

Evaluación físico-mecánica de las mezclas asfálticas mediante la adición de aceite reciclado de motor

Physical-mechanical evaluation of asphalt mixtures through the addition of recycled motor oil

Carlos Lucio Raffo Suclupe 
Universidad Señor de Sipán
Lambayeque, Perú
rsuclupe@crece.uss.edu.pe

Leyner Oswaldo Calva Herrera 
Universidad Señor de Sipán
Universidad Cesar Vallejo
Lambayeque, Perú
cherreraleyne@crece.uss.edu.pe

Fecha de recepción: 17-07-2023 / **Fecha de aprobación:** 05-10-2023

RESUMEN

El presente estudio se desarrolló de forma experimental, aplicado al diseño de una mezcla asfáltica en caliente (MAC). Se buscó mitigar el impacto negativo en el medio ambiente generado por los aceites reciclados de motor (ARM) o comúnmente llamados aceites quemados que, por lo general, son eliminados a la intemperie. Es así que se adicionó ARM en porcentajes de acuerdo con PEN 60/70 de la mezcla patrón, planteándose el objetivo determinar las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica modificada y evaluar si esta satisface los estándares que exigen las normas. Se evaluó mediante la metodología Marshall una población total de 135 briquetas que incluyen las mezclas asfálticas modificadas con 0,5 %, 1,5 %, 2,5 % y 3,5 % de aceite reciclado. Se determinó que el porcentaje óptimo de asfalto es de 5,75 %, ensayado a temperaturas de 120 °C y 130 °C. Se concluye que la incorporación de ARM en la mezcla asfáltica mejora sus propiedades físico-mecánicas (rigidez, flujo, estabilidad) y asegura el cumplimiento de los parámetros mínimos de una MAC.

Palabras clave: Mezcla asfáltica, aceites reciclados de motor, propiedades físico-mecánicas, medio ambiente, metodología Marshall.

ABSTRACT

This study was developed by an experimental design of a hot mix asphalt (HMA), seeking to mitigate the negative impact on the environment that generate the recycled motor oils (RMO) or commonly known as burned oil which, in general, is eliminated outdoors. Then, RMO was added in percentages to an asphalt mixture in different percentages according to the PEN 60/70 of the standard mixture, with the objective of determining the resulting physical-mechanical properties of the modified asphalt mixture and evaluating if they meet the standards. A total population of 135 briquettes of modified mixtures was evaluated by means of the Marshall methodology. The mixtures contained 0,5 %, 1,5 %, 2,5 % and 3,5 % of recycled oil. It was found that the optimal percentage of asphalt is 5,75 %, rehearsed at temperatures of 120 °C and 130 °C. It is concluded that after incorporating RMO in the asphalt mixture, its physical-mechanical properties (rigidity, flow, stability) were improved and comply with the minimum parameters of an HMA stated by standards.

Keywords: Asphalt mix, recycled motor oils, physical-mechanical properties, environment, Marshall methodology.

Introducción

La demanda vehicular a nivel mundial, la necesidad de conectar ciudades, la construcción y los trabajos de rehabilitación de pavimentos son necesidades básicas en las que se consumen significativamente los recursos naturales. Entre ellos, los agregados pétreos son un recurso infaltable para estas construcciones y que difícilmente se podrían renovar. Lo anterior conlleva a que este material escasee y aumenten los costos en su producción. Es por ello, que se han realizado diversas investigaciones con el fin de reducir costos y promover la reutilización de materiales en las construcciones, en procura de que estas sean ecológicamente eficientes (Modibbo *et al.*, 2021).

Adicional a la situación de los agregados, se analizan los riesgos potenciales de transportar, transferir y almacenar volúmenes muy grandes de petróleo crudo y sus subproductos refinados, junto con los problemas ambientales asociados a las emisiones gaseosas y a la contaminación del suelo y de aguas subterráneas. Entre los subproductos, el aceite derivado del petróleo es el que genera más daño al medio ambiente (Fox, 2016).

Se ha encontrado que, debido al escaso manejo de los residuos líquidos contaminantes como el aceite quemado, se contaminan los recursos hídricos con metales pesados (Thomas *et al.*, 2021). La demanda de aceites lubricantes a nivel mundial asciende a 40 millones ton/año, debido a que el recambio de aceite es una necesidad técnica en los vehículos, se tiene como resultado enormes cantidades de aceite residual que son liberados al suelo y al agua, lo que genera contaminación ambiental (Quillos, Calderón, Escalante y Nahui, 2021). A este punto, es necesario resaltar que los aceites residuales representan el 60 % de aceites consumidos.

En Colombia se inserta al mercado automotor 540 barriles diarios de combustibles, los cuales son utilizados en actividades de talleres mecánicos, de fundición, siderúrgicas, entre otras. Además, son compuestos de alta resistencia, considerados excelentes conductores de calor y aislantes térmicos, pero altamente peligroso para el medio ambiente y la salud del ser humano (Li, Yu, Cui y Wang, 2019; Del Castillo y Orobio, 2020; Xiao, Wang, Wang y x-Yuan, 2021).

El gran aumento de sobrantes mecánicos, como los óleos sintéticos y combustibles, son generadores de contaminación del suelo, ríos y lagos, incitando la destrucción de ecosistemas. Asimismo, la filtración de aceites al suelo produce daños en la vegetación y las fuentes de agua (Yuan, Gao y Cheng, 2022). Debido al impacto perjudicial que originan, debe evaluarse con cuidado, por ejemplo, el aceite quemado de motor que, por el peligro que significa para el medio ambiente, es uno de los principales residuos sometido a estricta regulación (Ivshina *et al.*, 2015).

Por los motivos expuestos previamente, se exploran alternativas para el reuso de este material en distintas aplicaciones. Por ejemplo, en Doha, Qatar se ha recomendado el uso de diferentes tipos de aceite de motor para la construcción de carreteras, con el fin de emplear los recursos de carácter más eficiente y, al mismo tiempo, buscar un rejuvenecedor de mezcla asfáltica. En el estudio se utilizó la metodología Marshall para evaluar la incorporación del aceite de motor en 7 %. Se encontró que el aceite mejora las propiedades mecánicas de la mezcla, tales como la estabilidad, la rigidez y el flujo en un 30 % con respecto a la mezcla patrón. En otras palabras, su estabilidad mejoró de 845 kg a 1098,5 kg (Mamun, Al-Abdul y Dalhat, 2020).

Del mismo modo, en China en la investigación de Li y colaboradores (2020), se estudió el efecto del aceite de motor quemado y se encontró que la dosis recomendada es de 1 % al 4 %, pues en este porcentaje mejoran las propiedades mecánicas como son estabilidad, flujo y rigidez. Sin embargo, al sobrepasar dichos porcentajes no cumpliría con los parámetros instituidos en la metodología Marshall.

En la investigación de Castillo, Yamasqui y Areche (2021), destinada a encaminar el uso de ARM en Ecuador y centrada en el estudio en la conducta mecánica de la mezcla asfáltica, se indica que el aceite funciona como ligante en la mezcla. Se obtuvo como resultado que el óptimo porcentaje de ARM es de 0,48 % y de 4,58 % asfalto, con lo cual se consigue una estabilidad de 1046 kg y flujo de 8,68 mm, valores considerados dentro de lo que establece la norma técnica. Por otro lado, Mohi Ud Din y Mohammad (2021) en China propusieron evaluar el aceite quemado en la mezcla asfáltica mediante la adición de porcentajes entre 15 % y 30 %. Se concluyó que

estos porcentajes no cumplen para satisfacer el valor de la estabilidad de Marshall; mientras que Jia, Huang, Moore y Zhao (2015) en su investigación aseguran que la incorporación de aceite reciclado de motor puede compensar el aumento de rigidez causado por el aglutinante envejecido en pavimento asfáltico reciclado y que reduce la resistencia a las roderas.

El uso de aceite reciclado de motor (ARM) en mezclas asfálticas, podría ser una solución al problema ecológico que estos aceites producen al desecharlos (Sanchez y Tighe, 2018), además de lograr mejoras en las propiedades de la mezcla asfáltica.

Por lo dicho líneas arriba y teniendo en cuenta que el aceite quemado es un agente altamente contaminante (pues un litro de dicho elemento contamina hasta un millón de litros de agua), se considera que al utilizarlo en una mezcla asfáltica se brinda beneficio doble para el medio ambiente al proporcionar, no solo el reciclaje de dicho material contaminante; sino mejorar el rendimiento y la vida útil del pavimento flexible (Kaplan, Kayadelen, Ozturk y Oñal, 2022). Por todo esto, el presente estudio tiene como objetivo estudiar un nuevo diseño de mezcla asfáltica en caliente y evaluar sus propiedades físico-mecánicas al adicionar aceite reciclado de motor (ARM), así como fomentar la reutilización de agentes contaminantes del medio ambiente como es el ARM.

Metodología

Materiales

Agregados

Tanto los agregados gruesos como los finos fueron obtenidos de la cantera Tres Tomas de la provincia de Ferreñafe, en Lambayeque, Perú. La distribución de agregados corresponde al 38 % de grava triturada, que comprende un rango de tamaño entre 19,00 mm (tamiz 3/4") y 4,76 mm (tamiz N°04); 33 % arena chancada, que comprende un rango de tamaño entre 2,38 mm (tamiz N°08) y 0,595 mm (tamiz N°30) y 29 % de arena zarandeada, que comprende un rango de tamaño entre 0,42 mm (tamiz N°40) y

0,074 mm (tamiz N°200). Esta distribución cumple con los límites dispuestos de diseño de mezcla asfáltica MAC-2 (ASTM, 2001a). La cantera se ubica en el distrito de Mesones Muro, aquí se encuentra gran variedad de piedras metamórficas y basa su producción en material de fondo de río, que es arrastrado por el río Loco. Tales agregados son acumulados en grandes cantidades utilizando maquinaria pesada que los procesa y tamiza en tamices hechizos. Ya en el laboratorio, dichos agregados fueron cuarteados y tamizados para cumplimiento de la norma.

Aceite reciclado de motor

El aceite lubricante que es cambiado de motores después de cada 5000 km de recorrido vehicular es un producto derivado de hidrocarburos, resultado de un proceso de refinación e inclusión de aditivos (López, Allauca, Veloz, Zambrano y Guilcapi, 2021). En esta investigación, el ARM fue obtenido de los talleres del parque del mecánico de la provincia de Chiclayo en Perú, quienes se dedican hacer el cambio de aceite a los vehículos, luego lo vierten en cilindros que finalmente son desechados. Para ser utilizado en esta investigación, se obtuvo el aceite directamente de estos depósitos (Figura 1). En esta investigación se utilizó asfalto PEN 60/70.



Figura 1. Aceite reciclado de motor (ARM)

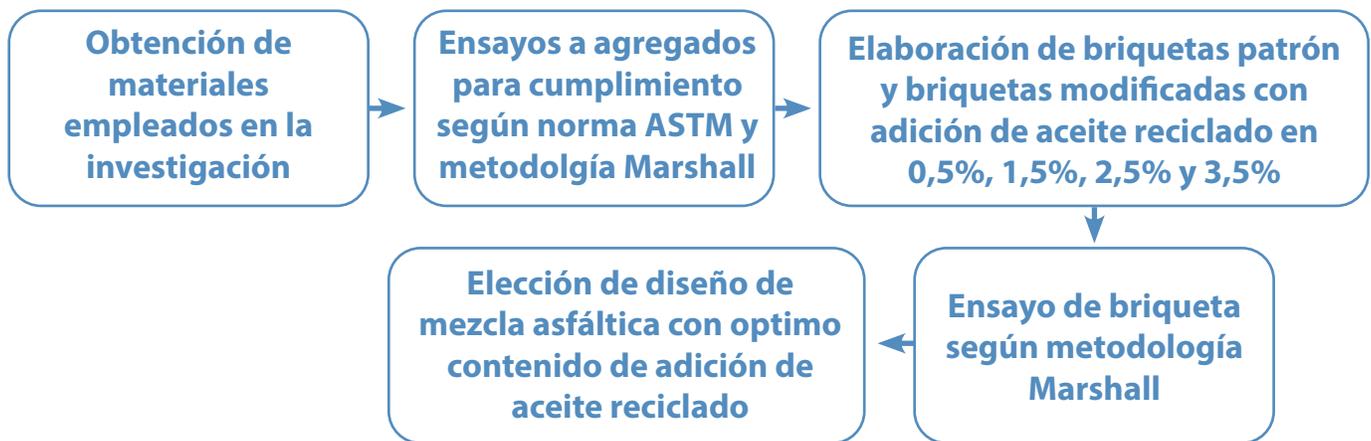


Figura 2. Diagrama de flujo de la investigación

Métodos

El presente artículo se basó en analizar la viabilidad de usar el aceite reciclado de motor para el diseño de mezclas asfálticas, a partir de la evaluación de sus propiedades físicas y mecánicas, se planteó un diseño experimental puro con enfoque cuantitativo-tecnológico (Taherkani y Noorian, 2021) y se desarrolló el proceso metodológico según la Figura 2.

Resultados y discusión

En la mezcla asfáltica se reemplazó 0,5 %, 1,5 %, 2,5 % y 3,5 % sobre el peso total del bitumen con aceites reciclados para ser evaluadas sus propiedades físico-mecánicas, se elaboró tres muestras para cada tipo de tránsito (pesado, medio y liviano) ensayadas a temperaturas de 110, 120 y 130 °C, estas muestras también están en función de los porcentajes de adición de ARM, teniendo un total de 135 muestras sometidas a ensayo (Figura 3).

De las propiedades físicas de los agregados

Los resultados de los ensayos realizados tanto al agregado fino y grueso se muestran en el Cuadro 1 y Cuadro 2, respectivamente.

Del análisis granulométrico, según los parámetros mínimos y máximos establecidos, se obtiene como resultado que los agregados satisfacen la especificación de diseño asfáltico MAC-2, debido a que el tamaño máximo del agregado pasa por el tamiz $\frac{3}{4}$ " y el material fino por el tamiz N° 200, tal como indica la Figura 4.

A partir del resultado de la metodología Marshall mostrado en el Cuadro 3, se puede verificar los parámetros mínimos y máximos permitidos de acuerdo con el Cuadro 5.



Figura 3. a) Muestras a 110 °C; b) a 120 °C; c) a 130 °C

Cuadro 1. Resultados de ensayos realizados al agregado fino

Ensayos	Norma	Requerimiento	Resultados	Observaciones
Equivalente de Arena	ASTM D - 2419	60 % mín.	62,7 %	Cumple
Angularidad del agregado fino	ASTM D - 22	30 % mín.	49,0 %	Cumple
Azul de metileno	AASTHO TP 57	8 % máx.	1,31 %	Cumple
Índice de Plasticidad (malla N°40)	ASTM D - 4318	N.P.	N.P.	Cumple
Índice de durabilidad	ASTM D - 3744	35 mín.	57,6	Cumple
Índice de Plasticidad (malla N°200)	ASTM D - 4318	4 máx.	2,7 %	Cumple
Adhesividad (Riedel Weber)	ASTM D: E 11-70	4 mín.	Grado 6	Cumple
Sales Solubles Totales	ASTM D - 2216	0,5 % máx.	0,06 %	Cumple

Cuadro 2. Resultados de ensayos realizados al agregado grueso

Ensayos	Norma	Requerimiento	Resultados	Observaciones
Durabilidad (al Sulfato de Magnesio)	ASTM C - 88	18 % máx.	7,9 %	Cumple
Abrasión Los Ángeles	ASTM C - 131	40 % máx.	18,4 %	Cumple
Adherencia	ASTM - 4541	> 95	> 95	Cumple
Índice de Durabilidad	ASTM D - 3744	35 % min.	52,9	Cumple
Partículas chatas y alargadas	ASTM - 4791	10 % máx.	7,7 %	Cumple
Caras fracturadas	ASTM D - 5821	85/50	100/97,7	Cumple
Sales Solubles Totales	ASTM D 2216	0,5 % máx.	0,04 %	Cumple
Absorción	ASTM C - 127	1,00 %	0,61 %	Cumple



Figura 4. Curva de combinación granulométrica dentro de los límites de diseño MAC-2

La compactación de la briqueta se ejecutó con 75 golpes por lado o cara del espécimen. Mediante el ensayo para estabilidad y flujo Marshall de mezclas asfálticas, se obtuvo la estabilidad y flujo de las muestras ensayadas, las mismas que cumplen con los requerimientos del Cuadro 5, de la sección 423 (ASTM, 2001b), cuyos discernimientos de aceptación se muestran en el Cuadro 1 y Cuadro 2, respectivamente.

Metodología de Marshall propiedades físico-mecánicas

Del Cuadro 3 se visualiza los resultados para los diferentes contenidos de asfalto (CA), mostrando su estabilidad y rigidez.

Cuadro 3. Resultados obtenidos del ensayo Marshall

Contenido de asfalto, CA (%)	Estabilidad (kg)	Rigidez (kg/cm)
4,5	450	1897
5,0	668	2392
5,5	1101	3431
6,0	1079	3186
6,5	952	2614

Tal como se muestra en el Cuadro 3, las estabilidades máximas 1101 kg y 1079 kg, corresponden al porcentaje de CA 5,5 % y 6,0 %, respectivamente. El óptimo contenido de asfalto se determina por promedio, resultando el porcentaje óptimo de 5,75 %.

Cuadro 4. Valores óptimos para la mezcla con 5,75 % de CA en peso de muestra

Propiedades	Valor
Óptimo contenido de C.A (%)	5,75
Peso unitario (g/cm ²)	2,334
Vacíos (%)	4,0
Vacíos del agregado mineral (%)	14,2
Vacíos llenados de C.A (%)	70,0
Flujo (mm)	3,3
Estabilidad (kg)	1174
Rigidez	3386

Dado el óptimo contenido de asfalto y sus respectivas características mostradas en el Cuadro 4, se muestran también los resultados de la adición de ARM en porcentajes de 0,5 %, 1,5 %, 2,5 % y 3,5 % a las temperaturas de 110 °C, 120 °C y 130 °C, valores que están representados en los gráficos de la Figura 4, Figura 5 y Figura 6 y donde se muestran el flujo, la estabilidad y la relación estabilidad/flujo.

Como se observa en la Figura 5, el flujo para el tránsito pesado se muestra constante al someter las muestras a 130 °C de temperatura para distintos porcentajes de ARM adicionados; sin embargo, la adición del 0,5 % de ARM (a 120° y 130 °C), son constantes en el flujo con 3,30 mm y 3,47 mm, respectivamente. La línea roja indica el máximo flujo permitido.

Como se muestra en la Figura 6, para el tránsito pesado, las probetas con 0,5 % de ARM presentan mejor estabilidad a 120 °C y 130 °C: 884 kg y 1174 kg, respectivamente, comparada con la muestra control de 865 kg y 1002 kg, a las temperaturas indicadas, respectivamente. A diferencia de estas, el valor del resto de muestras están por debajo de la estabilidad de la mezcla con asfalto sin modificar. La línea roja indica el parámetro mínimo de estabilidad.

Como se muestra en la Figura 7, las rigideces para el tránsito pesado de los asfaltos con el 0,5 % de ARM sometidos a 120 y 130 °C, obtuvieron rigideces de 2675 kg/cm y 3409 kg/cm correspondientemente, valores que se hallan por encima de los especímenes patrón. Por otro lado, se consiguió una rigidez de 672 kg/cm perteneciente a la muestra de 3,5 % de ARM a una temperatura de 110 °C, siendo la menor de todos los resultados. Las líneas rojas indican los parámetros entre los cuales deben estar los valores de las muestras ensayadas.

Todos los datos obtenidos y mostrados en la Figura 5, Figura 6 y Figura 7 son validados en conformidad con los parámetros de diseño que establece la metodología Marshall, detallados en el Cuadro 5.

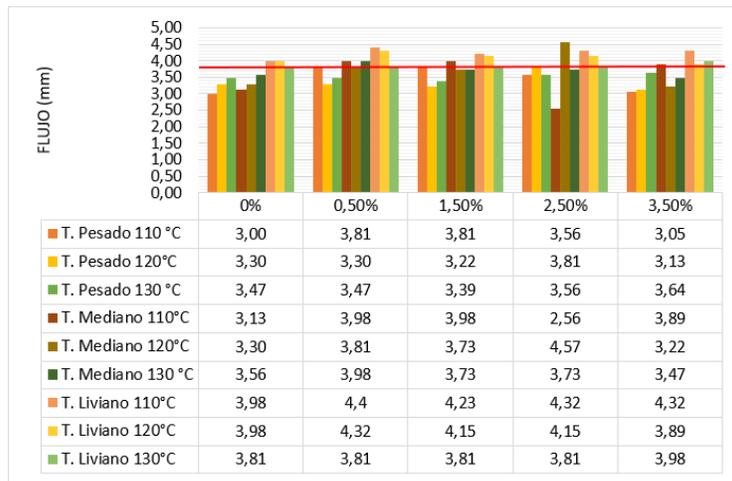


Figura 5. Flujo vs. adición de aceites reciclados para tránsito pesado, tránsito mediano y tránsito liviano

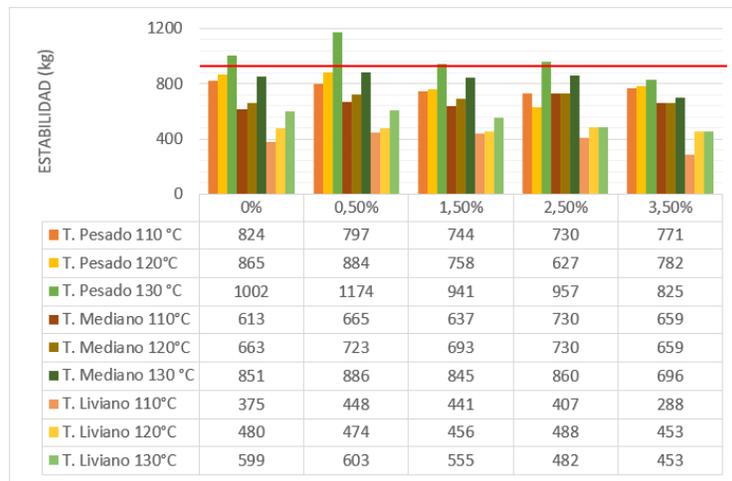


Figura 6. Estabilidad vs. adición de aceites reciclados para tránsito pesado, tránsito mediano y tránsito liviano



Figura 7. Rigidez vs. adición de aceites reciclados para tránsito pesado, tránsito mediano y tránsito liviano

Cuadro 5. Parámetros de diseño Marshall de mezclas asfálticas en caliente

Parámetro de diseño Marshall	Especificaciones
Golpes por cada lado	75
Estabilidad (mínimo)	831,07 kg
Flujo 0.01" (0.25mm)	2 – 3,56
Porcentaje de vacíos con aire	3 - 5
Vacíos en el agregado mineral (mínimo)	14 %
Inmersión – compresión	
Relación polvo – asfalto	0,6 – 1,3
Relación estabilidad/flujo (kg/cm)	1700 - 4000
Resistencia conservada en la prueba de tracción indirecta AASHTO T283	80 min.

Discusión

De los resultados, se obtiene que el porcentaje óptimo de asfalto es de 5,75 % y, con respecto al ARM, el 0,5 % es el porcentaje óptimo, debido a que los valores de rigidez de 2675 kg/cm y 3409 kg/cm, están por encima de las rigideces de las muestras patrón, que son 2621 kg/cm y 2890 kg/cm a 120 °C y 130 °C, respectivamente. Lo anterior es coincidente con Castillo, Yamasqui y Areche (2021), pues su dosificación óptima de ARM es similar a la utilizada en esta investigación (0,48 %), resultando su estabilidad en 1046 kg y su flujo en 8,68 mm. De similar resultado, la investigación de Lopera y Córdova (2013) indica que el aceite de palma incorporado en 1 % a la mezcla asfáltica mejora sus propiedades físicas y mecánicas y satisface los parámetros que establecen la normas y la metodología Marshall. Así mismo, se tiene una relación similar con la investigación de Mamun, Al-Abdul y Dalhat (2019), pues estos concluyen que, al incorporar 7 % de aceite reciclado, la estabilidad de la mezcla resultante mejoró de 845 kg a 1098,5 kg, es así que guarda relación cercana con la presente investigación que, al tener un óptimo contenido de asfalto de 5,5 %, la estabilidad es de 1101 kg. Se tiene también los resultados de Jia, Huang, Moore y Zhao (2015), quienes indican que al incorporar el aceite reciclado de motor puede compensarse el aumento de rigidez establecido dentro del parámetro normativo; sin embargo, al contrario

de todos los investigadores mencionados, Mohi Ud Din y Mohammad (2021) que evaluaron la incorporación de aceite quemado en altos porcentajes (entre 15 % y 30 %), encontraron que dichos porcentajes no satisfacen los parámetros de estabilidad y flujo Marshall.

Conclusiones

Se concluye que:

- El porcentaje óptimo de asfalto es 5,75 % y la adición óptima de aceite reciclado de motor es del 0,5 %, pues la mezcla con estos porcentajes da como resultado valores óptimos según método Marshall, obteniendo una rigidez de 2675 kg/cm, flujo de 3,30 mm y estabilidad de 884 kg, estudiados a temperaturas de 120 °C y, para temperatura de 130 °C, se obtuvo rigidez de 3409 kg/cm, flujo de 3,47 mm y estabilidad de 1174 kg.
- La adición de aceite reciclado cumple únicamente al 0,5 % y para temperaturas de 120 °C y 130 °C, pues a menor temperatura las propiedades físico-mecánicas se ven afectadas negativamente. Del mismo modo, la modificación sólo es aplicable para tránsito pesado, pues para el tránsito liviano y mediano no cumple con los parámetros establecidos por metodología Marshall.

Referencias

- ASTM (2001a). *Flat particles, elongated particles, or flat an elongated particles in coarse aggregate* (ASTM D-4791). West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM (2001b). *Práctica estándar para el muestreo de mezclas de pavimento bituminoso* (ASTM D979-01). West Conshohocken: ASTM International.
- Castillo, S., Yamasqui, R., y Areche, J. (2021). Comportamiento de las propiedades mecánicas de material reciclado de mezcla asfáltica con aceite de motor. *Polo del Conocimiento*, 6(10), 627-648. DOI:10.23857/pc.v6i10.3228
- Del Castillo, R., y Orobio, A. (2020). Investigación exploratoria sobre el efecto del aceite de motor usado en el suelo fino de subrasante. *Informes de la Construcción*, 72(558), e336. DOI: 10.3989/ic.69016
- Fox, M. (2016). The marketing, distribution and use of petroleum fuels. Environmental Technology in the Oil Industry. En: Orszulik, S. (eds) *Environmental Technology in the Oil Industry* (pp. 393 – 437). Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-24334-4_12
- Mohi Ud Din, I., y Mohammad, S. M. (2021). Laboratory study on the use of reclaimed asphalt pavement and copper slag in warm mix asphalt pavements using waste engine oil as a rejuvenator. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 547-559. DOI: 10.1007/s42947-021-00036-y
- Ivshina, I., Kuyukina, M., Krivoruchko, A., Elkin, A., Makarov, S., Cunnigham, C., Peshkur, T., Atlas, R., y Philip, J. (2015). Oil spill problems and sustainable response strategies through new technologies. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 17(7), 1201-1219. DOI: 10.1039/c5em00070j
- Jia, X., Huang, B., Moore, J., y Zhao, S. (2015). Influence of waste engine oil on asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12), 1-9. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001292
- Kaplan, E., Kayadelen, C., Ozturk, M., y Oñal, Y. A. (2022). Experimental evaluation of the usability of palm tree pruning waste (PTPW) as an alternative to geotextile. *Revista de la Construcción*, 21(1), 69-82. DOI: 10.7764/RDLC.21.1.69
- Li, J., Yu, M., Cui, X., y Wang, W. (2019). Properties and components of recycled engine oil bottom rejuvenated asphalt and its grey relationship analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*, 19(1), 1-12. DOI: 10.1155/2019/2462487
- Li, H., Zhang, F., Feng, Z., Li, W., y Zou, X. (2020). Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 276, 1-14. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122138
- Lopera, C., y Córdova, J. (2013). Warm mix asphalt design from mix asphalt and crude palm oil. *Dyna*, 80(179), 99-108. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v80n179/v80n179a11.pdf>
- López, J., Allauca, F., Veloz, F., Zambrano, T., y Guilcapi, J. (2021). Energy recovery of the lubricating oil used in thermal combustion systems of the ecuadorian cement industry. *Revista Digital NovasinerGía*, 1(2), 60-69. DOI: 10.37135/unach.ns.001.02.07
- Mamun, A., Al-Abdul Wahhab, H.I. y Dalhat, M.A. (2020). Comparative evaluation of waste cooking oil and waste engine oil rejuvenated asphalt concrete mixtures. *Arabian Journal Science and Engineering*, 45, 7987–7997. DOI: 10.1007/s13369-020-04523-5

- Modibbo, S., Hartadi, M., Napiah, M., Usman, A., Batari, A., Yusri, M., y Aliyu, N. (2021). Optimization of rubber seed oil content as bio-oil rejuvenator and total water content for cold recycled asphalt mixtures using response surface methodology. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00561. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00561
- Quillos, S., Calderon, L., Escalante, N., y Nahui, J. (2021). Effect of the discharge of residual oils on the quality of the soil in the automotive workshops of the City of Chimbote. *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 23, 1-8. DOI: 10.18687/LACCEI2021.1.1.246
- Sanchez, X., y Tighe, S. (2018). Steps towards the detection of reclaimed asphalt pavement in superpave mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 20(5), 1201-1214. DOI: 10.1080/14680629.2018.1428218
- Taherkani, H., y Noorian, F. (2021). Investigating the Creep and Fatigue Properties of Recycled Asphalt Concrete Containing Waste Engine and Waste Cooking Oil. *Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials. ISBM 2020. RILEM Bookseries*, vol. 27. DOI: 10.1007/978-3-030-46455-4_146
- Thomas, C., Nsonwu, A., Usoro, C., Agoro, E., y Idenyi, A. (2021). Hepato-renal toxicities associated with heavy metal contamination of water sources among residents of an oil contaminated area in Nigeria. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 111988. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.111988
- Xiao, Y., Wang, W., Wang, W., y Yuan, D. (2021). Viscoelasticity evaluation of regenerated asphalt containing waste engine oil based on rheological analysis. *Earth and Environmental Science*, 643(1), 1-9. DOI: 10.1088/1755-1315/643/1/012075
- Yuan, L., Gao, Y. C., y Cheng, F. (2022). The influence of oil exploitation on the degradation of vegetation: A case study in the Yellow River Delta Nature Reserve, China. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102579. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102579

Los contenidos de este documento, representan insumos dentro de un proceso de gestión del conocimiento que, por sí mismos, a priori, no constituyen una declaración de una normativa, procedimiento, criterio o herramienta oficial de acatamiento obligatorio en la gestión de proyectos de obra vial pública de Costa Rica, por parte del LanammeUCR. Cualquier posición oficial para Costa Rica sobre aspectos puntuales contemplados en este documento, se realizarán por los medios que corresponden, según los lineamientos de la Universidad de Costa Rica, de la Ley 8114 y su Reglamento al Art 6 (Decreto 37016 – MOPT).