

Efecto de polímeros y aceite de cocina en el rango de desempeño del asfalto

Effect of polymers and waste cooking oil on asphalt performance range

Michelle Munkel Jiménez

LanammeUCR
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
paula.munkel@ucr.ac.cr

José Pablo Aguiar Moya

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
jose.aguiar@ucr.ac.cr

Natalia Hernández Montero

Escuela de Ingeniería Química
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
natalia.hernandezmontero@ucr.ac.cr

Alejandra Baldi

LanammeUCR
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
alejandra.baldi@ucr.ac.cr

Rafael Ernesto Villegas Villegas

LanammeUCR
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica
rafael.villegas@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 19 de mayo de 2021 / **Fecha de aprobación:** 22 de julio de 2021

RESUMEN

Este estudio busca estudiar el uso de aceite reciclado de cocina (WCO, por sus siglas en inglés) para mejorar el desempeño en fatiga y deformación permanente del asfalto modificado con polímeros comerciales. Se seleccionaron y caracterizaron los materiales a utilizar con este fin. La metodología consistió en realizar pruebas previas para determinar el comportamiento del asfalto con el WCO. Luego, se modificó el asfalto a distintas dosificaciones de WCO y de polímero comercial (SBS o RET). Por último, se acondicionaron las muestras, se midió el grado de desempeño (PG) y se evaluó su resistencia a la deformación y a la fatiga mediante ensayos avanzados de reología. Se encontró que el aceite disminuye el grado superior e inferior del PG. Además, se evidenció que la presencia del WCO afectó la interacción del asfalto con el SBS. No obstante, con la incorporación del RET al asfalto con aceite, el límite superior de PG aumentó 2 grados sin afectar las temperaturas intermedia y baja. El análisis estadístico determinó que el polímero utilizado en cada muestra (SBS o RET) fue el factor que generó diferencias más significativas en la resistencia a deformación permanente y fatiga. La dosificación de cada polímero influyó mayormente en la recuperación elástica. Además, se determinó que la diferencia en la cantidad de WCO utilizado en las muestras del diseño experimental no generó cambios significativos en las variables medidas. Por último, se determinaron los rangos de dosificación de polímero y WCO necesarios para alcanzar los PG requeridos en Costa Rica. Generalmente, las guías de diseño de asfalto utilizadas en el país se establecen para suplir distintos requerimientos a los presentes en las carreteras nacionales. Por lo que este estudio permite sentar las bases de una metodología que oriente en el proceso de modificación de asfaltos y brinde mayor detalle de cómo garantizar un buen desempeño de los asfaltos nacionales.

Palabras clave: asfalto modificado, grado de desempeño, aceite reciclado, polímeros, SBS, RET.

ABSTRACT

Permanent deformation and fatigue are the main problems on Costa Rica's highways, and these are directly related to the asphalt binder. This study seeks to define dosage ranges for polymers and Waste Cooking Oil (WCO) to improve the performance of modified asphalt by improving resistance to fatigue and permanent deformation. The used materials were then characterized. Tests were carried out to determine how the binder would interact with the WCO. Then, the different dosage combinations of both WCO and commercial polymer, SBS or RET in each sample of modified asphalt were selected based on the experimental design. Finally, the sample performance grades (PG) were measured, and their resistance to deformation was evaluated by advanced rheology testing. Waste cooking oil was found to lower the upper and lower limit of the PG. It was also evidenced that the presence of the WCO affects the interaction of the asphalt with the SBS. However, the upper limit of PG increased 2 degrees without affecting the intermediate and low temperatures for the samples modified with RET and oil. Based on the statistical analysis it was determined that the polymer used in each sample (SBS or RET) was the factor that generated the most significant differences in resistance to permanent deformation and fatigue. The elastic recovery was mostly influenced by the polymer dosage. It was also determined that the difference in the amount of WCO used in the samples of the experimental design did not generate significant changes in the measured variables. Finally, the polymer and WCO dosage ranges needed to reach the PGs required in Costa Rica were determined. Generally, the asphalt design guidelines used in the country are established to meet different requirements to those present in Costa Rica. Therefore, this study allows to lay the foundations of a guideline for the asphalt modification process and provides more detail on how to guarantee a good performance of national asphalt.

Keywords: modified asphalt, performance grade, waste cooking oil, polymers, SBS, RET.

INTRODUCCIÓN

Costa Rica es un país tropical con condiciones climáticas variables y altas precipitaciones presentes a lo largo del año. Sumado a lo anterior, las exigencias de una carretera no admiten cualquier tipo de asfalto. Es imperativo, por lo tanto, que el país cuente con asfaltos que cumplan con ciertos requerimientos y se estudie con detenimiento el comportamiento del material ante estas condiciones para responder debidamente a las necesidades del país con alternativas que mejoren el estado de la red vial (Wang, 2019). En general, se debería buscar mejorar el desempeño en términos de las fallas más recurrentes en el país que son fatiga y deformación permanente (Loría, 2005).

Un parámetro que permite evaluar el comportamiento del pavimento asfáltico es el grado de desempeño, mejor conocido como PG (del inglés *performance grade*). Este está relacionado principalmente con las condiciones a las que estará expuesto el asfalto a lo largo de su vida útil. El PG establece un rango de temperaturas extremas dentro de las que mantendrá un buen comportamiento en términos de deformación permanente, fatiga y fisuración por contracción. El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) realizó un mapa por zonas del grado de desempeño de Costa Rica en el cual se establece que, para las temperaturas que predominan en cada zona y los correspondientes volúmenes de tránsito, en el país se requieren asfaltos con un grado de desempeño entre PG 58-22 y PG 76-22 (Elizondo, Rodríguez, Bonilla, y Badilla, 2013). El asfalto que se utiliza a nivel nacional es de PG 64-22 ya que este es el único que importa y comercializa la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE). Para alcanzar los otros valores requeridos por la especificación se debe modificar el asfalto.

La modificación del asfalto utilizando polímeros se ha estudiado y aplicado por años en diferentes países del mundo. El Lanamme se ha enfocado en estudiar y entender este tipo de modificación del asfalto disponible en el país. Al modificar con un polímero se puede alcanzar los PG requeridos para un asfalto, además de disminuir la susceptibilidad térmica, aumentar la cohesión interna, mejorar el comportamiento a fatiga, aumentar la durabilidad y la resistencia al envejecimiento e incrementar la resistencia al ahuellamiento (Salazar, 2008). Las ventajas del uso de asfaltos modificados son claras, por lo que su investigación continúa siendo relevante.

Sin embargo, al utilizar polímeros como el estireno-butadieno-estireno (SBS) o terpolímero elastomérico reactivo (RET) se corre el riesgo de que el rango de temperaturas del PG se

desplace hacia temperaturas más altas. En tal caso, es posible hacer una mezcla de aditivos para ampliar el rango de PG. Uno de los materiales que ha sido propuesto por diversos autores para estos efectos es el aceite usado de cocina (WCO, del inglés *waste cooking oil*) (Al-Omari, Khedaywi, y Khawneh, 2018).

Majid Zargar y Aslam Al-Omari en sus estudios analizan el uso del WCO como rejuvenecedor o simplemente como modificador para alcanzar especificaciones Superpave y utilizan fracciones másicas que van desde 1 % a 8 % (Al-Omari *et al.*, 2018; Zargar, Ahmadinia, Asli, y Karim, 2012). Ellos concluyen que, para mantener unas propiedades reológicas y físicas aceptables, la dosificación de WCO utilizada no debe sobrepasar el 4 % y uno de ellos concluye que para su asfalto con una viscosidad clasificado como 80/100, la dosificación idónea está entre 3 % y 4 % de WCO.

La modificación con aceite es un método que ha demostrado disminuir la susceptibilidad del ligante asfáltico a volverse más frágil a temperaturas bajas. Además, el material cambia de consistencia, disminuye la viscosidad y, por ende, disminuye el límite inferior del PG. Una temperatura baja de PG aún menor resulta en un ligante con mayor capacidad de relajarse al ser expuesto a cargas y almacenar menos tensión, por lo que el material se fatiga menos (Silla, 2015).

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es definir rangos de dosificación de polímeros y aceite de cocina reciclado para mejorar el desempeño del asfalto modificado en términos de su comportamiento ante los fenómenos de fatiga y deformación permanente.

METODOLOGÍA

En una primera parte del estudio se realizó un análisis bibliográfico para conocer los requerimientos del país y seleccionar los materiales a utilizar. Seguidamente, se procedió con la parte experimental la cual consistió en la caracterización de los materiales seleccionados con ensayos de espectroscopía de absorción en el infrarrojo usando Transformada de Fourier (FTIR, por sus siglas en inglés), análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés) y calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés). Una vez que se tuvo toda la información necesaria, se definió el diseño experimental apropiado para realizar el análisis y se modificó el asfalto según lo definido. Esas muestras de asfalto modificado se dejaron reposar a cierta temperatura por un tiempo específico (Cuadro 1), se sometieron a los tratamientos térmicos necesarios y se realizaron las mediciones reológicas para el

análisis estadístico. Por último, se analizaron los resultados y se determinaron los rangos de dosificación que cumplen con lo establecido para emitir las recomendaciones pertinentes. Cada uno de estos puntos se detalla a continuación.

MATERIALES

Los materiales utilizados en este estudio son: asfalto, los polímeros SBS y RET, los cuales son comerciales y se utilizan comúnmente a nivel de laboratorio, y aceite de cocina reciclado, donado por un restaurante.

El material de partida se clasifica como AC-30 y PG 64-22 (S), con un punto de ablandamiento de 49,7 °C y una recuperación elástica del 1 %.

En el caso de los polímeros, estos fueron seleccionados de acuerdo con las mejoras que proveen al asfalto una vez incorporados. El poli(estireno-butadieno-estireno) o SBS es un elastómero conocido por ser un caucho duro. El material se encuentra en polvo con un tamaño de partícula promedio de 2 mm y con carbonato de calcio como antiadherente. La ficha del fabricante indica que posee un contenido de poliestireno del 30 % másico. Según lo estudiado, la dosificación de SBS utilizada puede llegar hasta aproximadamente un 8 % (Airey, Singleton, y Collop, 2002). Por otro lado, se utilizó RET de alta reactividad y con diámetro promedio de partícula de 5 mm. Por lo general, se incorpora una dosificación entre 0,8 % y 1,8 % de la masa del asfalto utilizado y se recomienda que no sobrepase el 3 % (DuPont, 2011).

En este proyecto se utilizó aceite de cocina reciclado proveniente de un restaurante, referido por lo general en la literatura como WCO. Utilizar un material de desecho es de gran provecho y más aun siendo de difícil disposición. Se seleccionó este aceite de desecho en específico ya que, a diferencia del aceite usado de automóvil, los residuos de comida o demás compuestos que se generan por su uso no afectan al asfalto en el que se va a utilizar (Golalipour, 2013).

Modificación de Asfalto

Para la modificación se vertió una masa conocida de asfalto fluido en un recipiente caliente y se incorporó poco a poco el material modificante con agitación constante; tanto la rapidez de adición y la velocidad angular dependieron de la homogeneidad de la incorporación. El porcentaje de polímero a utilizar se eligió con base en la recomendación del fabricante. Adicionalmente, es necesario resaltar que el polímero RET requiere de la adición de ácido polifosfórico (PPA, por sus

siglas en inglés). Se añadió una cantidad máxima de PPA del 0,2 % de la masa de asfalto para evitar la gelificación del modificado.

Dependiendo del material utilizado se requiere el control de ciertas variables durante la modificación para garantizar una correcta incorporación. Además, algunos modificantes requieren un tiempo de reposo para garantizar los entrecruzamientos entre el asfalto y el polímero. Con base en la literatura (Airey *et al.*, 2002; DuPont, 2011; Hidayah, Hainin, Hassan y Abdullah, 2013; Rodríguez, 2018) y los resultados de la caracterización de los materiales, se establecen los tiempos y temperaturas de modificación para cada uno de los polímeros a utilizar. Esta información se muestra en el Cuadro 1. Además del control del tiempo, la temperatura y la agitación, se realizan pruebas visuales para comprobar la correcta homogeneización de la mezcla. Cabe destacar que en las muestras que contienen una mezcla de polímero y aceite, se adicionó el WCO primero y una vez transcurrido el tiempo necesario para producir una mezcla homogénea, se agregó el polímero, dejándolo en agitación durante el tiempo correspondiente.

Cuadro 1. Variables por controlar para cada modificación dependiendo del material modificante

Material modificante	Temperatura	Tiempo	Reposo	
	T_{mix} °C	t_{mix} h	T_{curado} °C	t_{curado} h
SBS	180	4	25	24
RET	185	1,5	163	24
PPA	163	0,5	163	24
Aceite	163	0,5	-	-

Por último, se acondicionaron las muestras, es decir, se sometieron los asfaltos a simulaciones de envejecimiento y oxidación conocidas como RTFO (del inglés *Rolling Thin Film Oven*) y PAV (del inglés *Pressure Aging Vessel*), respectivamente, para medir el PG completo, así como pruebas de desempeño como MSCR (del inglés *Multiple Stress Creep and Recovery*) y LAS (del inglés *Linear Amplitude Sweep*) a cada una de las muestras.

Diseño Experimental

Con el fin de encontrar un rango de dosificación de polímero adecuado que muestre una mejora en el desempeño del asfalto modificado al incorporarlo junto al WCO, se realizó un diseño experimental y análisis estadístico factorial de 2 niveles y 3 factores (Figura 1). Lo anterior permite evaluar el impacto del polímero utilizado, de la dosis de este y de la cantidad

de aceite añadida al asfalto original. En total se trabajó con 12 muestras de las cuales 8 son necesarias para el análisis estadístico y 4 extras que corresponden a los puntos centrales de dosificación para cada polímero. A continuación, se detalla los modificantes añadidos a cada muestra:

- M 0: 0 % WCO+ 0 % RET + 0 % PPA + 0 % SBS
- M 1: 3,5 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA
- M 2: 3,5 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA
- M 3: 3,5 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA
- M 4: 4 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA
- M 5: 4 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA
- M 6: 4 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA
- M 7: 3,5 % WCO + 1 % SBS
- M 8: 3,5 % WCO + 2 % SBS
- M 9: 3,5 % WCO + 4 % SBS
- M 10: 4 % WCO + 1 % SBS
- M 11: 4 % WCO + 2 % SBS
- M 12: 4 % WCO + 4 % SBS

El análisis brindó información sobre la interacción entre el polímero modificante y el aceite rebajador. Las propiedades de los polímeros, sus beneficios y desventajas al ser incorporado al asfalto se conocen bien, sin embargo, no se conoce cómo interaccionaría cada uno de polímeros seleccionados al ser incorporados al asfalto previamente rebajado con WCO. Por esa razón, es de gran importancia utilizar un diseño experimental que permita concluir con certeza si los cambios

en las variables medidas son estadísticamente significativos. Se realizó un análisis estadístico de las siguientes variables: límite superior del PG, $R_{3,2.kPa}$ y N_f al 10 % de deformación. Los resultados se presentan en la siguiente sección.

RESULTADOS

Las carreteras sufren dos deterioros principales que están directamente relacionados con el ligante asfáltico utilizado la deformación permanente y la fatiga. El enfoque en este análisis será evaluar el desempeño de las modificaciones con polímero y aceite, y la posibilidad de alcanzar los grados de PG requeridos en Costa Rica de modo que resistan adecuadamente estos fenómenos.

A continuación, se muestra el razonamiento detrás de la selección de los polímeros analizados, los resultados más importantes de su caracterización, la evaluación reológica de los asfaltos modificados, las dosificaciones recomendadas y el impacto económico que representa la utilización de estos asfaltos modificados en el país.

Selección de materiales

Para cumplir con el objetivo de este proyecto, se requirió incorporar materiales que mejoren al asfalto en términos de elasticidad. Por lo tanto, el reto inicia en la selección de los materiales adecuados. Como se mencionó anteriormente, los materiales involucrados fueron el asfalto, dos polímeros y aceite de cocina reciclado. A continuación, se comentará el proceso de selección, las especificaciones de los materiales seleccionados y los resultados de las pruebas previas.

El barrido de amplitud lineal (LAS) indica que el asfalto soporta 11 ciclos de carga hasta alcanzar una deformación del 10 %.

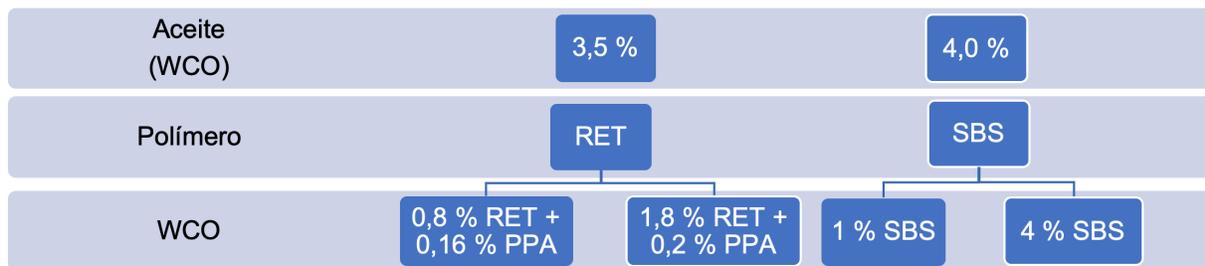


Figura 1. Factores y niveles para el análisis estadístico factorial

Estos resultados serán valores de partida para los siguientes análisis ya que se buscará alcanzar valores más favorables de elasticidad con la incorporación de los materiales en estudio.

Si bien los polímeros elegidos para el estudio promueven un comportamiento más elástico del asfalto una vez modificado, añadir polímero no suele tener un impacto en el límite inferior del grado de desempeño. Por ejemplo, una muestra de asfalto virgen posee un límite inferior de $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($m= 0,33$ y $s= 172,72$ MPa), al igual que ese mismo asfalto modificado con 2% de SBS ($m= 0,2$ y $s= 176,96$ MPa). Por lo tanto, se buscaron distintas alternativas para lograr disminuir el límite inferior del PG y utilizar el polímero para aumentar el límite superior del PG. Con esto, se obtendría un asfalto con un PG más amplio, es decir, un mejor desempeño en un rango más amplio de temperaturas.

Las ceras o aceites para rebajar el asfalto pueden ser añadidos vírgenes o previamente usados con otro fin (reciclados).

Pruebas previas

En estudios previos se ha experimentado con distintos porcentajes de los polímeros SBS y RET con el asfalto AC-30. Así que, con base en esos datos, se decidió realizar el análisis con una dosificación mayor y otra menor a la utilizada en el país sin sobrepasar las dosificaciones recomendadas por los proveedores.

En cuanto al WCO, dado que se desconocía cuál sería su comportamiento al mezclarse con el asfalto nacional, se realizaron pruebas previas para definir cuáles porcentajes se utilizarían junto con el polímero en el análisis. Se modificaron muestras con 1 %, 3 %, 3,5 % y 4 %. En el Cuadro 2 se muestran los resultados de PG para cada una de ellas.

Cuadro 2. PG completo para los asfaltos modificados con WCO a distintas dosificaciones de las pruebas previas

Muestra	Temperatura Superior $T_{SUB}^{\circ}\text{C}$	Temperatura Intermedia $T_{INT}^{\circ}\text{C}$	Temperatura Inferior $T_{INF}^{\circ}\text{C}$
Control	70	25	-16
1% WCO	64	22	-22
3% WCO	64	19	-28
3,5% WCO	64	19	-28
4% WCO	58	19	-28

El límite superior del PG disminuyó dos grados al incorporar el porcentaje de WCO mayor, lo cual debería ser fácilmente recuperable con la ayuda del polímero. Basado en este resultado, cualquiera de las 4 opciones es aceptable. La temperatura

intermedia también se ve favorecida en todos los casos; esta disminuye de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el mayor porcentaje de aceite utilizado de cocina.

La muestra con 3,5 % se consideró un buen aporte ya que consume más material de desecho sin afectar el desempeño del asfalto. En general, es el porcentaje más favorecido ya que logra bajar 2 grados del límite inferior, bajando solo 1 grado del límite superior. Es decir, no solo mueve el rango, sino que lo amplía.

De las pruebas previas se observa que el aceite de cocina reciclado podría ser capaz de ampliar el rango de temperatura a la que el asfalto presenta un buen desempeño al combinarlo con el polímero ya que, a la dosificación adecuada de WCO varía únicamente la temperatura baja de PG. Se considera relevante para el análisis estadístico utilizar 3,5 % y 4 % como alternativas de la cantidad de WCO incorporable.

Evaluación de respuestas reológicas

Una vez que se modificaron y se acondicionaron las 12 muestras, se midieron sus respuestas reológicas. Primero, se midió el PG completo de las muestras para verificar que se alcancen los grados de desempeño necesarios para suplir las necesidades del país con las dosificaciones planteadas. Utilizar únicamente el grado PG no siempre es un buen parámetro para evaluar el comportamiento de asfaltos modificados ya que solo detecta qué tan endurecido se encuentra el asfalto (Anderson, D' Angelo, y Walker, 2010). Por esta razón, se completó la evaluación con las pruebas de LAS y MSCR. Como se mencionó anteriormente, con el MSCR se busca determinar el comportamiento del material ante diferentes esfuerzos de forma tal que identifique su propensión a la deformación permanente. Así mismo, por medio del ensayo LAS se obtiene la resistencia a la fatiga del asfalto. A continuación, se detallará los resultados esperados de cada ensayo y los resultados obtenidos para luego discutirlos desde un punto de vista estadístico en la siguiente sección.

En términos de PG, lo ideal es que el asfalto soporte una temperatura alta en el límite superior el límite inferior ya que eso lo haría menos susceptible a deformación permanente a temperaturas altas y a fatiga a temperaturas bajas o intermedias. En el Cuadro 3 se observa que los límites superiores más altos corresponden a las muestras con mayor cantidad de polímero. Esto quiere decir que, como se esperaba, el límite superior es manipulable con polímeros. No obstante, la temperatura intermedia y el límite inferior no se vieron afectados por la presencia del polímero, sino que el aceite añadido tiene un impacto suficiente para que domine en el desempeño del material a temperaturas bajas.

Cuadro 3. PG completo de muestras de asfalto modificado

Muestras (M)		Superior T_{SUB} °C	Intermedia T_{INT} °C	Inferior T_{INF} °C
0	0 % WCO + 0 % RET + 0 % PPA + 0 % SBS	70	25	-16
1	3,5 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA	64	19	-28
2	3,5 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA	64	19	-28
3	3,5 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA	70	19	-28
4	4 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA	64	19	-28
5	4 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA	64	19	-28
6	4 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA	70	19	-28
7	3,5 % WCO + 1 % SBS	58	19	-28
8	3,5 % WCO + 2 % SBS	64	19	-22
9	3,5 % WCO + 4 % SBS	64	22	-22
10	4 % WCO + 1 % SBS	58	19	-28
11	4 % WCO + 2 % SBS	64	19	-28
12	4 % WCO + 4 % SBS	64	19	-28

Si bien no se logró superar el valor inicial para el límite superior con las modificaciones por haber utilizado el WCO, se alcanzó el PG 70 y se baja hasta dos grados el límite inferior. Es decir, el rango de temperaturas del PG no se traslada al agregarle el polímero, como sucede comúnmente, sino que al añadir el aceite junto con el polímero se amplía el rango de temperaturas a las cuáles se garantiza un buen desempeño del material. Esto sucede para las muestras 3 y 6 que contienen la mayor proporción de RET añadido a con 3,5 % y 4 % de WCO, respectivamente.

De los resultados obtenidos también se infiere que el SBS se ve afectado por la presencia del WCO. El comportamiento para el límite superior se reduce un grado PG en comparación

con las modificaciones con RET. Este comportamiento se evidenciará en los resultados de los posteriores ensayos.

Los resultados de MSCR para las muestras modificadas con RET (Cuadro 4) y SBS (Cuadro 5) refuerza los resultados anteriores. Las muestras clasificadas como aceptables bajo los criterios de conformidad y que, por ende, muestran una mayor resistencia al ahuellamiento y la deformación permanente son las muestras 2, 3 y 6. Estas muestras con una buena resistencia a la deformación poseen una clasificación de tránsito vehicular pesado (H) y muy pesado (VH) referido a un tránsito de entre 3 y 10 millones de ejes equivalentes y entre 10 y 30 millones de ejes equivalentes, respectivamente. Esto significa que el asfalto es resistente y estable al someter carga.

Cuadro 4. Resultados de MSCR para muestras de asfalto modificado con RET

Variables/Muestras	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Temperatura del ensayo T , °C	64	64	64	70	64	64	70
Porcentaje de recuperación a 3,2 kPa $R_{3,2}$, %	1,7	17	33	54	22	21	43
Fluencia no recuperable a 3,2 kPa $J_{nr3,2}$, kPa^{-1}	2,3	1,9	1	0,7	1,4	1,5	1,1
J_{nr} entre 0,1 kPa y 3,2 kPa $J_{nr diff}$, kPa^{-1}	9	28	25	21	24	30	20
Clasificación PG plus	S	H	VH	VH	H	H	H
Conformidad	-	NA	A	A	NA	NA	A

Cuadro 5. Resultados de MSCR para muestras de asfalto modificado con SBS

Variables/Muestras	M0	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Temperatura del ensayo T, °C	64	58	64	64	58	64	64
Porcentaje de recuperación a 3,2 kPa $R_{3,2}$ %	1,7	3,2	2,7	13	4	3,6	7,5
Fluencia no recuperable a 3,2 kPa $J_{nr,3,2}$ kPa ⁻¹	2,3	1,7	2,7	1,4	1,6	3,1	1,6
J_{nr} entre 0,1 kPa y 3,2 kPa $J_{nr,diff}$ kPa ⁻¹	9	10	15	24	12	21	24
Clasificación PG plus	S	H	S	H	H	S	H
Conformidad	-	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Por otro lado, para el caso del SBS, nuevamente se obtuvieron resultados desfavorables. El porcentaje de recuperación elástica a 3,2 kPa para el asfalto original era de 1,7 % y los resultados para el asfalto modificado con SBS son muy cercanos a estos valores. De igual manera, la fluencia no recuperable del asfalto original (2,5 kPa⁻¹) es aún menor que para algunas de las muestras del Cuadro 5. Por lo tanto, estos resultados descartan nuevamente la posibilidad de utilizar las muestras 7 - 12.

Por último, el ensayo del barrido de amplitud lineal es indicativo de la resistencia a la fatiga que va a experimentar el material al evaluar los siguientes parámetros. El coeficiente A debe ser un valor alto y B lo más cercano a cero para garantizar que el asfalto tenga una mayor resistencia a la fatiga. Esto se traduce en un N_f mayor, es decir, que el asfalto soporte una mayor cantidad de ciclos antes de alcanzar una deformación del 10 %, que debido a este aumento esto se traduciría en un

incremento en el desempeño mecánico de la carpeta. De acuerdo con los resultados obtenidos (Cuadro 6), las muestras 3 y 6 se ven favorecidas por la modificación.

El asfalto original soporta 142 ciclos antes de fatigarse con una deformación del 10 %, por lo tanto, todas las muestras soportan mínimo 3,6 veces más ciclos que el asfalto original. El SBS es conocido por mejorar el asfalto en términos de flexibilidad a bajas temperaturas. Sin embargo, tomando en cuenta los resultados insatisfactorios que ha tenido el SBS al ser incorporado junto al WCO, se afirma que los beneficios obtenidos son resultado de la presencia del WCO. Este tiende a distribuir el esfuerzo dentro del ligante y por ende aumenta su habilidad de relajación. Al acumular menos tensión, aumenta la cantidad de ciclos que soporta el material antes de fatigarse y se reduce la tendencia a fisuras.

La modificación con SBS consiste en la formación de una red tridimensional altamente elástica en el ligante donde los

Cuadro 6. Resultados de LAS para muestra de asfalto modificado con RET y SBS

Muestras (M)	A	B	N_f	$N_{f,diff}$
0 0 % WCO + 0 % RET + 0 % PPA + 0 % SBS	1 137 216	3,904	142,0	-
1 3,5 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA	5 299 000	3,731	985,5	594 %
2 3,5 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA	3 381 500	3,682	703,5	395 %
3 3,5 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA	8 707 500	6,785	1433,0	909 %
4 4 % WCO + 0,8 % RET + 0,15 % PPA	4 805 000	3,670	1023,0	620 %
5 4 % WCO + 1 % RET + 0,2 % PPA	4 859 000	3,706	956,5	574 %
6 4 % WCO + 1,8 % RET + 0,2 % PPA	6 991 500	3,698	1386,0	876 %
7 3,5 % WCO + 1 % SBS	3 196 000	3,729	595,5	319%
8 3,5 % WCO + 2 % SBS	3 729 000	3,860	517,0	264 %
9 3,5 % WCO + 4 % SBS	3 749 000	3,768	637,5	349 %
10 4 % WCO + 1 % SBS	2 601 000	3,623	623,5	339 %
11 4 % WCO + 2 % SBS	3 587 000	3,768	612,5	331 %
12 4 % WCO + 4 % SBS	5 503 000	3,921	661,5	366 %

bloques de PS forman entrecruzamientos físicos por fuerzas intermoleculares, entre el asfalto y el polímero. En este caso se usó un SBS radial así que la molécula cuenta con una cantidad mayor de puntos de entrecruzamiento, pero más impedimento estérico. Por lo tanto, un asfalto modificado con SBS radial posee una mayor viscosidad, mayor punto de ablandamiento y se le dificulta más la incorporación del polímero al asfalto (Hunter, Self, y Read, 2015). Se ha propuesto que algunos de los componentes del asfalto se introducen en la red polimérica y esta aumenta volumétricamente de 6 a 9 veces su tamaño inicial (Airey *et al.*, 2002); y una vez que se enfría, los bloques de PS se reacomodan formando la red (Pay, 2017). Cuando aumenta volumétricamente su tamaño, este absorbe los componentes aceitosos del asfalto, los maltenos. Al estar presente el WCO antes de incorporar el SBS, se infiere que el polímero tuvo más afinidad por el aceite y no por el asfalto, lo que evitó que se formara la red con este último. Lo anterior explicaría la respuesta desfavorable que tuvieron las muestras modificadas con este polímero y WCO.

Se concluye que las muestras que mejoran el asfalto de forma más significativa son la 3 y la 6. Todas corresponden a modificaciones con RET, a la mayor dosificación de polímero evaluada. La diferencia de 0,5 % en las dosificaciones de WCO no causó gran impacto en las modificaciones. Sin embargo, las muestras con alto porcentaje de polímero y mayor cantidad de WCO eran más trabajables que su homólogo con menos WCO.

Análisis estadístico

El análisis estadístico factorial permite determinar la importancia de los factores como el polímero utilizado, la dosificación de polímero y la dosificación de WCO sobre la respuesta mecánica del material. Las variables de respuesta analizadas son la temperatura del límite superior del PG, el porcentaje de recuperación elástica a 3,2 kPa y el número de ciclos que soporta el material antes de llegar a una deformación del 10 %, también conocido como vida de fatiga. De esta forma, se mejorará las recomendaciones en cuanto al tipo de material y las dosificaciones apropiadas para las carreteras nacionales.

Se comprueba con un 95 % de confianza que el polímero escogido genera la mayor diferencia en los resultados tanto para deformación permanente como para fatiga. En este caso, la gran diferencia, como se muestra en la Figura 2, se debe a que la interacción entre el asfalto y el SBS se vio afectada por la afinidad que tiene el polímero por el aceite. Por lo tanto, el SBS no formó los entrecruzamientos esperados con el asfalto y se vio beneficiado el RET en todos los casos. Aparte de eso, otros resultados importantes son que el cambio en la cantidad de WCO añadida afectó únicamente en términos de deformación permanente y que la cantidad de polímero utilizado es más importante en relación con el PG. Dicho comportamiento se asemeja al visto en las modificaciones de los materiales por separado, es decir, asfalto modificado únicamente con polímero o con WCO.

Definición de rangos de dosificación para alcanzar los PG requeridos

Las carreteras nacionales alcanzan temperaturas máximas de 64 °C. Sin embargo, si a eso se le suma los distintos volúmenes de tránsito de ciertas zonas del país, se requieren asfaltos: PG 58, PG 64, PG 70 y PG 76 (Elizondo *et al.*, 2013). Por otro lado, la temperatura más baja que alcanza el pavimento en el país es de 4 °C. Es decir, en el país no se esperan problemas de fisuramiento por baja temperatura. Sin embargo, menores temperaturas en el límite inferior e intermedio del PG refleja también mejoras en el desempeño en términos de fisuramiento por fatiga ya que se disipan mejor las cargas en el material. El asfalto tendría una vida más larga ya que tiene que oxidarse mucho más antes de alcanzar valores críticos para su desempeño. Por lo tanto, es beneficioso utilizar una temperatura baja e intermedia de PG menores a las que se reportan para el asfalto nacional.

En el Cuadro 7 se presentan los rangos de dosificación de WCO y polímero recomendados para alcanzar las temperaturas altas de PG requeridos en el país. Estos rangos se definen en base a los resultados obtenidos y analizados a lo largo de este proyecto.

Cuadro 7. Rangos de dosificaciones recomendadas según el análisis realizado para alcanzar los PG requeridos en el país ^{a,b}

PG requerido	Dosificación recomendada			Desempeño	
	% WCO	% RET	% PPA	N _r 10%	J _{nr,3.2 kPa}
58	3 – 3,5	-	-	623,5	1,61 – 1,62
64	3,5	0,8 – 1	0,16 – 0,2	703,5	0,96 – 0,98
70	4	1 – 1,8	0,2	1 386,0	1,11 – 1,90
76	-	1 – 1,8	0,2	-	-

^a Estos rangos se determinaron partiendo de un asfalto PG 70-16.

^b Se reportó una temperatura intermedia de 19 °C y una temperatura baja de PG de -28 °C para todos los casos excepto para el PG 76.

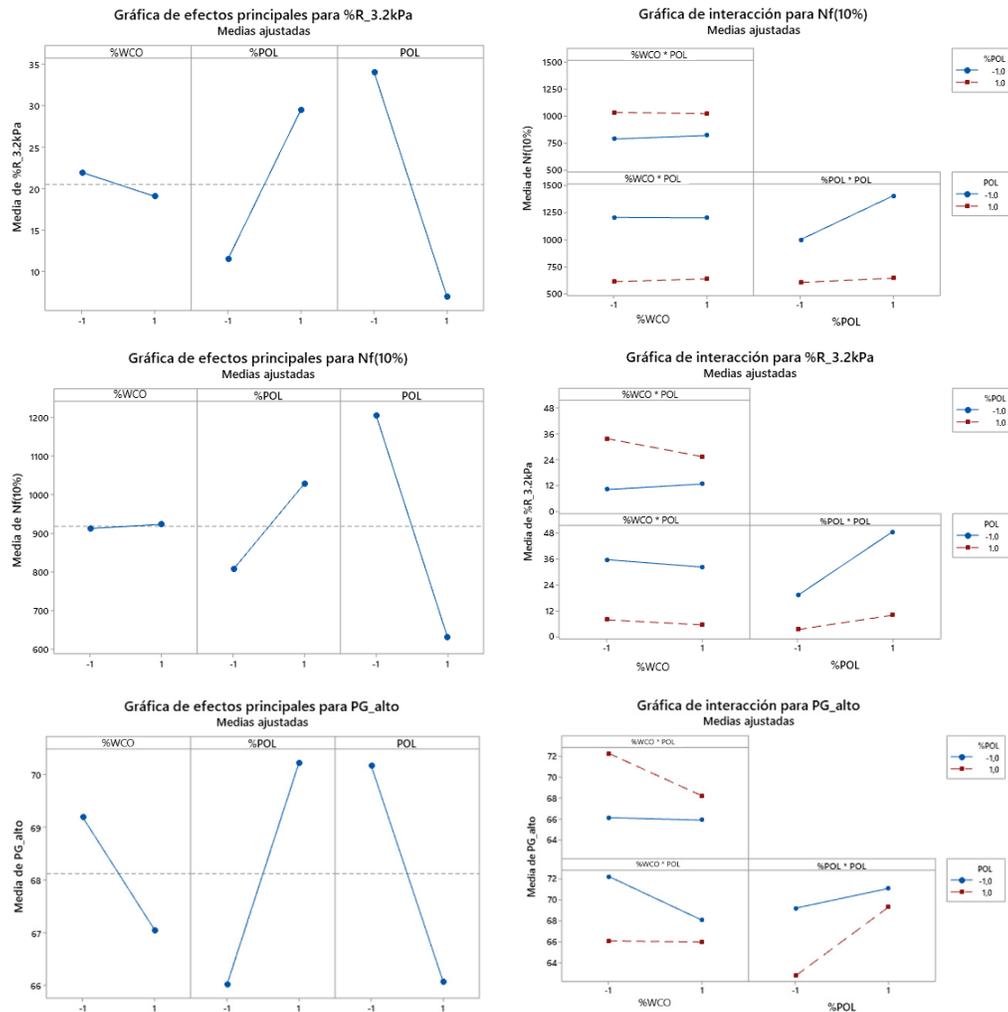


Figura 2. Efectos e interacciones entre las variables analizadas

La modificación del asfalto involucra un gasto mayor. Sin embargo, en casos que requieran un grado de desempeño menor al base, se considera que la adición de aceite resulta beneficiosa ya que con este estudio se comprobó que al añadir WCO hay un aumento en los ciclos que soporta el asfalto antes de fatigarse y estudios afirman que mejoran la adhesión entre el asfalto y el agregado en la mezcla (Airey *et al.*, 2002).

Además, se observó que la mezcla de polímero y aceite produce asfaltos aptos para cargas vehiculares mayores. Por ejemplo, el asfalto base comúnmente utilizado en el país tiene una clasificación PG 64-22 y soporta una carga vehicular estándar (S), no obstante, si se modifica con 1 % RET, 0,2 % PPA y 3,5 % WCO, además de mejorar la recuperación elástica, el asfalto soportará cargas muy pesadas (VH).

Las muestras con las dosificaciones seleccionadas como las mejores opciones para suplir las necesidades del país no están conformes a las especificaciones para asfaltos modificados según el Manual de Especificaciones Generales Para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2010; como se muestra en el Cuadro 7. Sin embargo, como se reportó en secciones anteriores, ensayos reológicos más modernos y específicos indican que hay una mejora considerable y beneficiosa con las modificaciones realizadas. Los datos obtenidos con el MSCR determinan que las modificaciones alcanzan los niveles de recuperación elástica y deformación permanente aceptables. Además, se alcanzan los grados de desempeño (PG) deseados y se obtiene una resistencia a la fatiga aún mayor que modificaciones con solo polímero. Por lo tanto, se recomienda una actualización de los criterios de conformidad utilizados en el país para la evaluación de asfaltos modificados.

Impacto económico

La adición de estos materiales significa un aumento en el costo de la carretera. En general, se estima que el aumento en los costos es de entre (40 - 45) % del costo del galón de asfalto. Y como en las mezclas se requiere alrededor de un 6 % de ligante, el aumento resulta en un 8 % del costo de la carretera. No obstante, estos costos representan una inversión, ya que la mejora en el desempeño del asfalto se ha estimado que aumenta la vida útil en un 20 - 30 %, lo que hace que se requieran mantenimientos más distanciados. Por otro lado, con la incorporación del aceite se obtienen ganancias en cuanto a la huella de carbono por el uso de material de desecho, en pocas palabras, es un modificante de bajo costo que mostró lograr la disminución en la temperatura baja del PG sin tener afectación en la temperatura alta, esto sin mencionar que es un material de desecho de difícil disposición. El aceite disminuye el punto de ablandamiento y la temperatura de compactación, es decir, se requiere menos diésel en el proceso de producción. Además, se podría hacer la mezcla aún más sostenible si se utilizara plástico reciclado en lugar de polímero virgen.

CONCLUSIONES

- Se seleccionaron como polímeros de estudio el SBS y el RET ya que son modificantes altamente utilizados en la industria del asfalto. Además, se seleccionó el aceite de cocina reciclado para lograr, junto al polímero, ampliar el rango del PG para el cual el asfalto modificado va a mostrar un desempeño favorable tanto en términos de deformación permanente como de fatiga. Se concluyó que el aceite puede afectar la formación de la red entre el polímero y el asfalto. Por lo tanto, se recomienda al utilizar polímeros diferentes a los utilizados en este estudio, evaluar la compatibilidad del polímero con el aceite o bien seleccionar adecuadamente el orden de incorporación de estos materiales al asfalto.

- Al incorporar el RET al asfalto previamente modificado con aceite se logró aumentar en 2 grados el límite superior de PG y no se vio afectada la temperatura intermedia ni la temperatura baja de PG. La buena incorporación del terpolímero reactivo demostró que este tipo de polímero forma una red más estable con el asfalto.
- Se observó que el grado de desempeño debe acompañarse con pruebas como MSCR y LAS para determinar adecuadamente el comportamiento mecánico del asfalto.
- El MSCR reveló que la clasificación por tráfico vehicular se vio beneficiada en todas las muestras evaluadas tras la modificación con aceite y RET.
- La totalidad de las muestras evaluadas mostró una mejora en la resistencia a la fatiga de al menos el 264 % según los resultados de LAS. Esto se le atribuye a la presencia del WCO, el cual rejuvenece el asfalto y promueve la mejor disipación de cargas dentro de la red asfáltica.
- El análisis estadístico factorial determinó, como era de esperar, que el polímero utilizado tuvo un impacto significativo. La dosificación de cada polímero influyó mayormente en la recuperación elástica (valor $p= 0,0001$; $R^2= 86\%$). Además, determinó que la cantidad de WCO variada en el diseño experimental no es suficiente como para generar cambios significativos (Valor $p= 0,098$).
- Modificar asfalto con las dosificaciones adecuadas de polímero y aceite utilizado de cocina permite ampliar los rangos de temperatura de desempeño del asfalto.

En resumen, al producir asfaltos modificados, se tiene el objetivo de encontrar el mejor diseño al menor costo posible. Por lo tanto, con la presente investigación se comprobó que el uso de aceite utilizado de cocina es una buena alternativa de bajo costo para la mejora de las propiedades del asfalto en términos de fatiga. A su vez se ofrece una solución a una problemática de los gobiernos locales, relacionada con la compleja disposición de este residuo.

REFERENCIAS

- Airey, G., Singleton, T., y Collop, A. (2002). Properties of polymer modified bitumen after rubber-bitumen interaction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14, 344-354. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:4(344)
- Al-Omari, A., Khedaywi, T., y Khasawneh, M. (2018). Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11, 68-76. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.09.004
- Anderson, M., D'Angelo, J., y Walker, D. (2010). MSCR: A better tool for characterizing high temperature performance properties. *ASPHALT: The Magazine of the Asphalt Institute*, 25(2), 15-23.
- DuPont (2011). *DuPont Elvaloy RET Lab Screening guide: Technical Bulletin RET 1.1. Suggested Guidelines for Initial Screening of Elvaloy® RET in Asphalt for Paving Applications*.
- Elizondo, F., Rodríguez, E., Bonilla, E., y Badilla, G. (2013). *Zonificación climática de Costa Rica para la determinación del tipo de ligante asfáltico clasificado por Grado de Desempeño (PG)*. Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/742>
- Golalipour, A. (2013). *Investigation of the effect of oil modification on critical characteristics of asphalt binders* (Tesis doctoral). Universidad de Winsconsin, Madison.
- Hidayah, N., Hainin, M., Hassan, N., y Abdullah, M. (2013). *A short review of waste oil application in pavement materials*. Malaysia: UTHM Institutional Repository.
- Hunter, R., Self, A., y Read, J. (2015). *The Shell Bitumen Handbook*. Thomas Telford Press: London.
- Loría, L. (2005). *Procuran elevar calidad de asfalto en carreteras*. Recuperado de: <https://historico.semanariouniversidad.com/suplementos/crisol/procuran-elevar-calidad-de-asfalto-en-carreteras/>
- Pay, P. (2017). *Effect of polymer modified bitumen on deformation characteristics of low-traffic asphalt pavements*. Norway: Norwegian University of Science and Technology.
- Rodríguez, E. (2018). *Guía rápida para la modificación de asfalto con polímeros comerciales*. Boletín Técnico PITRA-LanammeUCR, 9(4), 1-6.
- Salazar, J. (2008). *Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros modificantes de asfalto incorporados en planta*. Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1464>
- Sylla, R. (2015). *Effects of oil modification on aging characteristics of asphalt materials* (Tesis de Maestría). Universidad de Winsconsin, Madison.
- Wang, S. (2019). Generalidades y aplicaciones de la instrumentación de pavimentos en condiciones de campo en Costa Rica. *Infraestructura Vial*, 20(36), 5-14. DOI: 10.15517/IV.V20I36.37728
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., y Karim, M. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of Hazardous Materials*, 233-234, 254-258. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.06.021