

Estudio del contenido de cemento asfáltico óptimo en mezclas asfálticas densas en caliente modificadas con poliestireno reciclado

Study of the optimum asphalt cement content in hot dense asphalt mixes modified with recycled polystyrene

Briceño, Johannes^{1,2,3}; Omaña, Jesús²; Verjel, Víctor⁴

¹Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

²Postgrado de Ingeniería Vial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

³Laboratorio de Suelos y Pavimentos, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

⁴Programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.
ingjebb@gmail.com, johannes@ula.ve

Resumen

La sociedad actual ha traído consigo, además de una mejora sustancial en la calidad de vida, la generación de desechos sólidos, lo que supone una amenaza para la vida en el planeta. Esto ha obligado a establecer sistemas de gestión y producción más eficientes y sostenibles. El Poliestireno (PS), al igual que otros plásticos, está presente en grandes porcentajes como desecho en el ambiente; el objetivo de este trabajo de investigación es darle un uso útil a este material una vez reciclado, incorporándolo en mezclas asfálticas en caliente como un valor agregado (Briceño y col., 2016). El PS reciclado se puede moldear en formas y tamaños parecidos a los agregados utilizados en mezclas asfálticas, por lo que se plantea modificarlas aprovechando este pasivo ambiental y estudiar el comportamiento al sustituir el 20 % con material de PS retenido en el tamiz #8. Se construyeron tres mezclas patrón en caliente del Tipo IV, M9 y M19 (normas COVENIN 2000/87) y tres modificada con la sustitución ya mencionada, mediante la metodología Marshall (ensayo ASTM D1559), comparando sus propiedades índices con la mezcla patrón y definir un contenido de cemento asfáltico óptimo para la mezcla modificada. De acuerdo a los resultados obtenidos en las mezclas modificadas se concluye que las propiedades índices se encuentran en rangos aceptables.

Palabras Claves: Poliestireno reciclado, Mezclas asfálticas modificadas, Contenido de cemento asfáltico óptimo.

Abstract

Today's society has brought, in addition to a substantial improvement in the quality of life, the generation of solid waste, which poses a threat to life on the planet. This has forced to establish more efficient and sustainable management and production systems. Polystyrene (PS), like other plastics, is present in large percentages as waste in the environment; The objective of this research work is to give a useful use to this material once it has been recycled, incorporating it into hot asphalt mixtures as an added value (Briceño et al., 2016). The recycled PS can be molded in shapes and sizes similar to the aggregates used in asphalt mixtures, so it is proposed to modify them taking advantage of this environmental liability and to study the behavior by replacing 20% with PS material retained in sieve # 8. Three Type IV, M9 and M19 hot standard mixes were constructed (COVENIN 2000/87 standards) and three modified with the aforementioned substitution, using the Marshall methodology (ASTM D1559 test), comparing their index properties with the standard mix and defining an optimum asphalt cement content for the modified mix. According to the results obtained in the modified mixtures, it is concluded that the index properties are in acceptable ranges.

Keywords: Recycled polystyrene, Modified asphalt mixes, Optimum asphalt cement content.

1 Introducción.

Los productos de plástico son muy comunes en nuestra vida moderna, estos contaminan todos los mares y costas del planeta, estando presentes en prácticamente todos los ecosistemas. El plástico tarda cientos de años en descomponerse en el ambiente, hasta 1.000 años según el tipo de plástico (Econoticias.com, 2012). La importancia y extensión de la polución por plástico esta correlacionada con el bajo costo y durabilidad del mismo, lo que conduce a que los seres humanos utilicen gran cantidad de elementos de este material.

Debido a esto, en determinados países de Europa, Canadá y Estados Unidos se han implementado planes para intentar reducir el consumo de plástico y promover el reciclado del mismo.

Se puede señalar, la gran variedad de productos plásticos en lo que se encuentra el poliestireno que es utilizado para fabricar varios productos de uso común y cotidiano, que al ser usados se tiran a la basura llegando a ecosistemas marinos causando graves daños, planteando la interrogante ¿Planeta o plástico?

Actualmente, se está investigando la posibilidad de reciclar este material, a un costo asequible mediante proceso de extrusión en formas similares a esferas o cilindros pequeños, muy rígidos y resistentes, con tamaños semejantes a los agregados utilizados en las mezclas asfálticas. De esta forma, se disminuye la presencia de este material en vertederos y se reduce el impacto generado por la explotación de canteras y el transporte de los agregados, al utilizarse en mezclas asfálticas en caliente (MAC).

De manera convencional una mezcla asfáltica se fabrica con la combinación de varios tamaños de materiales pétreos, pero en esta investigación se utilizó una gradación media de las especificaciones de cada tipo de mezcla en cada uno de los tamices, con el fin de que la gradación no pasara a ser una variable dependiente.

La presente investigación se basa en el estudio de dos MAC, una mezcla patrón convencional y otra modificada con PS reciclado, utilizando la normativa venezolana (normas COVENIN 2000/87), para los tipos de mezcla IV, M9 y M19, ensayadas bajo la metodología Marshall (ensayo ASTM D1559). Todo esto con la finalidad de comparar las propiedades índices de las mezclas modificadas con las mezclas patrón (Briceño y col., 2016), para de este modo determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico a ser utilizado en las mezclas modificadas.

2 Marco metodológico.

Para obtener los objetivos planteados, se realizó el siguiente esquema de trabajo con el fin de tener resultados confiables de comparación entre las variables presentes en esta investigación: Se construyeron MAC del tipo IV, M9 y M19. Luego, de determinó el contenido óptimo de cemento asfáltico para la mezcla patrón. Posteriormente, se construyeron MAC del tipo IV, M9 y M19, modificadas con material reciclado de PS sustituido en el agregado pétreo en un 20 % del retenido en tamiz #8, para diferentes contenidos de asfalto (Briceño y col., 2016). Seguidamente, se determinó el comportamiento de las propiedades índices de las mezclas en cuanto a: densidad, vacíos totales, vacíos llenados con asfalto, vacíos en el agregado mineral, estabilidad y flujo. Finalmente, se determinó el contenido de cemento asfáltico óptimo en MAC modificadas con poliestireno reciclado.

Con el fin de, evitar que la gradación pase a ser una variable dependiente en esta investigación se utilizó lo establecido en las especificaciones técnicas y la construcción de las mezclas se hizo con gradación controlada utilizando el rango medio de las especificaciones de gradación para cada tipo de mezcla, cumpliendo así, tanto con el coeficiente de curvatura (Cc) como con el coeficiente de uniformidad (Cu). En la Tabla 1 se muestra las especificaciones de gradación del agregado pétreo para la elaboración de las briquetas de las mezclas en estudio tipo IV, M9 y M19 respectivamente.

Tabla 1. Especificaciones de gradación para agregado, mezclas tipo IV, M9 y M19.

Tamiz	mm	Tipo IV			M9			M19		
		Mezcla (%)	LS %	LI %	Mezcla (%)	LS %	LI %	Mezcla (%)	LS %	LI %
1"	25,00							100	100	100
3/4"	19,05	90	80	100				95	90	100
1/2"	12,50				100	100	100	85	80	90
3/8"	9,53	70	60	80	95	90	100	68	56	80
#4	4,70	56,50	48	65	70	55	85	50	35	6
#8	2,36	42,50	35	50	49,50	32	67	36	23	49
#30	0,60	24,50	19	30						
#50	0,36	18	13	23	15	7	23	12	5	19
#100	0,15	11	7	15						
#200	0,08	5	2	8	6	2	10	5	2	8

*LS, define el límite superior de las especificaciones, LI, corresponde al límite inferior de las especificaciones.

Asimismo, la Figura 1 muestra la representación gráfica de gradación de la mezcla tipo IV, mostrando el límite superior, inferior y rango medio de la misma.

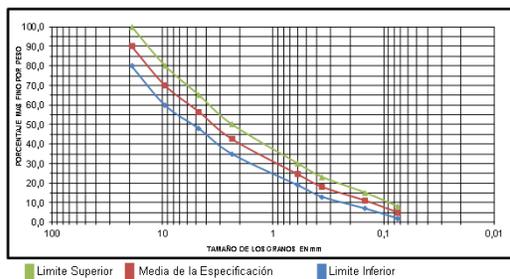


Figura 1. Representación grafica, especificaciones de gradación, mezcla tipo IV.

De igual forma, el peso específico Bulk o bruto de la mezcla de agregados (Gsb), es uno de los parámetros importantes a intervenir en el diseño de mezcla, se encuentran el peso específico Bulk de cada uno de los agregados, mostrados en la Tabla 2 y el peso específico Bulk o bruto de la mezcla de agregados, mostrados en la Tabla 3.

Tabla 2. Peso específico Bulk de los agregados.

MATERIAL	3/4"	1/2"	Pasa #4
P.E Bulk (ton/m ³)	2,701	2,667	2,585

Tabla 3. Peso específico Bulk de la mezcla de agregados (Gsb)

Mezcla	Gsb (ton/m ³)
Tipo IV	2,612
M9	2,589
M19	2,613

Para la construcción de las briquetas de ensayo se utilizó la metodología establecida por el método Marshall, utilizando la media de las especificaciones de gradación para cada tipo de mezcla (tipo IV, M9 y M19), la construcción de briquetas de ensayo se realizó en base a un peso de mezcla de 1200g, donde el cien por ciento (100%) de mezcla se conforma por el porcentaje de partículas de agregado más el porcentaje de participación del cemento asfáltico (%CA) con valores de 4; 4,50; 5; 5,50 y 6.

Al mismo tiempo, se realizó el ensayo RICE, para determinar la densidad teórica máxima de la mezcla suelta (Gmm) para los tres tipos de mezcla (IV, M9 y M19) con %CA=4; 4,5; 5; 5,5 y 6, mostrado en la Tabla 4.

Tabla 4. Densidad teórica máxima (Gmm) para diferentes %CA.

% CA	Mezcla tipo IV				
	4,000	4,500	5,000	5,50	6,00
Gmm (ton/m ³)	2,550	2,530	2,511	2,492	2,474
% CA	Mezcla M9				
	4,000	4,500	5,000	5,50	6,00
Gmm (ton/m ³)	2,533	2,514	2,495	2,472	2,454
% CA	Mezcla M19				
	4,000	4,500	5,000	5,50	6,00
Gmm (ton/m ³)	2,528	2,509	2,491	2,472	2,454

Una vez elaboradas las briquetas y ensayadas, las mismas deben cumplir con las especificaciones mostradas en la Tabla 5 para las propiedades índices de las mezclas en caliente, establecidas por el método Marshall según ensayo ASTM D1559.

Tabla 5. Especificaciones, propiedades índices, mezclas asfálticas en caliente (MAC).

Va (%)	VLL (%)	VAM (%)	Estabilidad (lb)	Flujo (1/100")
3-5	65-75	12-14	2200	8-14

2.1 Mezclas asfálticas en caliente, patrón (convencionales).

Con el fin de determinar el %CA óptimo en las mezclas se determinaron todas las propiedades índices de las mismas, tales como: Peso específico bruto de la mezcla compactada (Gmb), densidad teórica máxima (Gmm), vacíos totales (Va), vacíos llenados con asfalto (VLL), vacíos en el agregado mineral (VAM) y se midió la estabilidad y el flujo con los %CA=4; 4,50; 5; 5,50 y 6, de las mezclas tipo IV, M9 y M19. En la Tabla 6 se muestran los resultados de todas las mezclas patrón, utilizando las ecuaciones descritas en el método Marshall.

Siguiendo con el esquema de trabajo planteado y utilizando el criterio de la Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos (NAPA), se determinó el contenido de cemento asfáltico óptimo para las mezclas patrón.

Tabla 6. Propiedades índices de las mezclas asfálticas en caliente, patrón.

Mezcla tipo IV							
% CA	Gmb (ton/m ³)	Gmm (ton/m ³)	Va (%)	VAM (%)	VLL (%)	Estabilidad (lb)	Flujo (1/100")
4,0	2,303	2,550	9,67	15,37	37,09	2102,10	9
4,5	2,316	2,530	8,47	15,33	44,75	2493,92	10
5,0	2,337	2,511	6,92	15,01	53,90	2696,55	11
5,5	2,396	2,492	3,86	13,32	71,02	2577,05	12
6,0	2,392	2,474	3,31	13,93	76,24	2282,85	14
Mezcla M9							
4,0	2,270	2,533	10,37	15,83	34,49	2075,00	15
4,5	2,361	2,514	6,07	12,91	52,98	2786,30	14
5,0	2,352	2,495	5,72	13,7	58,25	2473,90	15
5,5	2,378	2,472	3,82	13,2	71,06	2364,27	13
6,0	2,366	2,454	3,6	14,1	74,47	2345,20	14
Mezcla M19							
4,0	2,295	2,528	9,23	15,67	41,10	1977,98	8
4,5	2,347	2,509	6,46	14,21	54,54	2166,59	9
5,0	2,384	2,491	4,30	13,31	67,69	2739,17	10
5,5	2,366	2,472	4,30	14,42	70,18	2435,58	11
6,0	2,361	2,454	3,80	15,05	74,75	1901,61	13

2.2 Mezclas asfálticas en caliente modificadas con PS reciclado.

De igual forma, siguiendo la metodología Marshall se construyeron mezclas asfálticas (tipo IV, M9 y M19) modificadas con material PS reciclado, sustituyendo el 20% (porcentaje determinado por (Briceño y col., 2016)) del material retenido en el pasante # 8 por vía seca para % CA=4; 4,50; 5; 5,50 y 6. Es importante tener en cuenta, que los pesos específicos de los materiales, agregados pétreos y PS reciclado ameritan una corrección por volumen en las mezclas propuestas por ser muy diferentes, esta corrección se hace para cada %CA manteniendo el 20% de PS. De esta manera se ajustan los porcentajes de participación de cada uno de los agregados tomando en cuenta el diferencial que existe entre las gravidades específicas de los materiales.

De igual manera, con el fin de determinar el %CA_{óptimo} en las mezclas, se determinaron todas las propiedades índices de las mismas con los mismos %CA que en las mezclas patrón y utilizando el criterio de la NAPA se determinó el contenido de cemento asfáltico óptimo para las mezclas modificadas con PS reciclado. En la Tabla 7 se muestran los resultados de todas las mezclas modificadas, utilizando las ecuaciones descritas en el método Marshall.

Tabla 7. Propiedades índices de las mezclas modificadas con PS reciclado.

Mezcla tipo IV							
% CA	Gmb (ton/m ³)	Gmm (ton/m ³)	Va (%)	VAM (%)	VLL (%)	Estabilidad (lb)	Flujo (1/100'')
4,0	2,335	2,461	5,12	14,19	63,92	3192,40	10
4,5	2,380	2,443	2,60	12,99	79,98	3449,14	8
5,0	2,377	2,426	2,02	13,56	85,10	2002,00	7
5,5	2,382	2,409	1,12	13,83	91,90	2364,27	11
6,0	2,367	2,392	1,05	14,83	92,92	2202,20	13
Mezcla M9							
4,0	2,258	2,483	9,05	16,27	44,38	3988,61	15
4,5	2,285	2,465	7,28	15,71	53,66	4523,67	14
5,0	2,284	2,447	6,66	16,19	58,86	2473,90	14
5,5	2,284	2,429	5,98	16,63	64,04	2359,50	16
6,0	2,322	2,412	3,73	15,69	76,23	2345,20	15
Mezcla M19							
4,0	2,276	2,484	8,36	16,36	48,90	2964,98	12
4,5	2,296	2,466	6,88	16,06	57,16	3947,52	11
5,0	2,338	2,448	4,48	14,97	70,07	3331,90	12
5,5	2,329	2,430	4,16	15,75	73,59	2402,40	15
6,0	2,276	2,413	5,67	18,10	68,67	2345,20	15

3 Análisis de resultados.

Después de haber aplicado la metodología descrita para la determinación del contenido de

cemento asfáltico óptimo (%CA_{óptimo}) en MAC, se presenta el conjunto de resultados para cada una de las mezclas, patrón y modificadas, ensayadas para el estudio de su comportamiento.

3.1 Mezcla asfáltica en caliente patrón (MAC), tipo IV, M9 y M19.

Como resultado, aplicando el método Marshall y el criterio NAPA, la Tabla 8 muestra el contenido de cemento asfáltico óptimo y las propiedades índices de las MAC patrón tipo IV, M9 y M19, hallados por (Briceño y col., 2016).

Tabla 8. Contenido de cemento asfáltico óptimo (%CA_{óptimo}) y propiedades índices, MAC patrón. (Briceño y col., 2016).

Mezcla tipo IV patrón							
% CA óptimo	Gmb (ton/m ³)	Gmm (ton/m ³)	Va (%)	VAM (%)	VLL (%)	Estabilidad (lb)	Flujo (1/100'')
5,5	2,396	2,492	3,86	13,32	71,02	2577,05	12,00
Especificaciones			3-5	12-14	65-75	2200	8-14
Mezcla patrón							
5,5	2,378	2,470	3,72	13,20	71,82	2364,27	13,00
Especificaciones			3-5	14-16	65-75	2200	8-14
Mezcla patrón							
5,5	2,366	2,472	4,30	14,42	70,18	2435,58	11,00
Especificaciones			3-5	12-14	65-75	2200	8-14

3.2 Mezcla asfáltica en caliente modificada con poliestireno reciclado, tipo IV, M9 y M19.

A continuación, la Tabla 9 muestra los resultados del contenido de cemento asfáltico óptimo y las propiedades índices de las MAC al incorporar el PS reciclado.

Tabla 9. Contenido de cemento asfáltico óptimo (%CA_{óptimo}) y propiedades índices, MAC modificadas con PS reciclado.

Mezcla tipo IV modificada PS reciclado							
% CA óptimo	Gmb (ton/m ³)	Gmm (ton/m ³)	Va (%)	VAM (%)	VLL (%)	Estabilidad (lb)	Flujo (1/100'')
4,20	2,353	2,454	4,00	14,00	70,00	3295,00	9,00
Especificaciones			3-5	12-14	65-75	2200	8-14
Mezcla M9 modificada PS reciclado							
6,0	2,316	2,412	3,98	15,91	74,98	3413,44	14,00
Especificaciones			3-5	14-16	65-75	2200	8-14
Mezcla M19 modificada PS reciclado							
5,2	2,342	2,441	4,00	14,88	73,00	4062,00	12,60
Especificaciones			3-5	12-14	65-75	2200	8-14

3.3 Comparación de las propiedades índices de las MAC patrón y modificadas con PS reciclado.

Seguidamente, se compararon las propiedades índices de los diferentes tipos de MAC, patrón y modificadas con PS reciclado, mostradas en las Tablas 6 y 7.

Densidad (Gmb).

La Figura 2 muestra la variación del peso específico bruto de la mezcla compactada (Gmb) o densidad de la mezcla compactada, tanto para las mezclas patrón como para las modificadas, para diferentes contenidos de cemento asfáltico (%CA) y la Figura 3 para contenido de cemento asfáltico óptimo (%CA_{óptimo}).

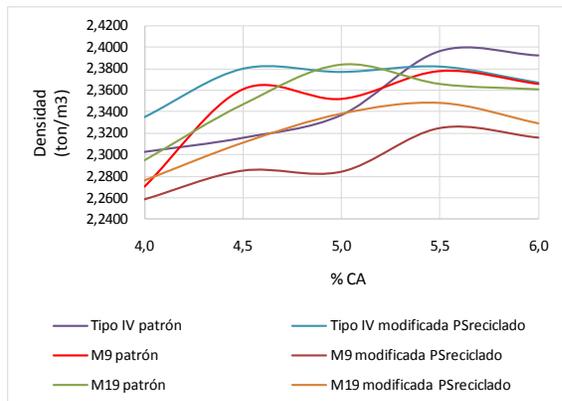


Figura 2. Peso específico bruto de la mezcla compactada (Gmb), MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para diferentes %CA.

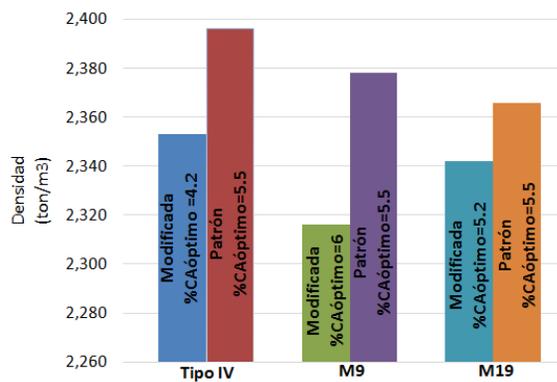


Figura 3. Peso específico bruto de la mezcla compactada (Gmb), MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para %CA_{óptimo}.

Notablemente, la Figura 3, muestra que la densidad disminuyó para cada una de las mezclas modificadas comparándolas con la patrón, para la mezcla tipo IV su disminución es de 2%, para la M9 de 3% y para la M19 la misma es de 1%.

A causa de la participación de un agregado como el PS con menor peso específico, en donde el peso se conserva pero el volumen aumenta, trae como consecuencia la disminución de la densidad en las mezclas modificadas.

Para la mezcla M9 modificada la cual tiene un %CA_{óptimo}=6, que a pesar de dar un mejor acomodo de las partículas de los agregados por tener mayor cantidad de ligante que la mezcla patrón, este mismo

ligante tiene una menor gravedad específica que los agregados, ocasionando la disminución de la densidad. Por otra parte, las mezclas tipo IV y M19, modificadas, disminuyeron su %CA_{óptimo} con respecto a la mezcla patrón, pero el hecho de tener el PS reciclado en una participación del 20%, de igual forma, hizo disminuir el valor de la densidad.

Vacios totales (%Va).

La Figura 4 muestra la variación de los vacios totales (%Va) o de aire, tanto para las mezclas patrón como para las modificadas, para diferentes %CA y la Figura 5 para contenido de cemento asfáltico óptimo (%CA_{óptimo}).

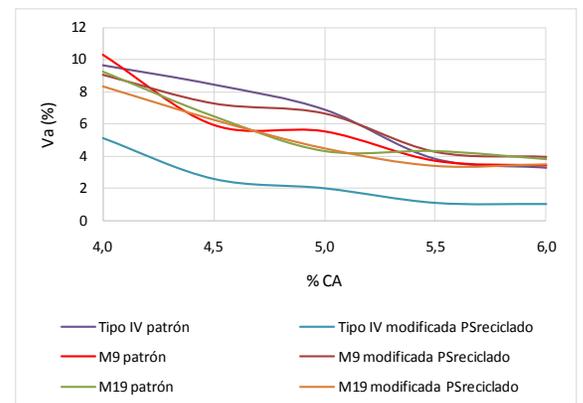


Figura 4. Vacios totales (%Va), MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para diferentes %CA.

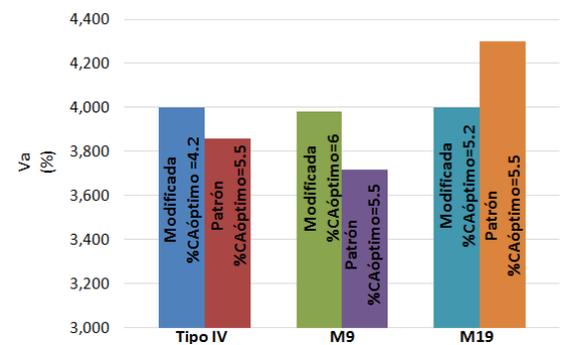


Figura 5. Vacios totales (%Va), MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para %CA_{óptimo}.

Asimismo, en la figura 5 se puede apreciar que para las mezclas tipo IV y M9, modificadas, el %Va aumentó en comparación con la mezcla patrón, debido a que se está incorporando un material a la mezcla (PS reciclado) que ocupa mayor volumen que el agregado que sustituyó, por tanto, el ligante asfáltico debe cubrir mas superficie y no está llenando los vacios. Por el contrario, en la mezcla M19 podemos notar un comportamiento diferente, que requerirá mayor atención experimental, a pesar de que esta propiedad se mantiene dentro de los rangos aceptables de las especificaciones.

Vacios en el agregado mineral (%VAM).

La Figura 6 muestra la variación de los vacios en el agregado mineral (%VAM), tanto para las mezclas patrón como para las modificadas, para diferentes %CA y la Figura 7 para contenido de cemento asfáltico óptimo (%CA_{óptimo}).

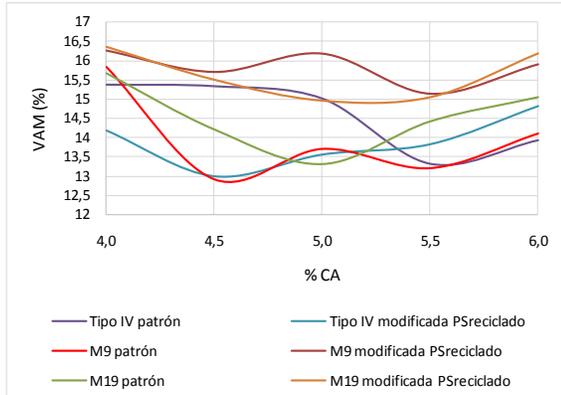


Figura 6. Vacios en el agregado mineral (%VAM), MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para diferentes %CA.

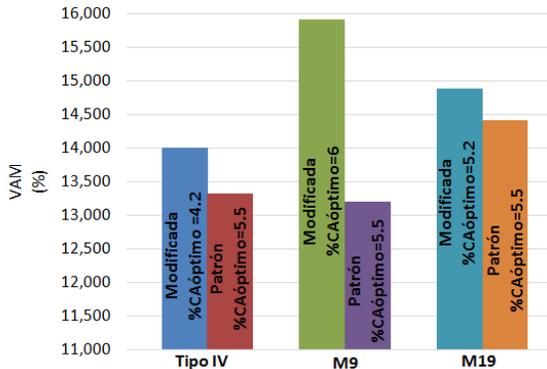


Figura 7. Vacios en el agregado mineral (%VAM), MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para %CA_{óptimo}.

De igual forma, en la Figura 7 se puede notar que para las tres mezclas modificadas el %VAM aumentó con respecto a las mezclas patrón, esto sucede debido a que se está incorporando un material (PS reciclado) que tiene mucha superficie y que ocupa mucho volumen, por tanto, el ligante tiene que cubrir mayor superficie como asfalto efectivo, aumentando el volumen de lo no ocupado por agregado.

Vacios llenados con asfalto (%VLL).

La Figura 8 muestra la variación de los vacios llenados con asfalto (%VLL), tanto para las mezclas patrón como para las modificadas, para diferentes %CA y la Figura 9 para contenido de cemento

asfáltico óptimo (%CA_{óptimo}).

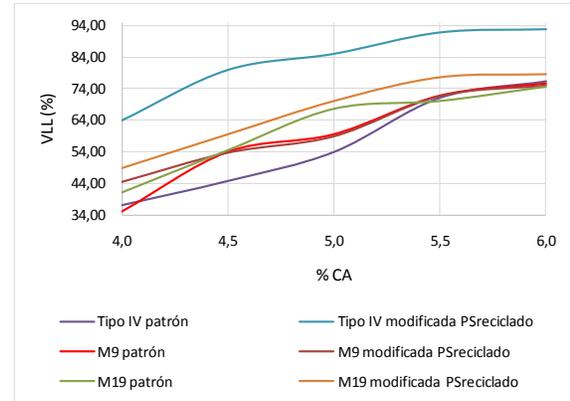


Figura 8. Vacios llenados con asfalto (%VLL), MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para diferentes %CA.

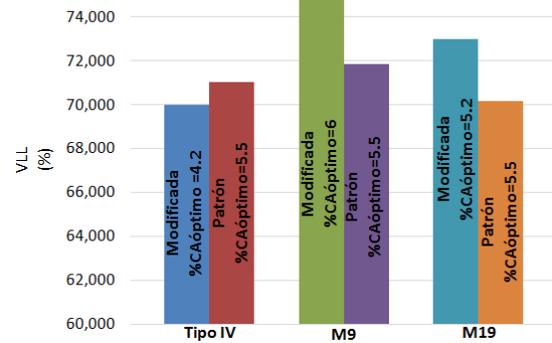


Figura 9. Vacios llenados con asfalto (%VLL), MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para %CA_{óptimo}.

Por otra parte, la Figura 9 muestra que en la mezcla M9 modificada, hay un aumento considerable de %CA_{óptimo} con respecto a la mezcla patrón, este incremento de asfalto llena los vacios, por lo que aumenta %VLL con respecto a la mezcla patrón. Por el contrario, la mezcla tipo IV al disminuir el contenido de asfalto el %VLL disminuye. Con respecto a la mezcla tipo M19 modificada requerirá mayor atención experimental, a pesar de que esta propiedad se mantiene dentro de los rangos aceptables de las especificaciones.

Estabilidad Marshall.

La Figura 10 muestra la estabilidad Marshall, tanto para las mezclas patrón como para las modificadas, para diferentes %CA y la Figura 11 para contenido de cemento asfáltico óptimo (%CA_{óptimo}).

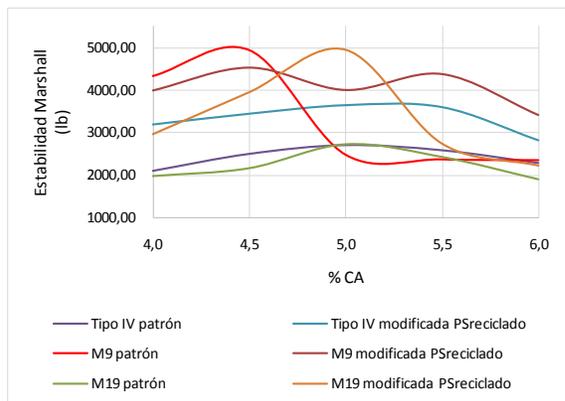


Figura 10. Estabilidad Marshall, MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para diferentes %CA.

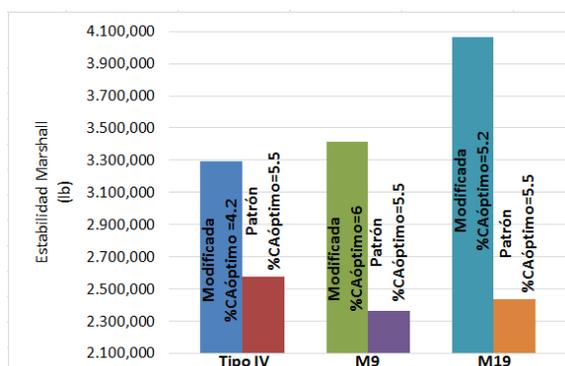


Figura 11. Estabilidad Marshall, MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para %CA_{óptimo}.

Seguidamente, se analiza la estabilidad, la cual se afectó favorablemente en las tres mezclas modificadas, tal como se observa en la Figura 11. Esta propiedad aumentó hasta alcanzar incrementos del 22% en la mezcla tipo IV, 31% para la M9 y de 40% para la M19. Este aumento se debe a que el PS reciclado, por su composición y forma que se adoptó para la mezcla, lo hace muy resistente a la compresión, lo que aumenta la estabilidad.

Flujo.

La Figura 12 muestra el flujo o deformación permanente, tanto para las mezclas patrón como para las modificadas, para diferentes %CA y la Figura 13 para contenido de cemento asfáltico óptimo (%CA_{óptimo}).

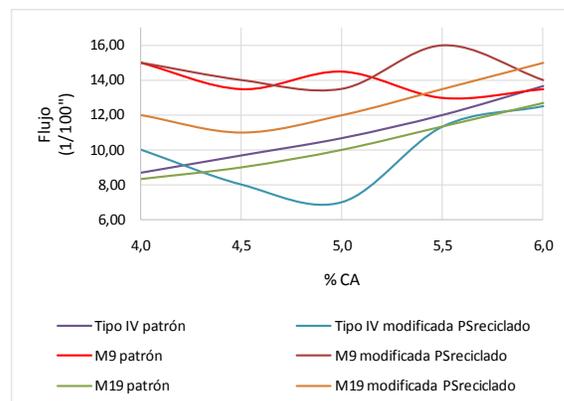


Figura 12. Flujo, MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para diferentes %CA.

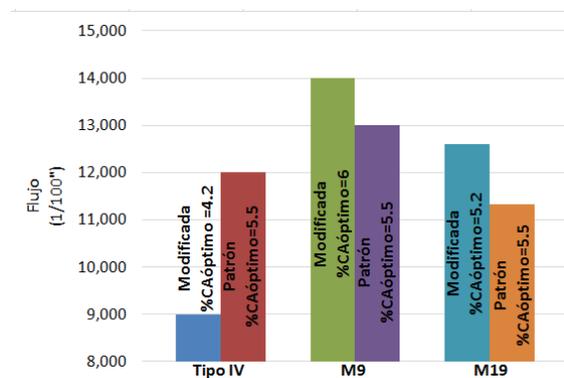


Figura 13. Flujo, MAC patrón y modificadas con PS reciclado, tipo IV, M9 y M19, para %CA_{óptimo}.

Asimismo, la Figura 13 muestra que para la mezcla tipo IV modificada, el flujo disminuye sustancialmente con respecto a la mezcla patrón, debido a que disminuyó el %CA_{óptimo}, lo que hace que la mezcla se comporte de forma más rígida. Por el contrario, la mezcla M9 modificada aumenta su flujo con respecto a la mezcla patrón, debido a que aumentó su %CA_{óptimo}, lo que hace que la mezcla sea más deformable. En cambio, el comportamiento de la mezcla M19, que a pesar de disminuir su %CA_{óptimo} en poca proporción, esto no evitó el aumento moderado del flujo, que se mantiene en el rango de las especificaciones.

Asfalto absorbido (Pba) y asfalto efectivo (Pbe).

La Tabla 10 muestra el asfalto absorbido (Pba) y asfalto efectivo (Pbe), tanto para las mezclas patrón como para las modificadas, para %CA_{óptimo}.

Tabla 10. Asfalto absorbido (%Pba) y efectivo (%Pbe).

Mezcla patrón					
Tipo IV		M9		M19	
Asfalto absorbido (%Pba)	Asfalto efectivo (%Pbe)	Asfalto absorbido (%Pba)	Asfalto efectivo (%Pbe)	Asfalto absorbido (%Pba)	Asfalto efectivo (%Pbe)
1,510	4,073	1,580	4,007	1,160	4,404
%CA _{óptimo} =5,50		%CA _{óptimo} =5,50		%CA _{óptimo} =5,50	
Mezcla modificada con PS reciclado (20%)					
Tipo IV		M9		M19	
Asfalto absorbido (%Pba)	Asfalto efectivo (%Pbe)	Asfalto absorbido (%Pba)	Asfalto efectivo (%Pbe)	Asfalto absorbido (%Pba)	Asfalto efectivo (%Pbe)
1,170	3,079	3,150	3,039	2,040	3,266
%CA _{óptimo} =4,20		%CA _{óptimo} =6,00		%CA _{óptimo} =5,20	

Para la mezcla tipo IV modificada, el %Pbe disminuye en un 24% con respecto a la mezcla patrón, esto se debe a que el poliestireno reciclado tiene poca o nula capacidad de absorción comparándolo con el material pétreo, esto hace que el asfalto tenga que cubrir una mayor superficie. El %Pba de la mezcla patrón es mayor que la mezcla modificada, esto se debe a la compensación entre %Pbe y %Pba, como %CA_{óptimo} en la mezcla patrón es mayor tiene mayor cantidad de ligante, esa razón hace que aumente el %Pba.

De igual forma, la mezcla M9 modificada presenta una disminución del 32% del %Pbe, esto se debe a la misma razón, hay mayor área que cubrir por el asfalto. El %Pba para esta mezcla, a diferencia de la tipo IV, aumentó aproximadamente en un 50% debido al aumento en el %CA_{óptimo}.

En este mismo orden de ideas, para la mezcla M19 modificada se observa la misma tendencia o comportamiento que la mezcla M9. El %Pbe disminuyó en un 35% y %Pba aumentó en un 43% con respecto a la mezcla patrón.

4 Conclusiones.

Finalizado el proceso de análisis de las propiedades índices de las mezclas asfálticas modificadas con PS reciclado, se obtienen las siguientes conclusiones:

Vacios.

Para los vacíos totales (%Va) en las tres mezclas modificadas, la que presenta una mayor disminución en esta propiedad es la tipo IV, parte de los vacíos ocupados por aire fueron sustituidos por asfalto, al aumentar el %CA el %Va disminuye. Para las mezclas M9 y M19, sus porcentajes de vacíos se mantienen en niveles intermedios entre el rango de (3-5)% ya que un bajo contenido de vacíos puede resultar en mezclas inestables o que tiendan al fenómeno de exudación.

Densidad.

El valor de la densidad disminuyó en las tres mezclas modificadas, ya que se está sustituyendo el material pétreo por uno más liviano como es el PS reciclado. Esta disminución de la densidad hace la mezcla más liviana lo que disminuye su costo de transporte.

Estabilidad.

En cuanto a la MAC M19 es la que mayor valor o incremento presenta en cuanto a la propiedad de estabilidad, comparándola con la tipo IV y M9. Con un %CA_{óptimo} de 5,2 y al compararla con la mezcla patrón su estabilidad se incrementó en 40%, por lo tanto, es la mezcla que cumple o mejora esta propiedad tan importante.

Por otra parte, aunque la mezcla M9 modificada incrementó el valor de la estabilidad su densidad disminuyó, comparándola con la mezcla patrón en un 3%, ya que se sustituyó un 20 % del material pétreo por uno más liviano como el PS reciclado.

Evidentemente, de las mezclas tipo IV, M9 y M19 modificadas, la MAC M19 es la que tolera mejor el PS reciclado. Con este porcentaje de PS reciclado se pueden mantener las propiedades índices en el rango de las especificaciones, mejorando notablemente la estabilidad.

En definitiva, la estabilidad aumento para las tres mezclas modificadas con respecto a la mezcla patrón, el incremento de esta propiedad le da un valor agregado a las mezclas, en vista que se pueden construir capas asfálticas de menor espesor.

Flujo.

En las mezclas estudiadas tipo IV, M9 y M19 modificadas, la propiedad del flujo que representa la deformación permanente, al hacer la comparación de las tres mezclas, la tipo IV es la que tiende a ser menor, manteniéndose en el rango recomendado con un %CA_{óptimo} de 4,2% y cuando se compara con la mezcla patrón el flujo disminuye en un 30%. En fin, es importante que esta propiedad haya disminuido, esto le da un valor agregado a la mezcla modificada ya que disminuyen las deformaciones en las capas asfálticas como el ahuellamiento, corrugaciones y deformación por empuje.

%CA_{óptimo}.

Para una MAC tipo IV modificada con un 20% de PS reciclado, sustituyendo al material pétreo retenido en el tamiz #8 su contenido de %CA_{óptimo}=4,2.

Al mismo tiempo, para una MAC M9 modificada es de %CA_{óptimo}=6,0.

Por su parte, para una MAC M19 modificada es de %CA_{óptimo}=5,2.

Aporte ambiental.

Para la MAC tipo IV modificada con el 20% de PS reciclado, esto representa 1,92% del peso de la mezcla, es decir, 19,2 kg de PS reciclado por tonelada de mezcla asfáltica modificada. Esto se traduce, en material petro de ahorro el cual no se va a extraer de cantera y material PS que ya no estará en los vertederos, además de esto se economiza el 23,64 de %CA, de ahí se deduce su ganancia ambiental.

De igual forma, para la MAC M9 modificada, esto representa 3,85%, es decir, 38,5 kg por tonelada, representa la mayor ganancia con respecto a la sustitución del agregado, pero se incrementa en 9,09 el %CA.

Asimismo, para la MAC M19 modificada, esto representa 2,65%, es decir, 26,5 kg por tonelada, pero en este caso disminuye la ganancia a un 5,45 de %CA pero sigue siendo significativo el aporte al ecosistema.

Para finalizar, con este porcentaje del 20% de PS reciclado sustituyendo al material pétreo retenido en el tamiz #8 como modificador de las mezclas asfálticas en caliente, los valores de las propiedades índices mejoraron notablemente, cumpliendo con todas la especificaciones en la norma COVENIN 2000/87 y de ahí la viabilidad de su utilización en la construcción de MAC para carreteras. En consecuencia, la utilización del PS reciclado en las mezclas asfálticas es un aporte considerable al ecosistema, reutilizando un material que es un pasivo ambiental en vertederos.

Recomendaciones.

Para avanzar y profundizar en esta línea de investigación de hacen las siguientes recomendaciones:

Realizar investigaciones buscando el contenido de cemento asfáltico óptimo para obtener el porcentaje de poliestireno de diseño en las mezclas modificadas, es decir, variando tanto el %PS reciclado como %CA.

De igual forma, estudiar para diferentes porcentajes de PS reciclado cual es el %CA_{óptimo}.

Es necesario, construir pistas de prueba con estas MAC modificadas.

Asimismo, se debe promover esta línea de investigación o similares, con el fin de conseguir nuevos materiales, especialmente reciclados, que puedan sustituir en parte los materiales pétreos.

Referencias

- Alonso S, Lozano A, Madregal S, Vilte E, Apaza A, Sarabia J, 2012, Degradación del poliestireno y polipropileno. [Pagina Web en Línea]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/aidis12/plasticos.pdf>. [Consulta: 2019, septiembre 14].
- Biernacki J, 2015, El poliestireno, prohibido en cada vez más rincones del mundo. [Documento en Línea] Disponible en: <http://www.abc.es/sociedad/20150702/abci-ciudades-prohiben-poliestireno-201507021800.html>. [Consulta: 2019, noviembre 20].
- Briceño J, González G, 2016, Estudio de las propiedades índices de mezclas asfálticas en caliente incorporando material reciclado de poliestireno, Avances en ciencia e ingeniería, Facultad de Ingeniera, Universidad de Los Andes y Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra, Capitulo 11, pag. 104.
- Campaña O, Galeas S, Guerrero V, 2015, Obtención de asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de automotores. [Revista en Línea], Disponible: <http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec>. [Consulta: 2019, octubre 15].
- Ecoplas, 2011, Poliestireno características y ventajas respecto al medio ambiente. [Pagina Web en Línea]. Disponible en: <http://www.ecoplas.org.ar/pdf/38.pdf>. [Consulta: 2019, septiembre 28].
- Econoticias.com, 2012. [Página Web en Línea], Disponible en: <http://www.ecoticias.com>. [Consulta: 2019, noviembre 2].
- Figuroa A, Sánchez A, Reyes F, 2007, Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada, Universidad de la Salle Colombia, Pontificia Universidad Javeriana Colombia. [Pagina Web en Línea]. Disponible en: <http://revistas.lasalle.edu.co/index.php/ep/article/viewFile/1954/1820>. [Consulta: 2019, diciembre 10].
- Forigua J y Pedraza E, 2014, Diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de desperdicios plásticos. [Página Web en Línea], Disponible: <http://repository.ucatolica.edu.co>. [Consulta: 2020, enero 18].
- Instituto Venezolano del Asfalto, 2004, Normativa INVEAS-2004. Disponible en Línea: <http://es.slideshare.net/rosanalaral/versin-inveas-2004-asfalto>. [Consulta: 2019, noviembre 25].
- Kraemer E, 2004, Apuntes sobre mezclas asfálticas en la construcción. [Documento en Línea]. Disponible: <https://civilgeeks.com>. [Consulta: 2019, septiembre 15].

Norma venezolana COVENIN 2000:1987, 1987, Sector construcción, especificaciones, codificación y mediciones, Parte 1: Carreteras, Fondonorma.

Organización de Las Naciones Unidas (ONU), 1997, Protocolo de Kioto de la conversación marco de Las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Disponible en Línea: http://unfccc.int/portaal_espanol/informacion_basica/protocolo_de_kyoto/items/6215.php. [Consulta: 2019, septiembre 12].

Romero F, Bonifaz H, Cedeño F, Espin P, 2014, Diseño de mezclas asfálticas en caliente modificadas con tetra pak, alambre de neumáticos fuera de uso y limadura metálica reciclados con ligante asfáltico ac-20. [Página Web en Línea]. Disponible: <https://repositorio.espe.edu.ec>. [Consulta: 2019, diciembre 10].

Reyes O, Troncoso J, Reyes F, 2005, Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de fibras; Facultad de Ingeniería Universidad Militar Nueva Granada y Facultad de Ingeniería Pontificia Universidad Javeriana Bogotá D.C Colombia. [Pagina Web en Línea]. Disponible en:

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2332390>. [Consulta: 2019, octubre 20].

Rondón H, Molano Y y Tenjo A, 2012, Influencia de la temperatura de compactación sobre la resistencia bajo carga monotónica de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado de llantas. [Documento en Línea], Disponible:<http://132.248.9.34/hevila/Tecnologicas/2012/no29/2.pdf>. [Consulta: 2019, noviembre 30].

Rondón H, Gómez W, Castro W, 2010, Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD), Universidad Distrital Francisco José de Caldas DC. Colombia. [Pagina Web en Línea]. Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/ric/v25n1/art04.pdf>. [Consulta: 2019, diciembre 21].

Rondón H, González G, Reyes F, 2009, Comportamiento de dos mezclas asfálticas venezolanas en caliente, modificadas con desecho de policloruro de vinilo, Universidad de los Andes Venezuela, Universidad Católica de Colombia y Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. [Pagina Web en Línea]. Disponible en: <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/viewFile/1127/1083>. [Consulta: 2019, octubre 05].

Tecnología de los Plásticos, 2011, [Página Web en Línea]. Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/poliestireno.html>, [Consulta: 2019, octubre 13].

The American Association Of State Highway And

Transportation Officials (AASHTO) Part 1 Specifications, 1986, Part 2 Methods Of Sampling And Testing, Fourteenth Edition. Standar Specifications for the Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing.

Recibido: 13 de noviembre de 2019

Aceptado: 12 de marzo de 2020

Johannes Enrique Briceño Balza: Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Vial. Profesor Asistente investigador de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela, Departamento de Vías, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Mérida Venezuela.

Jesús Benigno Omaña García: Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Vial. Mérida-Venezuela. Correo electrónico: jesusbomanag@gmail.com.

Víctor Hugo Verjel Tarazona: Ingeniero Civil, Magister en Gestión de Proyectos. Profesor programa de Ingeniería Civil, Universidad de Pamplona, República de Colombia. Correo electrónico: victor.verjel@unipamplona.edu.co