

Physical and mechanical behavior of hot mix asphalt mixtures incorporating WEO

Percy Ronaldo Plasencia Velasquez, Bachiller¹, Miler Ivaner Rodriguez Horna, Bachiller¹,
Marco Antonio Cerna Vasquez, Magíster¹, Segundo Eloy Soto Abanto, Doctor¹ y Elmis Jonatan García Zare,
Doctor¹

¹Universidad César Vallejo (UCV), Perú, pplasencia@ucvvirtual.edu.pe, mrodriguezho@ucvvirtual.edu.pe,
mcernav@ucvvirtual.edu.pe, ssotoa@ucv.edu.pe, ejgarciaz@ucvvirtual.edu.pe

Abstract – *There is a complex environmental problem due to the inadequate treatment of industrial waste. The main drawback corresponds to storage, since there are no spaces to be disposed of. One of the pillars of the 2030 agenda corresponds to responsible production and consumption (SDG 12), being the justification that motivated the research on asphalt incorporating different percentages of WEO burned engine oil. Two hot mix asphalt designs were carried out, the first design to determine the optimum percentage of asphalt cement to be used and the second design to determine a hot mix asphalt with the incorporation of burnt oil from vehicle engines in percentages of 1.00%, 1.25%, 4.00% and 7.00%. There were 27 briquettes made to evaluate the stability, flow and density by means of the Marshall test. In addition, 12 normative tests of the Ministry of Transport and Communications were carried out for the fine and coarse aggregates used. The results indicated that the optimum percentage of PEN 85/100 asphalt cement is 6.50%, and considering the different percentages of WEO incorporation, they present stable values with an addition of 4.00%. From an economic analysis, the incorporation of WEO in the MAC raises production costs compared to the conventional mix, but from an environmental analysis it is highly favorable for its reuse at the national level.*

Keywords— *WEO, Pollution, Marshall, Asphalt*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas en caliente incorporando WEO

Percy Ronaldo Plasencia Velasquez, Bachiller¹, Miler Ivaner Rodriguez Horna, Bachiller¹,
Marco Antonio Cerna Vasquez, Magíster¹, Segundo Eloy Soto Abanto, Doctor¹ y Elmis Jonatan García Zare,
Doctor¹

¹Universidad César Vallejo (UCV), Perú, pplasencia@ucvvirtual.edu.pe, mrodriguezho@ucvvirtual.edu.pe,
mcernav@ucvvirtual.edu.pe, ssotoa@ucv.edu.pe, ejgarciaz@ucvvirtual.edu.pe

Resumen– Se vive un complejo problema medioambiental debido al inadecuado tratamiento de los residuos industriales. El principal inconveniente corresponde al almacenamiento, ya que no se tienen espacios para ser desechados. Uno de los pilares de la agenda 2030 corresponde a la producción y consumo responsable (ODS 12), siendo la justificación que motivó a realizar la investigación en asfalto incorporando diversos porcentajes de aceite quemado de motor WEO. Se realizaron dos diseños de mezcla asfáltica en caliente, siendo el primer diseño para determinar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico a utilizar y el segundo diseño para determinar una mezcla asfáltica en caliente con la incorporación de aceite quemado de motor de vehículo en porcentajes de 1.00%, 1.25%, 4.00% y 7.00%. Fueron 27 briquetas realizadas para evaluar la estabilidad, flujo y densidad mediante el ensayo de Marshall, adicional a ello se realizaron 12 ensayos normativos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones para los agregados finos y gruesos utilizados. Los resultados indicaron que el porcentaje óptimo de cemento asfáltico PEN 85/100 es del valor de 6.50% y considerando los diversos porcentajes de incorporación de WEO, presentan valores estables con una adición al 4.00%. Desde un análisis económico, la incorporación de WEO en la MAC eleva los costos de producción en comparación a la mezcla convencional, pero desde un análisis medioambiental es sumamente favorable para su reutilización a nivel nacional.

Palabras clave — WEO, Contaminación, Marshall, Asfalto

I. INTRODUCCIÓN

Se vive un complejo problema medioambiental debido al inadecuado tratamiento de los residuos industriales. El principal inconveniente corresponde al almacenamiento, ya que no se tienen espacios para ser desechados. En lo que respecta al aceite de motor estos presentan dentro de su composición metales pesados como el plomo o el cadmio que son focos de contaminación latente para el medio ambiente [1].

En el Perú, durante el periodo 2021, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) ha incorporado más de 239 kilómetros de carreteras pavimentadas, equivalente al 83.7% a la Red Vial Nacional [2]. Así mismo, se han realizado trabajos de mejoramiento y rehabilitación en 900 km de carreteras (MTC, 2022). Como se puede apreciar, la cantidad y calidad de las vías nacionales exigen elaborar proyectos que optimicen el uso de recursos con el medio ambiente. Es este sentido, el Waste Engine Oil (WEO) o aceite quemado de

motor, puede ser una alternativa de solución para la construcción y mantenimiento de las carreteras, para evitar la diferentes patologías y la fatiga por envejecimiento y así reducir los costos de mantenimiento y prolongar su vida útil del pavimento.

En América Latina se han realizado estudios donde se adiciona WEO en mezclas de asfalto, tal es el caso de uno realizado en el Ecuador donde se analizó las propiedades mecánicas de mezclas de asfalto con adiciones del 0% al 2% de aceite de motor en peso, considerando los ensayos de estabilidad según flujo según la Norma ASTM D1559. Se estableció que el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla convencional es 6,07, mientras que el porcentaje óptimo de las mezclas modificadas con aceite de motor usado en 1 y 2 por ciento fueron 6,35 y 6,42. Como se observa en este estudio los parámetros de estabilidad son adecuados pero los valores de flujo son elevados [3].

Por otro lado, en Colombia, en estudios se ha evaluado las propiedades mecánicas y físicas en mezclas asfálticas que contienen materiales vírgenes y materiales reciclados como el pavimento asfáltico reciclado (RAP), considerando valores del 0%, 3% y 5% de aceite quemado de motor. Los resultados indicaron que estas adiciones tienen un efecto importante ya que parámetros de flujo y la relación de estabilidad-flujo, no cumplieron la normativa Invias, en cambio el ensayo de estabilidad sí cumplió en exceso, concluyendo que la incorporación del aceite quemado de motor reduce la rigidez de la mezcla siendo negativo su uso [4].

En otros estudios, se ha abordado el reciclaje de pavimento, evaluando 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; concluyendo que todas las mezclas de asfaltos (nuevo y envejecido) y WEO según su viscosidad quedan catalogados con grado de penetración 40-50, pero para obtener una mezcla con grado de penetración de 60-70 sería necesario adicionar proporciones de WEO entre 5.7% y 7.0% [5]. Para el caso de tránsito de bajo volumen, los especialistas en asfalto [6], validándose en una mezcla asfáltica densa caliente mediante la Norma MDC19 INVIAS 2013 establecen un porcentaje recomendado entre 5 y 10 por ciento de contenido de aceite residual de motor. Lo que difiere en lo indicado por [3] quien

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

afirmó que al incluir 2% de aceite de motor usado, existe desprendimiento de los agregados, es decir pierden adherencia al momento de ejecutar los ensayos de estabilidad en comparación a la mezcla patrón y modificada al 1%. Esto determina que los valores de flujo no cumplen los requerimientos de la norma Nevi-12. El objetivo de la presente investigación es determinar el comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas en caliente (MAC) incorporando WEO en diversos porcentajes. Con todo ello, se estará cumpliendo uno de los objetivos de desarrollo sostenible correspondiente a producción y consumo responsable (ODS 12) ya que se reducirá la contaminación y abrirá una gestión eficiente de residuos al reutilizar materiales de desecho.

II. MARCO TEÓRICO

A. Características del asfalto

Se puede indicar 05 puntos importantes que debemos tener en consideración [7]:

1) *Agglomerante*: Los asfaltos tienden a variar su viscosidad dependiendo a la temperatura, de tal modo, si esta aumenta, el asfalto llega a convertirse en una sustancia fluida permitiéndole adherirse y envolver con mucha facilidad a los agregados, al mismo tiempo que los aglomera. La propiedad aglomerante que posee el asfalto aumenta al enfriarse, y la superficie de contacto entre partículas se incrementa con la compactación, de este modo se da lugar a una mezcla asfáltica con características particulares para la construcción de las diferentes capas que componen la estructura del pavimento.

2) *Estabilizante*: Al utilizar el asfalto como agente estabilizador en materiales granulares, se obtiene una alta estabilidad, por lo que es considerado al igual que el cemento y la cal.

3) *Impermeabilizante*: Al recubrir con asfalto los materiales granulares, se forma una capa impermeable logrando impedir el paso del agua y se consigue rellenar los huecos dejados por estos, obteniéndose así materiales totalmente impermeables.

4) *Trabajabilidad*: Por sus propiedades, el asfalto, al ser calentado se convierte en una sustancia fácil de mezclar, colocar y compactar.

5) *Resistencia a los agentes atmosféricos*: El asfalto es insoluble en agua, por lo que las mezclas asfálticas no generan compuestos contaminantes por lixiviación y su composición permanece inalterable con el tiempo. La evaporación de sus componentes más volátiles y la oxidación hacen que el asfalto pierda tenacidad y se vuelva un producto más frágil, por ello es necesario tener en cuenta su envejecimiento causado por la acción del oxígeno del aire y los rayos ultravioleta, sin embargo, el mayor envejecimiento y oxidación que experimenta el asfalto se da durante su fabricación y puesta en obra

B. Mezclas asfálticas en caliente (MAC)

Son aquellas que por lo regular están formadas por la combinación de agregados pétreos cubiertos por una película

uniforme de cemento asfáltico. para poder realizar de buena manera la mezcla de estos materiales tanto los agregados pétreos como el cemento asfáltico deben ser calentados antes de proceder a mezclarlos, esto con el fin de utilizar agregados secos que favorezcan la adherencia entre el asfalto y los agregados, y para obtener la fluidez y trabajabilidad deseada del cemento asfáltico. En forma general, este tipo de mezcla está formada en un rango que oscila entre el 93% y 97% de agregados pétreos y un 3% a 7% de asfalto respecto de la masa total de la mezcla. Las propiedades relativas de cada material influyen sustancialmente en las propiedades físicas que determinan el comportamiento y desempeño funcional de la mezcla [8].

C. Agregados pétreos

Conglomeración de partículas de gravas, arenas y finos (naturales o triturados). Las partículas con diámetro de 6.4 cm a 2mm se les conoce como grava y aquellas que están en el rango de 2 mm a 0.075mm se les reconocen como arenas (gruesas y finas) Dentro de la mezcla asfáltica, los agregados conforman entre el 88% y 96% de la masa total y más del 75% del volumen de la mezcla. Por otro lado, dentro de la carpeta asfáltica los agregados pétreos soportan las cargas del tránsito vehicular y se transmiten en menor proporción a las capas por debajo de la carpeta de rodadura. Los agregados deben poseer una granulometría adecuada al uso y deben cumplir con los requerimientos mínimos de calidad de acuerdo a la normativa vigente. La gradación de los agregados según el uso granulométrico para mezclas asfálticas en caliente se clasifica en MAC-1, MAC-2, MAC-3 en base al Manual de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción. La curva granulométrica del agregado debe cumplir los parámetros y puntos de control y fuera de la zona delimitada. Además, la curva debe pasar por debajo de la zona delimitada [9].

TABLA I

GRADACIÓN PARA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (MAC)

| Tamiz | Porcentaje que pesa | | |
|-----------------|---------------------|---------|---------|
| | MAC - 1 | MAC - 2 | MAC - 3 |
| 25.0 mm (1") | 100 | - | - |
| 19.0 mm (3/4") | 80-100 | 100 | - |
| 12.5 mm (1/2") | 67-85 | 80-100 | - |
| 9.5 mm (3/8") | 60-77 | 78-88 | 100 |
| 4.75 mm (4") | 43-54 | 51-68 | 65-87 |
| 2.00 mm (10") | 29-45 | 38-52 | 43-61 |
| 425 um (N.º 40) | 14-25 | 17-28 | 16-29 |
| 180 um (N.º 80) | 8-17 | 8-17 | 9-19 |
| 75 um (N.º 200) | 4-8 | 4-8 | 5-10 |

Fuente: Manual de carreteras (2013, p. 561)

D. Cemento asfáltico

Se aplica la norma ASTM D-946 (Clasificación Estándar por grado de penetración para cementos asfálticos utilizados en pavimentación). Esta abarca los siguientes grados de penetración: Cemento Asfáltico 60/70 PEN, Cemento Asfáltico 85/100 PEN, Cemento Asfáltico 120/150 PEN. Este método se efectúa dejando penetrar una aguja dentro una muestra de asfalto bajo una carga dada. La distancia que penetra el agua en la muestra en un tiempo determinado es medida en décimas de milímetros (0.1 mm) [10].

E. Método Marshall

Fue creado por Bruce Marshall, con el que se define el contenido óptimo de cemento asfáltico para un determinado conjunto de agregados; el procedimiento, además de determinar dichos objetivos, también facilita la información de las características específicas de la MAC, estableciendo la densidad y el contenido óptimo de los vacíos, cumpliendo con los requerimientos normativos. Dicho procedimiento solo se aplica en las MAC, en las cuales se utiliza el cemento asfáltico con una clasificación de penetración o viscosidad y los agregados contenidos no exceden de 25.00 mm. Para ello, se utilizan probetas de 64 mm de espesor y 103 mm de diámetro. Lo más relevante del diseño de Marshal es la extracción de un ensayo de la relación de vacíos, flujo y estabilidad, consistencia de las muestras realizadas [11].

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Agregados

Los materiales pétreos se recolectaron de una zona nueva de explotación como es la cantera San Martín del sector La Soledad, Región de La Libertad. Esta se encuentra localizada en el kilómetro 585 de la Ruta Nacional PE-1N (Panamericana Norte).

B. Aceite de motor quemado (WEO)

En cuanto al WEO fue proporcionado por la empresa Nexen Tire ubicada en la ciudad de Trujillo. Estos fueron debidamente seleccionados y se transportaron al Laboratorio de Materiales Cerámicos de la Universidad Nacional de Trujillo, para ser considerados en el diseño MAC (mezcla asfáltica en caliente). Los resultados obtenidos fueron de mucha importancia para la operación y conservación de 242.61 km por parte de la concesionaria Autopista del Sol en el tramo de Trujillo – Chiclayo.

C. Muestra

En la presente investigación se consideraron quince briquetas de cemento asfáltico (CA) para la muestra patrón y doce briquetas de cemento asfáltico para las muestras modificadas de 1%, 2.5%, 4% y 7% considerando WEO.

E. Normativa vigente

En cuanto a los ensayos se ha cumplido con las exigencias reglamentarias mínimas de la norma de Especificaciones

Técnicas Generales para Construcción de Carreteras (EG-2013) del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) y en concordancia con las normas internacionales del *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Se analizaron las características de estabilidad, flujo, densidad y porcentaje de vacíos del asfalto mediante el ensayo Marshall (E504) y para lo que corresponde al análisis de los agregados finos y gruesos, se realizaron los ensayos de granulometría (E204), equivalente de arena (E114), absorción y peso específico (E205), abrasión los ángeles (E207), durabilidad al sulfato de magnesio (E209), caras fracturadas (E210), sales solubles (E219), partículas chatas y alargadas (E221) e índice de durabilidad (E214).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Caracterización de los agregados y cemento asfáltico (CA)

Para una adecuada elaboración del diseño de briquetas de asfalto es necesario conocer la buena calidad del agregado mediante ensayos físicos y mecánicos. Para iniciar este procedimiento, primero se evidenció que la granulometría de los agregados cumple con los estándares de gradación de las siguientes normas: Norma ASTM C136 y MTC E204. Podemos observar estos detalles en la Figura 1 y Figura 2.

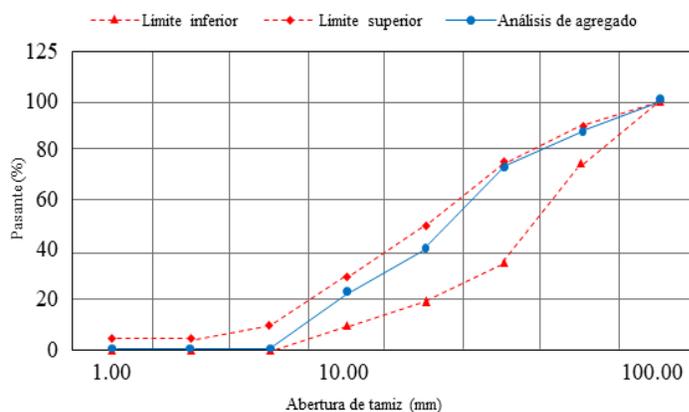


Fig. 1. Curva granulométrica del agregado grueso

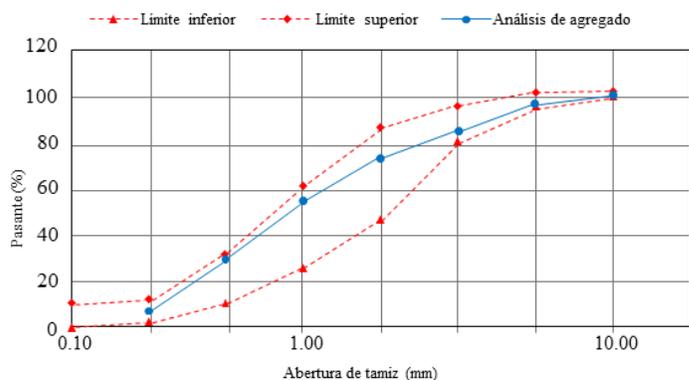


Fig. 2. Curva granulométrica del agregado fino

Se evidencia el cumplimiento de las características del agregado fino y grueso (Tablas II y III); en el caso del ensayo de sales soluble totales es necesario que el material sea lavado previamente o en su defecto, se le aplique un aditivo para reducir el porcentaje excesivo. Bajo esas condiciones, los agregados han sido considerados para el ensayo Marshall.

TABLA II
REQUERIMIENTOS NORMATIVOS DEL AGREGADO GRUESO

| Ensayo de materiales | Código MTC | Unidad | Condición Normativa | Resultado obtenido |
|------------------------------------|------------|--------|---------------------|--------------------|
| Absorción en agregados | E206 | % | 1.00 (mínimo) | 1.25 |
| Abrasión de los ángeles | E207 | % | 40.00 (máximo) | 26.90 |
| Durabilidad al sulfato de magnesio | E209 | % | 18.00 (máximo) | 0.57 |
| Partículas fracturadas | E210 | - | 85/50 | 9.20 |
| Índice de durabilidad | E214 | % | 35.00 (mínimo) | 38.60 |
| Sales solubles totales | E219 | % | 0.5 (máximo) | 0.57 |
| Adherencia | E517 | % | 95 (mínimo) | 96.00 |

TABLA III
REQUERIMIENTOS NORMATIVOS DEL AGREGADO FINO

| Ensayo de materiales | Código MTC | Unidad | Condición Normativa | Resultado obtenido |
|------------------------|------------|--------|---------------------|--------------------|
| Equivalente de arena | E114 | % | 60.00 (mínimo) | 92.90 |
| Absorción en agregados | E205 | % | 0.50 (máximo) | 0.47 |
| Índice de durabilidad | E214 | % | 35.00 (mínimo) | 94.00 |
| Sales solubles totales | E219 | % | 0.50 (máximo) | 0.57 |

Para determinar las especificaciones del ligante asfáltico se consideró la temperatura según zona de estudio y se ha usado asfalto de grado PEN 85/100. Los resultados fueron comparados con la normativa vigente, siendo favorables (Tabla 3).

TABLA IV
ESPECIFICACIONES DEL LIGANTE (NORMATIVA VIGENTE)

| Ensayo de materiales | Código ASTM | Unidad | Condición Normativa | Resultado obtenido |
|---|-------------|--------|---------------------|--------------------|
| Penetración a 25°C, 100gr.5 seg. 0.1 mm | D5 | - | 85-100 | 92.00 |
| Ductilidad a 25°C, 5 cm/min | D113 | - | 100 (mínima) | 150.00 |
| Punto de Inflamación | D92 | - | 232.00 (mínimo) | 270.00 |
| Solubilidad en Tricloroetileno | D-2042 | % | 99.00 (mínima) | 99.70 |
| Susceptibilidad Térmica | D-1754 | % | +/- 1 | 0.60 |

B. Diseño de mezclas asfálticas y método Marshall

Para la elaboración y distribución del material para las 27 briquetas se consideró un peso individual aproximado de 1200 gramos entre agregado grueso, fino, cemento asfáltico y el aceite quemado de motor de vehículo. Este material fue colocado en un recipiente normativo y compactado con 75 golpes por ambos lados, al ser considerado para un tránsito pesado (Fig.3). Las briquetas se dejan enfriar a temperatura ambiente, para luego retirar el molde y dejarlas en reposo por espacio de 24 horas. Posteriormente, las briquetas patrón y modificada se introducen en agua por un tiempo aproximado de 30 minutos, después de esto, se procede con el pesaje por desplazamiento y al aire. Finalmente, las briquetas son colocadas en baño maría por un tiempo de 30 minutos a una temperatura de 60° C y luego están en reposo por 30 minutos, estando en condiciones para la rotura de las mismas.



Fig. 3. Briqueta diseñada para tránsito pesado

Considerando la metodología Marshall, se establecieron cinco (5) diseños de mezcla con distintos contenidos de asfalto con valores del 4.5% a 6.5% con un incremento del 0,5%, con el objetivo de encontrar el porcentaje óptimo de cemento asfáltico (Fig.4).



Fig. 4. Ensayo de Compresión Axial en la briqueta a temperatura de 60°C

Los resultados de los factores de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos se muestran a continuación (Tabla 4).

TABLA V
RESULTADOS DE ENSAYOS DE MEZCLA ASFÁLTICA CON CEMENTO ASFÁLTICO.

| Código | CA en peso de mezcla (%) | Vacíos (%) | Estabilidad (kn) | Flujo (mm) |
|--------|--------------------------|------------|------------------|------------|
| DP-A1 | 4.5 | 4.26 | 4.85 | 4.29 |
| DP-A2 | | | 3.11 | 3.52 |
| DP-A3 | | | 5.94 | 5.91 |
| DP-B1 | 5.0 | 3.69 | 6.11 | 6.18 |
| DP-B2 | | | 5.11 | 6.41 |
| DP-B3 | | | 6.05 | 7.08 |
| DP-C1 | 5.5 | 3.56 | 7.19 | 7.26 |
| DP-C2 | | | 5.18 | 8.04 |
| DP-C3 | | | 5.84 | 7.81 |
| DP-D1 | 6.0 | 3.00 | 7.56 | 9.51 |
| DP-D2 | | | 7.90 | 9.88 |
| DP-D3 | | | 7.74 | 8.79 |
| DP-E1 | 6.5 | 3.81 | 8.57 | 8.64 |
| DP-E2 | | | 8.63 | 8.29 |
| DP-E3 | | | 8.47 | 7.97 |

En concordancia con los requisitos para mezclas de concreto bituminoso según el parámetro de Diseño Marshall MTC E504 (ASTM D1559), el porcentaje óptimo de ligante asfáltico PEN 85/100 corresponde a 6.5%. Como se puede evidenciar, los valores de estabilidad promedio de 8.56 kn (mínimo 8.15kn) y flujo promedio de 8.30 mm (entre 8 y 14) cumplen con los rangos y exigencias mínimas. Con los datos obtenidos anteriormente se procedió a elaborar las briquetas de asfalto con 4 porcentajes de aceite quemado incorporados a la MAC modificada (A, B, C y D).

TABLA VI
RESULTADOS DE ENSAYOS DE MEZCLA ASFÁLTICA CON WEO

| Código | WEO (%) | Vacíos (%) | Estabilidad (kn) | Flujo (mm) |
|--------|---------|------------|------------------|------------|
| DM-A1 | 1.0 | 4.79 | 8.25 | 11.60 |
| DM-A2 | | | 8.67 | 11.94 |
| DM-A3 | | | 8.51 | 11.79 |
| DM-B1 | 2.5 | 4.55 | 8.94 | 11.12 |
| DM-B2 | | | 9.18 | 11.27 |
| DM-B3 | | | 8.97 | 11.08 |
| DM-C1 | 4.0 | 4.83 | 9.35 | 10.71 |
| DM-C2 | | | 11.52 | 9.28 |
| DM-C3 | | | 10.24 | 9.54 |
| DM-D1 | 7.0 | 5.48 | 10.54 | 9.28 |
| DM-D2 | | | 12.67 | 8.64 |
| DM-D3 | | | 12.76 | 8.67 |

Para este caso, analizando los valores promedios se tiene que los 4 porcentajes (A, B, C y D) del factor de estabilidad (mínimo 8.15kn) y flujo (entre 8 y 14) cumplen con la normativa EG y ASTM. En cambio, solo cumplen 3 porcentajes (A, B y C) referente al factor de porcentaje de vacíos (entre 3 y 5).

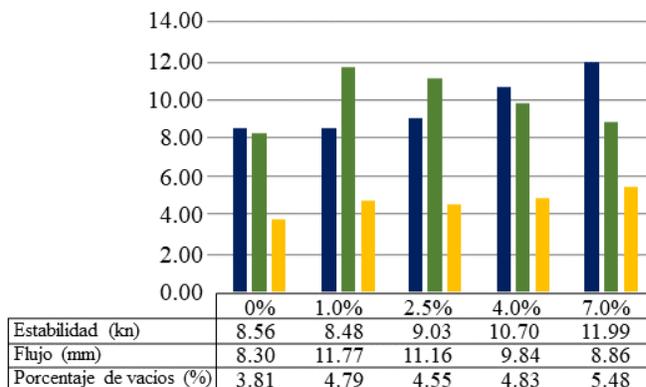


Figura 5. Comparativo de muestra patrón y modificada de asfalto

Cabe destacar que en el comparativo de resultados (Fig.5) se evidencia que al incrementar el porcentaje de WEO a la mezcla asfáltica los valores de estabilidad comienzan a elevarse, en cambio hay una reducción significativa constante en los valores de flujo.

Adicionalmente, ciertos valores se acercan a los extremos de los rangos establecidos por la normativa, como es el caso de la estabilidad para las incorporaciones del 1.00% y 2.50% (8.48 y 9.03 respectivamente) y para el flujo para la incorporación del 7.00% (8.86). De lo expuesto se establece que el porcentaje adecuado corresponde al 4% de WEO.

Es necesario recalcar que según [6] indican que el porcentaje de incorporación de WEO es de 5% y 10%, mientras para [5], recomienda los valores entre 5.7% y 7%; siendo estos valores congruentes con nuestra investigación que nos arrojó resultados normativos favorables para 4% y 7%.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Desde un análisis económico, la incorporación de WEO en la MAC eleva los costos de producción en comparación a la mezcla convencional, pero desde un análisis medioambiental es sumamente favorable para su reutilización a nivel nacional, ya que al darse un uso correcto se reducirá la contaminación vigente.

El porcentaje óptimo de incorporación de WEO a la mezcla asfáltica es 4% ya que proporciona valores de estabilidad de 10.37 kn, flujo de 9.84mm y el porcentaje de vacíos de 4.83% que cumplen las exigencias y requerimientos de la Norma EG-2013 y ASTM.

Es necesario la implementación de normativas y procesos para la reutilización del WEO de forma exigente en los diseños de mezclas asfálticas en el Perú y LATAM, ya que “las

innovaciones de reciclar y reutilizar materiales de desecho” corresponde a los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030 (ODS – Numero 12).

REFERENCIAS

- [1] Servicios Medioambientales de Valencia. ¿Cuántos litros de agua contamina un litro de aceite usado?, 2018. recuperado de: <https://www.smv.es/la-importancia-reciclar-aceite/>
- [2] P. Gallego; S. Campagnoli. Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP, vol. 1, pp. 109-120, *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, pp. 13-20, 2018. Recuperado de: <https://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci/article/view/34/30>
- [3] C. Martínez. Efectos de la adición de aceite usado de motor en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas en caliente, [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato], 2021. Recuperado de: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/33093>
- [4] Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Provias Nacional entregó 239 kilómetros de carreteras pavimentadas en la Red Vial Nacional, 2022. recuperado de: <https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/574338-provias-nacional-entrego-239-kilometros-de-carreteras-pavimentadas-en-la-red-vial-nacional>
- [5] F. Montealegre; G. Varón; L. Ramos. Impacto del aceite quemado de motor en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas que contienen pavimento asfáltico, [Tesis de grado, Universidad Cooperativa de Colombia], 2018. Recuperado de: <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/6189>
- [6] A. Mosos; C. Mosos; J. Gómez. Estudio de asfaltos y mezclas asfálticas modificadas con aceite residual de motor, [Tesis de grado, Universidad Católica de Colombia], 2018. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/10983/22533>
- [7] S. Caso; G De La Cruz. Diseño de mezclas asfálticas en caliente modificadas con polímeros reciclados HDPE y SBR, para pavimentos en la ciudad de Huancavelica, [Tesis de grado, Universidad Nacional de Huancavelica, Perú], 2021. Recuperado de: <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/2466097d-16e6-451c-8355-1414c2d701d3/content>
- [8] C. Morales. Mezclas asfálticas en caliente utilizando asfalto modificado, revisión y propuesta de especificación, [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala], 2012. Recuperado de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/5116/1/carlos%20arnoldo%20morales%20rosales.pdf>
- [9] P. Santa Cruz. Análisis de nuevas mezclas asfálticas en caliente utilizando material asfáltico reciclado de la Av. Andrés Avelino Cáceres - Provincia de Concepción 2020, [Tesis de grado, Universidad Continental, Perú], 2021. Recuperado de: <http://repositorio.unsa.edu.pe:8080/server/api/core/bitstreams/e9b0c26e-2b20-4516-8c4c-a1fbae876631/content>
- [10] Y. Dávalos. Obtención de mezclas asfálticas mediante la adición de material reciclado: Poliestireno expandido, [Tesis de grado, Universidad Nacional San Agustín, Perú], 2020. Recuperado de: <http://repositorio.unsa.edu.pe:8080/server/api/core/bitstreams/e9b0c26e-2b20-4516-8c4c-a1fbae876631/content>
- [11] P. Plasencia; M. Rodríguez. Diseño de mezcla asfáltica en caliente incorporando aceite quemado de motor de vehículo, Trujillo, [Tesis de grado, Universidad Cesar Vallejo, Perú], 2022. Recuperado de: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/97917>