



**Análisis de la efectividad y sostenibilidad de la inclusión de aceite lubricante usado en
mezcla asfáltica en caliente: Promoviendo la economía circular.**

Maria Jose Robayo Caycedo

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Gestión Ambiental

Asesor

Danny Waldir Ibarra Vega, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Gestión Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Robayo Caycedo, 2024)
Referencia	Robayo Caycedo, M. J. (2024). <i>Análisis de la efectividad y sostenibilidad de la inclusión de aceite lubricante usado en mezcla asfáltica en caliente: Promoviendo la economía circular</i> . [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Gestión Ambiental, Cohorte XVI.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi querida familia y pareja, les dedico este logro con todo mi cariño. Su apoyo incondicional, comprensión y paciencia en este tiempo de formación.

Tabla de contenido

Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción	11
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Justificación	14
3. Objetivos.....	16
4. Marco teórico.....	17
4.1 Aceites lubricantes usados	19
Tabla 1.	20
4.2 Adición a mezclas asfálticas	21
4.3 Efectos sobre la salud y medio ambiente de los Aceites Lubricantes Usados.....	22
4.3.1 <i>Efectos sobre la salud</i>	22
4.3.2 <i>Efectos sobre el medio ambiente</i>	23
5. Metodología	24
5.1 Proceso de investigación.....	24
5.2 Análisis de literatura	24
5.3 Síntesis de resultados	25
5.4 Elaboración de recomendaciones.....	25
6. Resultados.....	26
6.1 Incidencia del WEO en mezclas asfálticas	26
7. Discusión.....	29
8. Conclusiones	32

Referencias..... 33

Lista de tablas

Tabla 1 Características de las mezclas asfálticas 21;**Error! Marcador no definido.**

Lista de figuras

Figura 1 Incidencia del WEO en mezclas finales **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2 Consolidado de variables analizadas frente a especificaciones técnicas dadas en la tabla “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall” - INVIAS..... **¡Error! Marcador no definido.**

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ALU	Aceite Lubricante Usado
APA	American Psychological Association
FAU	Fondo de Aceite Usado
HMA	Mezcla Asfáltica en Caliente
Esp.	Especialista
MSc	Magister Scientiae
Párr.	Párrafo
RAP	Pavimento Asfáltico Reciclado
RESPEL	Residuo Peligroso
UdeA	Universidad de Antioquia
WEO	Waste Engine Oil

Resumen

La creciente preocupación por la sostenibilidad y la gestión eficiente de recursos naturales ha propulsado la búsqueda de alternativas sostenibles en diferentes sectores industriales, incluyendo así la disposición de aceite lubricante usado (ALU), el cual representa un grave problema ambiental si no se maneja adecuadamente. La inclusión de ALU en mezclas asfálticas en caliente (HMA) surge como una importante solución, aunque su evaluación sostenible y técnica requiere evaluación. Limitados estudios han abordado como el ALU impulsa la sostenibilidad y el cumplimiento constructivo en vías. Este trabajo analiza la efectividad de incluir ALU en HMA, destacando la necesidad de una gestión responsable y sostenible de estos residuos peligrosos (RESPEL), para reducir su impacto ambiental y promover un modelo de desarrollo más sostenible, alineado con la economía circular y la reutilización de recursos. Los resultados preliminares indican que la inclusión de ALU puede mejorar la sostenibilidad del sector vial, considerando sus implicaciones a largo plazo en el medio ambiente y la salud pública.

Palabras clave: Aceite lubricante usado, mezcla asfáltica en caliente, residuo peligroso.

Abstract

The growing concern for sustainability and efficient management of natural resources has driven the search for sustainable alternatives in different industrial sectors, including the disposal of used lubricating oil (ALU), which represents a serious environmental problem if not managed properly. The inclusion of ALU in hot mix asphalt (HMA) emerges as an important solution, although its sustainable and technical evaluation requires evaluation. Limited studies have addressed how ALU drives sustainability and constructive compliance in roads. This work analyzes the effectiveness of including ALU in HMA, highlighting the need for responsible and sustainable management of these hazardous waste (RESPEL), to reduce its environmental impact and promote a more sustainable development model, aligned with the circular economy and reuse of resources. Preliminary results indicate that the inclusion of ALU can improve the sustainability of the road sector, considering its long-term implications on the environment and public health.

Keywords: Used lubricating oil, hot asphalt mixes, hazardous waste.

Introducción

La gestión sostenible de residuos industriales peligrosos ha impulsado la investigación hacia soluciones innovadoras, como el aprovechamiento del aceite lubricante usado en la producción de mezcla asfáltica en caliente. Este enfoque busca optimizar tanto la gestión de residuos como las propiedades del asfalto, generando un interés creciente en la comunidad científica y la industria.

Este documento se enfoca en recopilar información y evaluar como la inclusión de aceite lubricante usado (ALU) en mezclas asfáltica en caliente (HMA) puede optimizar tanto la gestión de residuos industriales peligrosos y potenciar propiedades del asfalto.

De acuerdo a la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) en el año 2023 se registraron 186.222 unidades vendidas de vehículos, lo cual conlleva un aumento constante en la generación de ALU, exigiendo alternativas sostenibles para su reutilización. La HMA, comúnmente utilizada en la construcción vial, se presenta como una prometedora aplicación para este residuo, ya que la adición de ALU puede mejorar diversas propiedades del pavimento.

Conforme a información reportada por el Fondo de Aceite Usado (FAU), una sola gota de aceite usado puede contaminar un metro cúbico (1 m³) de agua, y este residuo al disponerse de manera inapropiada causa graves problemas ambientales, contaminando suelos, cuerpos de agua, afectando la biodiversidad y la salud humana. La inclusión de ALU en HMA surge como una solución para abordar esta problemática encaminada con la estrategia de economía circular, pero es crucial.

A lo largo de este escrito se pretende evaluar tanto la efectividad técnica de esta alternativa como su impacto en términos de sostenibilidad y con esto, lograr determinar el impacto ambiental de la inclusión de ALU en HMA. Teniendo en cuenta lo anterior, se busca establecer los beneficios ambientales en el impacto ambiental potencial y los impactos evitados, de la reutilización de ALU en HMA.

La justificación de este estudio radica en la urgente necesidad de encontrar alternativas sostenibles para la gestión de ALU, dado su potencial contaminante y la creciente generación de este residuo. Recientes investigaciones han demostrado que la inclusión de ALU en HMA puede mejorar la viscosidad del asfalto, aumentando su adherencia y resistencia a la fatiga, así como su resistencia térmica y capacidad de recuperación. Estos resultados sugieren que los pavimentos podrían volverse más duraderos. Sin embargo, para garantizar que esta iniciativa sea genuinamente sostenible, es fundamental estandarizar los procesos de reciclaje y realizar evaluaciones a largo plazo de las mezclas asfálticas modificadas con ALU.

1. Planteamiento del problema

La acelerada preocupación por la sostenibilidad y gestión eficiente de los recursos naturales ha impulsado la búsqueda de alternativas renovables con sus residuos en diferentes sectores industriales. Uno de los residuos que presenta este desafío es el aceite lubricante usado (ALU), cuya disposición final inadecuada puede causar graves problemas ambientales debido a su potencial contaminante. Paralelamente, la industria civil estudia el desarrollo de mezcla asfáltica en caliente (HMA) sostenible y duradera.

La inclusión de ALU surge como una solución para abordar la problemática de gestión de residuos. Sin embargo, es crucial evaluar no solo la efectividad técnica de esta alternativa, sino también su impacto en términos de sostenibilidad.

A la fecha, se han publicado pocos estudios que analicen como la adición del aceite lubricante usado influye en la sostenibilidad y al mismo tiempo en el cumplimiento constructivo.

1.1 Pregunta de investigación.

¿Es efectiva la inclusión de aceite lubricante usado en mezcla asfáltica en caliente en cuanto a sostenibilidad y análisis de ciclo de vida desde la extracción de recursos hasta su reutilización?

2. Justificación

El incremento en la generación de residuos, especialmente de aceite lubricante usado, es una consecuencia directa del acelerado desarrollo industrial y económico experimentado en la actualidad. Esta problemática se manifiesta en la falta de conciencia ambiental y en la prevalencia de prácticas informales que afectan negativamente la gestión de estos residuos, contribuyendo a su dispersión y a la contaminación de ecosistemas vitales.

La expansión de la industria automotriz y el aumento del parque vehicular en todo el mundo han llevado a un incremento significativo en la producción de aceites de motor, tanto nuevos como usados. Este aumento en la generación de residuos plantea desafíos importantes en términos de gestión y tratamiento adecuados para evitar impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana.

Además de la falta de conciencia ambiental, la disposición inapropiada de los aceites residuales de motor es otro factor clave que contribuye a esta problemática. Muchas veces, estos residuos son vertidos en suelos, cuerpos de agua o alcantarillas, lo que resulta en la contaminación de ecosistemas terrestres y acuáticos. Esta contaminación no solo afecta la biodiversidad de estos ecosistemas, sino que también pone en riesgo la salud de las comunidades que dependen de ellos para su sustento.

La categorización de los aceites lubricantes usados como residuos peligrosos, de acuerdo con el convenio de Basilea, subraya la gravedad de su impacto en la contaminación del agua. Estos residuos, al entrar en contacto con fuentes hídricas, generan una serie de efectos adversos,

incluyendo la presencia de sustancias tóxicas que ponen en riesgo la salud humana y la de otros seres vivos.

Para abordar este problema de manera efectiva, es necesario no solo aumentar la conciencia ambiental y promover prácticas sostenibles, sino también implementar regulaciones más estrictas para el manejo y disposición de los aceites de motor usados. Además, se requiere el desarrollo de alternativas técnicas viables para el tratamiento y aprovechamiento responsable de estos residuos, con el fin de reducir su impacto negativo en el medio ambiente y promover un modelo de desarrollo más sostenible.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar la efectividad de la inclusión de aceite lubricante usado en mezcla asfáltica en caliente en cuanto a sostenibilidad.

3.2 Objetivos específicos

- Recopilar y resumir la información relevante sobre el uso de aceite lubricante en mezcla asfáltica en caliente, destacando las principales tendencias, hallazgos y conclusiones de estudios anteriores.
- Determinar el impacto generado al ambiente en la inclusión del aceite lubricante usado en mezcla asfáltica en caliente.
- Establecer los beneficios ambientales (impacto ambiental potencial e impactos evitados) de la reutilización de aceite lubricante usado adicionado a mezcla asfáltica en caliente.

4. Marco teórico

En respuesta a diferentes desafíos sociales, económicos y ambientales la economía lineal evoluciona y abre paso a la estrategia de economía circular, la cual brinda una cosmovisión y un enfoque de eficiencia en el aprovechamiento y uso de los recursos naturales, así como, en la minimización de residuos generados, logrando desarrollar una simbiosis industrial.

Existen diferentes puntos de vista del concepto de economía circular, uno de ellos es la definición propuesta por la Fundación Ellen MacArthur:

“Sistemas de producción y consumo que promueven la eficiencia en el uso de materiales, agua y la energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales y la extensión de la vida útil a través de la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible.”

En Colombia, La Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), está acorde a los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para su agenda 2030.

El desarrollo industrial y económico actual induce un aumento en la demanda de materias primas, bienes y/o servicios, lo que provoca un aumento en los residuos que en innumerables ocasiones no se manejan de forma adecuada debido a la informalidad, desconocimiento y deficiencia en alternativas técnicas para su aprovechamiento y disposición final, especialmente en lo asociado a generación de aceite de motor usado.

Fong, Quiñonez y Tejada (2017), refieren que:

Los aceites residuales de motores son un material altamente contaminante, que requiere una gestión responsable; estos pueden causar daños al medio ambiente cuando se vierten en el suelo o en las corrientes de agua incluyendo alcantarillas. Esto puede resultar en la contaminación de las aguas subterráneas y del suelo. El aceite lubricante usado contiene diversos compuestos químicos tales como metales pesados, (cromo, cadmio, arsénico, plomo, entre otros), hidrocarburos aromáticos polinucleares, benceno y algunas veces solventes clorados, bifenilos pliclorados (PCBs), etc. Estos compuestos químicos producen un efecto directo sobre la salud humana y varios de estos productos son cancerígenos.

Los aceites lubricantes usados (ALU), son catalogados como residuos peligrosos de acuerdo al convenio de Basilea y presentan su principal incidencia en la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, volviéndola inaprovechable para la satisfacción de necesidades del ser humano. Estos residuos entran en contacto con las fuentes hídricas por descuido o acción intencionada debido al inadecuado almacenamiento, tratamiento o disposición final.

Con el aceite lubricante usado se han aplicado diversas formas de estrategias desarrollando tecnologías para su reutilización, reduciendo así, la necesidad de extraer recursos vírgenes y minimizando la contaminación. Este también ha sido sometido a la re-refinación dando como resultado un nuevo aceite lubricante, continuando en su ciclo de vida.

Una de estas estrategias son las mezclas bituminosas o asfálticas, que también reciben el nombre usualmente la denominación aglomerados, están formadas por una combinación de áridos y un ligante hidrocarbonado, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película

continua de este. Se fabrican de forma mecánica en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. Las principales características en una mezcla asfáltica son la estabilidad, durabilidad, impermeabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga y resistencia al deslizamiento. (Mosos Aragon et al., 2018)

Mediante diferentes ensayos como el de penetración de los materiales Bituminoso, de los materiales Bituminoso, ensayo Marshall y la evaluación de las características mecánicas de una mezcla convencional y modificada con aceite de motor residual se concluyó que el porcentaje recomendado en este proyecto oscila entre 5 y 10 por ciento de contenido de aceite residual de motor para vías de bajo volumen de tránsito. (Mosos Aragon et al., 2018)

4.1 Aceites lubricantes usados

El aceite de motor desechado de vehículos, mejor conocido como aceite quemado se genera periódicamente por el remplazo obligatorio al recorrer un kilometraje establecido. Generalmente este aceite, al ser sustituido por uno nuevo, se desecha. En el mejor de los casos es recolectado por empresas gestoras de desechos peligrosos o muy contaminantes que lo reciclan con un fin económico, al momento de pasar por un método de re-refinación vuelven a ser comercializados para distintos fines. (Mosos Aragon et al., 2018)

Asfalto y mezclas asfálticas

Se define al asfalto o cemento asfáltico como “un cementante de color marrón oscuro a negro en el que sus componentes predominantes son los asfáltenos que pueden ser naturales u obtenidos como residuo en la refinación del petróleo crudo”. (Mosos Aragon et al., 2018)

Las mezclas bituminosas o (asfálticas, que también reciben el nombre usualmente la denominación aglomerados, están formadas por una combinación de áridos y un ligante

hidrocarbonado, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua de este. Se fabrican de forma mecánica en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. Están formadas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total. (Mosos Aragon et al., 2018)

Tabla 1.

Característica	Definición
Estabilidad	Capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tránsito
Durabilidad	Capacidad para resistir la acción de los agentes climáticos y del tránsito
Impermeabilidad	Resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento.
Flexibilidad	Capacidad del pavimento para acomodarse sin agrietamientos, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante

Resistencia a la fatiga	Resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Expresa la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse
Resistencia al deslizamiento	Capacidad de proveer suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada.

Características de las mezclas asfálticas (Mosos Aragon et al., 2018)

4.2 Adición a mezclas asfálticas

La incorporación de los lodos a las mezclas asfálticas consiste en su adición como material llenante o “filler” en la formulación de capas de rodadura. El material fino que conforma la mayor parte de estos lodos aporta partículas de muy pequeño tamaño que contribuye al logro de una capa de rodadura de condiciones de rodaje más terso. Los metales pesados se incorporan a los poros de los agregados finos de la mezcla, recubriéndose durante el proceso con una capa de asfalto. De esta forma se logra un encapsulamiento de los contaminantes. La cantidad de lodo que puede usarse depende en primer lugar de la clase de suelo presente en la subrasante y en segundo lugar del tipo de obra que se va a realizar. Dependiendo del tipo de ligante que se utilice, la mezcla asfáltica puede ser aplicada in situ, bien en frío o en caliente, para finalmente ser compactada con el vehículo compactador. En el caso de las mezclas asfálticas, al estar estas expuestas a factores ambientales externos que aportan agua, tales como lluvias, condensación, etc., puede producirse un “lixiviado” que eventualmente, si hay fisuras en el recubrimiento asfáltico de los agregados como producto de oxidación por envejecimiento o

por mala aplicación de la mezcla, puede liberar compuestos de metales pesados al ambiente.

Actualmente no hay una posición clara al respecto y se desarrollan investigaciones sobre posible lixiviación de estos compuestos metálicos, especialmente en mezclas asfálticas ya envejecidas.

(Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006)

4.3 Efectos sobre la salud y medio ambiente de los Aceites Lubricantes Usados

4.3.1 Efectos sobre la salud

Además de contener aditivos muy peligrosos y tóxicos, durante su uso, los aceites incorporan a su composición gran cantidad de sustancias peligrosas para nuestra salud como son las partículas metálicas ocasionadas por el desgaste de piezas. Por otra parte, debido a la combustión de motores y por el calentamiento derivado de la fricción entre piezas de maquinaria, se pueden generar una serie de humos y gases. Así pues, entre los efectos directos que pueden tener los aceites sobre la salud se incluyen:

- Irritaciones del tejido respiratorio por la presencia de gases que contienen aldehídos, cetonas, compuestos aromáticos, etc.
- La presencia de elementos químicos como Cl (Cloro), NO₂ (dióxido de nitrógeno), SH₂ (ácido sulfhídrico), Sb (antimonio), Cr (Cromo), Ni (Níquel), Cd (Cadmio), Cu (Cobre) afectan las vías respiratorias superiores y los tejidos pulmonares.
- Producción de efectos asfixiantes, impidiendo el transporte de oxígeno, por contener monóxido de carbono, disolventes halogenados, ácido sulfhídrico, etc.

- Efectos cancerígenos sobre próstata, vejiga y pulmón por presencia de metales como plomo, cadmio, manganeso, etc. (Departamento de medio ambiente de CCOO – Aragón, 2007)

4.3.2 Efectos sobre el medio ambiente

Por lo que se refiere a los efectos directos sobre el medio ambiente se puede destacar su capacidad de contaminación de tierras, ríos y mares por su baja biodegradabilidad:

- Vertidos a las aguas: Originan una película impermeable entre la atmósfera y la superficie acuática que ocasiona una disminución del oxígeno disuelto en el agua. Prácticas como verter aceites a través de los sistemas de alcantarillado, provocan serios daños en las estaciones depuradoras.
- Vertidos en suelos: Recubren el suelo y provocan una disminución del oxígeno. El humus vegetal se va degradando y finalmente ocasiona una pérdida de la fertilidad. Por filtración pueden contaminar aguas subterráneas (contaminación de acuíferos, pozos, etc.).
- Emisiones a la atmósfera: La combustión de aceites usados, provoca emisiones a la atmósfera de metales como el plomo, gases tóxicos (compuestos de cloro, azufre y fósforo) y otros elementos, con los correspondientes efectos. (Departamento de medio ambiente de CCOO – Aragón, 2007)

5. Metodología

La metodología de este escrito adopta un enfoque metodológico mixto abordando los objetivos planteados.

5.1 Proceso de investigación

La obtención de información se lleva a cabo mediante una búsqueda sistemática de artículos académicos, informes técnicos y otras fuentes de información relacionadas con la gestión ALU y su aplicación en la producción HMA. Empleando bases de datos académicas de proyectos piloto desarrollados para demostrar la eficiencia técnica de la HMA, así mismo, literatura relacionada al impacto ambiental potencial por la inadecuada disposición de ALU. Acceder a esta información facilita la recopilación de datos cuantitativos de la efectividad de la inclusión de ALU en HMA y por ende los impactos evitados por la reutilización de ALU, contribuyendo significativamente a las recomendaciones de mejores prácticas en el sector automotriz.

5.2 Análisis de literatura

Luego de recopilada la información, se revisa críticamente los estudios seleccionados para identificar hallazgos y brechas en el conocimiento. La revisión incluye un análisis comparativo y resultados obtenidos con las diferentes metodologías empleadas con la inclusión de ALU en HMA. Se presta atención a los estudios que abordan la sostenibilidad y efectividad de la HHMA con la inclusión de ALU considerando factores como la durabilidad, resistencia y comportamiento mecánico de la mezcla. Además, se evalúan los estudios que examinan el impacto ambiental del ALU usado en HMA. Analizando indicadores ambientales como la

reducción emisiones de gases de efecto invernadero y disminución de residuos peligrosos. Este enfoque permite identificar tanto los beneficios como las limitaciones de esta práctica, proporcionando un punto de vista integral acerca de su viabilidad y contribución a una economía circular.

5.3 Síntesis de resultados

Una vez resumida la información obtenida de los estudios revisados, se destacan los principales hallazgos y conclusiones. Indicando si la incorporación de material reciclado en la construcción de vías puede mejorar la sostenibilidad del sector, reduciendo la dependencia de recursos naturales y disminuyendo la disposición de generación de residuos peligrosos en otros sectores. Se identifican posibles áreas de investigación futuras y se discuten las implicaciones de los resultados para la gestión residuos asociados con la construcción de vías.

5.4 Elaboración de recomendaciones

La formulación de recomendaciones para la implementación de prácticas sostenibles en la gestión de ALU y su integración en la producción de HMA es basada en los resultados de la revisión bibliográfica. En primer lugar, estableciendo un sistema regulatorio robusto que promueva y vigile la recolección, tratamiento y reutilización de ALU, vinculado a indicador de economía circular. Igualmente, el fomento de la colaboración entre las entidades gubernamentales, la industria automotriz y las empresas de construcción para el desarrollo de nuevas tecnologías y teniendo en cuenta la implementación de sistemas de monitoreo que evalúen el impacto de estas prácticas a lo largo del tiempo.

6. Resultados

En los resultados se comunican los hallazgos y descubrimientos del estudio. Se incluyen tablas, figuras, diagramas y demás material demostrativo.

Para obtener la información necesaria y cumplir con el objetivo general, se llevó a cabo la investigación de casos de éxito de la inclusión de aceite lubricante usado (ALU) en mezcla asfáltica en caliente HMA. Se obtuvieron los siguientes resultados. En dicha investigación denominan el aceite lubricante usado (ALU) como waste engine oil (WEO).

6.1 Incidencia del WEO en mezclas asfálticas

Una vez caracterizados los materiales, elaboraron mezclas asfálticas finales siguiendo los parámetros establecidos por una mezcla densa en caliente MDC-19 según INVIAS, incluyendo diferentes porcentajes de WEO (6% y 6,5%), sobre las cuales se determinaron: el porcentaje de vacíos con aire, la estabilidad, el flujo, la relación estabilidad/flujo y la susceptibilidad al agua utilizando el ensayo de tracción indirecta. La inclusión de WEO produjo cambios en las propiedades físico mecánicas de las mezclas finales (ligante + agregados + RAP), de manera general, su efecto consistió en el aumento o la disminución del valor de todas ellas. (Gómez Luengas et al., 2018)

Figura 1.

Parámetro	Inclusión de WEO		Parámetro	Inclusión de WEO	
	6	6.5		6	6.5
Vacíos con Aire (%)	5.11	4.94	Resistencia Seca R_{TS} (kPa)	1,566.71	1,312.62
	4.94	4.50		1,312.62	962.87
Estabilidad Corregida (N)	35,205.47	30,644.79	Resistencia Humeda R_{TH} (kPa)	1,399.04	1,138.10
	30,644.79	25,254.19		1,138.10	790.91
Flujo (mm)	3.76	3.85	RRT (%)	89.44	85.97
	3.85	4.44		85.97	84.51
Relación Estabilidad (kN) /Flujo (mm)	9.50	7.97			
	7.97	5.85			

Incidencia del WEO en mezclas finales (Gómez Luengas et al., 2018)

En cuanto a los parámetros medidos a las mezclas (estabilidad y susceptibilidad al agua), se muestra claramente que al incluir WEO se disminuye la rigidez de la mezcla que es finalmente lo que se busca al incluir un agente rejuvenecedor a las mezclas asfálticas con RAP.

La figura 2 presenta el consolidado de cada una de las variables analizadas, frente a las especificaciones técnicas para una mezcla asfáltica densa en caliente, de acuerdo a “Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall” de INVIAS. (Gómez Luengas et al., 2018)

Figura 2.

Normas de Ensayo	Niveles de Inclusión de WEO		
	0%	6%	6.5%
Vacios con Aire (%)	No cumple	Cumple	Cumple
Estabilidad Marshall Corregida (N)	Cumple	Cumple	Cumple
Flujo (mm)	Cumple	Cumple	No cumple
Relación Estabilidad/Flujo (kN/mm)	No cumple	No cumple	No cumple
Relación de Resistencia a la Tensión Indirecta RRT (%)	Cumple	Cumple	Cumple

Consolidado de variables analizadas frente a especificaciones técnicas dadas en la tabla

“Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall” - INVIAS. (Gómez Luengas et al., 2018)

Se pudo determinar que, de las mezclas analizadas, aquella que más se aproxima a las especificaciones dadas en la tabla 450 - 10 del Art. 450-13 (INVIAS, 2013c) 69 para la categoría de tránsito NT1, es la que contiene 6% de inclusión de WEO, por cumplir con la mayoría de los parámetros definidos por la norma, exceptuando la relación estabilidad/flujo, la cual se podría ajustar, disminuyendo los valores de estabilidad. El uso de aceites lubricantes de desecho en la fabricación de mezclas asfálticas para la construcción de carreteras no genera gastos adicionales en el proceso de producción y de control ambiental (permisos y licencias ambientales), con esto, se quiere aportar una alternativa para la utilización efectiva del RAP en Colombia, obteniendo un material apto para ser reutilizado como capa de rodadura en la realización de proyectos de construcción y mantenimiento de vías secundarias y terciarias a menor costo. (Gómez Luengas et al., 2018)

7. Discusión

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la mezcla que más se aproxima para la categoría de tránsito NT-1 de INVIAS, es la que contiene un 6% de inclusión de ALU. La inclusión de ALU en HMA es una práctica prometedora que no genera gastos adicionales en la producción ni control ambiental, sin embargo, es de suma importancia considerar desafíos técnicos con esta implementación. La reutilización de ALU promueve la reducción de residuos y la conservación de recursos naturales, alineándose con los principios de la economía circular. Por otro lado, esta práctica, plantea preguntas sobre la calidad del suministro de ALU, así como la variabilidad de sus propiedades físicas y químicas en el proceso de reciclado y almacenamiento, que podrían afectar la calidad del HMA. Es fundamental evaluar los impactos a largo plazo en el rendimiento del pavimento y las posibles emisiones de compuestos volátiles durante el procesamiento del ALU y su impacto en la salud pública y al medio ambiente.

Es primordial implementar un estudio multidisciplinario y basado en evidencias que incluya medidas preventivas y correctivas referente al impacto a largo plazo de la reutilización de ALU en HMA en el medio ambiente y en la salud pública. Primeramente, se recomienda realizar un análisis exhaustivo y continuo de los componentes del ALU antes de su incorporación en HMA, asegurando la eliminación de sustancias tóxicas o metales que puedan representar un riesgo. Así mismo, es crucial establecer programas de monitoreo ambiental que evalúen los impactos a largo plazo de estas prácticas, incluyendo la medición continua de la calidad del agua y del aire de áreas adyacentes a las vías construidas, de igual manera, incluye estudios

epidemiológicos para identificar posibles efectos en la salud de los trabajadores y comunidades cercanas.

Para garantizar una implementación efectiva y segura de la reutilización de ALU en HMA, es necesario que la normatividad nacional, la estrategia de economía circular y el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) se adopten para apoyar y regular el uso de ALU, asegurando su calidad, eficiencia y sostenibilidad en la economía circular. Para integrar eficazmente la reutilización de ALU en la construcción de vías es imperativo desarrollar un marco integral de políticas y normativas; estas deben estar alineadas con la estrategia de economía circular la cual debe incluir un indicador de esta práctica, promoviendo la reutilización del ALU y disminución de tratamiento y/o disposición final de residuos peligrosos (RESPEL). La legislación debe incluir la creación de estándares claros para la recolección, tratamiento y reutilización de ALU, apuntando que solo los ALU que cumplan con criterios de calidad y regulación ambiental sean incluidos en la HMA.

En el contexto de la estrategia de economía circular, es recomendable implementar instrumentos económicos para empresas y servitecas que adopten técnicas de reciclaje y tratamiento de ALU, permitiendo movilizar el flujo económico para impulsar la instalación de tecnologías de reciclaje y almacenamiento de ALU, reduciendo así, barreras económicas que enfrentan muchas de estas instalaciones. Para esto, es importante establecer una meta de volumen de ALU reciclado y de acuerdo a este, implementar un beneficio fiscal proporcional a la cantidad reciclada. Esta meta es trascendental para direccionar y medir el progreso de la iniciativa, de tal manera que se asegure su viabilidad y ambición.

Así mismo, es esencial implementar un esquema de responsabilidad extendida del productor (REP) para garantizar una gestión eficiente y sostenible del aceite lubricante usado. La REP extiende las responsabilidades de los productores de ALU más allá de la etapa de consumo, involucrándolos en el ciclo de vida completo del producto, incluyendo su recolección, tratamiento y reciclaje. Esto conlleva a incentivar a los productores a diseñar productos más sostenibles y contribuir activamente en la gestión adecuada de RESPEL. Este esquema implica que los productores asuman la responsabilidad financiera y logística de la recolección de ALU evitando impactos ambientales y promoviendo prácticas ambientales en toda la cadena de valor. Esto puede desarrollar un sistema de gestión más coherente y eficiente, donde los ALU sean manejados adecuadamente para reducir su potencial de contaminación al suelo y agua. Al asumir la responsabilidad en todo el ciclo de vida, los productores estarían motivados a desarrollar aceites con facilidad de reciclar y que tengan un menor impacto. Esto podría incluir la investigación y práctica de nuevos aditivos biodegradables junto a entidades regulatorias para establecer estándares claros y rigurosos en el tratamiento de ALU antes de su inclusión en HMA, asegurando que estén libres de contaminantes peligrosos y sea seguro para su reutilización.

8. Conclusiones

- La inclusión de ALU en HMA dentro del rango recomendado, representa una práctica ambiental responsable que promueve la economía circular y la conservación de recursos naturales en la construcción de vías. La inclusión de ALU en HMA fomenta un modelo de economía circular al cerrar el ciclo de vida del producto. Esta práctica permite reutilizar un residuo que al tratarlo o disponerlo representa un problema ambiental significativo, ya que el ALU contamina el suelo y las fuentes hídricas al disponerlos de manera inadecuada. Al incorporar el ALU en HMA contribuye a la reducción de la huella de carbono de los proyectos de construcción vial, puesto que, en lugar de considerar el ALU como un desecho sin valor, se establece una nueva utilidad, integrándolo en un proceso productivo que beneficia al medio ambiente.
- Esta práctica es una solución innovadora y efectiva para la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, debido a la disminución de uso de materias primas vírgenes y recursos naturales. Al reutilizar el ALU, se reduce la necesidad de extraer y procesar nuevos materiales, lo que mitiga las emisiones de CO₂ y otros gases vinculados a estos procesos industriales en el asfalto tradicional. Esta práctica fomenta una economía circular, donde los residuos se convierten en recursos valiosos, optimizando el uso de materiales y promoviendo la sostenibilidad.

Referencias

Departamento de medio ambiente de Comisiones Obreras Observatorio de Medio Ambiente de Aragón. (2007). *Guía para la reducción del impacto ambiental de los aceites usados*.

Departamento del medio ambiente CCOO – Aragón.

Fong Silva W, Quiñonez Bolaños E, Tejada Tovar C (2017). *Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje*. Barranquilla, Colombia. Pontificia Universidad de Cartagena.

Fundación Ellen MacArthur, (2014). *Como crear una economía circular*.
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/>

Gómez Luengas, Diana., Rubiano Amezquita, J & Santos Oliveros. M. (2018). *Análisis del impacto de aceite usado de motor en las características físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica con contenido de pavimento asfáltico recuperado*. Universidad Cooperativa de Colombia

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). *Manual Técnico para el manejo de Aceites Lubricantes Usados*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Mosos Aragon, A., Mosos Guzman, C & Gomez Martinez, J. (2018). *Estudio de asfaltos y mezclas asfálticas modificadas con aceite residual de motor*. Universidad Católica de Colombia.