
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)

•
Hugo Alexánder Rondón Quintana¹
Edgar Rodríguez Rincón²
Luis Ángel Moreno Anselmi³

•

Recibido: 03/03/2007
Aceptado: 27/09/2007

Resumen

El presente trabajo buscó evaluar en laboratorio el cambio en la resistencia mecánica que experimentan mezclas asfálticas densas en caliente cuando se adicionan, por vía húmeda, al cemento asfáltico aditivos poliméricos producto de desechos industriales del tipo plastómero (policloruro de vinilo, polietileno de alta densidad y poliestireno). Para tal fin se empleó el ensayo Marshall. De los resultados obtenidos se concluye que la resistencia mecánica de mezclas asfálticas modificadas con

¹ Ingeniero civil de la Universidad Francisco de Paula Santander, Magíster en Ingeniería Civil y candidato a doctor en Ingeniería de la Universidad de Los Andes. Director de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia. Dirección: Dg. 47, No. 15-50, Sede el Claustro, 4to. Piso, Bogotá D. C. Teléfono: 057 - 2853876, Fax: 2858792, e-mail: harondon@ucatolica.edu.co

² Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, magíster en Ingeniería Civil de la Universidad de Los Andes. Director de Docencia de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia. Dirección: Dg. 47, No. 15-50, Sede el Claustro, 4to. Piso, Bogotá D.C. Teléfono: 057 - 2853876, Fax: 2858792, e-mail: erodriguezr@ucatolica.edu.co

³ Ingeniero civil de la Universidad Francisco de Paula Santander, magíster en Ingeniería Civil de la Universidad de Los Andes. Docente investigador de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia. Dirección: Dg. 47, No. 15-50, Sede el Claustro, 4to. Piso, Bogotá D.C. Teléfono: 057 - 2853876, Fax: 2858792, e-mail: lamoreno@ucatolica.edu.co

desechos del tipo plastómero es mayor en comparación con las convencionales (mezclas que emplean asfaltos sin ningún aditivo).

Palabras clave

Asfaltos modificados, policloruro de vinilo, polietileno de alta densidad, poliestireno.

MECHANICAL RESISTANCE OF HOT THICK MIXTURES MADE WITH ASPHALT MODIFIED WITH POLYVINYL CHLORIDE, POLYCLORURE (PVC) WASTES, HIGH DENSITY POLYETHYLENE (PEAD), AND POLYSTYRENE (PS) EVALUATED IN MARSHALL ASSAY

Abstract

The main objective of this research Project was to evaluate in a laboratory the change in mechanical strength that dense hot asphalt mixtures go through when waste polymeric additives of plastomeric type (polyvinyl chloride, high density polyethylene and polystyrene) are added to asphalt cement, by “wet way”. This change was evaluated using Marshall Test. The general conclusion of the experimental results was that modified hot asphalt mixtures present better mechanical behavior than conventional mixtures (mixtures which use asphalt without additives).

Key Words

Modified asphalts, vinyl polychlorure, and high density polyethylene, polystyrene.

INTRODUCCIÓN

En el mundo, la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales cuando experimentan niveles elevados de tránsito y gradientes de temperatura. Por lo general, lo que se busca con este tipo de tecnología es mejorar algunas de las propiedades mecánicas y reológicas de los asfaltos y las mezclas asfálticas convencionales, tales como la susceptibilidad térmica, la rigidez y la resistencia al envejecimiento, a las deformaciones plásticas y a la fatiga.

El artículo presenta los resultados experimentales de ensayar mezclas asfálticas densas en caliente modificadas con aditivos poliméricos (producto de desechos industriales) del tipo plastómero como policloruro de vinilo, polietileno de alta densidad y poliestireno (los cuales se denominan en el presente trabajo PVC, PEAD y PS, respectivamente). Estos aditivos se adicionan al cemento asfáltico a una temperatura adecuada controlando el tiempo de mezcla para garantizar su homogeneidad (este proceso se denomina adición por vía húmeda). Para la evaluación de la resistencia mecánica de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas se empleó el ensayo Marshall, y para el cemento asfáltico con y sin aditivo se realizaron ensayos de caracterización de asfaltos como penetración, punto de ablandamiento y flotación.

ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS

Un asfalto modificado es aquel al cual se le adicionan productos tales como látex, polietileno, cal, cemento, azufre, asfaltenos naturales, hule molido de neumáticos, aceites, resinas, fibras de acero, vidrio o asbesto entre otros, con el fin de modificar y mejorar algunas de sus características mecánicas y reológicas. Una mezcla asfáltica modifica-

da es la combinación de material pétreo y ligante asfáltico modificado. Con la modificación de asfaltos se busca mejorar el comportamiento de algunas de las propiedades de las mezclas, tales como:

- Resistencia a la fisuración y susceptibilidad térmica.
- Resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento).
- Adherencia entre los agregados pétreos.
- Adherencia entre la carpeta de rodamiento y la base o sub-base.
- Cohesividad.
- Resistencia al envejecimiento.
- Resistencia a la fatiga.

En Colombia, los desarrollos investigativos en el área de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas son extensos en comparación con la cantidad de estructuras de pavimentos flexibles construidas con esta tecnología. Un estado del conocimiento detallado de los estudios realizados sobre esta tecnología en Colombia puede ser consultada en Rondón *et al.* (2006a).

POLÍMEROS

La palabra polímero significa “muchas piezas”. Los polímeros son compuestos orgánicos de elevado peso molecular, formados por la repetición sucesiva de grupos estructurales más sencillos denominados monómeros. Los materiales poliméricos más importantes se hallan divididos en plásticos y elastómeros. Estos se encuentran disponibles en gran variedad de formas comerciales como fibras, películas, hojas delgadas, espumas y en bruto.

Plásticos. Los plásticos son un gran y variado grupo de materiales sintéticos que se procesan mediante el modelado de la forma. Estos se dividen en dos clases, termoplásticos y termoendurecibles, dependiendo de la estructura química de su enlace.

Algunas diferencias entre termoplásticos y termoendurecibles radican en que los primeros al someterse a altas temperaturas pierden consistencia y se deforman (de esta manera pueden ser moldeados varias veces sin tener un cambio significativo de sus propiedades), mientras los segundos, a bajas temperaturas, se rigidizan, no permitiendo un nuevo moldeamiento y a temperaturas muy elevadas se descomponen o degradan, no logrando un reciclaje de estos materiales.

Elastómeros. Son materiales poliméricos cuyas dimensiones pueden tener un gran cambio cuando se les aplica una tensión, y retoman sus dimensiones originales cuando se elimina la tensión, siempre y cuando esta fuerza sea aplicada dentro del rango elástico del material.

Entre los materiales elastoméricos se encuentran el caucho natural, las siliconas, el neopreno, el caucho de nitrilo, el caucho de estireno-butadieno y el poliisopreno sintético.

Policloruro de vinilo (PVC)

El PVC es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo a policloruro de vinilo. Es un material termoplástico industrial amorfo, que puede ser transparente e incoloro pero que se encuentra comúnmente pigmentado. Es rígido, duro, naturalmente retardante a la combustión, y presenta alta resistencia química (los solventes son su punto débil, particularmente para la rotura bajo carga). La resina que resulta de la polimerización es la más versátil de la familia de los plásticos, pues además de ser termoplástica, a partir de ella se pueden obtener productos rígidos y flexibles.

Desecho de PVC. El PVC que se utilizó para modificar el asfalto es un residuo de la producción del mismo, el cual fue obtenido de la empresa Petroquímica de Colombia (PETCO S. A.), la cual produce Policloruro de Vinilo para diferentes usos, tales como recubrimientos y adhesivos para cue-

ros sintéticos, recubrimientos textiles, carpas para camiones y bandas transportadoras, películas impermeabilizantes para techos. De acuerdo con Rodríguez *et al.* (2006), esta empresa genera un volumen importante de este residuo durante su proceso de fabricación el cual es almacenado en los patios de la planta de producción ubicada en Cartagena. La acumulación de este tipo de desecho podría llegar a generar en el futuro un impacto ambiental negativo por su difícil degradación y por su baja demanda para ser reutilizado. Es por esto que la implementación de este desecho industrial (en este caso para pavimentos) puede llegar a tener un impacto ambiental positivo.

Polietileno (PE)

El etileno es la materia prima para la obtención del polietileno. La forma común de clasificar al polietileno es por medio de su densidad (baja, media y alta). También se encuentra en el mercado polietileno de peso molecular ultra-alto. Los tipos de baja densidad (PEBD) son flexibles y tenaces. Los de densidad media (PEDM) y alta densidad (PEAD) son más fuertes, más duros y más rígidos. Todos son materiales de peso ligero, fáciles de procesar y de bajo costo. Presentan baja estabilidad dimensional y resistencia al calor, pero presentan una alta resistencia química excepto cuando son expuestos a agentes como el ácido nítrico, ácido sulfúrico fumante, peróxido de hidrogeno o halógenos. Comercialmente existen básicamente dos tipos de polietileno, el de alta densidad el cual se identifica en el sistema SPI (Sistema de Productos Industriales) con el número 2 y el de baja densidad con el número 4. El polietileno presenta una resistencia a la tracción en el rango de los 2.0 a los 4.5 kg/mm².

Polietileno de alta densidad (PEAD). Es un polímero de cadena lineal no ramificada. Su resistencia química y térmica y su dureza son superiores a las del polietileno de baja densidad. Presentan alta capacidad elástica y flexibilidad. Son muy utilizados para

la fabricación de tubos, planchas, materiales aislantes, cables eléctricos recubrimiento para protección contra la corrosión, botellas para leche, frascos para productos cosméticos, envases para productos químicos, cubetas, botellas de refrescos, jugos, platos, juguetes y envases promocionales. Su densidad varía de 0.90 a 0.92 g/cm³.

Poliestireno (PS)

De acuerdo con Shackelford (1992), el poliestireno (PS) es el resultado de la polimerización del estireno monómero. Es un material plástico transparente, inodoro, insípido y relativamente frágil, a no ser que se modifique. El poliestireno fue sintetizado por primera vez a nivel industrial en el año 1930.

En general, los poliestirenos tienen buena estabilidad dimensional, pequeña contracción al moldearlos y son fácilmente procesables a bajo costo. Sin embargo, tienen baja resistencia al ambiente, carecen de estabilidad a los rayos ultravioleta y son químicamente atacados por disolventes orgánicos y aceites. Los poliestirenos tienen buenas propiedades como aislantes eléctricos y adecuadas propiedades mecánicas dentro de los límites de temperatura de uso. Sus aplicaciones típicas incluyen piezas interiores de los automóviles, envases desechables, carcasas de dispositivos, botones de aparatos, equipos eléctricos, piezas de refrigerador, juguetes, utensilios domésticos y en forma de espuma rígida para aislamiento y embalaje.

Básicamente existen dos tipos de resinas de poliestireno: poliestireno de uso general o poliestireno cristal (GPPS) y poliestireno de alto impacto (HIPS).

METODOLOGÍA

El agregado pétreo empleado para la elaboración de las briquetas modificadas con PVC (ensayo Marshall) es procedente de la mina La Fiscala, y para el caso, de la modificada con PEAD y PS de la cantera Conalgre (ambas ubicadas en Bogotá D. C.). A estos materiales se le realizaron los siguientes ensayos, con base en las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2002a):

- Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos (INV. E - 213).
- Peso específico y absorción de agregados finos (INV. E - 222), peso específico y absorción de agregados gruesos (INV. E - 223).
- Resistencia al desgaste de los agregados (tamaños menores de 3/4") por medio de la máquina de Los Ángeles (INV. E - 218).
- Partículas fracturadas (INV. E - 227).
- Ensayo para medir el equivalente de arena (INV. E - 133).
- Índice de alargamiento aplanamiento (INV. E-230).

El cemento asfáltico empleado en el proyecto proviene de la planta de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL) en Barranquilla. Este asfalto fue escogido debido a que se puede trabajar a más altas temperaturas que los asfaltos de otras refineries, facilitando el mezclado de los aditivos sin llegar a quemarse. Las características del cemento asfáltico se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Características generales del asfalto.

ANÁLISIS	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN	MÉTODO
Penetración a 25°C (77°F)	mm/10	88	70 mínimo - 90 máximo	ASTM D 5
Pérdida de masa (RTFOT)	g/100g	0.22	1.1 máximo	ASTM D 2872
Punto ablandamiento	°C	44	42 mínimo - 53 máximo	ASTM D 36
Punto de inflamación	°C	296	232 mínimo	ASTM D 92
Gravedad API	°API	7.38		ASTM D 4052
Peso específico	kg/m ³	1.01		

Fuente: ECOPETROL

Luego de realizar los ensayos al agregado pétreo se fabricaron 5 briquetas (compactadas a 75 golpes por cara) para cada porcentaje de asfalto de 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0 y 7.5%, con el fin de realizar el diseño Marshall para determinar el contenido óptimo de asfalto de las mezclas convencionales (el diseño se realizó basado en los criterios presentados en la Tabla 2). Las mezclas modificadas con PVC son del tipo MDC-2, y las modificadas con PEAD y PS son del tipo MDC-1. Una vez se obtuvo el porcentaje óptimo de asfalto, se fabricaron nuevas briquetas agregando por vía húmeda los aditivos (PVC, PEAD y PS) en porcentajes de 0.5, 1.0 y 1.5% (con respecto al peso total de la briketa

de 1200 g) y manteniendo el porcentaje de asfalto. Por cada porcentaje de aditivo se fabricaron 5 briquetas para ensayarlas en el aparato Marshall. Además, se realizó el mismo estudio rebajando el porcentaje óptimo de asfalto en 0.5%.

Con los resultados obtenidos se determinó el porcentaje óptimo de cemento asfáltico más aditivo. Por último se realizaron los siguientes ensayos al asfalto convencional y al modificado: punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola, INV. E -712), penetración de los materiales asfálticos (INV. E - 706) y flotación de acuerdo a la norma del laboratorio de transporte de España NLT - 183/85.

Tabla 2. Criterios de diseño Marshall para mezclas asfálticas densas en caliente.

CARACTERÍSTICAS		TRÁNSITO DE DISEÑO (N)		
		Ejes equivalentes de 80 kN		
		>5 x 10 ⁶	5x10 ⁵ -5x10 ⁶	<5 x 10 ⁵
Compactación, golpes/cara		75	75	75
Estabilidad mínima kg	900	750	600	
Flujo	mm	2-3.5	2-4	2-4
Vacíos con aire:				
Capa de rodadura %	4-6	3-5	3-5	
Base asfáltica %	4-8	4-8	4-8	
Vacíos mínimos en agregados minerales:				
Gradación MDC-0%	14	14	14	
Gradación MDC-1%	14	14	14	
Gradación MDC-2%	15	15	15	
Gradación MDC-3%	16	16	16	
Vacíos llenos de asfalto	%	65 - 75	65 - 78	65 - 80

Fuente: INVIAS, 2002. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 450.4.2.

Aditivos. El desecho de PVC presenta una densidad de 0.9 g/cm³ y partículas de coloración blanca que pasan el tamiz No. 200. El PEAD estaba procesado en *pellet*'s (partículas redondeadas de igual tamaño y forma, de 425 mm aproximadamente, el cual era retenido en tamiz No. 40), presentaba coloración negra con algo de tonalidad azul oscura y su densidad fue de 0.92 g/cm³. El poliestireno utilizado fue del tipo GPPS el cual se encuentra en *pellet*'s retenidos en el tamiz No.40,

presentaba una tonalidad blanca y su densidad fue de 1.05 g/cm³.

La temperatura de mezclado del cemento asfáltico con el PEAD y el PS fue de 160°C y el tiempo de mezclado, de 1 hora. Para el caso del PVC la temperatura de mezclado estuvo entre 170 - 180 °C y los tiempos fueron de 25 minutos para porcentaje de aditivo de 0.5 - 1.0% y de 35 minutos para 1.5% de aditivo.

RESULTADOS

Caracterización de los agregados pétreos

Para cumplir con las especificaciones del INVÍAS (2002), se modificó la granulometría original de los agregados, tomando como referencia los valores promedio en porcentajes de la franja granulométrica que exige la especificación para la elaboración de las briquetas del ensayo Marshall (tabla 3).

Tabla 3. Gradación de mezclas densas en caliente tipo 1 y 2 (MDC-1, MDC-2)

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA	
Normal	Alterno	MDC-1	MDC-2
25.0 mm	1"	100	-
19.0 mm	¾"	80-100	100
12.5 mm	½"	67-85	80-100
9.5 mm	3/8"	60-77	70-88
4.75 mm	No.4	43-59	49-65
2.00 mm	No.10	29-45	29-45
425 mm	No.40	14-25	14-25
180 mm	No.80	8-17	8-17
75 mm	No.200	4-8	4-8

Fuente: Instituto Nacional de Vías - INVÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Artículo 450.2.1. 2002.

En la tabla 4 se presentan los valores obtenidos de los ensayos de caracterización al agregado pétreo. Tan solo el valor de desgaste en la máquina de Los Ángeles de 31.5% no cumple con el requisito mínimo de calidad exigido por las especificaciones INVÍAS (2002) para fabricar mezclas tipo

MDC-2, pero en general se observa que el material puede ser empleado para la elaboración de las briquetas del presente estudio.

Tabla 4. Caracterización de los agregados

CARACTERÍSTICA	CONALGRE	LA FISCALA
Peso específico	2.6	2,55
Equivalente de arena	55.0%	78,90%
Caras fracturadas	86%	95%
Índice de alargamiento	14%	10%
Índice de aplanamiento	13%	13%
Resistencia al desgaste máquina de Los Angeles	34,20%	31.5%

Ensayo marshall

Se presentan en primera instancia los resultados de las briquetas elaboradas con asfalto convencional, seguido de las muestras con asfalto modificado. Es importante tener en cuenta que las briquetas con asfalto convencional y modificado fueron elaboradas con el mismo agregado pétreo y ligante asfáltico.

4.2.1. Mezcla asfáltica convencional. Los cálculos obtenidos del ensayo Marshall para las briquetas elaboradas con asfalto convencional están registrados en las Tablas 5 y 6. En la tabla 5 se presentan los resultados de la mezcla convencional tipo MDC-1 que empleó agregado pétreo procedente de Conalgre y en la tabla 6, aquellas del tipo MDC-2 que emplearon el material de la mina La Fiscala.

Tabla 5. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica convencional MDC-1.

% Asfalto	Peso Unitario g/cm ³	Estabilidad (E) [kg]	Vacios en la mezcla [%]	Vacios en agregados [%]	Llenos de asfalto [%]	Flujo (F) [mm]	Relación E/F [kg/mm]
5.0%	2.16	1357.27	8.95	19.59	54.40	3.64	373.2
5.5%	2.18	1541.40	7.48	19.29	61.29	4.77	323.1
6.0%	2.18	1689.60	6.66	19.57	66.17	4.85	348.4
6.5%	2.18	1881.16	5.90	19.90	70.66	5.12	367.7
7.0%	2.17	1645.82	6.37	20.31	68.66	5.70	288.5
7.5%	2.17	1561.60	6.48	20.40	68.24	5.93	263.2

Tabla 6. Resumen ensayo Marshall para mezcla asfáltica convencional tipo MDC-2.

% Asfalto	Peso Unitario [g/cm ³]	Estabilidad (E) [kg]	Vacios en la mezcla [%]	Vacios en agregados [%]	Llenos de asfalto [%]	Flujo (F) [mm]	Relación E/F [kg/mm]
5.0%	2.12	872.7	10.36	20.88	50.46	3.13	278.82
5.5%	2.16	956.1	8.00	19.79	59.69	3.42	279.60
6.0%	2.19	1251.5	5.96	19.34	67.28	3.48	359.63
6.5%	2.21	967.4	4.81	19.02	74.83	4.43	218.37

4.2.2. Mezclas asfálticas modificadas. Los datos obtenidos en el ensayo Marshall para las mezclas asfálticas modificadas fueron registrados en las Tablas 7, 8 y 9 para PVC, PEAD y PS, respectivamente.

Tabla 7. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PVC.

% PVC	Peso Unitario [g/cm ³]		Estabilidad (E) [kg]		% Vacíos de la mezcla		% Vacíos en agregados		% Llenos de asfalto		Flujo (F) [mm]		Relación E/F [kg/mm]	
	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%	5.5%	6.0%
0.50	2.18	2.16	1691	1398	6.75	6.36	19.80	20.72	64.17	69.42	3.93	4.09	430.3	341.8
1.00	2.20	2.14	2202	1894	5.09	6.51	19.49	21.92	73.95	70.39	4.00	4.11	550.6	460.9
1.50	2.14	2.12	2037	1843	6.70	6.58	21.63	23.03	70.67	71.72	4.22	4.29	482.7	429.7

Tabla 8. Resumen del ensayo Marshall para mezcla asfáltica modificada con PEAD.

% PVC	Peso Unitario [g/cm ³]		Estabilidad (E) [kg]		% Vacíos de la mezcla		% Vacíos en agregados		% Llenos de asfalto		Flujo (F) [mm]		Relación E/F [kg/mm]	
	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%
0.50	2.16	2.07	1554	823	6.9	10.2	20.9	24.5	67	59	3.0	2.5	519	330
1.00	2.24	2.12	1717	1115	2.8	7.2	18.4	23.1	85	69	3.9	2.7	442	409
1.50	2.26	2.17	1657	1113	1.0	4.3	18.1	21.7	94	81	4.4	3.4	378	325

Tabla 9. Resultados del ensayo Marshall con la adición de PS.

% PS	Peso Unitario [g/cm ³]		Estabilidad (E) [kg]		% Vacíos de la mezcla		% Vacíos en agregados		% Llenos de asfalto		Flujo (F) [mm]		Relación E/F [kg/mm]	
	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%	6.0%	6.5%
0.50	2.18	2.24	1732	1599	6.28	2,94	20.2	18.35	69.0	84.59	4.28	4.81	404	332
1.00	2.23	2.24	1874	1549	3.14	2,06	18.49	18.58	83.3	89.11	4.89	4.28	383	362
1.50	2.26	2.23	2979	1487	1.54	1,99	18.12	19.48	91.6	90.00	4.94	5.67	604	262

Caracterización del asfalto

En la tabla 10, se observan los resultados de penetración, índice de penetración y temperatura de mezcla y compactación del asfalto con-

vencional y modificado. Es importante tener presente que los asfaltos modificados se caracterizaron con los porcentajes óptimos obtenidos con base en el análisis de resultados, los cuales son:

- Asfalto - PVC: 5.5% de asfalto y 1.0% de PVC.
- Asfalto - PS: 6.0% de asfalto y 0.7% de CR.
- Asfalto - PEAD: 6.0% de asfalto y 0.75 de PEAD.

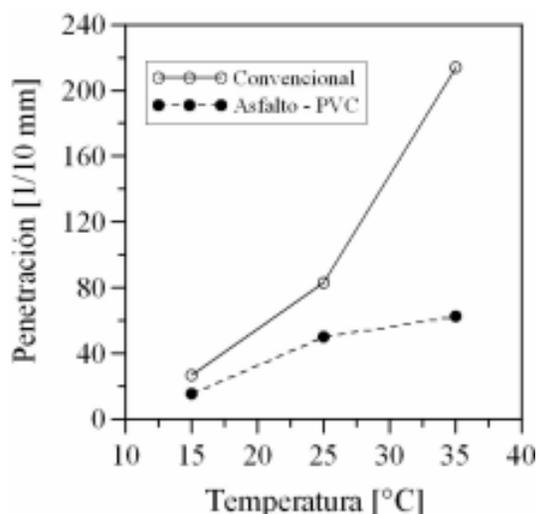
Tabla 10. Resultados obtenidos de caracterización.

Ensayo	Unidad	Ensayo	Asfalto convencional	Asfalto - PEAD	Asfalto - PS	Asfalto - PVC
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	INV-E-706	83	14.5	91.0	50.0
Punto de ablandamiento anillo y bola	°C	INV-E-712	49	93	94	60.5
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	cm	INV- E-702	>100	>100	>100	<100
Flotación 80°C	seg	NLT-183/85	96	7993	7005	8970

Para el caso del asfalto - PVC se realizó un análisis del cambio que experimentaba la penetración con la temperatura (tabla 11 y figura 1).

Tabla 11. Variación de la penetración con la temperatura para el asfalto - PVC.

ASFALTO	PENETRACIÓN		
	15°C	25°C	35°C
Convencional	26.67	83.0	214.0
Asfalto - PVC	15.33	50.0	62.50

**Figura 1.** Variación de la penetración con la temperatura para el asfalto - PVC.

El asfalto convencional tuvo un comportamiento acorde con las especificaciones de ECOPETROL.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El porcentaje óptimo de asfalto de acuerdo con los datos de la tabla 5 es de 6.5% y en este porcentaje se están cumpliendo, a excepción del valor de flujo, los requisitos mínimos exigidos por la especificación INVÍAS, 2002 (INV. 450.4.2) para MDC-1. Aunque el valor de flujo no cumple con los valores exigidos para ninguno de los porcentajes de asfalto de la mezcla, con la adición de los polímeros se presenta un mejoramiento de esta propiedad como se presenta más adelante. Para el caso de la MDC-2, el porcentaje óptimo de asfalto de acuerdo con los resultados de la tabla 6 es de 6.0%. En este porcentaje se cumple con los requisitos exigidos por la especificación INVÍAS (2002) para MDC-2.

En cuanto a la estabilidad y la rigidez, la mezcla asfáltica modificada con PVC presenta valores mayores con respecto a la convencional para cualquier porcentaje de asfalto (5.5 o 6.0%) y de aditivo, obteniéndose los mayores valores (2202 kg y 550.6 kg/mm, respectivamente) cuando se disminuye el porcentaje óptimo de asfalto en 0.5% (5.5%) y se adiciona 1.0% de PVC (ver figuras 2a y b). Los valores de flujo en la mezcla asfáltica modificada con PVC son mayores con respecto a la convencional y solo cumplen para tráfico entre 5×10^5 y 5×10^6 ejes equivalentes de 80 KN cuando se adiciona entre 0.5% y 1.0% de PVC al 5.5% de

asfalto (figura 2c). En cuanto al peso unitario (Figura 2d) y al porcentaje de vacíos en la mezcla, el mejor comportamiento se obtiene cuando se adiciona 1.0% de PVC al 5.5% de asfalto. Además este porcentaje presenta, con res-

pecto a la mezcla asfáltica convencional, valores similares.

En conclusión el mejor requerimiento se obtiene cuando se adiciona 1.0% de PVC al 5.5% de asfalto.

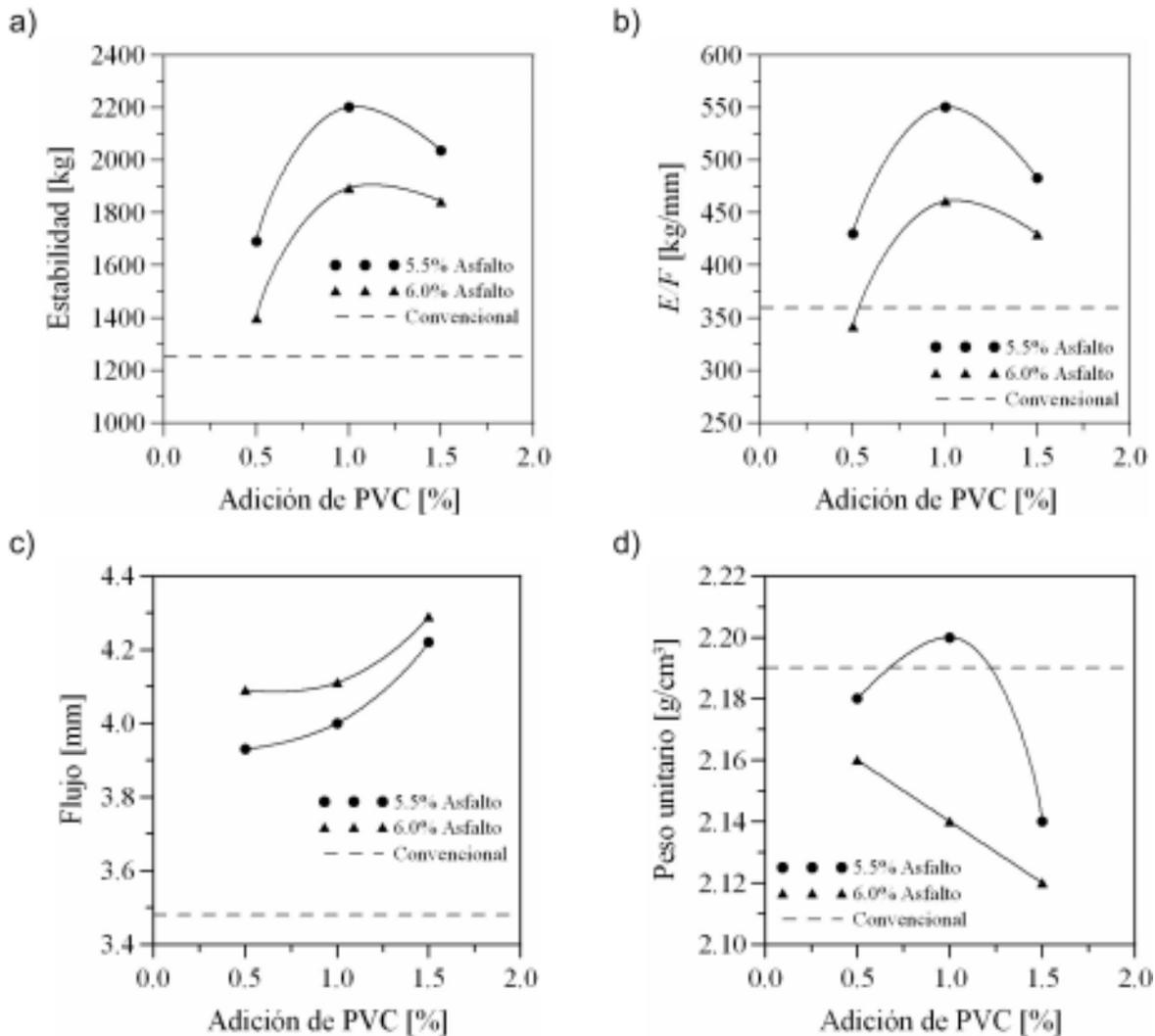


Figura 2. Evolución de a) Estabilidad, b) Rigidez Marshall, c) Flujo y d) Peso unitario con la adición de PVC al asfalto.

En las figuras 3a, b, c y d se puede observar que el mejor comportamiento de la mezcla asfáltica modificada con PEAD se obtuvo cuando se utilizó 6.0% de cemento asfáltico (es decir, 0.5% por debajo del óptimo de asfalto). En este por-

centaje, además, la mezcla modificada presenta un mejor comportamiento frente a la convencional. En comparación con la mezcla asfáltica convencional, la modificada con 6.0% de cemento asfáltico:

- Presenta valores superiores de peso unitario cuando se adiciona entre 0.7 y 1.5% de PEAD (Figura 3d).
- Presenta valores ligeramente inferiores de estabilidad para cualquier porcentaje de PEAD pero cumplen con el valor exigido por la especificación INVÍAS, 2002 (Figura 3a).
- Contrario a lo anterior, la mezcla modificada mejoró la resistencia a la deformación ya que el flujo disminuyó entre 23.5 y 41% para el caso en el que se adicionaba entre 0.5 - 1.1%

de PEAD permitiendo cumplir con los requisitos exigidos de flujo (figura 3c). Esta reducción en el flujo produce un aumento de la rigidez (figura 3b).

- Presenta menor porcentaje de vacíos en la mezcla con respecto a la convencional cuando se adiciona entre 0.7% y 1.5% (Tabla 8).

Con base en los datos presentados en la tabla 8 y en las figuras 3a, b, c y d se concluye que el mejor comportamiento se obtiene cuando se adiciona 0.75% de PEAD al 6.0% de asfalto.

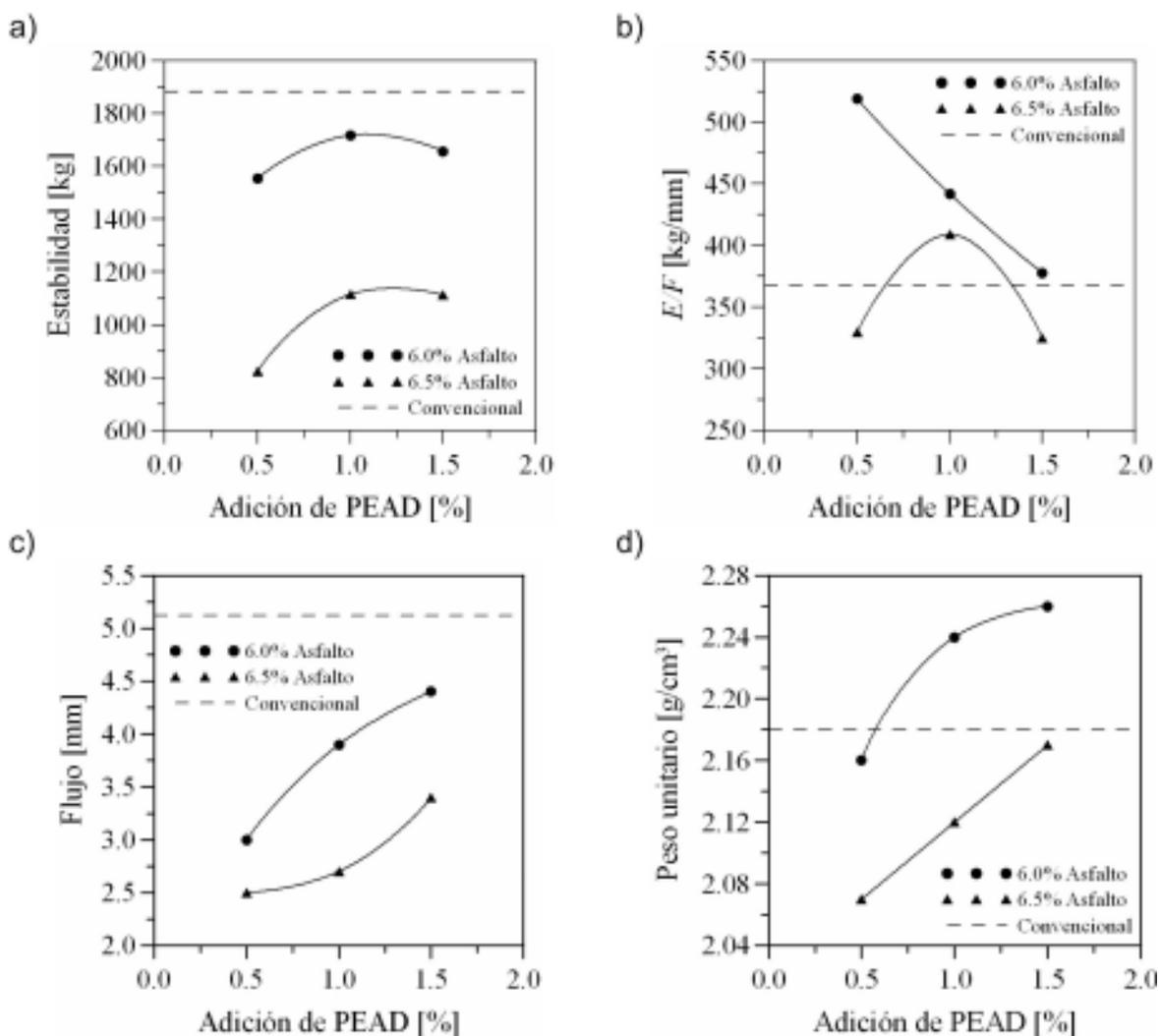


Figura 3. Evolución de a) Estabilidad, b) Rigidez Marshall, c) Flujo y d) Peso unitario con la adición de PEAD al asfalto.

El mejor comportamiento de la mezcla asfáltica modificada con PS también se obtuvo cuando se utilizó 6.0% de cemento asfáltico (figuras 4a, b, c y d). En comparación con la mezcla asfáltica convencional, la modificada con 6.0% de cemento asfáltico:

- Presenta valores de peso unitario y rigidez mayores para cualquier porcentaje de aditivo. Para el caso de la estabilidad, se puede observar en la figura 4a un aumento de este parámetro a partir del 1.0% de adición. La mayor estabilidad y rigidez se presenta en la mezcla cuando se adiciona 1.5% de PS (2979 kg y 604 kg/mm respectivamente). En este porcentaje de aditivo la estabilidad es 58.4% mayor y la rigidez 64.3% mayor con respecto a la mezcla convencional.
- Mejora los valores de flujo para cualquier porcentaje de aditivo, pero aún así en ningún caso cumple con lo establecido por la norma INVÍAS, 2002 según la cual el flujo debe estar entre 2 y 4 mm.
- A partir del 0.6% de adición de PS la mezcla tiende a presentar menores porcentajes de vacíos en comparación con la mezcla convencional (ver tabla 9). Los porcentajes que cumplen con los requerimientos para la MDC -1 según el INVIAS están entre el 0.5% y el 0.9% de PS aproximadamente. De acuerdo con esta norma el porcentaje de vacíos en la mezcla total debe estar entre 4 y 8%.

Con base en los datos presentados en la tabla 9 y en las figuras 4a, b, c y d se concluye que el mejor comportamiento se obtiene cuando se adiciona entre 0.5 y 0.9% de PS al 6.0% de asfalto.

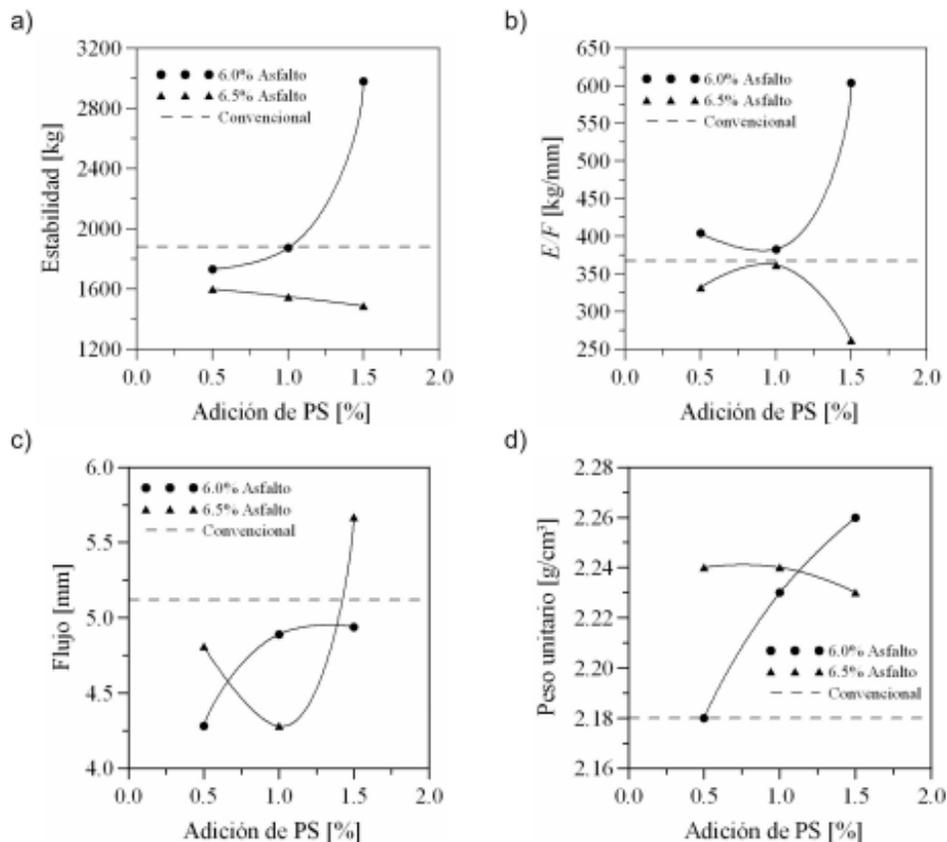


Figura 4. Evolución de a) Estabilidad, b) Rigidez Marshall, c) Flujo y d) Peso unitario con la adición de PS al asfalto.

Los asfaltos modificados con PVC y PEAD presentan una resistencia mayor a la penetración que el asfalto convencional, mientras que con PS disminuye ligeramente (tabla 10).

Del ensayo de flotación (tabla 10) se puede concluir cualitativamente que los asfaltos modificados presentan mayor viscosidad en comparación con el convencional y deben ser sometidos a mayores temperaturas para ablandarlos (incrementaron el valor de temperatura para el cual fluyen).

Las mezclas asfálticas modificadas con PVC, PEAD y PS, presentan un incremento notable de la rigidez. En el porcentaje óptimo de asfalto - PVC el peso unitario de la mezcla modificada es similar, el porcentaje de vacíos es menor y la estabilidad es mayor que el de la mezcla convencional. La mezcla asfalto - PVC presenta mayor viscosidad que el asfalto convencional y muy baja susceptibilidad térmica manifestada a través de los cambios que en penetración se obtienen a distintas temperaturas. Las mezclas asfálticas modificadas con PEAD y PS de desecho presentan mejor comportamiento que la convencional especialmente en rigidez, resistencia a la deformación y peso unitario.

CONCLUSIONES

En general, las mezclas asfálticas modificadas con desechos plastoméricos tienden a poseer un

comportamiento rígido. A bajas temperaturas de servicio, estas mezclas pueden tener un comportamiento frágil, llevando a pensar que tendrían un mejor desempeño en climas cálidos. La resistencia que tienen los asfaltos modificados a fluir es mayor con respecto al convencional. Los valores de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad del asfalto modificado permiten predecir menor ahuellamiento a altas temperaturas de servicio.

Agregar aditivos plastoméricos productos de desechos industriales al asfalto, para modificar o mejorar alguna de sus propiedades, contribuiría al ambiente reduciendo el impacto negativo que producen, gracias a la reutilización de materiales que generalmente son contaminantes si se disponen de manera no controlada y que normalmente se desperdician por ser subproductos de procesos industriales y desconocimiento de usos alternos. La utilización entonces de estos desechos como materiales modificadores de asfaltos podría llevar a generar cultura del desarrollo sostenible en el área de los pavimentos.

Las fases futuras del proyecto deben medir variables como envejecimiento a corto y largo plazo de los asfaltos, módulos dinámicos, resistencia a fatiga y ahuellamiento de las mezclas asfálticas y establecer un análisis de costos más detallado, tal como lo recomiendan Ayala (2006), Rondón *et al.* (2004) y Rondón *et al.* (2006).

BIBLIOGRAFÍA

- AYALA, A. 2006. Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente tipo 1 (MDC - 1) empleando asfaltos modificados con poliestireno de desecho. Bogotá D.C., Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Colombia, 71pp.
- EMPRESA COLOMBIANA DE PETRÓLEOS. Catalogo de asfaltos colombianos. [En línea]. Bogotá D. C. (Citado, 18 de diciembre de 2004). Disponible Internet <www.ecopetrol.com.co/especiales/catalogo/asfaltos.htm>
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. 2002. Especificaciones generales de Construcción de carreteras. Bogotá D.C., INVÍAS.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. 2002a. Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. V. I y II. Bogotá D.C., INVÍAS.

- INSTITUTO MEXICANO DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL. 1997. Enciclopedia mexicana de la industria del plástico. México. Litografías publicitarias ECC.
- REYES, F. A. & REYES, O. J. 2003. Efecto de los polímeros en las mezclas asfálticas. *Asfaltos y Pavimentos*, V. 8, No. 5, p. 13 - 18.
- RODRÍGUEZ, E., RONDÓN, H. A., VÉLEZ, D. M. & AGUIRRE, L. C. 2006. Influencia de la inclusión de desecho de PVC sobre el CBR de un material granular tipo subbase. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. V. 5, No. 9, p. 21 - 30.
- RONDÓN, H. A., HERRERA, O. A., CAICEDO, L. R., DÍAZ, D. M., GUTIÉRREZ, A. P., LADINO, C. M. & DÍAZ, F. A. 2004. Estudio del comportamiento de mezclas densas en caliente elaboradas con asfaltos modificados con policloruro de vinilo, látex natural y caucho reciclado. Cartagena. 4as. Jornadas Internacionales del Asfalto, 17 pp.
- RONDÓN, H. A., RODRÍGUEZ, E., MOJICA, A. A. & HERNÁNDEZ, H. 2006. Análisis del comportamiento de una mezcla densa en caliente (MDC-1) modificando el asfalto con desecho de polietileno. Cartagena. 5as. Jornadas Internacionales del asfalto, 12 pp.
- RONDÓN, H. A., RODRÍGUEZ, E., REAL, C. M. & MONTEALEGRE, T. A. 2006a. Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia. Cartagena. 5as. Jornadas Internacionales del asfalto, 18 pp.
- SHACKELFORD, J. 1992. *Ciencia de Materiales para Ingenieros*. México. Ed. Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 794 pp.
- THE UNIVERSITY OF SOUTHERN MISSISSIPPI. Los polímeros en persona. [En línea]. E.E.U.U. (Citado, 26 de Julio de 2005). Disponible internet <<http://www.psrc.usm.edu/spanish/pvc.htm>>