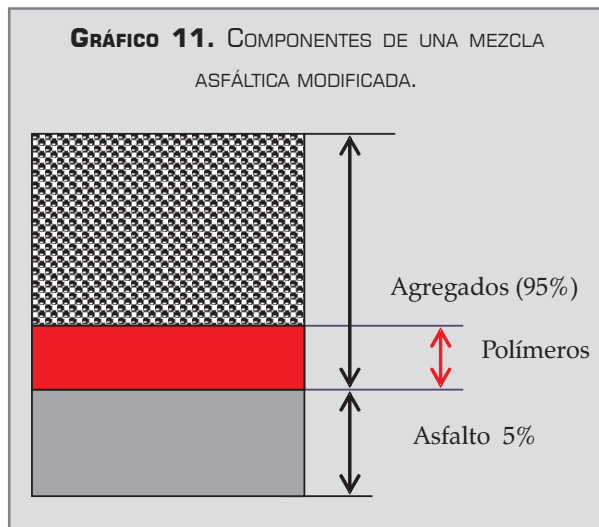
RECOMENDACIONES

A través del proceso de este proyecto, se desarrollaron mucho ensayos, los cuales se hacían con probetas tipo Marshall, y estas probetas eran compactadas a través del martillo Marshall, es decir por golpes. Este tipo de compactación pudo generar los valores desfasados que se presentaron en cada uno de los ensayos. Por esta razón se recomienda que en el proceso de compactación de las probetas, sea utilizado el compactador giratorio, debido a que, a través de esta herramienta, la varianza de datos puede disminuir y el comportamiento de la mezcla puede tener resultados más cercanos a la realidad.

Muchas de las briquetas ensayadas a la fatiga, tuvieron comportamientos extraños, que no generaron resultados confiables. Por esta razón, se recomienda la fabricación de más probetas que permitan conocer mejor, el comportamiento de la mezcla. Además, debe ser revisado el criterio de falla seleccionado, ya que la rigidez que la mezcla desarrolla cuando se le adiciona caucho, es diferente y el comportamiento respecto a la fatiga puede requerir muchos ciclos para llegar a la falla, sin que necesariamente la deformación llegue al 50%. Estudios⁹ como

el desarrollado por Robert Lunddtrom, Hervé Di Benedetto y Ulf Isacsson, pueden ser utilizados como un buen punto de referencia.

El desarrollo de esta investigación, tomó como punto de partida evaluar dos polímeros diferentes cada uno dentro de una mezcla asfáltica, y luego se pasó a mezclarlos bajo diferentes combinaciones. En este tipo de diseño la cantidad de polímero adicionada variaba dentro de la mezcla, motivo por el cual fue muy difícil hacer las comparaciones respectivas. Debido a esto, se recomienda que para futuras investigaciones afines, la cantidad de polímero adicionada a la mezcla permanezca como un valor constante, es decir: una mezcla asfáltica se compone de asfalto, agregados y en este caso de combinación de polímeros (ver Figura 15, los porcentajes de asfalto y agregado son a usados como ejemplo), y durante este proyecto las dosificaciones se realizaron sobre un valor constante de agregado, pero no sobre un valor constante de polímero.



La recomendación se basa en tomar un valor constante de adición de polímero, es decir, de ese 95%

de agregado escoger un porcentaje arbitrario, por ejemplo 1%, y dentro de ese valor del 1%, variar la adición de un polímero A y un polímero B. Lo que mantendría como valores constantes la adición de asfalto, el porcentaje de agregados y el porcentaje de adición de modificante.

Para seleccionar ese valor arbitrario del 1%, este trabajo de grado sirve como referencia, ya que los valores de adición que se hicieron sobre la mezcla asfáltica, correspondían a porcentajes que no superaban el 1,2 %.

Observando los resultados de esta investigación, se encontró que a medida que se aumenta el contenido de polímero dentro de la mezcla, el ahuellamiento se aumenta (ver Gráfico 6), y si se observan los resultados de módulos dinámicos, estos mejoraban a medida que el porcentaje de adición disminuía.

Teniendo en cuenta lo anterior, un porcentaje adecuado para trabajar sobre la adición de 2 polímeros sobre una mezcla asfáltica, es del 1% de adición de modificantes, dentro del cual se pueden generar combinaciones de polímeros así:

	Polímero A	Polímero B
a.	25%	75%
b.	50%	50%
c.	75%	25%
d.	100%	0%
e.	0%	100%

Teniendo estas combinaciones, se puede entrar a evaluar si el comportamiento de la mezcla mejora o no dentro de esos rangos, aclarando, que las combinaciones pueden ser diferentes dependiendo el enfoque que quiera dársele a la dosificación.

BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas - ASEFMA. *Seminario sobre mezclas bituminosas drenantes*. Madrid: Asociación Técnica de Carreteras, 1990.
- CEDEX. «Principios y Antecedentes del Decreto sobre Materiales de Construcción de los Países Bajos». *Ingeniería Civil*. 108 (1997): 133-136.
- Cuellar, A. *Estudio comparativo de las leyes de fatiga de una mezcla cerrada 0/10 con y sin adiciones de icopor*. Trabajo de Grado. Universidad Javeriana. 2003.
- DAMA-Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, Colombia. «Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y llantas usadas generadas por el parque automotor de Bogotá». *Gestión de residuos en Bogotá*. Bogotá D.C. DAMA (2000): 51-69.
- Figueroa, R. *Asfaltos modificados con poliestireno*. Universidad de La Salle, 2005
- Gallego, D. *Mezclas bituminosas con betunes de alto contenido en caucho de neumáticos: una elección por las altas prestaciones*. Madrid: Universidad Politécnica De Madrid.
- Mantilla, L. *Caracterización dinámica de una mezcla asfáltica drenante con adición de desechos plásticos mediante técnicas de banco de fatiga*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2003.
- Montejo, A. *Ingeniería de pavimentos para carreteras* (2 ed.) Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia, 2001.
- - -. *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Bogotá: Impreandes, 1998.
- Oda, S. y Fernández, J. *Viabilidad Técnica de Usar Caucho de Neumático como Material de Pavimentación Asfáltica*. Brasil: Universidad Estadual de Maringá.
- Palit, S., Sudhakar, K. y Pandey, B. «Laboratory Evaluation of Crumb Rubber Modified Asphalt Mixes». *Journal of Material in Civil Engineering*. January/ February 2004.
- Reyes, F. *Construcción de un prototipo para el estudio de las leyes de fatiga en mezclas asfálticas*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2002.
- - -. *Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2002.
- Reyes, O. *Mejoramiento de las propiedades mecánicas de una capa de asfalto con desperdicios plásticos*. Bogotá, 1997. Trabajo de grado. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería Civil.
- Robert, L., Di Benedetto, H. e Isacson, U. «Influence of Asphalt Mixture Stiffness on Fatigue Failure». *Journal of Material in Civil Engineering*. November/ December 2004.
- Sánchez De Guzmán, D. *Concretos y Morteros, Manejo y colocación en obra*. Bogotá: Asociación de Productores de Concreto-Asocreto, 2000.
- Sánchez, F. *Manual de laboratorio de pavimentos*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 1988.