

Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP

Effect of Waste Engine Oil on physical and mechanical properties of asphalt mixtures containing RAP

PEDRO JULIÁN GALLEGO QUINTANA¹ - SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ²

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Profesora titular del Centro de Estudios Geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

pedro.gallego@mail.escuelaing.edu.co - sandra.campagnoli@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/07/2017 Aceptado: 31/07/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

El uso de materiales provenientes del fresado de capas asfálticas de pavimentos (RAP, por su sigla en inglés *Reclaimed Asphalt Pavement*) es una tendencia mundial en la elaboración de mezclas asfálticas con características, en principio, similares a las obtenidas con materiales nuevos. En el presente estudio se analizaron los cambios en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas con RAP al incorporar aceite quemado de motor de carro (WEO, por su sigla en inglés *Waste Engine Oil*) como agente rejuvenecedor del ligante envejecido contenido en el RAP. Se tomó como referencia una mezcla tipo MDC-19, acorde con las especificaciones del Invías, Artículo 450-13. Los resultados obtenidos sugieren que el uso de WEO como agente rejuvenecedor es viable para la elaboración de mezclas asfálticas con RAP.

Palabras claves: reciclaje de pavimentos, RAP, mezclas asfálticas, rejuvenecedor de ligantes, aceite usado de motor de carro.

Abstract

Using materials from Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) is a world-wide trend in production of asphalt mixtures having properties like those obtained with new materials. In this study, changes in the physical and mechanical properties of asphalt mixtures containing RAP and waste engine oil (WEO) as a rejuvenating agent of the aged binder contained in RAP were analyzed, using an MDC-19 mixture pavement, according to Invías specifications, 450-13, as a reference. Results obtained suggest that WEO as a rejuvenating agent can be used for producing asphalt mixtures with RAP.

Keywords: pavement recycling, RAP, asphalt mixtures, binder rejuvenation, waste engine oil.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial es un factor de gran relevancia para el desarrollo económico de un país. En Colombia, la principal forma de transporte tanto de carga como de pasajeros es la terrestre (71 % de la carga es transportada por carretera al interior del país) [1]. A pesar de lo anterior, existe un atraso importante de la infraestructura vial (y de otros medios de transporte) [1], que se debe en parte a las características geográficas particulares del país (topografía andina y carreteras sinuosas que la recorren), las cuales imponen restricciones que dificultan la construcción y el mantenimiento de la malla vial existente.

Colombia cuenta con aproximadamente 165.403 kilómetros de carreteras. El 76 % de éstos corresponde a la red terciaria a cargo de los municipios y del Instituto Nacional de Vías (Invías); el 14 % a la secundaria, a cargo de los departamentos, y el 10 % a la primaria, a cargo de la nación. Cabe señalar que únicamente el 83 % de la red primaria y el 26 % de la red secundaria se encuentran pavimentadas. Para la red terciaria no se tienen datos oficiales [1]. Los anteriores indicadores permiten observar un claro rezago en la infraestructura vial del país.

Las dificultades en el desarrollo y el mantenimiento de las redes viales, además del creciente uso de la infraestructura vial, la cual pasó de 99.516 toneladas de carga transportada al interior en 1994 a 279.760 en el 2012 [1], han hecho de la infraestructura vial y de transporte un eje importante dentro de las políticas nacionales de desarrollo.

La cantidad y la calidad de las vías nacionales dejan en evidencia la necesidad de avanzar en los procesos de construcción y mantenimiento de la infraestructura vial existente, mediante proyectos que hagan uso eficiente de los recursos disponibles en forma respetuosa con el ambiente, es decir, prácticas que contribuyan a la conservación de los recursos naturales y favorezcan el desarrollo sostenible.

En ese sentido, una opción viable para la construcción y mantenimiento de vías es el reciclaje de materiales, que presenta además contribuciones significativas tanto en costos de construcción como en conservación de recursos naturales.

El reciclaje de pavimentos asfálticos no es una idea nueva. Las primeras experiencias de su uso, de acuerdo con la Asphalt Recycling and Reclaiming Association

[2], datan de principios del siglo XX (reciclaje en frío), época en que se documenta el primer caso en la bibliografía existente, específicamente en 1930 (reciclaje en caliente). No obstante, es en la década de los setenta cuando el reciclaje empieza a ser una alternativa en construcción y mantenimiento de vías, debido a la crisis mundial de petróleo y a la evolución de maquinaria y equipos especializados para tal fin [2].

El reciclaje de pavimentos, sea en frío o en caliente, con adición de pavimento asfáltico recuperado (RAP), emulsiones rejuvenecedoras, cemento asfáltico, espuma de asfalto o aglomerantes hidráulicos, ha mostrado ser un método eficaz e innovador [3]. Con respecto a los agentes rejuvenecedores, la utilización de aceite de automóvil usado (*Waste Engine Oil, WEO*) es una línea de investigación reciente, que ha venido despertando el interés de algunos investigadores en los últimos años. En esas investigaciones, el WEO se presenta como opción viable para la fabricación de mezclas con RAP aptas para uso en labores de mantenimiento [4]–[9] PG64-22.

Desde el punto de vista normativo, en Colombia se permite preparar mezclas asfálticas hasta un determinado contenido de RAP, lo cual es reglamentado por el Invías en su Artículo 462 -13 (Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente), donde se define un contenido máximo de RAP del 40 %.

Pese a la normativa existente en el país para la preparación de mezclas asfálticas, el empleo de materiales y tecnologías de reciclaje en la rehabilitación y mantenimiento vial, específicamente de RAP, es aún incipiente. Lo anterior se debe en parte a la falta de materiales o aditivos comprobados que actúen como agentes rejuvenecedores del asfalto contenido en el RAP, de tal modo que permitan recuperar en cierto grado sus propiedades ligantes y, por ende, mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla.

En este contexto, a continuación se explora, para las condiciones propias de materiales –agregados pétreos, RAP y cemento asfáltico–, el uso de WEO en diferentes proporciones (0 %, 5 %, 10 % y 15 %), como agente rejuvenecedor para la restauración del asfalto envejecido en mezclas con RAP, de tal manera que la mezcla obtenida sea apta para labores de mantenimiento o construcción de capas asfálticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Agregados vírgenes. Material extraído del río Cucuana, en el sector de El Palmar (municipio de Saldaña, Tolima), triturado en planta. La distribución de tamaños corresponde a 55,6 % de arena, 40,5 % de grava y 3,9 % de finos. Clasifica como SP - Arena Pobrementemente Gradada, de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos, y cumple con los rangos de tamaños especificados para una mezcla asfáltica MDC-19.

WEO. Aceite quemado de automóvil tipo SAE30 (15W30), uno de los dos aceites de mayor empleo en el departamento del Tolima. Los parámetros (densidad, gravedad API, viscosidad cinemática a 20 °C, contenido de cenizas sulfatadas, humedad, sólidos y punto de inflamación) fueron caracterizados de acuerdo con los procedimientos de la American Standard Testing of Materials (ASTM D-1298, D-445, D-874, D-95, D-9362 y D-92) y se resumen más adelante (tabla 1).

RAP. Pavimento asfáltico recuperado de la vía El Guamo - Saldaña, km 6. El contenido de asfalto envejecido en el RAP es del 6,4 % y los agregados extraídos corresponden al 61 % de arena, 30 % de grava y 9 % de finos, clasificando como SW-SM, arena bien gradada - arena limosa, de acuerdo con el USCS, o como A-1-a, según la AASHTO.

Cementos asfálticos. Asfalto (60/70) proveniente de Barrancabermeja - Ecopetrol, con propiedades certificadas por la refinera, y asfalto envejecido contenido en el RAP (6,4 % del total del RAP).

Preparación de las mezclas asfálticas

Para la preparación y dosificación de los componentes reciclados en cada mezcla se siguió el procedimiento

INV E-812-13, “Determinación de la proporción y del grado del agente de reciclado en mezclas de concreto asfáltico elaboradas en caliente con material reciclado”.

De manera general, la composición de las mezclas corresponde a 65 % de agregados vírgenes y 35 % de RAP (porcentajes y proporciones en peso). La cantidad de asfalto nuevo fue ajustada, considerando el porcentaje de asfalto envejecido presente en el RAP (6,5 %) y las adiciones de WEO (0 %, 5 %, 10 % y 15 %), hasta alcanzar el óptimo teórico de asfalto en la mezcla del 5,9 %, el cual se determinó mediante el método Duriez. Es de aclarar que en este estudio el WEO fue considerado como ligante.

Para cada concentración de WEO (0 %, 5 %, 10 % y 15 %), se elaboraron 12 briquetas tipo Marshall de 100 mm de diámetro, para un total de 48 briquetas de 1200 g cada una. Para la evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas se asignaron 3 briquetas para determinar la estabilidad y el flujo utilizando el equipo Marshall, 3 para el módulo resiliente y las 6 restantes para medir la susceptibilidad al agua con el ensayo de tracción indirecta (3 en estado seco y 3 después de inmersión).

Las temperaturas de los materiales en el proceso de mezclado para cada una de las inclusiones de WEO fueron las siguientes: para los agregados vírgenes y el RAP, 165 °C, 162 °C, 160 °C y 135 °C, para el asfalto nuevo, 160 °C, 157 °C, 155 °C y 130 °C, y el WEO fue adicionado sin calentamiento previo (temperatura de calentamiento segura 163 ± 1 °C).

Las temperaturas de mezclado se establecieron a partir de la viscosidad del ligante, siendo estas de 160 °C, 157 °C, 155 °C y 130 °C para cada una de las inclusiones de WEO de 0 %, 5 %, 10 % y 15 %, respectivamente. El proceso de compactación de las mezclas se hizo mediante la aplicación de 75 golpes por cara con el martillo

Tabla 1
Características del WEO SAE30 (15W30)

Parámetros	Valores	Unidades	Norma ASTM
Densidad	875 +/- 4,20	Kg m ³	D-1298
Gravedad API	901 +/- 14,1	-	D-1298
Viscosidad cinemática 20 °C	3,86 +/- 0,012	mm ² s ⁻¹	D-445
Cenizas sulfatadas	0,334 +/- 0,005	% (p/p)	D-874
Humedad	0,10 +/- 0,001	% (v/v)	D-95
Sólidos 0,20 +/- 0,002	0,20 +/- 0,002	% (p/v)	D-9362
Punto de inflamación	163 +/- 1	°C	D-92

Fuente: El autor.

tipo Marshall (norma INV E-748-13). Posteriormente, se dejaron en reposo dentro del molde hasta alcanzar una temperatura cercana a la temperatura ambiente y proceder a la extracción de las briquetas.

En resumen, los ensayos realizados sobre los ligantes, con la inclusión de WEO y las mezclas así fabricadas, son como sigue:

Para ligantes

- Viscosidad de acuerdo con la norma INV E-717-13, “Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional”.
- Punto de ablandamiento, norma INV E-712-13, “Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)”.
- Penetración, norma INV E-706-13, “Penetración de los materiales bituminosos”.

Para las mezclas

- Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes, empleando especímenes saturados y superficialmente secos, norma INV E-733-13 [10].
- Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas y abiertas, norma INV E-736-13 [11].
- Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall, norma INV E-748-13 [12].
- Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta, norma INV E-725-13 [13].
- Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas, norma BS EN 12967.

RESULTADOS

Dado que fueron varios los parámetros evaluados para la caracterización tanto de la mezcla de ligantes como de las mezclas asfálticas con adición de RAP + WEO, todo esto de acuerdo con las especificaciones del Artículo 450-13, cap. 4. Especificaciones generales de construcción de carreteras del Inviás, la selección de la cantidad óptima de WEO es consecuencia del análisis conjunto de todos ellos. A continuación se exponen los efectos producidos en cada uno de los parámetros analizados.

Incidencia del asfalto envejecido en el asfalto nuevo

La inclusión de asfalto envejecido en el asfalto virgen produjo alteraciones en las propiedades reológicas de este último, tales como aumento de la viscosidad (de 2000 P => a 2977 P), incremento de la temperatura del punto de ablandamiento (de 47,7 °C => a 72,1 °C) y disminución de la penetración (de 63_(1/10 mm) => a 24,8_(1/10 mm)) (figura 1).

Incidencia de Asfalto envejecido en ligante nuevo		
Parámetro		
Viscosidad	Penetración	Ablandamiento
2.977,9P	63 _(1/10mm)	72,1 C
↑ 49%	↓ 61%	↑ 51%
2.000P	24,8 _(1/10mm)	47,7 C

Figura 1. Efectos de la inclusión de asfalto envejecido en el asfalto virgen para cada uno de los parámetros analizados.

Fuente: El autor.

Incidencia del WEO en las mezclas de ligante

La inclusión de WEO en la mezcla de ligante produjo efectos contrarios a los inducidos por la adición de asfalto envejecido a la mezcla, permitiendo recuperar las propiedades reológicas de la mezcla de ligante a niveles comparables con una mezcla virgen. Produjo una disminución promedio de la viscosidad de un 49,3 % (de 2977 P_(weo0%) => a 382,9P_(weo15%)), disminución de la temperatura del punto de ablandamiento en promedio del 17,7 % (de 72,1 °C_(weo0%) => a 39,6 °C_(weo15%)) y un aumento en la penetración del 82,6 % (de 41_{(1/10 mm)(weo0%)} => a 147_{(1/10 mm)(weo0%)}). Los valores y el comportamiento detallado aparecen más adelante (figura 2).

Incidencia del WEO en las mezclas finales

La inclusión de WEO produjo cambios en las propiedades de las mezclas finales (ligante + agregados + RAP). En términos generales, a medida que se aumentó la concentración de WEO hasta alcanzar el 15 % se lograron mezclas con menores vacíos con aire (de 4,3 %_(weo0%) => a 3,7 %_(weo15%)), mezclas de menor rigidez con disminución de la estabilidad (de 8427 N => a 2348 N), del flujo (de 3,1_{mm(weo0%)} => a 2,6_{mm(weo15%)}) y de la relación estabilidad - flujo (de 2,7_(weo0%) => a 0,9 P_(weo15%)).

La resistencia a la tracción indirecta en seco, al igual que tras inmersión en agua y por consiguiente la resistencia conservada, también disminuyó (seco de 1,1 MPa_(weo0%) => a 0,2M Pa_(weo15%)), (húmeda de 0,9 MPa_(weo0%) => a 0,1 MPa_(weo15%)), (resistencia conservada de 83,1 %_(weo0%) => a 74,0 %_(weo15%)). Los valores y comportamiento detallado se presentan posteriormente (figura 3).

Incidencia del WEO en mezclas de Ligantes			
Parámetro	Inclusión de WEO		
	5%	10%	15%
Viscosidad	2.977,9P	1.757,0P	798,9P
	↓ 41%	↓ 55%	↓ 52%
Ablandamiento (°C)	72,1	52,6	45,1
	↓ 27%	↓ 14%	↓ 12%
Penetración (1/10mm)	41,0	87,9	147,8
	↑ 66%	↑ 114%	↑ 68%
	1.757,0P	798,9P	382,9P
	52,6	45,1	39,6
	24,8	41,0	87,9

Figura 2. Incidencia de la inclusión de WEO en las mezclas de ligantes (asfalto envejecido más asfalto virgen).

Fuente: El autor.

Incidencia del WEO en mezclas finales							
Parámetro	Inclusión de WEO			Parámetro	Inclusión de WEO		
	5%	10%	15%		5%	10%	15%
Vacíos con aire (%)	4,3	3,8	3,7	Tracción Indirecta Seca (MPa)	1,1	0,5	0,3
	↓ 12%	↓ 2%	↓ 8%		↓ 57%	↓ 41%	↓ 44%
Estabilidad (N)	3,8	3,7	3,4	Tracción Indirecta Húmeda (MPa)	0,9	0,4	0,2
	8.427	5.750	3.506		↓ 57%	↓ 45%	↓ 48%
Flujo (mm)	5.750	3.506	2.348	Resistencia Conservada	83,1	81,9	78,5
	3,1	2,8	2,7		↓ 1%	↓ 4%	↓ 6%
Relación Estabilidad/Flujo	2,7	2,0	1,3		81,9	78,5	74,0
	↓ 25%	↓ 35%	↓ 32%				
	2,0	1,3	0,89				

Figura 3. Incidencia de la inclusión de WEO en las mezclas finales.

Fuente: El autor.

MÓDULO RESILIENTE

Para determinar M_R se usó la norma BS EN 12697-26:2012, anexo C, evaluándose los efectos de la temperatura y de la velocidad de aplicación de carga (Invías, 2013), con el propósito de analizar la calidad relativa de los materiales, en este caso, las mezclas con los diferentes niveles de WEO.

Más adelante se aprecian los valores de M_R obtenidos para cada combinación de temperatura y frecuencia de aplicación de la carga utilizada, según el porcentaje de WEO contenido en cada mezcla (figura 4).

La alta rigidez que posee el RAP se ve disminuida en una mezcla caliente, lo que concuerda con las experiencias que se presentan en [6], [4], [15]. De acuerdo con los resultados encontrados, la cantidad de WEO que hay que usar para obtener un M_R similar al de una mezcla MDC-19 es del 5,9 %.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como era de esperarse, la incorporación del asfalto envejecido al asfalto original dio lugar a un aumento en la viscosidad y en la temperatura del punto de ablandamiento, con una disminución de la penetración. Sin embargo, con el incremento del WEO se generan los efectos contrarios: se obtiene un ligante menos viscoso y de menor consistencia. Lo anterior demuestra que con la inclusión de WEO se pueden conseguir unas propiedades cercanas a las de un asfalto original, sin envejecer. En cuanto a las propiedades de las mezclas [estabilidad y flujo, susceptibilidad al agua y módulo resiliente), se evidencia que al incluir WEO se disminuye la rigidez de la mezcla, que es finalmente uno de los inconvenientes medidos en las características mecánicas que presentan las mezclas asfálticas con RAP.

Por último, a partir de los modelos de regresión calculados para cada uno de los parámetros evaluados en las mezclas finales (agregados + RAP+ ligante + WEO), es posible determinar cuáles restringen el porcentaje de WEO que debe utilizarse para obtener una mezcla tipo MDC-19, de acuerdo con las especificaciones generales de construcción de carreteras, descritas en el Artículo 450-13 del Invías.

Posteriormente, se presenta el consolidado de los valores óptimos calculados para cada parámetro analizado; se aprecia que los parámetros que restringen la cantidad de WEO que es posible adicionar son la

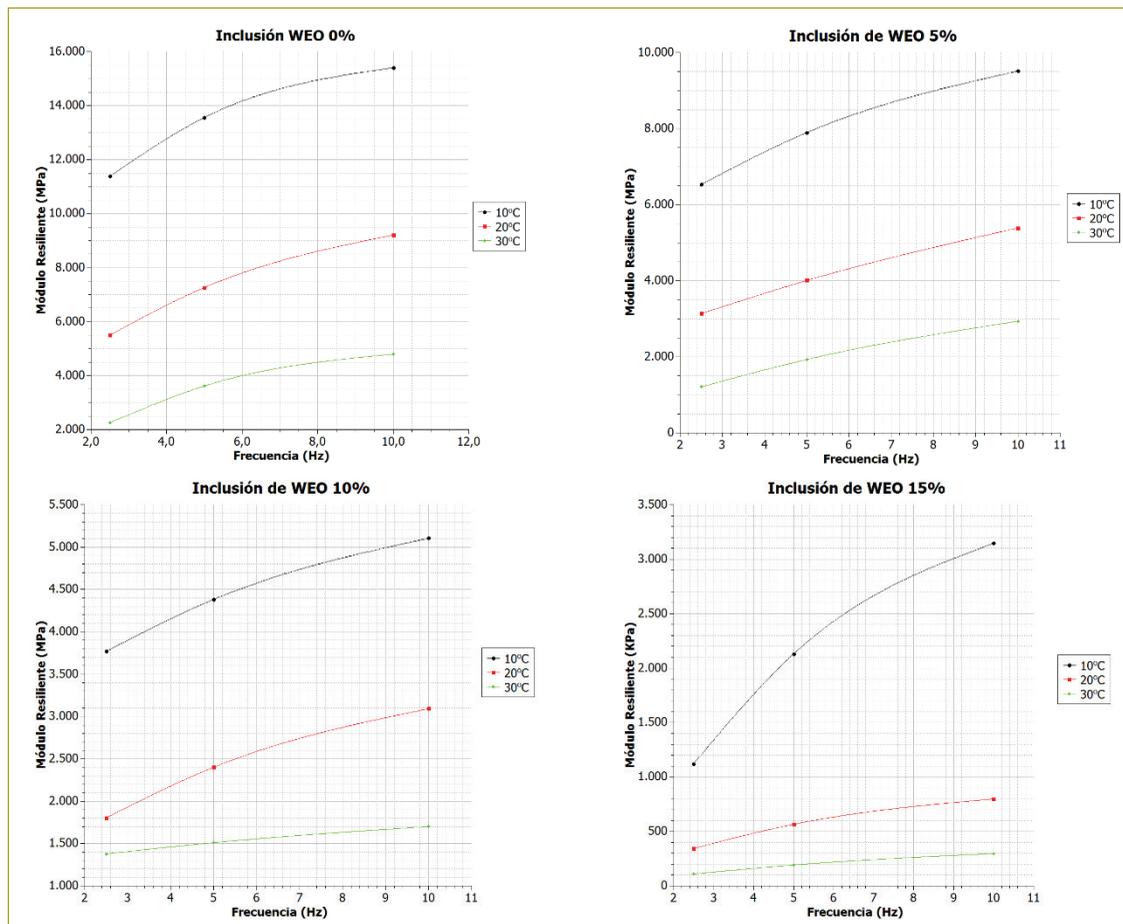


Figura 4. Módulos resilientes para la mezcla con diferentes porcentajes de inclusión de WEO.

Fuente: El autor.

relación estabilidad-flujo y la penetración del ligante. Así, para este caso particular de ligantes y agregados, el porcentaje admisible de WEO se encuentra entre 5,4 y 5,7 (figura 5).

CONCLUSIONES

Como era de esperar, la adición de asfalto envejecido al asfalto nuevo produjo alteraciones en las propiedades analizadas. La viscosidad de la mezcla de ligantes y su punto de ablandamiento aumentaron, mientras que la penetración disminuyó.

La adición de WEO en las mezclas de ligante (asfalto nuevo y asfalto envejecido) modificó las magnitudes de todas las propiedades, en forma inversa al efecto producido por la presencia del asfalto envejecido, lo que permitió alcanzar valores compatibles con un ligante compuesto únicamente con asfalto virgen.

Se encontró que de las mezclas analizadas, aquella que más se aproxima a las especificaciones que aparecen en el art. 450-13, cap. 4. Especificaciones generales de construcción de carreteras del Invías para la categoría de tránsito NT1, es la que contiene 5,0 % de WEO. Sin embargo, dados los modelos de regresión para cada parámetro analizado, en este caso particular, la concentración de WEO que es posible usar para obtener una mezcla tipo MDC-19 se encuentra en el rango de 5,4 y 5,7 %.

Cabe señalar que la temperatura de mezcla definida para este rango de WEO es de 157 °C, la cual se encuentra cercana al punto de inflamación de este producto (163 °C). Sin embargo, teniendo en cuenta el bajo porcentaje de este material en la mezcla total (0,3 %), se considera que los riesgos de inflamación son reducidos o prácticamente inexistentes.

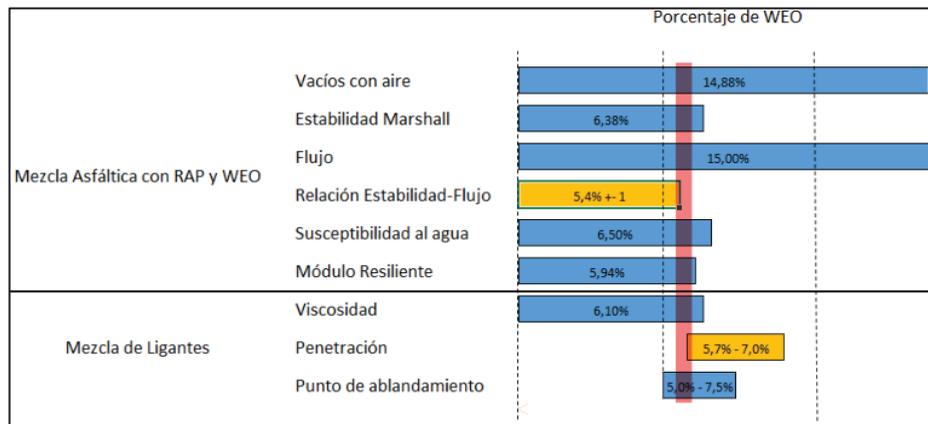


Figura 5. Porcentajes de WEO óptimo para adicionar a mezclas con RAP, de acuerdo con cada parámetro evaluado.

La franja roja indica el intervalo en términos de porcentaje de adición de WEO en los que se encuentra el punto óptimo.

Fuente el autor.

Aunque todas las mezclas de asfaltos (nuevo y envejecido) y WEO según su viscosidad quedan catalogados con grado de penetración 40-50, solo las que contienen WEO en porcentajes de 5% y 10% permiten obtener mezclas que cumplen con la penetración y punto de ablandamiento correspondiente a grados de penetración 40-50 y 80-100 respectivamente. Para obtener una mezcla con grado de penetración 60-70 sería necesario adicionar proporciones de WEO entre 5,7% y 7,0%.

Todas las mezclas con inclusiones de WEO presentan valores de módulo resiliente por debajo de 10.000 MPa.

En otros trabajos se había reportado límites de adición del 30% como es el caso de [16], es posible que esta grande variación se deba a las características del tipo de aceite, estado del RAP y calidad de los agregados utilizados.

Considerando las cantidades generadas de WEO en el departamento del Tolima, y su posible uso como agente rejuvenecedor para mezclas asfálticas con RAP (también reciclado), la combinación WEO + RAP se convierte en una alternativa que contribuye a la solución del problema de mantenimiento y/o construcción de buena parte de malla vial. Con esto, se quiere aportar una alternativa para el uso efectivo del RAP en Colombia, obteniendo un material apto para ser reutilizado en capas intermedia en la realización de proyectos de mantenimiento y conservación de vías secundarias y terciarias a menor costo, contribuyendo además a la

conservación de los recursos naturales y a la disminución del impacto ambiental.

REFERENCIAS

- [1] Fedesarrollo (s.f.). "Indicadores del sector del transporte en Colombia, p. 234.
- [2] ARRA (2013). *Basic Asphalt Recycling Manual*, 53 (9).
- [3] Bernucci, L. B., Augusto, J., Ceratti, P., Barbosa, J., Laura, S., Goretti, M. & Motta, D. (2008). *Pavimentação Asfáltica*.
- [4] Dedene, C. D. (2011). Investigation of using waste engine oil blended with reclaimed asphalt materials to improve pavement recyclability. Michigan Technological University.
- [5] Jia, X., Huang, B., Bowers, B.F. & Zhao, S. (2014). Infrared spectra and rheological properties of asphalt cement containing waste engine oil residues. *Constr. Build. Mater.*, 50, 683-691.
- [6] Kamaruddin, N. H. M., Hainin, M. R., Hassan, N. A., Abdullah, M. E. & Yaacob, H. (2014). Evaluation of pavement mixture incorporating waste oil. *J. Teknol.*, 71 (3), 93-98.
- [7] DeDene, C. D. & You, Z. (2014). The performance of aged asphalt materials rejuvenated with waste engine oil. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 7 (2), 145-152.
- [8] Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulidakos, L. & Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Comput. Chem. Eng.*, 71, 538-550.
- [9] Dedene, C. D. (2011). Investigation of using waste engine oil blended with reclaimed asphalt materials to improve pavement recyclability by submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (Civil Engineering) Michigan Technological Unive.
- [10] Invías (2013). *Inv-E-733-13. Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficie seca*.
- [11] Invías (2013). *Normas de ensayo de materiales para carretera. INV. E - 736 - 13. Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas*. Bogotá (Colombia).

[12] Invías (2013). *Normas de ensayo de materiales para carretera. INVE - 748 - 13 (2013). Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall*. Bogotá (Colombia).

[13] Invías (2013). *Normas de ensayo de materiales para carretera. INVE - 725 - 13 (2013). Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta*. Bogotá (Colombia).

[14] Invías (2013). *Normas de ensayo de materiales para carretera. INVE - 749 - 13. Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas*. Bogotá.

[15] Kamaruddin, N. H. M., Hainin, M. R., Hassan, N. A. & Abdullah, M. E. (2014). Rutting Evaluation of Aged Binder Containing Engine Oil. *Adv. Mater. Res.*, 91, 405-409.

[16] King, K., Holleran, I., Jayalath, C., Henning, T. F. P. et al. (2015). Laboratory performance of rejuvenated asphalt surfacing mixtures containing 30 % RAP. *Road Transp. Res. A J. Aust. New Zeal. Res. Pract.*, 24 (4), 3.