



**REUTILIZACIÓN DE ACEITE DESECHADO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE
METRO COMO PLASTIFICANTE EN MEZCLAS DE CAUCHO**

Babyngton Esteban Vélez Álvarez

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero de Materiales

Tutor

Diego Hernán Giraldo Vásquez, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería de Materiales

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Vélez Álvarez, 2024)
Referencia	B.E Vélez Álvarez, 2024 “Reutilización de aceite desechado del sistema de transporte metro como plastificante en mezclas de caucho” [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Grupo de Investigación Materiales Poliméricos.

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Claudia Patricia Serna Giraldo

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 mis padres, mis hermanos, mi familia, por su apoyo y aliento a lo largo de este camino.

Agradecimientos

A mis amigos de pregrado: Juan Holguín, Juan Henao, Geraldine Rivera y Yesi Reyes, gracias por los innumerables momentos de aprendizaje, apoyo y alegría compartidos durante nuestra formación académica.

Al profesor Juan Fernando Hernández, por sus valiosos conocimientos, recomendaciones y consejos, que fueron fundamentales en la realización de este trabajo.

Agradezco especialmente al profesor y asesor Diego Giraldo, por permitirme aplicar y complementar lo aprendido en el grupo de Materiales Poliméricos, y por su constante guía.

Finalmente, a mi Alma Máter, por recibirme y brindarme la oportunidad de crecer tanto personal como profesionalmente.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	13
Introducción	15
1. Planteamiento del problema.....	17
2. Objetivos	19
3. Marco teórico	20
3.1 Introducción a la gestión de residuos y la economía circular.....	20
3.1.1 Principios clave de la economía circular	20
3.1.2 Gestión de residuos en el sistema metro	22
3.2 Caracterización de los Aceites Usados y su Impacto Ambiental	22
3.2.1 ¿Qué son los aceites usados?	22
3.2.2 Caracterización de los aceites usados	22
3.2.3 Aprovechamiento de aceites usados:	24
3.2.4 Composición química de aceites de maquinaria:	24
3.3 Fabricación de mezclas de caucho:	26
3.3.1 ¿Qué son los plastificantes?	26
3.3.2 Función de los plastificantes en las mezclas de caucho.....	26
3.3.3 Tipos de plastificantes.....	27
3.3.4 Normativa y Legislación Ambiental Aplicables.....	28

3.4 Análisis de propiedades mecánicas:	30
3.4.1 Resistencia a la tracción:.....	30
3.4.2 Resistencia al desgarro.....	30
3.4.3 Dureza:.....	30
3.5 Caracterización del aceite:.....	30
3.5.1 Cromatografía de gases.....	30
3.5.2 Espectroscopía de masas.....	31
3.5.3 Metales pesados:	31
3.5.4 Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP):.....	31
4 Metodología	33
4.1 Revisión bibliográfica.	33
4.2 Formulación para las mezclas de caucho natural.	33
4.3 Elaboración de las mezclas de caucho	34
4.4 Determinación de la temperatura de vulcanización para las mezclas <i>M1</i> , <i>M2</i> y <i>M3</i>	37
4.5 Vulcanización de probetas mediante moldeo por compresión.	37
4.5.1 Probetas para ensayos de tracción y desgarre.	38
4.6 Ensayo de dureza.....	39
4.7 Ensayo de tracción.....	40
4.8 Ensayo de desgarre.....	41
5 Resultados y análisis	42

5.1 Identificación de la literatura especializada de los aceites lubricantes para su posible uso como plastificante.....	42
5.2 Reometría de disco móvil MDR.....	48
5.3 Ensayos de Dureza	49
5.4 Ensayo de tracción.....	52
5.5 Ensayos de desgarre	54
6 Conclusiones	56
7 Recomendaciones.....	57
8 Referencias	58

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de lubricantes industriales tomado de [16].....	25
Tabla 2. Ingredientes para la formulación usada en phr (partes por cien de caucho en masa).	34
Tabla 3. Parámetros de vulcanización obtenidos por reometria de disco móvil mdr a 160°C.	48
Tabla 4. Valores de dureza obtenidos para cada probeta de la mezcla m1 y m2.	51

Lista de figuras

Figura 1. Ciclo considerado en la economía circular. Fuente: elaboración propia.	21
Figura 2. a) molino utilizado para la preparación de las mezclas, b) mezcla obtenida sin plastificante.	36
Figura 3. Reómetro de disco móvil serie Pioneer MDR	37
Figura 4. Prensa hidráulica usada.....	38
Figura 5. a) Troqueladora manual Ceast tipo 605A, b) Troquel para probetas tipo A y c) troquel para probetas tipo corbatín	39
Figura 6. Medición de dureza Shore A.....	39
Figura 7. a) probetas tipo corbatín y b) montaje para ensayo de tracción.....	40
Figura 8. Montaje ensayos de desgarre, a) probetas tipo A y b) montaje para ensayo de desgarre	41
Figura 9. Dureza de las mezclas vulcanizadas a 160°C. Izquierda M1 y derecha M2.....	49
Figura 10. Gráfico de esfuerzo vs deformación para cada una de las probetas. Izquierda M1 y derecha M2.....	52
Figura 11. Ensayos de desgarre realizados a M1(arriba) y M2 (abajo).	54

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
API	Instituto Americano del Petróleo
Cm	Centímetro
°C	Grado centígrado
Hap	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
MPa	Megapascales
mm	Milímetros
min	Minuto
PhD	Philosophiae Doctor
REACH	Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de las sustancias Químicas
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

Este trabajo aborda un tema de creciente relevancia en el contexto actual de sostenibilidad y gestión de residuos. La investigación se centra en la valorización del aceite usado, un residuo industrial común, explorando su potencial como materia prima en la industria del caucho. Este enfoque no solo busca mitigar el impacto ambiental de los residuos, sino también promover la economía circular y la innovación en el uso de materiales reciclados.

El estudio destaca la preocupación global por el cambio climático y la necesidad de adoptar modelos de producción y consumo más sostenibles. En este sentido, la gestión adecuada de los residuos se convierte en un imperativo. El aceite usado, que a menudo se considera un desecho problemático, puede ser transformado en un recurso valioso al ser utilizado como plastificante en mezclas de caucho. Este proceso no solo contribuye a la reducción de residuos, sino que también puede resultar en un ahorro de costos y en el desarrollo de tecnologías más sostenibles.

La metodología incluye profundizar en la característica de los aceites lubricantes utilizados, la formulación de mezclas de caucho y la evaluación de sus propiedades mecánicas. Se prepararon dos tipos de mezclas: una sin plastificante, otra con un plastificante comercial. Esta última mezcla es fundamental para determinar si el aceite desechado puede ofrecer propiedades similares o superiores a las de los plastificantes convencionales.

Las pruebas de laboratorio realizadas en las mezclas permitieron evaluar características como la resistencia a la tracción, la elongación a la rotura y la dureza. Estos datos son esenciales para validar la viabilidad técnica y ambiental del uso del aceite como plastificante. Los resultados preliminares

indican que el aceite usado puede proporcionar propiedades mecánicas competitivas, lo que sugiere su potencial como alternativa sostenible en la formulación de mezclas de caucho.

Las conclusiones del trabajo resaltan la importancia de la reutilización de recursos en la promoción de la economía circular. La implementación exitosa de este proyecto no solo beneficiará al medio ambiente, sino que también posicionará al Sistema de Transporte Metro como un referente en la adopción de prácticas sostenibles. Además, se espera que la investigación contribuya a la creación de nuevas oportunidades de negocio en el ámbito de la economía circular, fomentando la innovación y el desarrollo de tecnologías más limpias.

Palabras clave: Aceite usado, Plastificante, Caucho, Economía circular, Propiedades mecánicas, Sistema de Transporte Metro

Abstract

This work addresses a topic of growing relevance in the current context of sustainability and waste management. The research focuses on the valorization of used oil, a common industrial waste, exploring its potential as a raw material in the rubber industry. This approach not only seeks to mitigate the environmental impact of waste but also to promote a circular economy and innovation in the use of recycled materials.

The study highlights the global concern about climate change and the need to adopt more sustainable production and consumption models. In this sense, proper waste management becomes an imperative. Used oil, often considered a problematic waste, can be transformed into a valuable resource by being used as a plasticizer in rubber mixtures. This process not only contributes to waste reduction but can also result in cost savings and the development of more sustainable technologies.

The methodology includes delving into the characteristics of the lubricating oils used, the formulation of rubber mixtures, and the evaluation of their mechanical properties. Two types of mixtures were prepared: one without a plasticizer, the other with a commercial plasticizer. The latter mixture is essential to determine if the waste oil can offer similar or superior properties to those of conventional plasticizers.

The laboratory tests carried out on the mixtures allowed for the evaluation of characteristics such as tensile strength, elongation at break, and hardness. This data is essential to validate the technical and environmental feasibility of using oil as a plasticizer. Preliminary results indicate that used oil

can provide competitive mechanical properties, suggesting its potential as a sustainable alternative in the formulation of rubber mixtures.

The conclusions of the work highlight the importance of resource reuse in promoting the circular economy. The successful implementation of this project will not only benefit the environment but will also position the Metro Transport System as a leader in the adoption of sustainable practices. Additionally, it is expected that the research will contribute to the creation of new business opportunities in the field of the circular economy, fostering innovation and the development of cleaner technologies.

Keywords: Used oil, Plasticizer, Rubber, Circular economy, Mechanical properties, Metro Transport System.

Introducción

La creciente preocupación global por el cambio climático y la escasez de recursos naturales ha impulsado una transición hacia modelos de producción y consumo más sostenibles. En este contexto, la gestión adecuada de los residuos se ha convertido en una necesidad [1]. El presente estudio se centra en explorar una posible ruta para valorizar un residuo industrial común como lo es el aceite usado en maquinaria, explorando su potencial como plastificante en la industria del caucho.

El aceite desechado en sistemas de transporte, como los administrados por el Metro de Medellín, puede representar una fuente significativa de contaminación ambiental sino se trata debidamente, contribuyendo a la degradación de suelos y aguas subterráneas [2]. Además, su disposición inadecuada intensifica el problema del cambio climático al liberar gases de efecto invernadero[3]. Sin embargo, aprovechar este residuo puede ser en una oportunidad para promover la economía circular y desarrollar tecnologías más limpias.

Estudios previos han demostrado que los aceites usados, al poseer propiedades plastificantes, pueden mejorar significativamente las características de los compuestos de caucho, reduciendo la dependencia de plastificantes convencionales como los ftalatos, conocidos por su toxicidad y persistencia ambiental [4]. Esta alternativa no solo disminuye la generación de residuos, sino que también reduce los costos de producción y genera nuevas oportunidades de negocio en el sector productivo de artículos de caucho.

El objetivo principal de este estudio es evaluar la viabilidad técnica y ambiental de utilizar como plastificante en mezclas de caucho un aceite lubricante empleado en vehículos del sistema Metro, determinando el efecto de la incorporación del aceite seleccionado en las propiedades mecánicas y térmicas, así como en la resistencia al envejecimiento del compuesto de caucho estudiado.

Los resultados de este trabajo no solo contribuirán al desarrollo de tecnologías más limpias y eficientes en la industria del caucho, sino que también proporcionarán una herramienta para la toma de decisiones en la gestión de residuos y la promoción de la economía circular en el sector del transporte. Al demostrar la viabilidad técnica de esta propuesta, se espera impulsar la adopción de prácticas más sostenibles en la industria del caucho y contribuir a la mitigación del cambio climático.

1. Planteamiento del problema

La creciente demanda por soluciones sostenibles y la preocupación global por el medio ambiente han puesto en el centro de la discusión la gestión adecuada de los residuos. En este contexto, el aceite usado como lubricante, un subproducto común en diversas industrias, representa un desafío ambiental significativo.

El aceite desechado contiene una mezcla de contaminantes peligrosos que pueden filtrarse en el suelo y las aguas subterráneas, causando daños irreversibles a los ecosistemas y poniendo en riesgo la salud pública. La acumulación de este tipo de residuos no solo genera un impacto ambiental negativo, sino que también implica costos elevados para su gestión y disposición final [5].

Por otro lado, la industria del caucho emplea regularmente plastificantes derivados del petróleo, lo que contribuye a la dependencia de recursos no renovables y a la generación de más residuos. Ante este escenario, se hace necesario explorar alternativas más sostenibles que permitan reducir el impacto ambiental de la producción industrial [6].

En este sentido, la reutilización de un aceite desechado como plastificante en la producción de materiales para la industria del caucho representa una oportunidad única para abordar varios desafíos ambientales y económicos. Al transformar un residuo en una materia prima con valor, se promueve la economía circular y se reduce la dependencia de recursos fósiles. Además, se disminuye la presión sobre los ecosistemas y se contribuye a la mitigación del cambio climático.

Sin embargo, la implementación de esta solución requiere una evaluación de la viabilidad técnica del proceso, identificando el efecto del aceite usado sobre la procesabilidad y las propiedades del compuesto.

2. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnica del uso de un aceite lubricante desechado del Sistema de Transporte Metro como plastificante en mezclas de caucho.

3.2 Objetivos específicos

Identificar en la literatura especializada los tipos de aceites lubricantes como los desechados del Sistema de Transporte Metro que por sus propiedades y composición química pueden ser empleados como plastificantes en mezclas de caucho.

Desarrollar un proceso de mezclado en molino abierto de rodillos, empleando el aceite desechado como plastificante en mezclas con caucho natural.

Identificar similitudes y diferencias relevantes en lo concerniente a comportamiento reológico y propiedades mecánicas entre una mezcla obtenida con plastificante comercial y una obtenida con el aceite recuperado.

3. Marco teórico

Esta sección se centra en cuatro temáticas claves para el proyecto: gestión de residuos, reutilización de aceites usados, composición química de aceites usados en equipos industriales como los desechados en el Metro de Medellín y fabricación de mezclas de caucho que usan aceites plastificantes.

3.1 Introducción a la gestión de residuos y la economía circular

Tradicionalmente, los residuos se han considerado un problema a resolver al final de un proceso productivo o de consumo. Por esa razón, la gestión de residuos es un conjunto de actividades que se llevan a cabo desde la generación de desperdicios hasta su disposición final, con el objetivo de minimizar sus impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana.

La economía circular propone un cambio de paradigma, donde los residuos se conciben como recursos. En lugar de un modelo lineal basado en extraer, producir, consumir y desechar, la economía circular busca diseñar productos y sistemas que permitan mantener los materiales en la economía el mayor tiempo posible, reduciendo al mínimo la generación de residuos y la extracción de recursos vírgenes [7], [8].

3.1.1 Principios clave de la economía circular

Los principios que rigen este enfoque son los siguientes, los cuales se visualizan en esquemas como los presentados en la Figura 1:

- *Reducción*: Minimizar la generación de residuos en todas las etapas del ciclo de vida de un producto.
- *Reutilización*: Dar una nueva vida a los productos o materiales sin necesidad de procesarlos.

- *Reciclaje*: Transformar los residuos en nuevas materias primas.
- *Recuperación de energía*: Obtener energía a partir de los residuos que no pueden ser reciclados.



Figura 1. Ciclo considerado en la economía circular. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a los beneficios esperados de la implementación de metodologías derivadas de la economía circular, se tienen:

- *Reducción del impacto ambiental*: Disminución de la contaminación, la deforestación y el consumo de recursos naturales.
- *Mejora de la eficiencia económica*: Reducción de costos asociados a la gestión de residuos y creación de nuevas oportunidades de negocio.
- *Innovación*: Fomento de la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y modelos de negocio.
- *Creación de empleo*: Generación de nuevos puestos de trabajo en sectores relacionados con la economía circular.

3.1.2 Gestión de residuos en el sistema metro

La gestión de residuos es un aspecto crucial para abordar la problemática de los aceites desechados del Sistema de Transporte Metro. Según diversos expertos en gestión ambiental, la gestión de residuos se refiere al conjunto de actividades y procedimientos destinados a recolectar, tratar, reciclar y disponer de los desechos de manera segura y ambientalmente sostenible. En el contexto de este proyecto, la gestión de residuos es de importancia primordial, ya que la reutilización de los aceites desechados no solo reduce la cantidad de residuos, sino que también minimiza el impacto ambiental y los costos asociados con la eliminación de estos residuos [9].

3.2 Caracterización de los Aceites Usados y su Impacto Ambiental

3.2.1 ¿Qué son los aceites usados?

Los aceites usados son aquellos que han perdido sus propiedades originales debido a su utilización en motores, maquinaria industrial, equipos de cocina o cualquier otro proceso. Estos aceites, aunque en su estado original pueden ser útiles, se convierten en un residuo peligroso cuando se desechan de manera inadecuada [10].

3.2.2 Caracterización de los aceites usados

La caracterización de los aceites usados es fundamental para determinar su composición química, propiedades físicas y potencial de contaminación. Algunos de los principales componentes de estos aceites incluyen:

Hidrocarburos: Compuestos orgánicos que son los componentes principales de los aceites.

Aditivos: Sustancias añadidas para mejorar el rendimiento del aceite, como antioxidantes, detergentes y agentes antidesgaste.

Contaminantes: Partículas de metales pesados, agua, combustibles y otros materiales que pueden estar presentes en el aceite usado [11].

Propiedades físicas de los aceites:

Viscosidad: Resistencia de un fluido a fluir.

Densidad: Relación entre la masa y el volumen de una sustancia.

Punto de inflamación: Temperatura mínima a la que un líquido desprende vapores inflamables en cantidad suficiente para formar una mezcla inflamable con el aire [11].

Impacto ambiental de los aceites usados

El inadecuado manejo de los aceites usados puede generar graves impactos ambientales:

Contaminación del suelo: El vertido de aceites usados en el suelo puede contaminar los acuíferos y afectar la vida de los microorganismos del suelo.

Contaminación del agua: Los aceites usados son menos densos que el agua y flotan en la superficie, formando películas que impiden el paso de la luz y el oxígeno, afectando la vida acuática.

Contaminación del aire: La quema de aceites usados libera gases tóxicos y partículas contaminantes a la atmósfera.

Daño a la biodiversidad: Los aceites usados pueden afectar a la fauna y flora, tanto terrestre como acuática.

Una gestión adecuada de los aceites usados implica:

Recolección: Establecimiento de sistemas eficientes para la recolección de aceites usados en hogares, industrias y talleres mecánicos.

Tratamiento: Los aceites usados deben ser sometidos a procesos de tratamiento para eliminar los contaminantes y recuperar los componentes útiles.

Valorización: Los aceites usados pueden ser valorizados a través de procesos como la regeneración, la incineración con recuperación de energía o la producción de biocombustibles.

3.2.3 Aprovechamiento de aceites usados:

La reutilización de aceites usados es una práctica importante para abordar la escasez de recursos naturales y reducir la contaminación ambiental. Los aceites usados, cuando se gestionan adecuadamente, pueden encontrar una segunda vida en diversas aplicaciones, como combustibles, lubricantes y plastificantes [12], [13]. El proceso de reutilización de aceites usados implica una serie de pasos, que incluyen la recolección, el tratamiento y la purificación de aceites usados para eliminar contaminantes son aspectos cruciales para este proyecto. Sería beneficioso explorar y detallar los diversos métodos disponibles para llevar a cabo este proceso [13]. Es pertinente conocer las opciones existentes y compararlas en términos de eficacia y viabilidad para este proyecto en específico. Identificar y analizar los métodos más factibles garantizará no solo la eliminación efectiva de contaminantes, sino también la seguridad y la idoneidad de los aceites tratados para su reutilización [14]. La viabilidad de la reutilización de aceites desechados del Metro como plastificante en mezclas de caucho depende de la efectividad de este proceso en caso de ser necesario eliminar dichos elementos

3.2.4 Composición química de aceites de maquinaria:

El conocimiento de la composición química de los aceites desechados es esencial para determinar su idoneidad como plastificantes en mezclas de caucho. Los aceites usados pueden contener una

variedad de compuestos, como hidrocarburos, aditivos y contaminantes que pueden incluir partículas sólidas, agua y productos de degradación térmica [15].

Entre los aditivos más comunes se encuentran los mejoradores del índice de viscosidad, detergentes, dispersantes, demulsificantes y emulsificantes, los agentes antiespumantes, antidesgaste y los antioxidantes. La composición química influye en las propiedades del aceite, como su viscosidad, punto de inflamación y estabilidad térmica [16].

Tabla 1. Tipos de lubricantes industriales tomado de [16].

TIPO DE LUBRICANTE.	APLICACIONES.	CARACTERÍSTICAS.
Aceites lubricantes.	Motores, maquinaria industrial, equipos móviles.	Clasificados en cinco grupos según el instituto Americano del Petróleo (API)
Grasas lubricantes.	Rodamientos, acoplamientos, engranajes, cables.	Formuladas con aceite lubricante, espesante y aditivos.
Pastas lubricantes.	Sellos, ensamblajes, aplicaciones de alta temperatura.	Contienen una gran cantidad de sólidos lubricantes.
Anticorrosivos.	Equipos expuestos a entornos corrosivos	Diseñados para hacer frente a la oxidación de los componentes mecánicos.
Lacas.	Metales, plásticos, elastómeros.	Al secarse dejan una película lubricante seca. Reducen el coeficiente de fricción y repelen el polvo.

Recubrimientos. Componentes mecánicos. Actúan como una pintura en los componentes. Contiene lubricantes sólidos que forman una película fija.

3.3 Fabricación de mezclas de caucho:

La fabricación de mezclas de caucho es un proceso que implica componentes, como plastificantes, cargas, vulcanizantes y agentes antioxidantes, para obtener las propiedades deseadas en el producto final.

3.3.1 ¿Qué son los plastificantes?

Los plastificantes son sustancias químicas que se añaden a los polímeros, como el caucho, para mejorar su flexibilidad, reducir su viscosidad y facilitar su procesamiento. Actúan como lubricantes internos, separando las cadenas de polímero y permitiendo un mayor movimiento molecular [17].

3.3.2 Función de los plastificantes en las mezclas de caucho

La función principal de los plastificantes en las mezclas de caucho es modificar las propiedades físicas y mecánicas del material final. Entre sus principales funciones se encuentran:

Aumento de la flexibilidad: Los plastificantes hacen que el caucho sea más flexible y menos rígido, lo que lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere una mayor movilidad.

Reducción de la viscosidad: Facilitan el mezclado y el procesamiento del caucho, reduciendo la energía necesaria para moldearlo y extruirlo.

Mejora del procesamiento: Los plastificantes permiten que el caucho se procese a temperaturas más bajas, lo que reduce los costos de producción y evita la degradación del polímero.

Modificación de otras propiedades: Dependiendo del tipo de plastificante utilizado, se pueden modificar otras propiedades del caucho, como la resistencia al frío, la resistencia a la abrasión y la impermeabilidad [18].

3.3.3 Tipos de plastificantes

Existen diversos tipos de plastificantes, cada uno con características y aplicaciones específicas [19], [20]:

Ésteres de ácidos ftálicos: Son los plastificantes más utilizados debido a su bajo costo y buena compatibilidad con muchos polímeros.

Ésteres de ácidos adípicos: Ofrecen una buena resistencia a la migración y al exudado, lo que los hace adecuados para aplicaciones en contacto con alimentos.

Ésteres de ácidos fosfóricos: Proporcionan una excelente resistencia a la llama y a la temperatura.

Óleos: Son plastificantes de bajo costo y alta volatilidad, utilizados principalmente en aplicaciones de corto plazo.

La selección del plastificante adecuado depende de diversos factores, como:

Tipo de caucho: La compatibilidad del plastificante con el polímero es fundamental para garantizar un buen rendimiento.

Propiedades deseadas del producto final: La elección del plastificante dependerá de las propiedades específicas que se deseen obtener, como flexibilidad, resistencia al calor, etc.

Condiciones de servicio: El plastificante debe ser estable bajo las condiciones de temperatura, humedad y exposición a agentes químicos a las que estará sometido el producto final.

Impacto ambiental y normativas

Algunos plastificantes, como los ftalatos, han sido asociados con efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente. Por esta razón, existen regulaciones y restricciones cada vez más estrictas sobre su uso. La industria está desarrollando nuevos plastificantes más seguros y sostenibles [21].

3.3.4 Normativa y Legislación Ambiental Aplicables

Este trabajo debe enmarcarse dentro de una rigurosa normativa ambiental que garantice la seguridad y sostenibilidad del proceso.

Gestión de residuos peligrosos: Los aceites usados, al ser considerados residuos peligrosos, están sujetos a regulaciones específicas sobre su recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final.

Calidad del aire: Si durante el proceso de reutilización se generan emisiones, estas deberán cumplir con los estándares de calidad del aire establecidos.

Calidad del agua: Si se utilizan cuerpos de agua para el tratamiento o disposición de los residuos o subproductos, se deberán cumplir las normas de calidad del agua.

Suelo: Si se utilizan terrenos para el almacenamiento o tratamiento de los aceites usados, se deberán cumplir las normas de protección del suelo.

Salud y seguridad ocupacional: Los trabajadores involucrados en el proceso de reutilización deben estar protegidos de los riesgos para la salud asociados con la manipulación de sustancias peligrosas.

Evaluación del impacto ambiental: Antes de iniciar el proyecto, se deberá realizar una evaluación del impacto ambiental para identificar y mitigar los posibles efectos negativos.

Aspectos clave a considerar en la normativa

Caracterización del aceite usado: Es fundamental caracterizar el aceite usado para determinar su composición química y su potencial de contaminación.

Tratamiento del aceite: El tratamiento del aceite usado debe garantizar la eliminación de contaminantes y la obtención de un producto final que cumpla con los requisitos de calidad para su uso como plastificante.

Pruebas de compatibilidad: Se deben realizar pruebas para evaluar la compatibilidad del aceite tratado con las otras componentes de la mezcla de caucho.

Etiquetado y transporte: El aceite tratado y las mezclas de caucho resultantes deben ser etiquetados de acuerdo con la normativa vigente y transportados de manera segura.

Monitoreo y control: Se deben establecer sistemas de monitoreo y control para garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental y la calidad del producto final.

Para el cumplimiento de las expectativas normativas respecto al manejo adecuado de residuos como el aceite lubricante desechado de vehículos, existen normativas relevantes a tener en cuenta como las siguientes:

- Reglamento REACH (Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de las sustancias Químicas): Este reglamento de la Unión Europea regula la producción y el uso de sustancias químicas, incluyendo los plastificantes [22].
- Directiva marco sobre residuos: Esta directiva establece el marco general para la gestión de los residuos en la Unión Europea [23].

- Convenio de Basilea: Este convenio internacional regula el movimiento transfronterizo de los residuos peligrosos.

3.4 Análisis de propiedades mecánicas:

El análisis de las propiedades mecánicas es un componente crítico para determinar la calidad y el rendimiento de las mezclas de caucho que contienen aceites desechados como plastificante. Las propiedades por evaluar pueden incluir:

3.4.1 Resistencia a la tracción: La capacidad del material para resistir fuerzas de tracción y deformación.

3.4.2 Resistencia al desgarro: La capacidad del material para resistir la propagación de una grieta o rasgadura.

3.4.3 Dureza: La resistencia del material a la penetración o deformación superficial.

Estas propiedades proporcionarán una comprensión de cómo la inclusión de aceites desechados puede influir en la respuesta mecánica de las mezclas de caucho. Al definir estas propiedades, se establecerá una base para la interpretación de los resultados experimentales.

3.5 Caracterización del aceite:

Para determinar su calidad y su idoneidad para su tratamiento o reutilización. Los aceites industriales usados pueden variar en su composición y calidad, dependiendo del tipo de maquinaria en la que se utilizaron, las condiciones de uso y el tiempo de servicio.

La caracterización se puede realizar mediante:

3.5.1 Cromatografía de gases: La cromatografía de gases es una técnica analítica utilizada para separar, identificar y cuantificar componentes individuales en una mezcla de

gases. Se basa en la capacidad de los compuestos para ser arrastrados por un gas a través de una columna cromatográfica, donde se produce la separación en función de sus propiedades químicas y físicas.

3.5.2 Espectroscopía de masas: Es una técnica analítica que se utiliza para identificar compuestos químicos y determinar su estructura molecular. En esta técnica, las moléculas se ionizan y se fragmentan en iones, que luego se separan y detectan según sus masas y cargas eléctricas. La información resultante se utiliza para identificar los componentes y determinar la composición molecular de la muestra [24].

3.5.3 Metales pesados: Los metales pesados son elementos químicos que tienen una densidad mayor que la mayoría de los metales comunes. Algunos ejemplos de metales pesados incluyen el mercurio, plomo, cadmio, cromo y arsénico. Estos elementos son conocidos por tener propiedades tóxicas para los seres vivos en determinadas concentraciones. Pueden ingresar al medio ambiente a través de actividades industriales, vertidos de desechos y otras fuentes, y representan una preocupación significativa debido a su persistencia y capacidad de acumulación en los organismos, lo que puede tener impactos negativos en la salud humana y el ecosistema [24].

3.5.4 Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP): Los hidrocarburos aromáticos policíclicos son compuestos químicos formados por anillos de carbono e hidrógeno, dispuestos de manera aromática. Estos compuestos suelen originarse durante la combustión incompleta de materiales orgánicos, como el carbón, el petróleo y la madera. Algunos HAP

son conocidos por tener propiedades carcinogénicas y mutagénicas. Debido a su persistencia en el medio ambiente y su capacidad para acumularse en los tejidos de organismos, los HAP son considerados contaminantes ambientales que requieren monitoreo y gestión adecuados [25].

4 Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos se diseñó e implementó la metodología descrita a continuación.

4.1 Revisión bibliográfica.

Durante el desarrollo de todo el trabajo de grado se realizó una constante revisión bibliográfica del estado del arte para recolectar información acerca del tema de estudio. Como herramientas de búsqueda se utilizó la base de datos de la Universidad de Antioquia, recopilando información de sitios como Scopus, Scienedirect, Google Scholar, así mismo como información electrónica, libros e información suministrada por el grupo de Materiales Poliméricos de la Universidad de Antioquia.

4.2 Formulación para las mezclas de caucho natural.

Se realizaron mezclas de 300 g con una formulación tomada del libro Natural Rubber Formulary [26] sin plastificante y con plastificante, acogiéndose a las normas ASTM D3182 y ASTM D3184 [27],[28] que buscan evaluar el efecto de los ingredientes sobre el comportamiento del caucho natural. La formulación usada se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Ingredientes para la formulación usada en phr (partes por cien de caucho en masa).

Ingredientes	phr
NR	100
N330, Negro de carbón	25
Carbonato de calcio	20
Aceite plastificante	0,5
Óxido de zinc	5
Ácido esteárico	2
Antidegradante	2
Azufre	1,5
CBS	14

NR: Caucho natural. CBS: N-ciclohexil-2-benzotiazosulfenamida.

4.3 Elaboración de las mezclas de caucho

Empleando un molino abierto de rodillos marca Bolling con rodillos de 15,24 cm de diámetro, 30,48 de largo, con una relación de giro entre rodillos de 1:1,25. En la (Fig 2) se observa el equipo empleado para la realización de las mezclas y la mezcla obtenida sin adicionar plastificante. Se prepararon 3 mezclas con la formulación mostrada en la TABLA 2.

MI: Mezcla sin plastificante

Esta mezcla se elabora sin la adición de ningún plastificante. Sirve como un control para comparar las propiedades mecánicas y físicas de las otras mezclas. Al no contener plastificantes, se espera que esta mezcla tenga características más rígidas y menos flexibles, lo que puede afectar su rendimiento en aplicaciones prácticas.

M2: Mezcla utilizando un plastificante comercial

En esta mezcla, se añade un plastificante comercial, que es un aditivo comúnmente utilizado en la industria para mejorar la flexibilidad y procesabilidad del caucho. Esta mezcla se utiliza para evaluar cómo el plastificante comercial afecta las propiedades del caucho en comparación con la mezcla sin plastificante (M1). Se espera que esta mezcla tenga mejores características de flexibilidad y trabajabilidad.

M3: Mezcla utilizando como plastificante el aceite obtenido del Sistema de Transporte Metro

Esta mezcla utiliza un aceite recuperado del Sistema de Transporte Metro como plastificante. El objetivo es evaluar la viabilidad de este aceite desechado como un sustituto de los plastificantes comerciales. Se busca determinar si el aceite recuperado puede proporcionar propiedades similares o incluso mejores en comparación con los plastificantes convencionales. Esta mezcla es clave para el análisis de sostenibilidad y reciclaje, ya que se investiga el uso de un material que de otro modo sería desechado.

El procedimiento mediante el cual se prepararon las mezclas se encuentra en los ANEXOS.



Figura 2. a) molino utilizado para la preparación de las mezclas, b) mezcla obtenida sin plastificante.

4.4 Determinación de la temperatura de vulcanización para las mezclas *M1*, *M2* y *M3*.

Para determinar el T_{100} correspondiente al tiempo de vulcanización, se utilizó un reómetro de disco móvil (Fig 3) serie Pioneer MDR regido por la norma ASTM D5289, con una temperatura de 160 °C [29]. Para cada mezcla se realizaron 5 ensayos.



Figura 3. Reómetro de disco móvil serie Pioneer MDR

4.5 Vulcanización de probetas mediante moldeo por compresión.

Con el valor obtenido en la reometría para la temperatura de vulcanización correspondiente al T_{100} , se procedió a vulcanizar las probetas necesarias para los ensayos. La vulcanización se realizó en la

prensa hidráulica por compresión mostrada en la Figura 4, con una temperatura de 160 °C en cada una de las planchas a una presión de 5 MPa aproximadamente.



Figura 4. Prensa hidráulica usada.

4.5.1 Probetas para ensayos de tracción y desgarre.

Se fabricaron láminas cuadradas de 2 mm de espesor y 210 mm de cada lado, en la troqueladora manual Ceast tipo 605A, se obtuvieron probetas tipo corbatín según la norma ASTM D412 [30] y de desgarre tipo A según la norma ASTM D624 [31]. Se sumerge en agua la lámina obtenida durante 5 minutos para enfriarla. En la figura 5 se muestra el montaje utilizado para obtener las probetas tipo corbatín y de desgarre tipo A y en la figura 5 se observa la troqueladora y los troqueles utilizados.

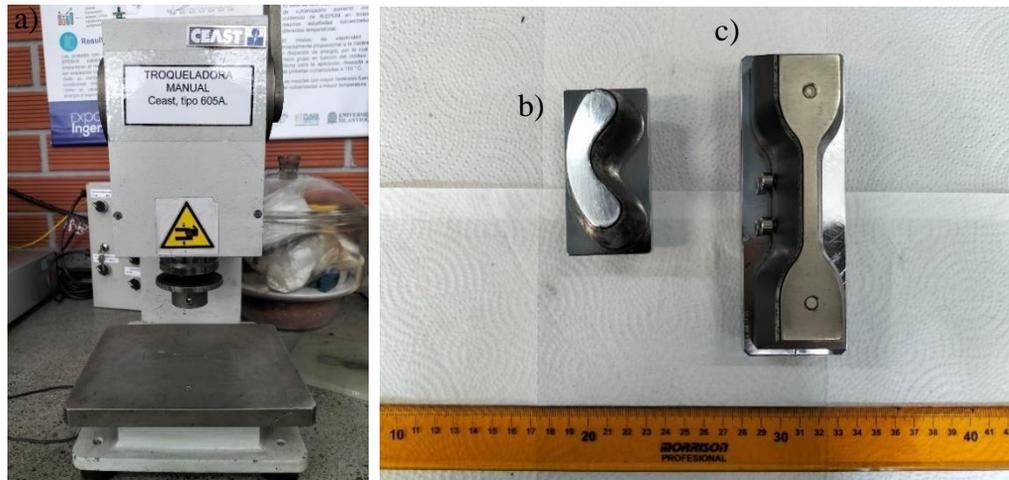


Figura 5. a) Troqueladora manual Ceast tipo 605A, b) Troquel para probetas tipo A y c) troquel para probetas tipo corbatín

4.6 Ensayo de dureza.

Para medir la dureza se utilizó un durómetro de marca CEAST en escala shore A según la norma ASTM D2240 [32], tomando 21 medidas para cada probeta, como se muestra en la figura 7.



Figura 6. Medición de dureza Shore A.

4.7 Ensayo de tracción.

Se realizaron ensayos de resistencia a la tracción por triplicado para cada una de las mezclas bajo la norma ASTM D412 [32] a las probetas tipo corbatín figura 8a, obtenidas mediante vulcanización por compresión. Las probetas se sometieron a un esfuerzo de tensión hasta la falla, con una velocidad de desplazamiento de las mordazas de 500mm/min y una zona calibrada de 25mm, en la figura 8b se observa el montaje que se utilizó para realizar el ensayo. Se midió para cada probeta el espesor y el ancho, con el fin de obtener el valor de la resistencia última, la deformación máxima, el módulo elástico entre otras propiedades.



Figura 7. a) probetas tipo corbatín y b) montaje para ensayo de tracción.

4.8 Ensayo de desgarre.

Se realizaron ensayos de desgarre por triplicado para cada una de las mezclas bajo la norma ASTM D624 [33] a las probetas tipo A figura 9a, obtenidas mediante vulcanización por compresión. A las probetas se les realizó una entalla de 0.5mm en la zona cóncava, posteriormente se sometieron a



Figura 8. Montaje ensayos de desgarre, a) probetas tipo A y b) montaje para ensayo de desgarre

un esfuerzo de tensión hasta la falla, con una velocidad de desplazamiento de las mordazas de 500mm/min en la figura 9b se observa el montaje que se utilizó para realizar el ensayo. Se midió el espesor de cada probeta y se calculó la resistencia al desgarro en KN/m.

5 Resultados y análisis

5.1 Identificación de la literatura especializada de los aceites lubricantes para su posible uso como plastificante

Para identificar aceites lubricantes que logren emplearse como plastificantes, se pretende llevar a cabo un análisis de alguna de la bibliografía especializada que exista del tema. Este estudio permitirá establecer qué características químicas y físicas hacen que determinados aceites sean adecuados para su aplicación en mezclas de caucho. Adicionalmente, se investigarán trabajos anteriores acerca de la factibilidad de aceites y sus ventajas como lo es el de Petrovic at colaboradores [34] donde evaluaron el rendimiento de los aceites de soja específicamente polimerizados como alternativas sostenibles a los plastificantes a base de petróleo en compuestos de caucho, analizando su efecto en las propiedades físicas y mecánicas del material. Utilizando varios métodos estandarizados para evaluar las propiedades del caucho plastificado con aceites, incluyendo: Dureza (ASTM D2240) Resistencia a la tracción, elongación y módulo al 100% (ASTM D412), Resistencia al desgarro** (ASTM D624) Set de compresión (ASTM D395), Envejecimiento en horno (ASTM D573), Propiedades dinámicas (ASTM D5992) obteniendo como resultados que los compuestos con 10 partes por ciento (phr) de aceite mostraron una recuperación del 93% a 100% de deformación y 90% a 200% de deformación. Al aumentar el contenido de aceite a 60 phr, la recuperación mejoró a 98% y 96%, respectivamente además los resultados mostraron que la dureza (Shore A) y la resistencia a la tracción disminuyeron con el aumento del contenido de aceite. Por ejemplo, la dureza variaba de 53 a 60 Shore A y la resistencia a la tracción de 18.05 MPa a 15.22 MPa con diferentes formulaciones por el lado de las propiedades dinámicas las curvas mecánicas dinámicas mostraron transiciones a temperaturas específicas, con un desplazamiento de la temperatura de transición α al aumentar el contenido de aceite, lo que indica un efecto de

plastificación se observó que los elastómeros de alto peso molecular se comportan como líquidos no newtonianos de alta viscosidad antes de la reticulación. La viscosidad mínima y el tiempo de escorcha se midieron para evaluar la facilidad de procesamiento del compuesto llegando a la conclusión de que el uso de aceites de soja polimerizados no solo proporciona una alternativa sostenible a los plastificantes tradicionales, sino que también mantiene propiedades mecánicas competitivas. Esta investigación sugiere que el aumento del contenido de aceite mejora la recuperación elástica y puede optimizar el procesamiento del caucho, aunque con un compromiso en la resistencia a la tracción y dureza. Los siguientes hallazgos abren la puerta a un mayor uso de recursos renovables en la industria del caucho, promoviendo prácticas más sostenibles y reduciendo la dependencia de productos derivados del petróleo [34].

Por otro lado, Bismark y su grupo de trabajo [35] destaca el uso de aceites de soja en la formulación de cauchos y compara el uso de aceite de manteca de karité (Shea butter, SB) y aceite aromático tratado (TDAE) como plastificantes en compuestos de caucho natural reforzados con negro de carbón (NR-CB). Analizando las propiedades de vulcanización, el comportamiento mecánico y la cinética de curado de estos compuestos. Dónde preparó compuestos de NR-CB mezclados con diferentes concentraciones de SB y TDAE utilizando técnicas de amasado en caliente y molino de rodillos. Luego, vulcanizaron las muestras a diferentes temperaturas (155 °C, 160 °C, 165 °C y 170 °C). Las muestras se analizaron para medir su tiempo de escaldado (T_{s2}), tiempo óptimo de curado (T_{90}), índice de viscosidad (ML), y otros parámetros reométricos. También se realizaron análisis de propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción y el módulo de Young obteniendo resultados relevantes como que el tiempo de escaldado aumentó con el contenido de SB, lo que indica que el SB retrasa la vulcanización en comparación con el TDAE. Sin embargo, estos tiempos más largos permiten una mayor seguridad en el curado del caucho. Además, el tiempo óptimo de

curado (T90): también aumentó al usar SB, lo que sugiere que el SB ralentiza las reacciones de entrecruzamiento en los compuestos NR-CB. A pesar de esto, los compuestos con SB mostraron tiempos de curado más cortos que los compuestos con TDAE a temperaturas más bajas. Los compuestos sin plastificantes en esta investigación mostraron un mayor índice de viscosidad (ML) y una mayor densidad de entrecruzamiento (ΔM), lo que indica que la inclusión de plastificantes reduce la rigidez del compuesto y facilita su procesado. Aun así, los compuestos con SB mostraron una mejor densidad de entrecruzamiento en comparación con los compuestos con TDAE. Desde las propiedades mecánicas los compuestos con TDAE exhibieron una mayor resistencia a la tracción, lo que se atribuye a una mejor interacción entre el negro de carbón y el caucho (CB-NR). Sin embargo, los compuestos con SB mostraron un módulo de Young más alto, lo que indica una mayor rigidez y mejor capacidad de carga. Este estudio nos muestra que el aceite de manteca de karité es un plastificante efectivo para los compuestos NR-CB y podría reemplazar al TDAE en aplicaciones de caucho. Los compuestos con SB exhiben propiedades de vulcanización comparables y, en algunos casos, superiores a los compuestos con TDAE, particularmente en términos de menor energía de activación y mejores propiedades mecánicas a cargas bajas[35].

El uso de diferentes clases de aceites lubricantes como plastificantes en el caucho se amplía a muchas clases de aceites como lo realizó Wang y su equipo de trabajo [36] exploraron el potencial del aceite de palma (PMO) como un plastificante alternativo y sostenible para el caucho EPDM, en comparación con el aceite parafínico (PO), que es un plastificante convencional basado en petróleo. Realizando estudios del el PMO como un plastificante renovable y de bajo costo, analizando su impacto en las propiedades de procesamiento y mecánicas del EPDM, el cual es un material ampliamente utilizado en la fabricación de piezas automotrices, materiales impermeables y componentes eléctrico. Los métodos que se utilizaron fueron la viscosidad Mooney y se

caracterizaron las propiedades de procesamiento utilizando un analizador de procesos de caucho y un reómetro de disco. Obteniendo parámetros de solubilidad de Hansen para EPDM, PMO y PO los cuales fueron 18.1, 17.9 y 18.2, respectivamente, lo que indica una buena compatibilidad entre el caucho y los plastificantes. El PMO mostró un rendimiento comparable al PO en términos de viscosidad y características de procesamiento, lo que sugiere que puede ser utilizado eficazmente en aplicaciones industriales. Además, realizaron un estudio de costos obteniendo que el PMO tiene un costo aproximado de \$0.7 por kilogramo, mientras que el PO cuesta alrededor de \$0.9 por kilogramo, lo que hace que el PMO sea una opción más económica. Esto nos lleva a asegurar que el aceite de palma (PMO) es un plastificante verde y rentable que puede reemplazar al aceite parafínico (PO) en la formulación de caucho EPDM. Esto no solo ofrece beneficios económicos, sino que también contribuye a un enfoque más sostenible en la producción de materiales, alineándose con las tendencias actuales hacia la reducción del uso de recursos no renovables [36].

Raju et al [37] investigan el uso del aceite de ricino como plastificante en compuestos de caucho natural donde evaluaron características como la dureza (Shore A), la resistencia a la compresión, la resiliencia y la pérdida por abrasión de los compuestos de caucho. Los compuestos con aceite de ricino mostraron valores de resiliencia y resistencia a la abrasión comparables a los de los compuestos de control, lo que indica un buen desempeño mecánico. Obteniendo como resultados una excelente resistencia a la flexión, con ninguna muestra fallando antes de alcanzar 5×10^5 ciclos, lo que sugiere una buena durabilidad. Además, se observó que la acumulación de calor en los compuestos con aceite de ricino fue significativamente mayor (28 °C) en comparación con los compuestos que contenían aceite nafténico (15 °C). lo que atribuyeron a una menor densidad de entrecruzamiento y a la dispersión incompleta de los agregados de relleno. Lo que se corroboró en la prueba de compresión donde el más alto fueron los compuestos con aceite de ricino, lo que se

correlaciona con los mayores valores de acumulación de calor. En esta investigación se utilizaron varios métodos estandarizados para evaluar las propiedades mecánicas, incluyendo ASTM D 412 para la resistencia a la tracción y ASTM D 624 para la resistencia al desgarre. Cabe aclarar que las mezclas se prepararon en un molino de dos rodillos de laboratorio, siguiendo el procedimiento ASTM D 3184 – 89, durante un tiempo de 18 minutos. En conclusión, el aceite de ricino se presenta como una alternativa viable y sostenible a los plastificantes tradicionales en la industria del caucho, ofreciendo propiedades mecánicas competitivas y un buen rendimiento en aplicaciones prácticas [37]. Estos aceites naturales también pueden ser modificados tal como lo hizo Hongying Chu y su equipo de trabajo [38] quienes sintetizaron un plastificante a base de aceite de semilla de caucho modificado con fósforo (FRP) para sustituir los plastificantes derivados del petróleo, como el dioctil ftalato (DOP), en el PVC. Ya que el uso de plastificantes de ftalato ha sido restringido debido a sus riesgos para la salud. Es por esto que los plastificantes bio-basados, como el aceite de semilla de caucho (RSO), son una alternativa prometedora para su remplazo ellos realizaron la epoxidación y la reacción de apertura de anillos del aceite de semilla de caucho para producir el plastificante. El rendimiento térmico, la procesabilidad y la resistencia a la extracción fueron evaluados en mezclas de PVC plastificadas con FRP. obteniendo como resultados principales el índice de oxígeno límite (LOI) aumentó de 24.3% a 33.1% cuando se reemplazó el DOP por FRP, mejorando la resistencia al fuego. También observaron que el calor total liberado (THR) disminuyó de 39 MJ/m² a 22 MJ/m² con un 20% de FRP, reduciendo la inflamabilidad. Por otro lado, la estabilidad térmica también mejoró, aumentando la temperatura de degradación de 252°C a 272°C. con respecto a las demás propiedades el FRP mostró mejor resistencia a la extracción en solventes que el DOP, con una reducción del 22.6% al 2.8% en la pérdida de peso. El FRP es un plastificante bio-basado con potencial para reemplazar parcialmente al DOP en mezclas de PVC,

proporcionando mejores propiedades de resistencia al fuego y menor migración de plastificantes. Este estudio propone una solución sostenible al problema de los plastificantes convencionales, con la ventaja adicional de ser más respetuoso con el medio ambiente [38].

Por último Heba A Raslan y su equipo de trabajo[39] analizaron el uso de plastificantes bio-basados y alternativas al caucho natural en compuestos de neumáticos. Estos plastificantes incluyen aceites derivados de plantas como el aceite de soja, de palma, de linaza y el líquido de cáscara de nuez de anacardo lo que amplía el uso de aceites para estos fines. Los cuales se evaluaron en combinación con caucho derivado de guayule, una planta que ofrece una alternativa al caucho de los árboles Hevea. Los compuestos de caucho fueron probados en su capacidad de procesamiento, propiedades físicas y predicciones de rendimiento en neumáticos. Los resultados importantes obtenidos en esta investigación incluyen que los bio-plastificantes mejoraron la elongación del caucho sin sacrificar la resistencia a la tracción, aunque algunos disminuyeron la dureza y el módulo a altas extensiones. El análisis mecánico dinámico se utilizó para predecir el rendimiento en neumáticos, mostrando que el uso de estos aceites reduce la resistencia al rodamiento, lo que mejora la economía de combustible, pero puede comprometer el manejo en seco y la tracción en mojado. Además, el caucho de guayule mostró un comportamiento comparable al caucho natural en términos de resistencia al desgarro y alargamiento, con la ventaja de mejorar la tracción en mojado y el manejo en seco, aunque a costa de una menor eficiencia en el consumo de combustible. La combinación de guayule con aceites como el de soja y palma ayudó a equilibrar el rendimiento entre la tracción y la eficiencia energética. Esto nos muestra que el uso de aceites como plastificantes del caucho es un tema en exploración y que por resultados reportados y ya mencionados es aplicativo en el caso del sistema de transporte metro para reducir costos de operación y contribuir al medio ambiente[39].

En esta sección, se presenta un análisis exhaustivo de las propiedades mecánicas y tribológicas de las muestras m1 y m2. Inicialmente, se detallan los resultados obtenidos en el estudio reométrico de disco móvil, los cuales proporcionan una base fundamental para comprender el comportamiento mecánico posterior. A continuación, se exponen los resultados de las pruebas de dureza, tracción y desgarré, que permiten evaluar la resistencia, ductilidad y capacidad de soportar cargas repetitivas de los materiales evaluados.

5.2 Reometría de disco móvil MDR

La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos en los ensayos de reometría de disco móvil (MDR)

Tabla 3. Parámetros de vulcanización obtenidos por reometría de disco móvil mdr a 160°C.

	t_{100} (min)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	$\tan \delta_{t100}$ (-)
M_1	12,47	0,28	14,27	0,47
M_2	12,39	0,12	13,45	0,22

para las mezclas M1 y M2 a una temperatura de 160°C. Estos ensayos permiten evaluar el comportamiento reológico de los compuestos de caucho durante el proceso de vulcanización. Los resultados revelan que ambas mezclas alcanzan el reticulado óptimo en tiempos de vulcanización (t_{100}) muy similares, lo que sugiere una cinética de vulcanización comparable. Sin embargo, se observan diferencias significativas en otros parámetros. La mezcla M1 presenta un mayor momento de torsión a baja frecuencia (M_L), indicando una mayor viscosidad y resistencia al flujo, posiblemente debido a una estructura de red más densa o a una mayor interacción entre las partículas de relleno [25] [35]. Por el contrario, la mezcla M2, con un valor de M_L más bajo, exhibe una mejor fluidez, atribuible a la presencia de plastificantes que facilitan el movimiento de las

cadena polimérica [40]. En cuanto al momento de torsión a alta frecuencia (M_H), ambas mezclas alcanzan una rigidez similar, aunque M1 presenta un valor ligeramente superior. El factor de pérdidas ($\tan \delta_{t100}$) es considerablemente mayor para la mezcla M1, lo que sugiere una mayor capacidad de disipación de energía en forma de calor. Estas diferencias en los parámetros reológicos pueden atribuirse a la variación en la composición de las mezclas, especialmente en cuanto a la cantidad y tipo de cargas de relleno, plastificantes y otros aditivos [41], [42]. Los resultados obtenidos tienen implicaciones directas en la procesabilidad y las propiedades finales de los productos fabricados con estos compuestos. Por ejemplo, una mayor viscosidad puede dificultar el llenado de moldes complejos, mientras que una mayor capacidad de disipación de energía puede influir en el comportamiento térmico del producto durante su uso.

5.3 Ensayos de Dureza

En el ámbito de los polímeros, la dureza está estrechamente relacionada con la estructura molecular, la reticulación y la presencia de aditivos. En este análisis, se evaluaron las propiedades de dureza de dos mezclas de polímeros, M1 y M2, mediante ensayos de dureza Shore A. A continuación, se presentarán y discutirán los resultados obtenidos, estableciendo una relación con

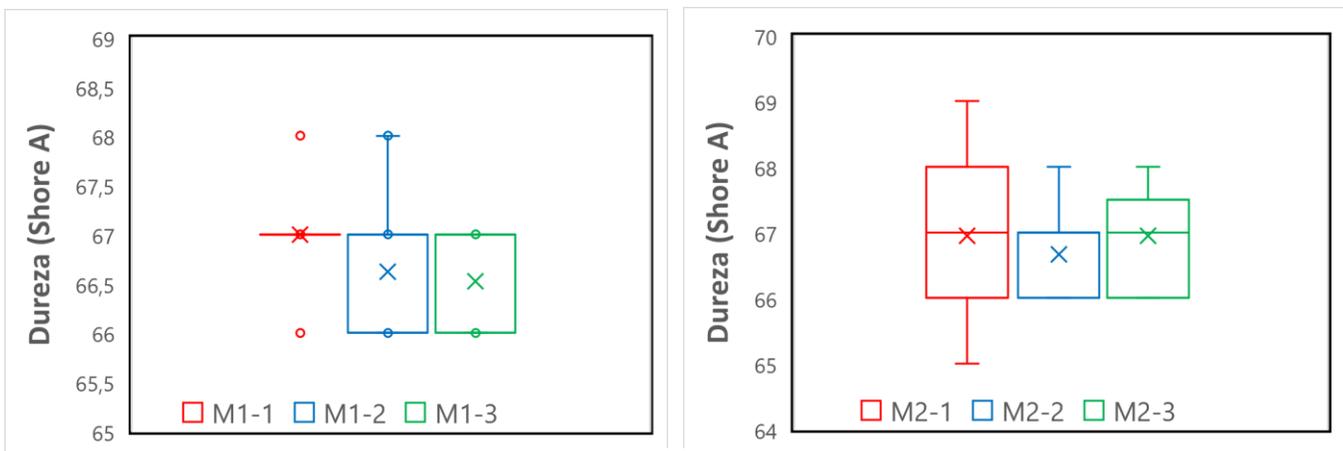


Figura 9. Dureza de las mezclas vulcanizadas a 160°C. Izquierda M1 y derecha M2.

otros parámetros reológicos y considerando la influencia de factores como la temperatura y la composición química.

Los ensayos de dureza y viscosidad son herramientas fundamentales en la caracterización de materiales, particularmente en el campo de los polímeros. La dureza, medida en la escala de Shore A, proporciona una indicación de la resistencia de un material a la penetración de un indentador.

Los diagramas de caja y bigotes presentados en la figura 8 muestran una ligera variabilidad en los valores de dureza dentro de cada mezcla, lo cual es común debido a factores como la heterogeneidad del material o pequeñas variaciones en las condiciones de ensayo. Aunque la mezcla M2 presenta un valor promedio de dureza ligeramente superior, esta diferencia podría no ser estadísticamente significativa.

Los datos presentados en la tabla 4 revelan una ligera diferencia en la dureza promedio entre las mezclas M1 y M2, siendo esta última ligeramente más dura lo que ya se había afirmado desde los diagramas de bigotes. Sin embargo, es notable la mayor variabilidad en los resultados de la mezcla M2, evidenciada por una desviación estándar más elevada. Esta variabilidad puede indicar una menor homogeneidad en la composición de la mezcla M2, lo que podría estar relacionado con fluctuaciones en la distribución de los componentes durante el proceso de mezclado o con la presencia de aglomerados.

La dureza, como propiedad mecánica, está estrechamente ligada a la estructura molecular del material. Una mayor dureza suele asociarse con una mayor reticulación, una mayor cristalinidad o la presencia de refuerzos como fibras o partículas. En este caso, la ligera diferencia en dureza entre las dos mezclas podría atribuirse a variaciones en la cantidad o tipo de aditivos utilizados, o a

Tabla 4. Valores de dureza obtenidos para cada probeta de la mezcla M1 y M2.

Mezcla	Probeta	Promedio Dureza (Shore A)	Desviación estandar
M1	1	67,00	0,55
	2	66,62	0,67
	3	66,52	0,51
M2	1	66,95	1,02
	2	66,67	0,66
	3	66,95	0,74

diferencias en el grado de curado.

5.4 Ensayo de tracción

El análisis de los ensayos de tracción de las mezclas M1 y M2 nos permite obtener una visión más detallada de su comportamiento mecánico. Al comparar las curvas esfuerzo-deformación de ambas mezclas, se observan diferencias significativas en términos de rigidez, resistencia y ductilidad.

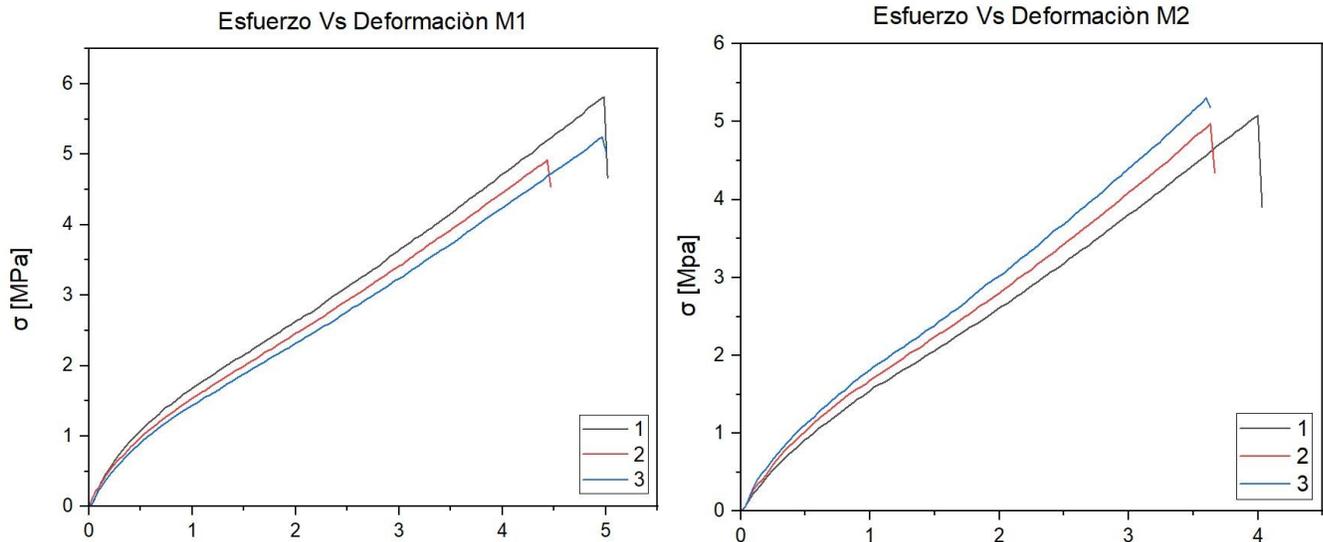


Figura 10. Gráfico de esfuerzo vs deformación para cada una de las probetas. Izquierda M1 y derecha M2.

La mezcla M2 presenta un módulo de elasticidad ligeramente superior al de la mezcla M1, lo que indica una mayor rigidez inicial. Esto significa que la mezcla M2 requiere de una mayor fuerza para producir una determinada deformación elástica. Sin embargo, es importante destacar que el módulo de elasticidad es una propiedad que caracteriza el comportamiento del material en la región elástica, es decir, antes de alcanzar el límite elástico.

En cuanto a la resistencia a la tracción, la mezcla M2 también muestra un valor ligeramente superior, lo que indica una mayor capacidad para soportar cargas antes de fracturar. Este comportamiento podría estar relacionado con una mayor densidad de enlaces cruzados o con la presencia de refuerzos en la matriz polimérica.

La ductilidad, por otro lado, es una propiedad que se relaciona con la capacidad de un material de deformarse plásticamente antes de fracturar. Si bien ambas mezclas muestran un comportamiento dúctil, es necesario cuantificar esta propiedad mediante el cálculo de la elongación a la rotura para realizar una comparación más precisa. Una mayor elongación a la rotura indica una mayor ductilidad.

Las diferencias observadas entre las mezclas M1 y M2 pueden atribuirse a diversos factores, entre los que destacan:

Composición química: La presencia del plastificante en la mezcla 2 puede influir significativamente en sus propiedades mecánicas.

Estructura molecular: La morfología de las cadenas poliméricas, el grado de reticulación y la cristalinidad pueden afectar la rigidez, la ductilidad y la resistencia a la tracción. Una mayor reticulación, por ejemplo, suele aumentar la rigidez y la resistencia, pero reducir la ductilidad

En conclusión, los ensayos de tracción han proporcionado información valiosa sobre el comportamiento mecánico de las mezclas M1 y M2. Sin embargo, para obtener una comprensión más completa de las diferencias observadas, es necesario realizar estudios adicionales que permitan relacionar las propiedades mecánicas con la microestructura y la composición química de los materiales.

5.5 Ensayos de desgarre

Con el fin de evaluar el impacto de la adición de plastificantes en las propiedades mecánicas de las muestras M1 y M2, se complementaron los ensayos de tracción con pruebas de desgarre. Estas últimas permitieron analizar de manera más detallada el comportamiento de los materiales ante esfuerzos de corte y evaluar la eficacia de los plastificantes en el proceso de mezclado.

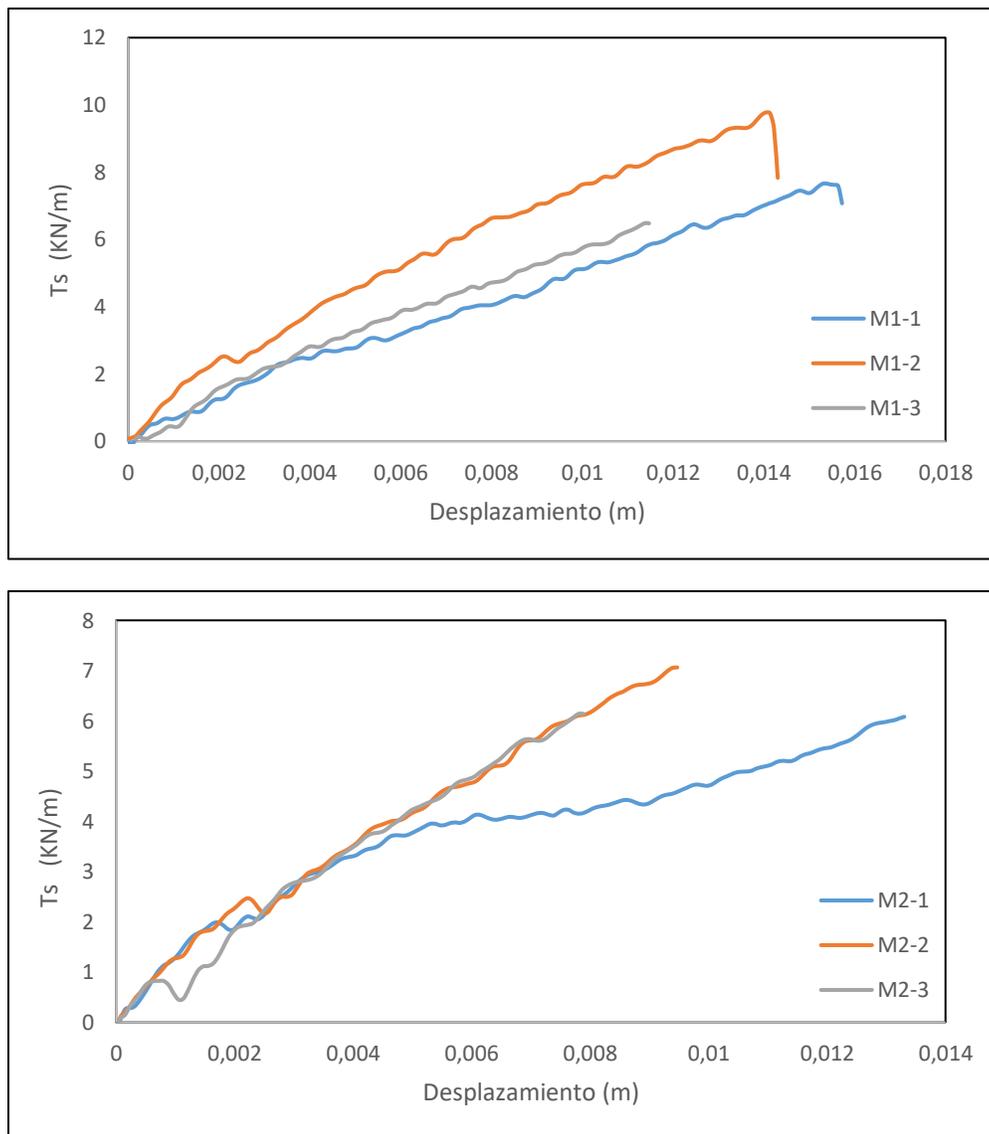


Figura 11. Ensayos de desgarre realizados a M1(arriba) y M2 (abajo).

Las pruebas de desgarre realizadas a las muestras M1 y M2, con y sin la adición de un plastificante comercial respectivamente, ofrecen una valiosa visión sobre el comportamiento mecánico de estos materiales ante esfuerzos de corte.

Ambas gráficas (Fig 11) muestran curvas típicas de esfuerzo de desgarre versus desplazamiento, donde se observa un incremento general en la fuerza necesaria para propagar una grieta a medida que aumenta el desplazamiento. Sin embargo, al comparar las curvas de las muestras M1 y M2, se aprecian algunas diferencias notables.

Las réplicas de la muestra M1 exhiben un comportamiento relativamente homogéneo, con un aumento gradual del esfuerzo de desgarre hasta alcanzar un valor máximo, seguido de una pequeña disminución antes de la fractura. Por otro lado, las réplicas de la muestra M2 presentan una mayor dispersión en los resultados, con valores máximos de esfuerzo ligeramente inferiores y un comportamiento más irregular en algunas curvas.

La adición del plastificante a la muestra M2 tiene como objetivo principal mejorar la procesabilidad del material, sin embargo, su impacto en la resistencia al desgarre no es tan evidente como se esperaba. Si bien se observa una ligera disminución en el valor máximo de esfuerzo de desgarre en comparación con M1, esta diferencia podría atribuirse a la variabilidad inherente del proceso de fabricación más que a un efecto directo del plastificante [43].

Existen varias razones que podrían explicar este resultado. La dosis del plastificante podría no haber sido suficiente para producir un efecto significativo en la tenacidad del material. Asimismo, el tipo de plastificante utilizado podría no ser el más adecuado para mejorar esta propiedad en particular. Además, las interacciones entre el plastificante y la matriz polimérica podrían estar influyendo en el comportamiento del material de manera compleja[43], [44], [45].

6 Conclusiones

La investigación demuestra que el aceite desechado del sistema de transporte metro puede ser utilizado como un plastificante en mezclas de caucho, ofreciendo propiedades mecánicas comparables o incluso superiores a las de los plastificantes convencionales. Esto sugiere que el aceite usado no solo es un recurso valioso para la industria del caucho, sino que también contribuye a la sostenibilidad al reducir la dependencia de productos químicos nuevos.

La reutilización del aceite desechado se alinea con los principios de la economía circular, promoviendo la gestión eficiente de residuos y la creación de nuevas oportunidades de negocio. Al integrar el aceite usado en la producción de caucho, se fomenta un modelo de producción más sostenible que minimiza el impacto ambiental y promueve la reducción de residuos.

El estudio sugiere que se deben explorar más a fondo las propiedades del aceite usado y su comportamiento en diferentes formulaciones de caucho. Se recomienda investigar otras aplicaciones potenciales del aceite desechado y desarrollar normativas que faciliten su uso en la industria, lo que podría abrir nuevas líneas de investigación y mejorar la gestión de residuos en el sector.

7 Recomendaciones

Se propone una investigación exhaustiva para evaluar la viabilidad técnica y ambiental de la reutilización de aceites usados como plastificantes en mezclas de caucho también se propone, realizar un análisis detallado de la composición química de estos aceites mediante cromatografía de gases y espectroscopía de masas, comparando los resultados con los de plastificantes convencionales. También podría realizarse, diversas mezclas de caucho variando la proporción de aceite usado y se evaluarán sus propiedades reológicas y mecánicas mediante ensayos como reometría, tracción, dureza y flexión. Para evaluar el desempeño a largo plazo, se podría realizar ensayos de envejecimiento acelerado y análisis de migración. Además, se de recomendar un análisis de ciclo de vida (LCA) para cuantificar el impacto ambiental de esta alternativa en comparación con los plastificantes convencionales, incluyendo la evaluación de la huella de carbono y la toxicidad. Finalmente, se proponen desarrollar normativas y estándares que regulen el uso de aceites usados en la industria del caucho, garantizando la calidad y seguridad de los productos finales. Esta investigación contribuirá al desarrollo de materiales más sostenibles y económicos, reduciendo la dependencia de recursos fósiles y minimizando el impacto ambiental.

8 Referencias

- [1] E. Leff, *Transición hacia el desarrollo sustentable, La: perspectivas de América Latina y el Caribe*. Instituto Nacional de Ecología, 2002.
- [2] V. Tanrattanakul, B. Wattanathai, A. Tiangjunya, y P. Muhamud, «In situ epoxidized natural rubber: Improved oil resistance of natural rubber», *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 90, n.º 1, pp. 261-269, 2003, doi: 10.1002/app.12706.
- [3] D. Liu *et al.*, «Synthesis of an efficient bio-based plasticizer derived from waste cooking oil and its performance testing in PVC», *Polym. Test.*, vol. 90, p. 106625, oct. 2020, doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106625.
- [4] V. Cherubini, F. R. Lamastra, M. Bragaglia, y F. Nanni, «Waste cooking oils as processing aids for eco-sustainable elastomeric compounding», *Prog. Rubber Plast. Recycl. Technol.*, vol. 38, n.º 1, pp. 3-20, 2022.
- [5] J. M. Niño Zárate, «Biorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos de petróleo: retos y oportunidades para Colombia en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible», jun. 2023, Accedido: 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/67609>
- [6] Q. Carrillo y L. Jesús, «Desarrollo y optimización de nuevos materiales poliméricos, mezclas y compuestos de alto rendimiento medioambiental a partir de poliésteres y poliamidas procedentes de recursos renovables de interés en el sector envase y embalaje», Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, 2021. doi: 10.4995/Thesis/10251/147479.
- [7] M. Geissdoerfer, M. Pieroni, D. Pigosso, y K. Soufani, «Circular business models: A review», *J. Clean. Prod.*, vol. 277, p. 123741, ago. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123741.
- [8] E. MacArthur, «Towards the circular economy», *J. Ind. Ecol.*, vol. 2, n.º 1, pp. 23-44, 2013.

-
- [9] Á. M. V. de Aburrá, «Manual para el manejo Integral de Aceites Lubricantes», *Medellín Colomb. Obtenido Httpwww Metropol Gov Co*, vol. 9000, 2006.
- [10] «US EPA Manejando Aceite Usado: Consejos Para Empresas Pequeñas (Managing Used Oil: Advice for Small Business)». Accedido: 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://surl.li/ecuxgr>
- [11] H. Hosseinzadeh-Bandbafha *et al.*, «Managing the hazardous waste cooking oil by conversion into bioenergy through the application of waste-derived green catalysts: A review», *J. Hazard. Mater.*, vol. 424, p. 127636, feb. 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127636.
- [12] Soluciones_admin, «Aceite industrial usado - alternativa energética - Soluciones de Combustión», *Soluciones Integrales de Combustión*. Accedido: 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://solucionesdecombustion.com/aceite-industrial-usado-alternativa-energetica-soluciones-integrales-de-combustion/>
- [13] M. T. P. E. M. DE, «Aceites Lubricantes Usados», *Minist. Ambiente Vivienda Desarro. Territ.*, 2006.
- [14] O. US EPA, «Managing, Reusing, and Recycling Used Oil». Accedido: 15 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/recycle/managing-reusing-and-recycling-used-oil>
- [15] W. Fong Silva, E. Quiñonez Bolaños, C. Tejada Tovar, W. Fong Silva, E. Quiñonez Bolaños, y C. Tejada Tovar, «Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje», *Prospectiva*, vol. 15, n.º 2, pp. 135-144, dic. 2017, doi: 10.15665/rp.v15i2.782.
- [16] «¿Qué aditivos tienen los lubricantes industriales y cuáles son sus funciones?» Accedido: 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://lubricantesdistribuidor.com/blog/post/que-aditivos-tienen-los-lubricantes-industriales-y-cuales-son-sus-funciones.html>

-
- [17] «Plastificantes para caucho». Accedido: 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.jorgemandelbaum.com/plastificantes-para-caucho/>
- [18] M. Rahman y C. S. Brazel, «The plasticizer market: an assessment of traditional plasticizers and research trends to meet new challenges», *Prog. Polym. Sci.*, vol. 29, n.º 12, pp. 1223-1248, dic. 2004, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2004.10.001.
- [19] «La unión hace la fuerza: distintos plastificantes para aplicaciones específicas», Interempresas. Accedido: 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/218937-La-union-hace-la-fuerza-distintos-plastificantes-para-aplicaciones-especificas.html>
- [20] P. M. F. Torres, A. Gatica, D. Trinidad, y V. Sulca, «Uso de Grano de Caucho Reciclado para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos: una revisión literaria», *INVESTIGATIO*, n.º 18, Art. n.º 18, mar. 2022, doi: 10.31095/investigatio.2022.18.2.
- [21] P. B. Montes, B. L. Soberanis, G. O. Fernández, y F. V. Moreno, «FTALATOS Y EFECTOS EN LA SALUD», *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 17, n.º 4, Art. n.º 4, 2001.
- [22] «UNIDO | United Nations Industrial Development Organization». Accedido: 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.unido.org/>
- [23] «Legislación de la Unión Europea sobre gestión de residuos | EUR-Lex». Accedido: 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/eu-waste-management-law.html>
- [24] A. Kupareva *et al.*, «Chemical Characterization of Lube Oils», *Energy Fuels*, vol. 27, n.º 1, pp. 27-34, ene. 2013, doi: 10.1021/ef3016816.
- [25] P. L. Carmichael, J. Jacob, G. Grimmer, y D. H. Phillips, «Analysis of the polycyclic aromatic hydrocarbon content of petrol and diesel engine lubricating oils and determination of

DNA adducts in topically treated mice by ³²P-postlabelling», *Carcinogenesis*, vol. 11, n.º 11, pp. 2025-2032, nov. 1990, doi: 10.1093/carcin/11.11.2025.

[26] P. A. Ciullo y N. Hewitt, *The Rubber Formulary*. William Andrew, 1999.

[27] «Standard Practice for Rubber—Materials, Equipment, and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized Sheets». Accedido: 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d3182-21a.html>

[28] «Standard Practice for Rubber—Evaluation of NR (Natural Rubber)». Accedido: 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d3184-11r22.html>

[29] «Standard Test Method for Rubber Property—Vulcanization Using Rotorless Cure Meters». Accedido: 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d5289-19a.html>

[30] «D412 Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension». Accedido: 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d0412-16r21.html>

[31] «Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers». Accedido: 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d0624-00r20.html>

[32] «Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness». Accedido: 16 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d2240-15r21.html>

[33] «D624 Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers». Accedido: 23 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d0624-00r20.html>

-
- [34] «SOYBEAN OIL PLASTICIZERS AS REPLACEMENT OF PETROLEUM OIL IN RUBBER | Rubber Chemistry and Technology». Accedido: 2 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://meridian.allenpress.com/rct/article/86/2/233/92525/SOYBEAN-OIL-PLASTICIZERS-AS-REPLACEMENT-OF>
- [35] B. Mensah *et al.*, «Vulcanization kinetics and reinforcement behaviour of natural rubber-carbon black composites: Addition of Shea-butter versus aromatic oil as plasticizers», *Heliyon*, vol. 10, n.º 4, feb. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25592.
- [36] «Investigation of Palm Oil as Green Plasticizer on the Processing and Mechanical Properties of Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber | Industrial & Engineering Chemistry Research». Accedido: 2 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.iecr.5b04527>
- [37] «A Study on the Use of Castor Oil as Plasticizer in Natural Rubber Compounds - P. Raju, V. Nandan, Sunil K.N. Kutty, 2007». Accedido: 2 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/147776060702300302>
- [38] H. Chu, H. Li, X. Sun, y Y. Zhang, «Phosphorus Containing Rubber Seed oil as a Flame Retardant Plasticizer for Polyvinyl Chloride», *J Renew. Mater*, vol. 11, n.º 4, pp. 1731-1743, 2023.
- [39] «Thermal aging and automotive oil effects on the performance of electron beam irradiated styrene butadiene rubber/waste and microwave devulcanized rubber blends - Heba A Raslan, ES Fathy, SE Abdel Aal, 2023». Accedido: 2 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/14777606221136148>
- [40] Burak Erman, C. Michael Roland, y James E. Mark, *The Science and Technology of Rubber*. 2013.

-
- [41] C. E. C. Jr, *Seymour/Carraher's Polymer Chemistry: Sixth Edition*, 6.^a ed. Boca Raton: CRC Press, 2003. doi: 10.4324/9780203911303.
- [42] J. D. Ferry, *Viscoelastic Properties of Polymers*. John Wiley & Sons, 1980.
- [43] W. D. Callister y D. R. G, *Materials science and engineering*. 2013.
- [44] W. F. Smith y J. Hashemi, *Foundations of Materials Science and Engineering*. McGraw-Hill, 2003.
- [45] W. D. C. Jr y D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons, 2020.

ANEXOS.

Anexo A. Proceso de mezclado en molino abierto para la preparación de las mezclas.

