



Pontificia Universidad
Católica del Ecuador | Sede
Ambato

PUCE TEC

TECNOLOGÍA SUPERIOR EN CONSTRUCCIÓN

Tema:

**EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MODIFICADAS CON CAUCHO**

**Proyecto de investigación previo a la obtención del título de Tecnólogo
Superior en Construcción**

Línea de investigación:

CONSTRUCCIÓN, TECNOLOGÍA

Autor:

José Leonidas Rosero Ortiz

Directora:

Mg. Verónica Cristina Oñate Oñate

Ambato – Ecuador


Abril 2025

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Yo: **JOSÉ LEONIDAS ROSERO ORTIZ**, con cédula de ciudadanía **1803323961**, autor del trabajo de graduación titulado: "EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MODIFICADAS CON CAUCHO", previa a la obtención del título de **TECNÓLOGO SUPERIOR EN CONSTRUCCIÓN**, en **PUCE TEC**.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tiene la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, de conformidad con el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador a difundir a través del sitio web de la Biblioteca de la PUCE Ambato, el referido trabajo de graduación, respetando las políticas de propiedad intelectual de la Universidad.

Ambato, abril 2025



José Leonidas Rosero Ortiz
CC. 1803323961

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
SEDE AMBATO
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Tema:

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS MODIFICADAS CON CAUCHO

Línea de investigación:

CONSTRUCCIÓN, TECNOLOGÍA

Autor:

José Leonidas Rosero Ortiz

Verónica Cristina Oñate Oñate, Ing. Mg.

CC. 1206607382

CALIFICADOR

f.  Firmado electrónicamente por:
VERONICA CRISTINA
ONATE ONATE

Jorge Leonardo Vélez Brito, Ing. Mg.

CALIFICADOR

f.  Firmado electrónicamente por:
JORGE LEONARDO
VELEZ BRITO

Diego Sebastián Viera Pérez, Ing. Mg.

CALIFICADOR

f.  Firmado electrónicamente por:
DIEGO SEBASTIAN
VIERA PEREZ

Daniel Marcelo Acurio Maldonado, Ing. Mg.

COORDINADOR GENERAL PUCE TEC

f.  Firmado electrónicamente por:
DANIEL MARCELO
ACURIO MALDONADO

Diego Gonzalo Coca Chanalata, Dr.

SECRETARIO GENERAL PUCESA

f. DIEGO GONZALO COCA CHANALATA
Firmado digitalmente por DIEGO GONZALO COCA CHANALATA
Fecha: 2025.04.09 08:49:21 -05'00'

Ambato – Ecuador

Abril 2025

DEDICATORIA

A mi madre, por ser mi luz y fortaleza en cada paso de este camino. Por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por enseñarme con su ejemplo que el esfuerzo y la dedicación siempre rinden frutos, y por brindarme su apoyo incondicional, lleno de amor y sabiduría, que ha sido el motor de mis logros. Este triunfo también es tuyo.

A mi pareja, por ser mi cómplice, mi apoyo constante y mi refugio en los momentos de incertidumbre. Gracias por tu paciencia infinita, tus palabras de aliento y por impulsarme a superar mis propios límites. Tu amor y confianza en mí han sido esenciales para llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a quienes hicieron posible la culminación de este proyecto.

A mis docentes y tutores, por su guía y valiosas enseñanzas, que me permitieron crecer profesionalmente.

A mi familia, especialmente a mi madre, por su constante respaldo emocional y por ser mi pilar más fuerte.

A mi pareja, por su compañía inquebrantable, su apoyo en los momentos difíciles y su fe en mis capacidades.

Y a mis amigos y compañeros, quienes con su amistad y aliento hicieron de este proceso algo más llevadero y significativo.

RESUMEN

Esta investigación evalúa las propiedades mecánicas y la durabilidad de mezclas asfálticas recicladas modificadas con caucho de llantas recicladas (RAP), proponiendo soluciones sostenibles para la construcción de carreteras. El uso de RAP permite reciclar pavimentos en desuso, reduciendo la demanda de materiales vírgenes y los costos de producción.

La adición de caucho reciclado mejora significativamente el rendimiento de los pavimentos al incrementar su elasticidad, resistencia a la deformación y durabilidad bajo condiciones de tráfico y clima adversas.

Los ensayos realizados, como el Marshall y el AASHTO T 283, confirmaron que estas mezclas tienen mejor comportamiento ante humedad, envejecimiento y carga vehicular. Este estudio aporta un marco de referencia para la implementación de estas tecnologías en Ecuador, destacando su potencial técnico y ambiental en la infraestructura vial.

Palabras clave: mezclas asfálticas recicladas, caucho reciclado, propiedades mecánicas, durabilidad.

ABSTRACT

This research evaluates the mechanical properties and durability of recycled asphalt mixtures, modified with recycled tire rubber (RAP), proposing sustainable solutions for road construction. The use of RAP allows for the recycling of worn-out pavements, reducing the demand for virgin materials and production costs.

Adding recycled rubber significantly enhances pavement performance by increasing elasticity, resistance to deformation, and durability under adverse traffic and weather conditions.

The tests conducted, such as the Marshall test and AASHTO T 283, confirmed that these mixtures perform better in terms of moisture resistance, aging, and vehicular load. This study provides a reference framework for the implementation of these technologies in Ecuador, highlighting their technical and environmental potential in road infrastructure.

Keywords: *recycled asphalt mixtures, recycled rubber, mechanical properties, durability.*

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD	ii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE Y LA PRÁCTICA	3
1.1. Uso de materiales reciclados en asfaltos.....	3
1.2. Propiedades y ventajas técnicas del asfalto modificado con caucho y RAP....	3
1.3. Experiencia internacional en la aplicación de caucho y RAP en pavimentos...	7
1.4. Sostenibilidad del uso combinado de caucho y RAP en asfaltos.....	12
CAPITULO II. DISEÑO METODOLÓGICO	15
2.1. Tipo de investigación	15
2.2. Población y muestra	17
2.3. Métodos, técnicas e instrumentos.....	19
2.4. Procesamiento y análisis de la información	24
CAPÍTULO III. PROPUESTA	32
3.1. Análisis situacional.....	32
3.2. Diseño de mezclas asfálticas.....	43
3.3. Ensayos realizados	48
3.4. Resultados	51
CONCLUSIONES.....	54
RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXOS	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Resistencia a la fatiga por tipo de mezcla.....	51
Ilustración 2. Granulometría de agregados	57
Ilustración 3. Lavado de agregado fino para granulometría	57
Ilustración 4. Peso específico 3/8.....	58
Ilustración 5. Peso específico 3/4.....	58
Ilustración 6. Peso específico cono para arena.....	59
Ilustración 7. Peso específico arena eliminación de burbujas de aire	59
Ilustración 8. Agregados para mezcla asfáltica	60
Ilustración 9. Calentado de agregados para mezcla asfáltica	60
Ilustración 10. Preparación de muestras previo a la colocación de emulsión asfáltica	61
Ilustración 11. Colocación de emulsión asfáltica y toma de temperatura	61
Ilustración 12. Mezcla de materiales para formar una mezcla uniforme.....	62
Ilustración 13. Golpes a la mezcla asfáltica para realizar briquetas	62
Ilustración 14. Normativa 75 golpes por cada lado de la briqueta	63
Ilustración 15. Temperatura del asfalto	63
Ilustración 16. Chequeo de temperatura de agregados y asfalto líquido.....	64
Ilustración 17. Selección del RAP para realizar la extracción del asfalto	64
Ilustración 18. Gasolina 500 ml para cada lavada.....	65
Ilustración 19. Resolver el material con ayuda de espátula	65
Ilustración 20. Lavadas del RAP	66
Ilustración 21. Gasolina extraída del lavado del RAP.....	66
Ilustración 22. Lavado de la muestra hasta limpiarla.....	67
Ilustración 23. Extracción de gasolina	67
Ilustración 24. Quema de gasolina extraída	68
Ilustración 25. Ceniza de la gasolina al ser expuesto a altas temperaturas	68
Ilustración 26. Anotación de pesos.....	69
Ilustración 27. Toma de peso de las briquetas modificadas	69
Ilustración 28. Pesos de cada una de las briquetas	70
Ilustración 29. Máquina de extracción de asfalto.....	70
Ilustración 30. Ensayo mediante máquina Marshall de la briqueta 5.....	71

Ilustración 31. Ensayo mediante máquina Marshall de la briqueta 4.....	71
Ilustración 32. Resultados ensayo Marshall – Estabilidad y Flujo	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de Asfalto	36
Tabla 2. Granulometría RAP	37
Tabla 3. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	39
Tabla 4. Ensayo de Abrasión agregado 3/4	39
Tabla 5. Ensayo de Abrasión agregado 3/8	40
Tabla 6. Granulometría carpeta asfáltica tradicional	40
Tabla 7. Granulometría caucho reciclado.....	41
Tabla 8. Briquetas tradicionales	46
Tabla 9. Dosificación briquetas prefabricadas.....	47

INTRODUCCIÓN

El presente estudio se enfoca en el uso de mezclas asfálticas recicladas (RAP), combinadas con caucho proveniente de llantas usadas, como una alternativa sostenible e innovadora en el ámbito de la construcción vial. Esta técnica ha despertado interés debido a sus ventajas ambientales y a las mejoras significativas que aporta a las propiedades mecánicas y la durabilidad de los pavimentos. En un contexto global donde la preservación de los recursos naturales es crucial, la ingeniería civil y la industria de la construcción buscan soluciones que permitan reutilizar materiales, abaratar costos y, simultáneamente, disminuir los impactos ambientales negativos.

El RAP, que corresponde al material recuperado de pavimentos existentes, permite reutilizar tanto el asfalto como los agregados presentes en esas capas, facilitando su incorporación en nuevas mezclas. Esta práctica reduce la necesidad de emplear materiales vírgenes, lo cual tiene un impacto positivo en la economía del proyecto y en el medio ambiente. Sin embargo, este tipo de material reciclado puede presentar inconvenientes técnicos, como la pérdida de propiedades mecánicas o una disminución de la vida útil, lo que ha llevado a explorar la incorporación de modificadores. Uno de los más prometedores es el caucho reciclado de llantas, el cual contribuye a mejorar las características del material asfáltico.

El caucho reciclado ofrece diversas ventajas. Por su naturaleza resistente y duradera, las llantas usadas generan problemas ambientales cuando no son desechadas correctamente, ocupan espacio en vertederos y representan riesgos de incendios o proliferación de mosquitos. Al integrarlas en mezclas asfálticas, no solo se aborda el problema de estos residuos, sino que se mejora el rendimiento de los pavimentos. Este material confiere elasticidad al asfalto, permitiéndole adaptarse mejor a las cargas vehiculares y retornar a su forma original. Esto es particularmente relevante en vías con tráfico pesado, donde la deformación plástica, conocida como ahuellamiento, es un desafío común.

Además, el caucho aporta resistencia a fracturas térmicas en climas fríos, reduce la rigidez del pavimento y evita que se vuelva quebradizo. También mejora la resistencia a la fatiga, una característica que ayuda a prevenir fisuras debido a la

carga repetitiva de vehículos, prolongando así la vida útil de las vías.

Para garantizar la calidad de las mezclas modificadas con caucho, se realizan ensayos técnicos como el ensayo Marshall, que permite evaluar la estabilidad y el flujo de la mezcla asfáltica. Este procedimiento es esencial para determinar si la mezcla puede soportar las cargas vehiculares sin deformarse excesivamente. Adicionalmente, se efectúan pruebas de resistencia a la humedad, como el ensayo AASHTO T 283, que evalúa cómo las mezclas asfálticas reaccionan ante la presencia de agua, un factor clave en climas húmedos donde el deterioro por humedad es frecuente.

El uso de estas mezclas también debe cumplir con normativas y estándares internacionales. Por ejemplo, la ASTM D6927 regula los procedimientos del ensayo Marshall, mientras que en Ecuador las especificaciones técnicas del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) establecen los lineamientos para la incorporación de RAP en pavimentos. Estas normativas aseguran que los materiales empleados cumplan con los estándares necesarios para resistir las condiciones de tráfico y clima locales.

En resumen, las mezclas asfálticas recicladas con caucho de llantas representan una solución viable y sostenible que no solo ayuda a reducir la acumulación de desechos, sino que también mejora el desempeño técnico del pavimento. Esta tecnología contribuye a la sostenibilidad ambiental, extiende la vida útil de las carreteras y reduce los costos asociados al mantenimiento. La evaluación constante de sus propiedades mecánicas y su durabilidad permitirá optimizar su uso y garantizar su éxito en aplicaciones viales futuras. Este trabajo, al explorar los beneficios del caucho en mezclas recicladas, fomenta el desarrollo de tecnologías más sostenibles y profundiza en su impacto en el sector vial. Con más investigaciones y el desarrollo de normativas adecuadas, estas innovaciones podrían adoptarse de manera más amplia, beneficiando tanto a la infraestructura vial como al medio ambiente.

CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE Y LA PRÁCTICA

1.1. Uso de materiales reciclados en asfaltos

El uso de materiales reciclados en asfaltos, particularmente el caucho de llanta y el asfalto reciclado (RAP, por sus siglas en inglés), representa una evolución en la tecnología de pavimentación que aborda las demandas actuales de sostenibilidad y rendimiento. Durante las últimas décadas, el crecimiento en la acumulación de residuos de llantas y asfaltos envejecidos ha motivado a investigadores y profesionales de la construcción a encontrar soluciones que no solo reduzcan el impacto ambiental, sino que también mejoren las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. La incorporación de estos materiales permite una pavimentación más económica, ecológica y duradera, cumpliendo con los objetivos de sostenibilidad propuestos por entidades como la *Federal Highway Administration* (FHWA) en Estados Unidos.

Autores como Huang et al. (2005) y García Morales et al. (2006) sostienen que el caucho reciclado aporta flexibilidad y resistencia al asfalto, mejorando su comportamiento frente a la fatiga y aumentando su vida útil. Por otro lado, el uso de RAP, ampliamente estudiado por Shen et al. (2007), permite reducir el consumo de agregados vírgenes y asfalto nuevo, haciéndolo una solución eficiente desde el punto de vista económico y ambiental. Esta combinación de materiales reciclados en mezclas asfálticas también ha mostrado buenos resultados en cuanto a la disminución de fisuras y resistencia a la deformación permanente.

1.2. Propiedades y ventajas técnicas del asfalto modificado con caucho y RAP

La combinación de caucho de llanta y asfalto reciclado (RAP) en mezclas asfálticas ofrece un conjunto único de propiedades técnicas que mejoran el desempeño del pavimento en diversas condiciones, contribuyendo a una infraestructura más resistente y duradera. Estas propiedades incluyen una mayor resistencia a la deformación, mejor comportamiento ante la fatiga, reducción del envejecimiento y resistencia a condiciones climáticas extremas. Cada uno de estos aspectos aporta una ventaja particular en la estructura del pavimento, permitiendo su uso en proyectos de alta carga vehicular y en regiones con temperaturas fluctuantes.

Resistencia a la deformación y a la fatiga

Una de las propiedades más destacadas de los asfaltos modificados con caucho y RAP es su capacidad para resistir la deformación permanente, especialmente en condiciones de carga pesada y temperaturas elevadas.

La incorporación de caucho de llanta mejora significativamente esta resistencia a la deformación debido a sus propiedades viscoelásticas, que permiten a la mezcla asfáltica absorber energía y distribuirla de manera más uniforme. Investigadores como García Morales et al. (2006) explican que el caucho proporciona una mayor flexibilidad y capacidad de recuperación en la mezcla, lo cual disminuye la deformación permanente y prolonga la vida útil del pavimento. Además, el RAP contribuye a mejorar la estabilidad de la mezcla al aumentar su rigidez y cohesión, reduciendo así la deformación en condiciones de carga intensa.

Estudios recientes han cuantificado este beneficio, demostrando que los asfaltos con caucho y RAP pueden reducir la deformación en un 20-30% en comparación con mezclas sin modificaciones. Esto se traduce en una reducción significativa de la formación de surcos y fisuras, problemas comunes en pavimentos de alta carga. Al minimizar estos efectos, las mezclas asfálticas con caucho y RAP no solo mejoran el confort de los usuarios, sino que también reducen los costos de mantenimiento a largo plazo.

Durabilidad y reducción del envejecimiento

La durabilidad de los pavimentos es otro factor crucial en la elección de materiales para la construcción de carreteras. Los asfaltos tienden a envejecer debido a la oxidación y la exposición a condiciones climáticas, lo cual provoca un endurecimiento del material y un aumento en su susceptibilidad a las fisuras. Este envejecimiento puede reducir la vida útil del pavimento, aumentando la frecuencia de mantenimiento y la necesidad de reemplazo de la capa superficial.

La inclusión de caucho y RAP en mezclas asfálticas ayuda a mitigar este problema de envejecimiento prematuro. El caucho de llanta actúa como un antioxidante, lo cual retrasa la oxidación del asfalto y mantiene su flexibilidad a lo largo del tiempo.

Esta propiedad permite que el pavimento conserve su cohesión interna, evitando que se endurezca y se agriete fácilmente. Huang et al. (2005) señalan que los pavimentos modificados con caucho pueden extender su vida útil en un 20-30% en comparación con los pavimentos convencionales, lo que representa una ventaja significativa en términos de sostenibilidad y economía.

Por otro lado, el RAP también aporta beneficios en cuanto a la reducción del envejecimiento, su inclusión permite reutilizar materiales asfálticos envejecidos, que aún contienen agregados y asfalto en buen estado. Al incorporar RAP, se puede reducir la cantidad de asfalto nuevo en la mezcla, lo cual disminuye los efectos de la oxidación en la superficie y mejora la durabilidad de la estructura.

Resistencia a condiciones climáticas extremas

El comportamiento de los pavimentos frente a condiciones climáticas extremas es un aspecto importante en su diseño, especialmente en zonas donde la temperatura varía considerablemente entre estaciones. En regiones de alta temperatura, el asfalto puede volverse más blando, incrementando el riesgo de deformación y daño estructural. Por el contrario, en zonas frías, el pavimento tiende a endurecerse y a perder flexibilidad, aumentando la probabilidad de agrietamiento.

La combinación de caucho y RAP en la mezcla asfáltica permite mejorar la resistencia del pavimento a estos cambios climáticos extremos. Las propiedades viscoelásticas del caucho ayudan a que el asfalto mantenga su flexibilidad en climas fríos, mientras que su capacidad de resistencia al calor reduce la susceptibilidad al ablandamiento en climas cálidos. Shen et al. (2007) resaltan que el uso de caucho en asfaltos permite una adaptación superior a variaciones térmicas, lo cual se traduce en un pavimento más estable y resistente en regiones de temperaturas extremas.

Mejora en la adherencia y cohesión de la mezcla

Además de las propiedades anteriores, la inclusión de caucho y RAP en el asfalto mejora la adherencia y cohesión de la mezcla, lo cual es fundamental para asegurar que los agregados permanezcan bien ligados y distribuidos en la estructura del

pavimento. La cohesión adicional que proporciona el caucho permite una mayor resistencia al deslizamiento y la separación de los agregados, lo cual es especialmente importante en carreteras de tráfico intenso y en climas lluviosos, donde la adherencia suele verse comprometida.

El RAP, debido a su naturaleza rígida y su capacidad para retener agregados, también mejora la cohesión de la mezcla, aumentando la resistencia del pavimento a la abrasión y el desgaste. Hosseinnezhad et al. (2021) concluyen que la combinación de caucho y RAP en mezclas asfálticas no solo mejora la durabilidad del pavimento, sino que también proporciona un mejor desempeño en términos de seguridad vial, la superficie del pavimento presenta una mejor adherencia y resistencia al deslizamiento.

Reducción de la fisuración por retracción

La fisuración por retracción es un problema común en pavimentos asfálticos, especialmente en regiones donde el pavimento se enfría rápidamente después de períodos de alta temperatura. Este fenómeno ocurre cuando el asfalto se contrae debido a cambios bruscos de temperatura, lo cual puede provocar fisuras en la superficie y reducir la vida útil del pavimento.

La elasticidad y la capacidad de recuperación del caucho en la mezcla asfáltica contribuyen a reducir la fisuración por retracción, permiten que el pavimento se adapte mejor a los cambios de volumen sin sufrir fracturas. Al combinar esta propiedad con la rigidez del RAP, se obtiene un pavimento que tiene tanto flexibilidad como resistencia, lo cual disminuye la probabilidad de que se formen fisuras superficiales. Estudios recientes han demostrado que las mezclas con caucho y RAP tienen hasta un 25% menos de fisuración por retracción en comparación con asfaltos sin modificación, lo cual mejora considerablemente su durabilidad.

Con estas ampliaciones, se exploran de manera más detallada las propiedades técnicas de los asfaltos modificados con caucho y RAP, destacando sus beneficios en durabilidad, resistencia y adaptación a condiciones climáticas adversas.

1.3.Experiencia internacional en la aplicación de caucho y RAP en pavimentos

Varios países han implementado con éxito el uso de caucho y RAP en la construcción y rehabilitación de pavimentos, adaptando estas tecnologías a sus necesidades locales y condiciones geográficas. En Estados Unidos, por ejemplo, la *Federal Highway Administration* ha promovido el uso de RAP en mezclas asfálticas desde hace más de dos décadas. Estudios recientes han demostrado que la incorporación de hasta un 30% de RAP en mezclas asfálticas proporciona un equilibrio entre durabilidad y sostenibilidad. A nivel estatal, Arizona y California han sido pioneros en el uso de caucho de llanta en asfaltos, reportando una mejora significativa en la resistencia a la deformación y reducción en el mantenimiento.

En países europeos, como España, se ha promovido activamente el uso de asfaltos modificados con caucho y RAP en zonas de tráfico intenso. Investigaciones lideradas por García Morales et al. (2006) han mostrado que la combinación de estos materiales reduce el costo de mantenimiento de las carreteras en un 15-20%, y alarga su vida útil en climas mediterráneos. Además, en México, el uso de RAP y caucho ha ganado popularidad en áreas urbanas, donde el tráfico pesado y las altas temperaturas son factores críticos. (Hosseinnezhad, 2008) concluyen que las políticas gubernamentales en países como México han incentivado esta práctica debido a su costo-eficiencia y beneficios ambientales.

Acerca de la experiencia internacional en la aplicación de mezclas asfálticas con caucho de llanta y asfalto reciclado (RAP) en pavimentos. Esta sección destaca algunos casos en regiones como Estados Unidos, Europa y América Latina, así como sus beneficios y desafíos en diferentes contextos.

La implementación de asfaltos modificados con caucho de llanta y RAP ha crecido a nivel mundial, especialmente en países comprometidos con mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la infraestructura vial. Países como Estados Unidos, Alemania, España y algunas naciones en América Latina han liderado esta adopción, desarrollando y aplicando normativas y metodologías que permiten aprovechar al máximo estos materiales en condiciones diversas. La experiencia internacional en esta área ofrece lecciones valiosas y evidencia de los beneficios a nivel técnico,

económico y de sostenibilidad.

Estados Unidos ha sido pionero en el uso de asfaltos modificados con caucho y RAP, especialmente a través de programas de investigación respaldados por entidades como la *Federal Highway Administration* (FHWA) y el *National Center for Asphalt Technology* (NCAT). Desde los años 90, Estados Unidos comenzó a investigar y experimentar con mezclas de asfalto que incluyeran caucho reciclado, particularmente en regiones de altas temperaturas, como el suroeste del país. La Proposición 103 en California, aprobada en 1989, impulsó el uso de polvo de caucho en pavimentos estatales, estableciendo uno de los primeros precedentes para el uso de llantas recicladas en asfalto.

Actualmente, muchos estados de EE. UU. emplean un alto porcentaje de RAP en sus mezclas asfálticas, alcanzando niveles de hasta 20-30% en proyectos de rehabilitación vial. La inclusión de caucho y RAP no solo ha resultado en pavimentos de mayor durabilidad, sino que también ha permitido reducir los costos asociados con el mantenimiento y las reparaciones. El NCAT ha demostrado en estudios a largo plazo que el uso de RAP y caucho incrementa la vida útil de las carreteras hasta en un 30%, lo cual resulta en un ahorro significativo para los departamentos de transporte estatales.

Un ejemplo destacado es el proyecto de pavimentación en Arizona, donde el uso de caucho de llanta ha demostrado reducir el ruido en las carreteras, lo cual ha beneficiado a comunidades cercanas a autopistas y zonas urbanas densamente pobladas. Los estudios realizados por el Departamento de Transporte de Arizona indican que los pavimentos con caucho pueden reducir el ruido en hasta 5 decibeles, mejorando la calidad de vida de los habitantes cercanos.

En Europa, la adopción de asfaltos con caucho y RAP ha sido especialmente destacada en países como Alemania, España, Italia y el Reino Unido, donde el compromiso con la sostenibilidad y el desarrollo de infraestructuras duraderas ha llevado a la creación de normativas específicas para el uso de materiales reciclados en pavimentos. La Unión Europea, a través de proyectos como *End of Life Tyre Recycling* (ELT), ha fomentado la investigación sobre el uso de caucho en pavimentos y ha impulsado políticas que promueven el reciclaje de neumáticos en

las carreteras.

En España, el uso de caucho reciclado y RAP en asfaltos se ha popularizado a través de iniciativas como el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR), el cual establece directrices para la inclusión de materiales reciclados en la construcción. Empresas de construcción han utilizado mezclas de asfalto con hasta un 20% de RAP y caucho en carreteras de alto tráfico, como en la autopista AP-7. Este proyecto ha sido evaluado periódicamente, y los resultados indican que el pavimento modificado ha mantenido su estructura y desempeño en condiciones óptimas, incluso bajo el tráfico pesado y las altas temperaturas del verano español.

En Alemania, donde los inviernos son rigurosos, se han realizado investigaciones que destacan la efectividad del caucho en la mezcla asfáltica para mejorar la flexibilidad del pavimento en climas fríos. Estudios realizados por el Instituto de Investigación de Carreteras y Transporte de Alemania concluyen que los asfaltos con caucho y RAP presentan una mayor resistencia a las grietas por retracción térmica, una propiedad crucial en regiones con temperaturas invernales extremas.

En América Latina, el uso de asfaltos modificados con caucho y RAP ha ido ganando aceptación, aunque con ciertos desafíos, especialmente en términos de financiamiento y adopción de normativas estandarizadas. Países como México, Brasil, Chile y Argentina han comenzado a implementar proyectos piloto y estudios que evalúan el desempeño de estas mezclas en diferentes climas y condiciones de tráfico.

En México, el uso de asfalto con caucho ha sido promovido por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), que ha desarrollado proyectos de pavimentación en zonas de alta temperatura en estados como Sonora y Chihuahua. El IMT ha informado que el uso de caucho mejora la resistencia del pavimento a la deformación permanente, especialmente en áreas con alta exposición solar. Sin embargo, uno de los desafíos ha sido la estandarización de estos materiales a nivel nacional, lo cual es necesario para garantizar un desempeño uniforme en las carreteras del país.

Brasil también ha realizado avances significativos, especialmente en proyectos de infraestructura urbana. En São Paulo, la inclusión de caucho y RAP en asfaltos ha

sido promovida tanto por el gobierno como por iniciativas privadas. La ciudad ha utilizado estas mezclas en proyectos de rehabilitación vial, y los estudios han demostrado una reducción en los costos de mantenimiento, lo cual ha impulsado su uso en otras ciudades del país. Un estudio reciente del Departamento de Transporte de São Paulo destaca que el uso de mezclas modificadas con RAP reduce la necesidad de reasfaltado en un 25%, generando ahorros significativos.

En Ecuador, la investigación sobre asfaltos reciclados, particularmente aquellos que utilizan RAP y modificaciones con caucho, está en crecimiento, aunque todavía es un campo en desarrollo. Algunas universidades y centros de investigación han comenzado a realizar estudios para evaluar el desempeño de estos materiales en condiciones locales.

Universidad Central del Ecuador y Escuela Politécnica Nacional (EPN) han llevado a cabo pruebas experimentales con RAP en mezclas asfálticas, evaluando la resistencia a la fatiga y la deformación permanente en climas específicos del país, como en la Sierra y la Costa. Estas pruebas buscan adaptar metodologías de reciclaje usadas en otros países a las condiciones climáticas y de tráfico en Ecuador.

Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) ha realizado estudios a pequeña escala con empresas constructoras para probar el uso de RAP en pavimentos de carreteras principales, buscando reducir costos de mantenimiento y mejorar la sostenibilidad de los proyectos viales.

En Guayaquil y Quito, algunas constructoras han explorado el uso de mezclas con RAP en proyectos urbanos de rehabilitación. Se están evaluando parámetros como la durabilidad y resistencia a la deformación bajo tráfico pesado y altas temperaturas.

Estos estudios son parte de una tendencia creciente en Ecuador, en la que se exploran las ventajas y limitaciones de los asfaltos reciclados. La falta de normativas específicas es un desafío, pero se espera que a medida que los resultados de estas investigaciones se acumulen, el uso de asfaltos reciclados en el país se regularice y se adopte más ampliamente en los proyectos de

infraestructura vial.

Desafíos y lecciones aprendidas en la experiencia internacional

Aunque la experiencia internacional en la aplicación de asfaltos modificados con caucho y RAP ha sido exitosa en muchos casos, también existen desafíos que deben ser abordados. Uno de los principales obstáculos ha sido la variabilidad en la calidad de los materiales reciclados, especialmente en el RAP, lo cual puede afectar el desempeño del pavimento. Estados Unidos y Europa han enfrentado este desafío mediante la implementación de normativas estrictas y controles de calidad, asegurando que el RAP cumpla con ciertos estándares antes de su inclusión en la mezcla.

Otro desafío importante ha sido el costo inicial de producción. Aunque las mezclas con caucho y RAP reducen los costos de mantenimiento a largo plazo, el proceso de modificación y reciclaje puede requerir inversiones iniciales mayores. Sin embargo, varios estudios, como el del NCAT en Estados Unidos y el del Instituto Alemán de Investigaciones de Carreteras, han demostrado que los beneficios a largo plazo, en términos de durabilidad y costos de mantenimiento, compensan la inversión inicial.

Acerca de la experiencia internacional

La experiencia internacional en el uso de asfaltos modificados con caucho y RAP muestra un camino claro hacia la sostenibilidad, el ahorro en costos de mantenimiento y la mejora de la infraestructura vial. Los estudios en países como Estados Unidos, Alemania y México destacan que estos materiales no solo ofrecen un desempeño superior en términos de durabilidad y resistencia, sino que también representan una oportunidad para optimizar el uso de recursos y mejorar la sostenibilidad en la construcción de carreteras.

La implementación de estos materiales ha permitido a estos países obtener un conocimiento profundo de los desafíos y ventajas de las mezclas asfálticas modificadas, lo cual resulta invaluable para otras naciones que desean adoptar estas tecnologías. La creación de normativas que regulen el uso de caucho y RAP

y el desarrollo de sistemas de control de calidad son pasos necesarios para maximizar los beneficios de estas tecnologías en cualquier contexto.

1.4. Sostenibilidad del uso combinado de caucho y RAP en asfaltos

La sostenibilidad es un concepto fundamental en la construcción moderna de infraestructuras, especialmente en el ámbito de los pavimentos. La utilización de asfaltos modificados con caucho de llanta y asfalto reciclado (RAP) no solo ofrece ventajas técnicas, sino que también se alinea con los principios de sostenibilidad al fomentar un uso más responsable y eficiente de los recursos disponibles. Este enfoque se manifiesta en varias dimensiones: económica, social y técnica, y contribuye a un desarrollo más sostenible de la infraestructura vial.

Eficiencia en el uso de recursos

Una de las principales ventajas de utilizar mezclas asfálticas que incorporan RAP y caucho es la eficiencia en el uso de materiales. Al reciclar asfalto de pavimentos existentes, se reduce la necesidad de extraer y procesar nuevos agregados y asfalto, lo que disminuye la demanda de recursos naturales. Este enfoque no solo ahorra costos en la producción de materiales, sino que también prolonga la vida útil de los recursos existentes, optimizando su utilización.

Según datos del Instituto del Asfalto, el uso de RAP puede representar un ahorro de hasta un 30% en costos de materiales en proyectos de pavimentación. Además, la modificación del asfalto con caucho de llanta aprovecha un material que de otro modo podría terminar en vertederos, lo que contribuye a un manejo más eficiente de los desechos. La transformación de residuos en recursos valiosos promueve un ciclo de vida más circular, donde los materiales se reutilizan en lugar de desecharse.

Reducción de costos de mantenimiento

Las mezclas asfálticas modificadas con caucho y RAP no solo tienen propiedades técnicas superiores, sino que también se traducen en menores costos de mantenimiento a largo plazo. Su durabilidad y resistencia a la deformación, a la fatiga y al envejecimiento prematuro significan que estos pavimentos requieren

menos intervenciones y reparaciones en comparación con los asfaltos convencionales. Esto se traduce en ahorros significativos para las entidades gubernamentales y los operadores de carreteras, quienes pueden destinar esos recursos a otros proyectos o servicios.

En términos económicos, las infraestructuras de transporte representan una parte considerable del gasto público. Al invertir en pavimentos más duraderos, se optimiza la asignación de recursos y se mejora la eficiencia del gasto público. Los estudios han demostrado que la adopción de mezclas asfálticas modificadas puede resultar en ahorros que superan el 20% de los costos de mantenimiento a lo largo de la vida útil del pavimento, lo cual es un beneficio directo para las finanzas públicas y los contribuyentes.

Impulso a la innovación y desarrollo tecnológico

La búsqueda de soluciones más sostenibles en la construcción de carreteras ha llevado a un impulso en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías. El uso de asfaltos modificados con caucho y RAP está a la vanguardia de esta innovación, lo que ha permitido el desarrollo de técnicas de producción más eficientes y sostenibles. Los laboratorios y centros de investigación están constantemente mejorando las metodologías de mezcla y los procesos de modificación, lo que no solo optimiza el uso de materiales, sino que también abre nuevas oportunidades para la investigación científica y técnica en el sector.

La adopción de estas tecnologías no solo beneficia a la industria del asfalto, sino que también crea oportunidades de empleo y desarrollo profesional en el ámbito de la ingeniería y la construcción. Las empresas que invierten en la producción y uso de asfaltos modificados pueden atraer talento y desarrollar competencias específicas en técnicas sostenibles, lo que contribuye al crecimiento económico local.

Beneficios sociales y económicos

La implementación de asfaltos modificados con caucho y RAP también tiene un impacto positivo en la calidad de vida de las comunidades. Al construir pavimentos

más duraderos y de mejor desempeño, se mejora la seguridad vial y el confort de los usuarios, lo que reduce el número de accidentes y mejora la experiencia de conducción. Las carreteras bien mantenidas y duraderas favorecen la movilidad y conectividad de las comunidades, lo que a su vez puede estimular el desarrollo económico local.

La creación de empleos relacionados con la producción y aplicación de asfaltos modificados también tiene un efecto multiplicador en la economía local. Desde la recolección de llantas usadas hasta la fabricación y aplicación de mezclas asfálticas, se generan oportunidades de trabajo que benefician a los residentes y apoyan el desarrollo económico en la región.

Conclusiones sobre la sostenibilidad

En resumen, la utilización de asfaltos modificados con caucho de llanta y RAP representa una solución integral para abordar los desafíos de sostenibilidad en la construcción de infraestructuras. Al mejorar la eficiencia en el uso de recursos, reducir costos de mantenimiento, fomentar la innovación y desarrollo tecnológico, y generar beneficios sociales y económicos, estas mezclas asfálticas contribuyen a un enfoque más sostenible y responsable en la infraestructura vial.

La adopción de estos materiales no solo beneficia a la industria del asfalto, sino que también promueve un desarrollo más equilibrado y sostenible, asegurando que las futuras generaciones puedan disfrutar de infraestructuras eficientes y duraderas. La transición hacia un enfoque más sostenible en la construcción de carreteras es, sin duda, un paso hacia un futuro más próspero y resiliente.

La inclusión de caucho de llanta y RAP en las mezclas asfálticas no solo ofrece beneficios técnicos y de rendimiento, sino que también contribuye de manera significativa a la sostenibilidad en la infraestructura vial. La investigación demuestra que la combinación de estos materiales incrementa la durabilidad de los pavimentos, reduce los costos de mantenimiento, y minimiza el impacto ambiental a través de la reducción de desechos y el uso eficiente de recursos naturales. Con el respaldo de estudios nacionales e internacionales, el uso de caucho y RAP representa un avance en la tecnología de pavimentación.

CAPITULO II. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1. Tipo de investigación

El presente estudio se caracteriza por un enfoque cuantitativo y experimental, su objetivo es medir, analizar y comparar de manera objetiva las propiedades mecánicas y volumétricas de mezclas asfálticas convencionales y modificadas con RAP (asfalto reciclado) y caucho de llanta. Este enfoque permite obtener datos numéricos precisos que respalden las conclusiones del estudio, garantizando la reproducibilidad de los resultados en otros contextos.

El enfoque cuantitativo resulta especialmente útil en investigaciones relacionadas con materiales de construcción, donde es esencial evaluar parámetros específicos, como la estabilidad, densidad, vacíos y flujo, mediante técnicas estandarizadas. En este caso, el uso de ensayos controlados y repetibles, como el Ensayo Marshall, asegura que los resultados obtenidos puedan ser analizados de manera estadística y extrapolados a situaciones reales de pavimentación.

Por otro lado, la naturaleza experimental del estudio implica la manipulación deliberada de variables, como las proporciones de RAP y caucho reciclado en las mezclas asfálticas. Este enfoque permite analizar cómo estas modificaciones afectan las propiedades mecánicas de las mezclas, estableciendo relaciones causa-efecto. Por ejemplo, el uso de RAP no solo aporta agregados reciclados y ligante envejecido, sino que también puede alterar la compactación y la resistencia del pavimento. Del mismo modo, la adición de caucho reciclado modifica las propiedades reológicas del ligante, mejorando la resistencia al ahuellamiento y la elasticidad.

Justificación del enfoque experimental

Según Hernández et al. (2014), las investigaciones experimentales son fundamentales en el desarrollo de materiales innovadores, permiten evaluar el impacto de modificaciones específicas en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales. En el contexto de los pavimentos, este enfoque resulta particularmente relevante, el desempeño del material está estrechamente

relacionado con su capacidad para resistir cargas de tráfico, cambios de temperatura y otros factores ambientales.

El presente estudio no solo busca evaluar el comportamiento de las mezclas modificadas, sino también establecer su viabilidad técnica y económica como alternativas sostenibles. La elección de RAP y caucho reciclado responde a la necesidad de reducir la dependencia de materiales vírgenes y mitigar el impacto ambiental generado por los residuos de construcción y neumáticos fuera de uso. En este sentido, la investigación se enmarca en un enfoque de economía circular, promoviendo la reutilización de recursos y la reducción de residuos.

Objetivos del enfoque cuantitativo y experimental

El enfoque metodológico adoptado en este estudio tiene como objetivo:

1. Medir de manera precisa las propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas asfálticas, utilizando técnicas estandarizadas que garanticen la comparabilidad de los resultados.
2. Determinar la influencia de diferentes proporciones de RAP y caucho reciclado en parámetros clave, como estabilidad, flujo y densidad, para identificar configuraciones óptimas.
3. Validar la aplicabilidad de estas mezclas en proyectos de pavimentación, evaluando su desempeño bajo condiciones controladas de laboratorio y extrapolando los resultados a escenarios reales.

En conclusión, el enfoque experimental cuantitativo empleado en esta investigación permite responder de manera rigurosa y objetiva a la pregunta principal del estudio: ¿Cómo afectan el RAP y el caucho reciclado las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas?

Los resultados obtenidos no solo contribuirán al conocimiento científico en el ámbito de la ingeniería vial, sino que también servirán como base para el desarrollo de normativas y prácticas más sostenibles en el sector de la construcción vial.

2.2. Población y muestra

La población de este estudio está constituida por todas las posibles combinaciones de mezclas asfálticas que incluyan RAP y caucho reciclado como modificadores, en diversas proporciones. Estas combinaciones representan una amplia gama de diseños que podrían aplicarse en diferentes contextos de pavimentación, especialmente en proyectos enfocados en la sostenibilidad y el uso de materiales reciclados.

Para llevar a cabo un análisis estadísticamente significativo y garantizar la representatividad de los resultados, se seleccionó una muestra específica compuesta por 36 briquetas, distribuidas de la siguiente manera:

- **9 briquetas convencionales:** Fabricadas siguiendo los estándares establecidos en el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas del Ecuador (MOP-2002), sin la adición de materiales reciclados. Estas briquetas actúan como grupo de control, permitiendo establecer comparaciones con las mezclas modificadas.
- **27 briquetas modificadas:** Elaboradas con mezclas asfálticas que contienen RAP y caucho reciclado en proporciones específicas. Estas proporciones se seleccionaron en función de estudios previos y normativas internacionales, asegurando su pertinencia técnica y su aplicabilidad en la construcción vial.

El tamaño de la muestra se determinó considerando las exigencias de los ensayos Marshall, que requieren al menos tres réplicas por diseño para garantizar resultados estadísticamente válidos. Además, la muestra seleccionada permite evaluar variaciones clave en las propiedades de las mezclas (estabilidad, densidad, vacíos y flujo), logrando un nivel de confianza adecuado en las conclusiones obtenidas.

La decisión de incluir proporciones específicas de RAP y caucho reciclado responde a la necesidad de evaluar cómo estos materiales interactúan entre sí y con el ligante asfáltico. En particular, se busca identificar configuraciones que ofrezcan un equilibrio óptimo entre desempeño mecánico, costos y sostenibilidad.

Origen y procesamiento de los materiales reciclados

RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*): El material reciclado utilizado en este estudio se obtuvo de fresados asfálticos recuperados durante proyectos de rehabilitación vial en la ciudad de Ambato, Ecuador. El RAP fue sometido a un proceso de limpieza, trituración y tamizado para garantizar una granulometría uniforme y la eliminación de contaminantes como tierra, vegetación o restos de materiales no deseados. Este tratamiento asegura que el RAP cumpla con las especificaciones técnicas necesarias para su incorporación en las mezclas asfálticas.

La inclusión de RAP en las mezclas no solo permite aprovechar el ligante asfáltico envejecido presente en el material, sino que también contribuye a reducir la dependencia de agregados vírgenes, optimizando los costos y minimizando el impacto ambiental.

Caucho reciclado de neumáticos fuera de uso (NFU): Este material se obtuvo a partir de neumáticos fuera de uso (NFU) recolectados en talleres locales y centros de reciclaje. Los neumáticos fueron triturados y tamizados hasta alcanzar un tamaño de partícula inferior a 1.18 mm, de acuerdo con las especificaciones técnicas para su uso en mezclas asfálticas. Este caucho, al ser incorporado en el ligante asfáltico, mejora las propiedades elásticas de la mezcla, aumentando su resistencia al agrietamiento y a las deformaciones permanentes.

El empleo de estos materiales reciclados no solo responde a consideraciones económicas, sino también a la necesidad de promover prácticas de construcción sostenible. Según estudios previos realizados en América Latina, la inclusión de RAP y caucho en las mezclas asfálticas puede extender la vida útil del pavimento y reducir los costos asociados al mantenimiento y la rehabilitación.

Distribución de las proporciones en las mezclas modificadas

Las 27 briquetas modificadas se elaboraron utilizando combinaciones de RAP y caucho reciclado en diferentes proporciones. Estas proporciones fueron seleccionadas en base a estudios previos y a recomendaciones técnicas, asegurando un balance adecuado entre propiedades mecánicas y costos. Las

combinaciones evaluadas incluyen:

- **Bajo contenido de RAP y caucho:** Representa mezclas con 10 % de RAP y 5 % de caucho reciclado.
- **Proporciones intermedias:** Incluye mezclas con 25 % de RAP y 10 % de caucho.
- **Altas proporciones de reciclado:** Diseños que incorporan 40 % de RAP y 15 % de caucho.

Estas proporciones fueron seleccionadas para evaluar cómo varía el comportamiento mecánico y volumétrico de las mezclas en función de la cantidad de material reciclado incorporado. Los resultados obtenidos permitirán determinar si existen niveles críticos de incorporación que puedan comprometer el desempeño del pavimento.

Impacto esperado del diseño muestral

La selección cuidadosa de la muestra permite abordar preguntas clave relacionadas con la viabilidad técnica y económica de las mezclas modificadas. En particular, el análisis de estas briquetas ayudará a determinar si el uso combinado de RAP y caucho reciclado puede superar los estándares de desempeño de las mezclas asfálticas convencionales, promoviendo al mismo tiempo un modelo de construcción más sostenible.

2.3. Métodos, técnicas e instrumentos

En este apartado se detalla de forma exhaustiva el conjunto de métodos, técnicas e instrumentos empleados para la realización de los ensayos necesarios para esta investigación. Dado el enfoque cuantitativo del estudio, se utilizaron metodologías que permitieron recopilar datos precisos y fiables sobre las propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas asfálticas estudiadas. A continuación, se presenta un análisis detallado:

Métodos empleados

El diseño metodológico de la investigación se sustentó en el uso de métodos experimentales, los cuales permitieron establecer comparaciones objetivas entre las mezclas asfálticas convencionales y aquellas modificadas con RAP y caucho reciclado. Los métodos empleados incluyeron:

1. Método comparativo:

Este método fue el eje central de la investigación, permitió establecer diferencias y similitudes entre las briquetas de asfalto convencional y las modificadas con RAP y caucho. La comparación se realizó a través de parámetros clave como estabilidad, flujo, densidad y vacíos, todos ellos evaluados mediante ensayos normalizados.

2. Método inductivo:

A través de la recopilación de datos específicos de los ensayos realizados, se pudieron generar conclusiones generales sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas modificadas. Este enfoque permitió comprender cómo el uso de RAP y caucho afecta las propiedades mecánicas de las mezclas.

3. Método deductivo:

Basándose en los conocimientos teóricos y en investigaciones previas, se establecieron hipótesis que fueron verificadas o rechazadas mediante los resultados obtenidos en los ensayos experimentales.

4. Método analítico:

Este método se utilizó para descomponer los datos obtenidos en sus componentes fundamentales, lo que permitió identificar patrones y relaciones entre las variables estudiadas, como el porcentaje de modificación (RAP y caucho) y el desempeño mecánico de las briquetas.

Técnicas empleadas

Para llevar a cabo la investigación, se implementaron técnicas específicas, todas ellas respaldadas por normativas internacionales como ASTM, AASHTO y las especificaciones del Ministerio de Obras Públicas (MOP) de Ecuador. Estas técnicas garantizan la reproducibilidad y la fiabilidad de los resultados obtenidos. Entre las técnicas utilizadas se encuentran:

1. Granulometría:

- Se realizó mediante el método de tamizado en seco (ASTM C136), separando los agregados según su tamaño y determinando la distribución granulométrica de los materiales utilizados en las mezclas.
- Esta técnica permitió verificar que los agregados reciclados (RAP) y nuevos cumplieran con las especificaciones requeridas para garantizar una buena compactación y estabilidad en el pavimento.

2. Abrasión en la máquina de Los Ángeles:

- Según la norma ASTM C131, este ensayo se utilizó para medir la resistencia al desgaste de los agregados.
- Fue fundamental para evaluar si los agregados reciclados presentes en el RAP mantenían una resistencia adecuada tras múltiples ciclos de uso.

3. Ensayo Marshall:

- Esta técnica, descrita en la norma ASTM D6927, fue clave para determinar la estabilidad (resistencia a la carga) y el flujo (deformación) de las briquetas.
- Los resultados de este ensayo permitieron evaluar la capacidad de las mezclas modificadas para resistir las cargas del tráfico y deformarse dentro de los límites aceptables.

4. Ensayo Rice (ASTM D2041):

- Utilizado para determinar la densidad teórica máxima de la mezcla asfáltica, esencial para calcular el volumen de vacíos.
- Este ensayo es crucial para garantizar que las mezclas asfálticas no sean ni demasiado densas (impermeables) ni demasiado porosas (susceptibles al

deterioro).

5. Moldeo de briquetas:

- Se empleó un compactador Marshall estándar automático para fabricar briquetas cilíndricas, asegurando una compactación uniforme y representativa.
- Este proceso incluyó la adición controlada del asfalto modificado, calentamiento a temperaturas específicas (135°C) y la compactación mediante golpes mecánicos estandarizados. (75 golpes por lado)

6. Medición de densidades:

- Se aplicaron ensayos para determinar la gravedad específica de los agregados y las briquetas compactadas, utilizando normas como ASTM D2726.
- Esta técnica permitió analizar la interacción entre los materiales reciclados (RAP y caucho) con el ligante asfáltico.

7. Contenido de asfalto:

- Mediante el ensayo de extracción (ASTM D2172), se determinó el porcentaje de ligante presente en las mezclas.
- Este análisis fue crucial para verificar que las proporciones de asfalto en las mezclas modificadas cumplieran con las especificaciones técnicas. Cada una de las mezclas realizadas se hizo la extracción de asfalto con la centrifuga y en este caso como solvente Gasolina super.

Instrumentos empleados

Los instrumentos utilizados durante los ensayos desempeñaron un papel esencial para garantizar la precisión de los datos obtenidos. A continuación, se describen los principales instrumentos utilizados:

1. Tamices estándar:

- Fabricados según las especificaciones ASTM E11, permitieron realizar la granulometría de los agregados y del RAP.

- Los resultados de esta técnica aseguraron que las partículas cumplieran con las distribuciones ideales para mezclas asfálticas.

2. Máquina de Los Ángeles:

- Instrumento diseñado para evaluar la resistencia al desgaste de los agregados mediante la aplicación de impactos controlados.
- Su uso garantizó la selección de materiales duraderos para las mezclas.

3. Prensa Marshall:

- Este equipo fue esencial para medir la estabilidad y el flujo de las briquetas. La prensa aplica una carga incremental hasta la falla de la muestra, proporcionando datos críticos para el análisis comparativo.

4. Compactador Marshall:

- Utilizado para fabricar las briquetas cilíndricas mediante golpes mecánicos controlados, asegurando una compactación uniforme.
- Este instrumento replicó las condiciones de compactación que enfrentan los pavimentos durante su construcción.

5. Baño María de agua:

- Se utilizó para acondicionar las briquetas a 60°C antes de realizar el ensayo Marshall, asegurando la uniformidad en las condiciones de prueba.

6. Balanza de precisión:

- Con una precisión de 0.01 g, se empleó para medir las masas de los agregados, asfalto y briquetas. Este instrumento fue fundamental para garantizar la exactitud en la preparación de las mezclas.

7. Frasco volumétrico y bomba de vacío:

- Utilizados durante el ensayo Rice para determinar la densidad teórica máxima de las mezclas asfálticas.

Procedimientos estandarizados

Cada técnica e instrumento fue utilizado siguiendo procedimientos estandarizados establecidos por las normativas correspondientes. Esto aseguró que los datos fueran fiables y comparables con estudios previos realizados en Ecuador e internacionalmente. Además, todos los instrumentos se calibraron antes de los ensayos para evitar desviaciones en los resultados.

2.4. Procesamiento y análisis de la información

El procesamiento y análisis de los datos recolectados durante los ensayos constituyen una parte fundamental del desarrollo de esta investigación. Para este propósito, se utilizó Microsoft Excel, una herramienta versátil que permitió realizar cálculos, gestionar grandes volúmenes de datos y generar gráficos representativos que facilitaron la comparación entre las briquetas convencionales y las modificadas con RAP y caucho reciclado.

A continuación, se describen con mayor detalle las actividades realizadas en esta etapa:

Diseño de fórmulas maestras en Excel

Para garantizar la precisión y la eficiencia en el análisis de los datos, se diseñaron fórmulas maestras que automatizaron cálculos clave, reduciendo el margen de error humano y optimizando el tiempo de procesamiento. Entre los cálculos más importantes realizados se encuentran:

Densidad de las briquetas:

La densidad se calculó dividiendo la masa de las briquetas por su volumen. Se utilizó una fórmula que incorporaba los datos de las medidas físicas de las briquetas, lo que permitió calcular este parámetro de manera rápida y uniforme para todas las muestras.

Fórmula en Excel:

$$\text{`=MASA/((PI()*DIAMETRO^2/4)*ALTURA)`}$$

1. Estabilidad y flujo:

Los datos obtenidos del ensayo Marshall, realizados con un aparato que mide la carga máxima antes de la falla (estabilidad) y la deformación vertical (flujo), fueron procesados directamente en Excel. Se crearon columnas que permitían calcular las relaciones entre estos valores y determinar si las mezclas cumplían con las especificaciones del MOP-2002.

2. Volumen de vacíos (VMA y VFA):

Para el cálculo del volumen de vacíos totales (VMA) y el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA), se usaron fórmulas que incorporaban datos como densidad de los agregados, contenido de asfalto y densidad de la mezcla compactada. Estas métricas son esenciales para evaluar la calidad volumétrica de las briquetas.

Ejemplo de fórmula para VMA:

$$VMA = 100 * ((1 - DENSIDAD_DE_MEZCLA / DENSIDAD_TEORICA_MAXIMA))$$

3. Vacíos teóricos máximos (Rice):

Los resultados obtenidos del ensayo Rice fueron utilizados como referencia para calcular los vacíos presentes en las briquetas, relacionándolos con la densidad de la mezcla compactada. Este análisis permitió evaluar la compactación y permeabilidad de las briquetas, parámetros fundamentales para la durabilidad del pavimento.

Organización y limpieza de datos

Uno de los primeros pasos en el procesamiento de información fue organizar los datos recolectados durante los ensayos en un formato tabular en Excel. Esto incluyó la separación de los datos por grupos (briquetas convencionales y modificadas) y la creación de etiquetas claras para cada ensayo y parámetro evaluado.

Además, se implementaron las siguientes acciones:

1. Validación de datos:

Se aplicaron herramientas de validación en Excel, como rangos predefinidos y reglas condicionales, para evitar valores atípicos o errores de ingreso de datos. Por ejemplo, los valores de densidad y flujo se restringieron a rangos aceptables según las especificaciones del MOP.

2. Promedios y desviaciones estándar:

Para cada conjunto de datos (estabilidad, flujo, densidad, vacíos, entre otros), se calcularon promedios y desviaciones estándar. Esto permitió analizar la variabilidad de los resultados y determinar la consistencia de los ensayos realizados.

Fórmulas en Excel:

Promedio: `=PROMEDIO(RANGO_DE_DATOS)`

Desviación estándar: `=DESVEST(RANGO_DE_DATOS)`

3. Creación de filtros y tablas dinámicas:

Se usaron filtros avanzados y tablas dinámicas para segmentar los datos según los diferentes factores de modificación (contenido de RAP y caucho) y generar reportes específicos que facilitaron el análisis comparativo.

Representación gráfica de resultados

Una parte crucial del análisis fue la generación de gráficos en Excel, que permitieron visualizar de forma clara las diferencias entre las briquetas convencionales y las modificadas. Se emplearon los siguientes tipos de gráficos:

1. Gráficos de barras:

Utilizados para comparar parámetros como estabilidad y flujo entre los dos grupos de briquetas. Estos gráficos permitieron identificar de manera inmediata cuál de las mezclas ofrecía mejores resultados mecánicos.

2. Gráficos de dispersión:

Estos gráficos se usaron para evaluar la relación entre el contenido de RAP/caucho y las propiedades volumétricas de las briquetas (densidad y vacíos). Esto ayudó a visualizar tendencias y comportamientos específicos.

3. Gráficos de líneas:

Se emplearon para mostrar el desempeño de las briquetas a medida que se incrementaba el contenido de RAP y caucho. Esto permitió analizar si existía un punto óptimo en las proporciones de los modificadores.

4. Gráficos comparativos:

Se elaboraron gráficos superpuestos que mostraban los valores promedio de estabilidad, densidad y vacíos para las briquetas convencionales y las modificadas. Estas representaciones fueron esenciales para resaltar las diferencias y ventajas de las mezclas recicladas.

Análisis estadístico básico

Aunque la herramienta principal fue Excel, se complementó con un análisis estadístico descriptivo para interpretar los resultados de manera más profunda.

Entre los indicadores calculados están:

- Intervalos de confianza: Permitieron evaluar la precisión de las medidas y determinar si las diferencias entre los grupos eran estadísticamente significativas.
- Coeficientes de variación: Ayudaron a medir la dispersión relativa de los datos respecto a sus promedios, garantizando la fiabilidad de los ensayos realizados.

El análisis estadístico básico realizado en Excel permitió identificar patrones relevantes y establecer conclusiones preliminares que respaldan la incorporación de RAP y caucho en mezclas asfálticas.

Consolidación de resultados

Finalmente, todos los datos procesados se consolidaron en reportes finales generados en Excel. Estos reportes incluyeron tablas resumidas con promedios, desviaciones estándar y valores comparativos, así como gráficos representativos. La información consolidada sirvió como base para estructurar las conclusiones y recomendaciones del estudio, garantizando que las decisiones tomadas estén fundamentadas en datos objetivos y consistentes.

Justificación del uso de Excel

El uso de Excel en esta investigación se justificó por las siguientes razones:

1. **Facilidad de uso:** Su interfaz intuitiva permitió gestionar grandes volúmenes de datos sin necesidad de software especializado.
2. **Versatilidad:** Las fórmulas y herramientas gráficas integradas permitieron realizar tanto cálculos básicos como análisis complejos.
3. **Adaptabilidad:** La flexibilidad de Excel facilitó la personalización de las fórmulas y gráficos según las necesidades específicas del estudio.
4. **Accesibilidad:** Al ser una herramienta ampliamente utilizada, garantiza que los datos y reportes generados sean fácilmente replicables y comprensibles para otros investigadores o profesionales del sector.

Caracterización del método y materiales

El método empleado en este estudio combina el uso de RAP y caucho de llanta reciclado como modificadores en mezclas asfálticas, con el objetivo de optimizar sus propiedades mecánicas y volumétricas. Este enfoque no solo mejora el desempeño del pavimento, sino que también contribuye a una construcción más sostenible al reducir la necesidad de materiales vírgenes y minimizar el impacto ambiental generado por los desechos.

Ventajas del método propuesto

El diseño metodológico del estudio ofrece múltiples ventajas, tanto técnicas como ambientales y económicas:

- **Optimización de recursos:** El RAP proporciona agregados y ligante envejecido, disminuyendo la necesidad de nuevos materiales. Por otro lado, el caucho reciclado mejora propiedades críticas como la elasticidad y la resistencia al ahuellamiento.
- **Reducción de residuos:** La reutilización de fresados asfálticos y neumáticos fuera de uso (NFU) minimiza la acumulación de desechos en vertederos y su impacto negativo en el medio ambiente.
- **Mejora del desempeño del pavimento:** Las mezclas modificadas con RAP y caucho reciclado pueden resistir mejor las deformaciones permanentes, el envejecimiento del asfalto y las cargas dinámicas del tráfico pesado, especialmente en climas cálidos.

Propiedades clave de los materiales

El éxito del método depende de la caracterización adecuada de los materiales reciclados y su interacción con el ligante asfáltico. A continuación, se presentan las propiedades más relevantes de los materiales utilizados:

RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*):

- **Composición:** El RAP contiene una mezcla de ligante envejecido y agregados previamente utilizados en pavimentos. Este material puede presentar propiedades heterogéneas dependiendo de su origen, por lo que es esencial un procesamiento adecuado para garantizar una granulometría uniforme.
- **Propiedades técnicas:** El ligante envejecido en el RAP tiene una mayor viscosidad debido a la oxidación sufrida durante su vida útil. Esto puede afectar la trabajabilidad de la mezcla, pero su combinación con un ligante virgen y aditivos como caucho reciclado permite restaurar sus propiedades reológicas.
- **Ventajas específicas:** La incorporación de RAP reduce significativamente los costos de producción y contribuye a la sostenibilidad, disminuye la extracción de agregados naturales.

Caucho de llanta reciclado:

- **Proceso de obtención:** El caucho reciclado utilizado en este estudio se obtuvo a partir de llantas trituradas y tamizadas hasta alcanzar un tamaño de partícula inferior a 1.18 mm, según las especificaciones técnicas recomendadas.
- **Propiedades mecánicas:** Este material mejora la elasticidad de las mezclas asfálticas, aumentando su resistencia a las deformaciones permanentes y al agrietamiento por fatiga. Además, el caucho actúa como un modificador del ligante, aumentando su durabilidad frente al envejecimiento y la intemperie.
- **Aplicaciones adicionales:** Estudios previos han demostrado que las mezclas con caucho reciclado presentan una mejor absorción de vibraciones y ruido, lo que las hace ideales para proyectos en zonas urbanas.

Ligante asfáltico:

En este estudio se utilizó un asfalto convencional tipo AC-20, cumpliendo con las especificaciones técnicas establecidas en el MOP-2002. Este ligante sirvió como base para la mezcla, garantizando que las propiedades del asfalto modificado se mantuvieran dentro de rangos aceptables.

Diseño de mezcla y proporciones

El método adoptado se basa en la incorporación de RAP y caucho reciclado en proporciones cuidadosamente seleccionadas para garantizar un desempeño óptimo. El diseño de mezcla siguió los lineamientos del Ensayo Marshall, ajustando las proporciones de RAP y caucho para alcanzar valores ideales de estabilidad, flujo, densidad y vacíos.

Las mezclas se diseñaron considerando las siguientes proporciones:

- 10 % de RAP y 5 % de caucho: Configuración con bajo contenido de reciclado, adecuada para condiciones de tráfico ligero.
- 25 % de RAP y 10 % de caucho: Configuración intermedia, diseñada para evaluar la interacción óptima entre materiales reciclados y ligante.
- 40 % de RAP y 15 % de caucho: Configuración con alto contenido de

reciclado, que maximiza la sostenibilidad, pero requiere mayor control en el diseño para evitar problemas de compactación.

Estas proporciones permitieron analizar cómo varía el desempeño de las mezclas en función de la cantidad de material reciclado incorporado, contribuyendo a la identificación de configuraciones óptimas.

Impacto en el desempeño del pavimento

El método propuesto busca optimizar las propiedades de las mezclas asfálticas, con énfasis en:

- **Resistencia al ahuellamiento:** Las mezclas con caucho presentan un mayor módulo de elasticidad, lo que reduce las deformaciones plásticas en climas cálidos.
- **Durabilidad:** La incorporación de RAP y caucho mejora la resistencia al envejecimiento del pavimento, prolongando su vida útil.
- **Costo-beneficio:** Aunque las mezclas modificadas pueden requerir un proceso inicial de diseño más complejo, sus beneficios a largo plazo en términos de durabilidad y sostenibilidad justifican su uso en proyectos viales.

En comparación con las mezclas convencionales, las mezclas evaluadas en este estudio presentan el potencial de ser una solución viable para proyectos de pavimentación sostenible en Ecuador, combinando desempeño técnico, reducción de costos y beneficios ambientales.

Conclusión

La metodología desarrollada permite evaluar de manera precisa y controlada el impacto de la incorporación de RAP y caucho reciclado en mezclas asfálticas. Al seguir estándares internacionales y emplear técnicas validadas, se garantiza la confiabilidad de los resultados. Este estudio no solo aporta datos relevantes sobre el desempeño de materiales reciclados en el ámbito local, sino que también contribuye al desarrollo de soluciones sostenibles y económicamente viables para la construcción vial en Ecuador.

CAPÍTULO III. PROPUESTA

3.1. Análisis situacional

Contexto general del proyecto

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar mezclas asfálticas modificadas con RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) y caucho reciclado proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU), contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia económica en la construcción de pavimentos en Ecuador. Este enfoque innovador no solo reduce la dependencia de materiales vírgenes, sino que también mitiga el impacto ambiental asociado a la disposición de neumáticos y pavimentos deteriorados.

A nivel mundial, las investigaciones sobre el uso de RAP y caucho reciclado han demostrado beneficios significativos. El RAP aporta ligante asfáltico envejecido y agregados reciclados, mientras que el caucho mejora las propiedades viscoelásticas de las mezclas, incrementando su durabilidad y resistencia a la deformación permanente. En Ecuador, este tipo de iniciativas son relativamente nuevas, lo que convierte a este proyecto en un referente para futuras aplicaciones.

La implementación de mezclas asfálticas modificadas con RAP y caucho reciclado representa una oportunidad significativa para la industria de la construcción vial en Ecuador. Este enfoque se alinea con las tendencias globales hacia la economía circular y la construcción sostenible, respondiendo simultáneamente a dos desafíos ambientales críticos: la gestión de residuos de pavimentos y la disposición de neumáticos fuera de uso.

En el contexto internacional, países como Estados Unidos, España y Alemania han liderado la investigación y aplicación de estas tecnologías, reportando resultados prometedores en términos de rendimiento y sostenibilidad. Por ejemplo, estudios realizados por la *Federal Highway Administration* (FHWA) han demostrado que las mezclas con contenidos de RAP de hasta 40% pueden alcanzar desempeños equivalentes o superiores a las mezclas convencionales cuando se diseñan adecuadamente. Asimismo, la incorporación de caucho reciclado ha mostrado

mejoras significativas en la resistencia al agrietamiento por fatiga y la reducción del ruido de rodadura.

En Ecuador, el contexto actual presenta condiciones favorables para la implementación de estas tecnologías. El país genera aproximadamente 3 millones de neumáticos usados anualmente, de los cuales solo un pequeño porcentaje se recicla efectivamente. Además, la creciente necesidad de rehabilitación de pavimentos existentes genera una fuente constante de RAP que actualmente no se aprovecha en su totalidad. La combinación de ambos materiales en mezclas asfálticas representa una solución integral que podría reducir significativamente los costos de construcción y mantenimiento vial.

Desde el punto de vista técnico, la incorporación de estos materiales reciclados requiere un estudio minucioso de sus propiedades y comportamiento. El RAP aporta ligante envejecido que debe ser considerado en el diseño de la mezcla, mientras que el caucho modifica la reología del asfalto, mejorando su comportamiento a altas y bajas temperaturas. La interacción entre ambos materiales y su efecto combinado en las propiedades finales de la mezcla representa un área de investigación novedosa con potencial significativo.

La implementación exitosa de estas tecnologías en Ecuador podría establecer un precedente importante para la región latinoamericana, donde la gestión de residuos y la sostenibilidad en la construcción vial son temas de creciente importancia. Además, el desarrollo de normativas y especificaciones técnicas locales para el uso de estos materiales contribuiría a la estandarización y adopción más amplia de estas prácticas sostenibles.

Este proyecto no solo aborda aspectos técnicos y ambientales, sino que también tiene implicaciones socioeconómicas significativas, como la creación de nuevas oportunidades de empleo en la industria del reciclaje y la reducción de costos en la construcción y mantenimiento de infraestructura vial. La transferencia de conocimiento y tecnología resultante de esta investigación podría catalizar la innovación en el sector de la construcción vial ecuatoriana.

Caracterización de los materiales

La caracterización de materiales es un proceso científico y técnico fundamental para comprender las propiedades físicas, químicas, mecánicas y estructurales de un material. En el contexto de materiales para construcción vial, como los utilizados en mezclas asfálticas con RAP y caucho reciclado, la caracterización es crucial para evaluar su idoneidad y rendimiento.

Elementos clave de la caracterización de materiales:

1. Caracterización Física

- Densidad
- Granulometría
- Distribución de tamaño de partículas
- Porosidad
- Morfología

2. Caracterización Mecánica

- Resistencia a la tracción
- Módulo de elasticidad
- Dureza
- Resistencia a la fatiga
- Comportamiento viscoelástico

3. Ensayos Mecánicos

- Marshall
- Módulo Resiliente
- Tracción indirecta
- Fatiga
- Deformación permanente

Importancia en Mezclas Asfálticas:

Control de Calidad

- Verificación de especificaciones técnicas
- Garantía de rendimiento

Diseño de Mezclas

- Optimización de proporciones
- Predicción de comportamiento

Investigación y Desarrollo

- Comprensión de interacciones entre materiales
- Mejora de propiedades

Sostenibilidad

- Evaluación de materiales reciclados
- Reducción de impacto ambiental

En el caso específico de mezclas con RAP y caucho reciclado, la caracterización permite:

- Determinar la compatibilidad entre materiales
- Evaluar la modificación de propiedades
- Predecir el comportamiento en diferentes condiciones
- Establecer parámetros de diseño óptimos

En este estudio trataremos de investigar los más importantes:

Pavimento asfáltico reciclado (RAP)

El RAP empleado proviene de fresados asfálticos recolectados en la ciudad de Ambato, procesados para cumplir con los estándares internacionales. Definición y Origen: El Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) representa una solución innovadora en la gestión de infraestructura vial, consistiendo en materiales provenientes de la rehabilitación o reconstrucción de pavimentos existentes. En el

caso específico de Ambato, los fresados asfálticos se obtienen mediante procesos de rehabilitación y mantenimiento de vías urbanas e interurbanas.

Proceso de Obtención y Procesamiento:

1. Recolección

- Rehabilitación de vías urbanas
- Mantenimiento de carreteras provinciales
- Renovación de infraestructura vial
- Zona de recolección: Ciudad de Ambato y zonas aledañas de la provincia de Tungurahua

2. Procesamiento

Etapas de transformación:

- a) Fresado mecánico
- b) Separación de componentes
- c) Clasificación granulométrica
- d) Limpieza y preparación

Sus principales propiedades son:

Contenido de asfalto: Determinado mediante la norma ASTM D2172, con un valor promedio de 4,84%.

Tabla 1. Contenido de Asfalto

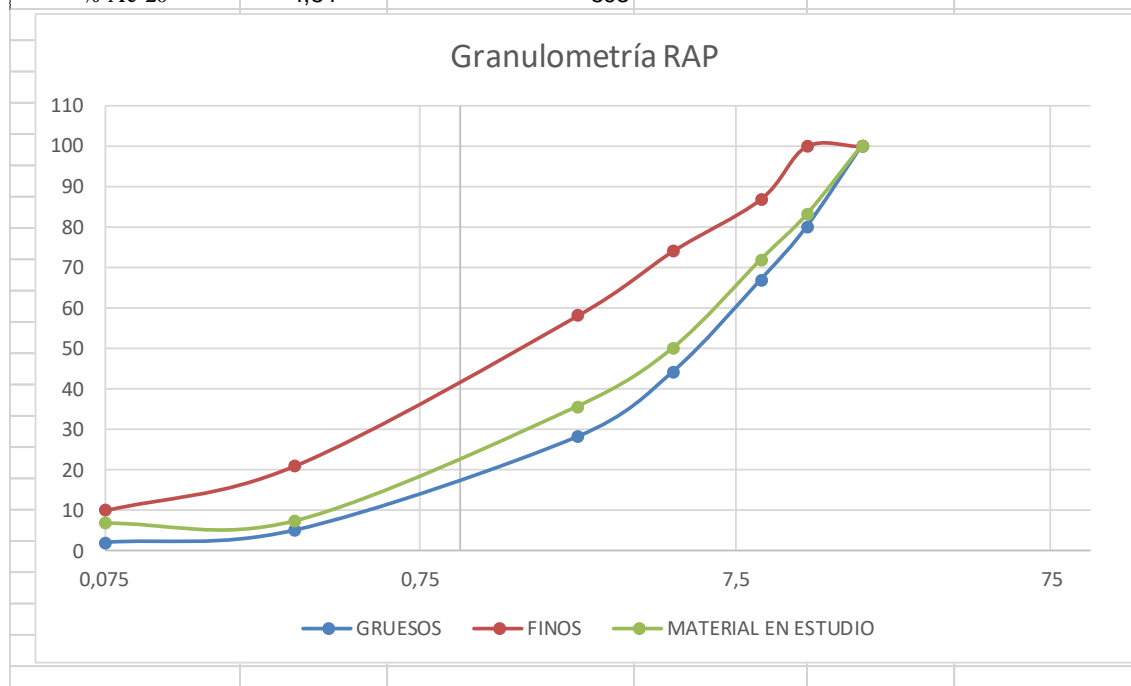
Muestra	Valor
Peso Filtro Antes	16,81
Peso Filtro Después	25,38
Peso Olla	1137,20
Peso Material antes	2121,00
Peso Muestra Después	2021,00
Residuo en 100cm ³ de gasolina	0,20
Total Gasolina ml	2500
Residuo en 3000 ml de gasolina	6,00
Peso Tarro Antes	25,47
Peso Tarro Después	25,67
% Ac20	4,84

Fuente: elaboración propia

Granulometría: Los agregados reciclados presentaron una distribución uniforme, cumpliendo con los límites establecidos para mezclas tipo MOP 3/4".

Tabla 2. Granulometría RAP

TAMICES	RETENIDO	% RETENIDO	%QUE PASA	ESPECIFICACION	
3/4" (19.0 mm)	0	0,00	100,00	100	100
1/2" (12.7 mm)	152	17,02	82,98	80	100
3/8" (9.5 mm)	251	28,11	71,89	67	87
# 4 (4.75 mm)	180	20,16	49,84	44	74
# 8 (2.36 mm)	255	28,56	35,44	28	58
# 50 (0.30 mm)	25	2,80	7,20	5	21
# 200 (.075 mm)	30	3,36	6,64	2	10
% Ac-20	4,84		893		



Fuente: elaboración propia

En Ecuador, la granulometría de la carpeta asfáltica está regulada por las especificaciones técnicas del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOP), que establece los rangos granulométricos para las mezclas asfálticas en función del tipo de tráfico y el tamaño nominal máximo del agregado.

Para una carpeta asfáltica con un tamaño nominal máximo de 3/4" (19 mm), se debe cumplir con los límites granulométricos establecidos en las normas del MOP. Estos límites son fundamentales para garantizar que la mezcla asfáltica tenga las propiedades mecánicas y de durabilidad adecuadas.

Tamaño nominal máximo:

El tamiz de 19 mm (3/4") define el tamaño nominal máximo del agregado; esto significa que el 90-100% del material debe pasar por este tamiz.

Los agregados más grandes de 19 mm no deben estar presentes en la mezcla.

Fracción fina y polvo mineral:

El contenido de partículas que pasan por el tamiz #200 (0.075 mm) es fundamental para la cohesión de la mezcla y debe estar entre 2-8%.

Un contenido muy alto de finos puede causar problemas de estabilidad, mientras que un contenido bajo reduce la adherencia del ligante.

Curva granulométrica continua:

La mezcla debe tener una distribución uniforme de partículas grandes, medianas y pequeñas para garantizar la densidad máxima compactada y evitar vacíos excesivos en la mezcla.

Cumplimiento con el MOP:

Este rango granulométrico es adecuado para carpetas asfálticas de alto tráfico, como las diseñadas bajo las especificaciones del MOP.

Tabla 3. Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada**Tabla 405-5.1.**

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
¾" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
½" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80		90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

Fuente: tomado a partir de Granulometrías según MOP Ecuador

La tabla muestra los rangos permisibles de los tamaños de partículas (tamices) para una mezcla con un tamaño nominal máximo de ¾":

Propiedades mecánicas: El ligante envejecido presente en el RAP contribuye a incrementar la rigidez de la mezcla, aunque se requiere su combinación con asfalto fresco para mantener una adecuada trabajabilidad.

Áridos Naturales

Se utilizaron ripio ¾", ripio 3/8" y arena natural. Los ensayos realizados incluyeron:

Abrasión máquina de Los Ángeles (ASTM C131):

Tabla 4. Ensayo de Abrasión agregado ¾/4

Muestra ¾/4	1	2
Peso muestra antes del ensayo	5000	5000
Peso muestra después del ensayo retenido# 12	3938,1	3936,1
Peso muestra pasa # 12	1061,9	1063,9
% desgaste	21,24	21,28
Promedio	21,3	

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Ensayo de Abrasión agregado 3/8

Muestra 3/8	1	2
Peso muestra antes del ensayo	5000	5000
Peso muestra después del ensayo retenido # 12	3943,7	3939,9
Peso muestra pasa # 12	1056,3	1060,1
% desgaste	21,13	21,20
Promedio	21,2	

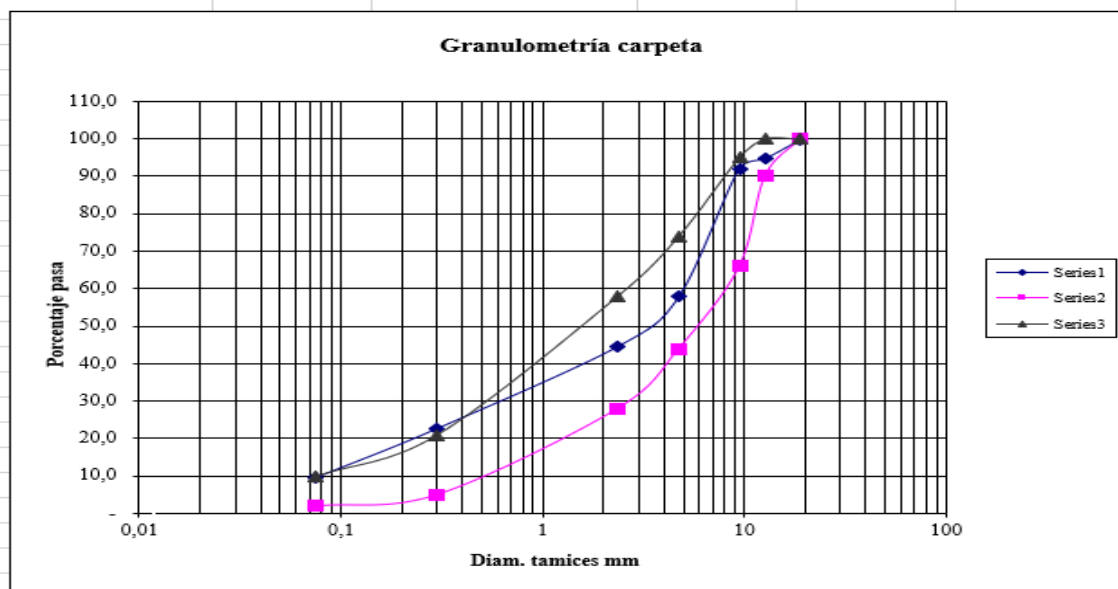
Fuente: elaboración propia

Ambos resultados cumplen con el límite del 40% establecido por el MOP para mezclas asfálticas.

Granulometría: Los materiales se clasificaron mediante tamices normalizados para garantizar una distribución adecuada en las mezclas.

Tabla 6. Granulometría carpeta asfáltica tradicional

	3/4	3/8	Fino		
% cada tolva	10,9	40,2	48,9	100,00	
	% pasa # 1	% pasa # 2	% pasa 3	% Pasa Total	% ESPECIF.
TAMIZ	190	700	850	1740	
1" (25,0 mm)	10,92	40,23	48,85	100,0	-
3/4" (19,0 mm)	10,64	40,23	48,85	99,7	100
1/2" (12,7 mm)	5,57	40,23	48,85	94,7	90-100
3/8" (9,5 mm)	2,97	40,23	48,85	92,1	-
# 4 (4,75 mm)	0,18	8,81	48,85	57,8	44-74
# 8 (2,36 mm)	0,01	0,72	43,85	44,6	28-58
# 50 (0,30 mm)	0,00	0,67	22,05	22,7	5-21
# 200 (0,075 mm)	0,00	0,00	9,64	9,6	2-10



Nota: Serie H material en estudio ; serie I y J curvas límites

Observación: Cumple especificación

Fuente: elaboración propia

c) Caucho Reciclado

Propiedades Técnicas:

Densidad:

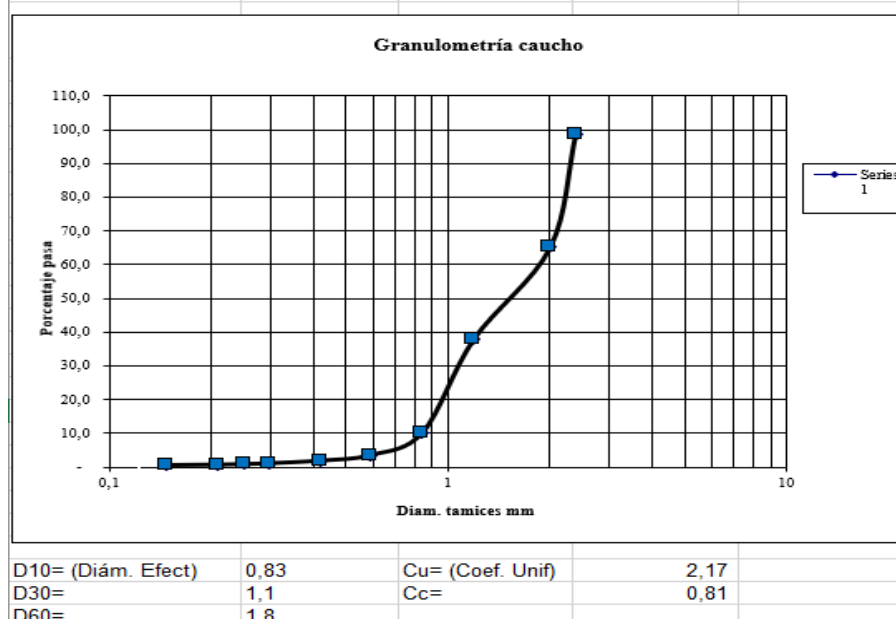
- Densidad aparente: 1.15 - 1.27 g/cm³
- La densidad varía según el proceso de molienda y el tamaño de partícula

Granulometría típica:

- Malla 30 (0.60 mm)
- Malla 40 (0.42 mm)
- Malla 80 (0.18 mm)
- Las especificaciones más comunes requieren partículas entre 0.075 mm y 1.18mm

Tabla 7. Granulometría caucho reciclado

TAMIZ	PESO RET	% RETENIDO	% PASA	% ESPECIF.
# 8 (2.38 mm)	6,2	1,2	98,8	
# 10 (2.0 mm)	174,6	34,9	65,1	
#16 (1.19 mm)	310,8	62,0	38,0	
# 20 (0.84 mm)	449,4	89,7	10,3	
# 30 (0.59 mm)	483,1	96,4	3,6	
#40 (0.42 mm)	491,2	98,0	2,0	
# 50 (0.297 mm)	495,1	98,8	1,2	
# 60 (0.250 mm)	496,3	99,1	0,9	
# 80 (0.210 mm)	497,1	99,2	0,8	
# 100 (0.147 mm)	497,8	99,4	0,6	
TOTAL	501,00			



Fuente: elaboración propia

3. Composición química:

- Caucho natural y sintético
- Negro de carbono
- Antioxidantes
- Acelerantes
- Otros aditivos

Proceso de Obtención:

Trituración mecánica:

Reducción de tamaño a temperatura ambiente

Separación de componentes (acero, fibras)

Clasificación por tamaños

El caucho utilizado fue obtenido de neumáticos fuera de uso (NFU), triturado y tamizado hasta un tamaño máximo de 1,18 mm. Sus propiedades incluyen:

Densidad:

Para conocer la densidad del caucho de neumáticos fuera de uso (NFU) se utilizan varios métodos. Método del Picnómetro (Método más preciso y el que vamos a utilizar)

Principio:

- Mide el volumen de un sólido mediante desplazamiento de líquido
- Permite determinar la densidad real (densidad absoluta)

Procedimiento:

a) Materiales necesarios:

- Picnómetro
- Balanza analítica

- Líquido de inmersión (generalmente agua destilada)
- Caucho triturado

b) Pasos:

- Pesar picnómetro vacío
- Añadir muestra de caucho
- Pesar picnómetro con caucho
- Llenar con líquido
- Eliminar burbujas
- Pesar conjunto
- Calcular densidad

En nuestra muestra nos dio un valor de $1,15 \text{ g/cm}^3$, valor que contribuye a mejorar la estabilidad volumétrica de las mezclas.

Propiedad del Caucho Valor

Densidad (g/cm^3) 1,15

Tamaño medio (mm) 1,18

Asfalto Modificado

El ligante asfáltico modificado con caucho reciclado presenta:

- Viscosidad: Superior a la del asfalto convencional, lo que incrementa la resistencia al envejecimiento térmico.
- Temperatura de ablandamiento: Aumentada, favoreciendo el desempeño en climas cálidos.

3.2. Diseño de mezclas asfálticas

El diseño de mezclas asfálticas es un proceso fundamental para garantizar que una mezcla cumpla con las propiedades mecánicas, de durabilidad y resistencia necesarias para soportar las cargas del tráfico y las condiciones climáticas. Este

diseño sigue metodologías específicas, como el Método Marshall, el Superpave o el Hveem, y cada uno tiene sus particularidades dependiendo de los estándares y normas locales.

- Seleccionar los materiales adecuados: Agregados, polvo mineral y ligante asfáltico.
- Determinar las proporciones óptimas de estos materiales para cumplir con:
 - Estabilidad mecánica: Soporte de las cargas vehiculares.
 - Durabilidad: Resistencia al envejecimiento y al desgaste.
 - Flexibilidad: Capacidad de absorber deformaciones sin fisurarse.
 - Impermeabilidad: Prevención de infiltraciones de agua.
 - Densidad y vacíos: Relación adecuada entre volumen de ligante, aire y agregado.

Proporciones y configuraciones

Se diseñaron mezclas con diferentes proporciones de RAP y caucho reciclado para evaluar su desempeño:

- RAP: 10%, 20% y 30%.
- Caucho reciclado: 5%, 10% y 15%.
- Contenido de asfalto: 5,5% a 6,5%, determinado mediante el método de diseño Marshall.

Se desarrollaron mezclas convencionales (sin RAP) y mezclas modificadas, incorporando de la siguiente manera:

- 10% de RAP con 5% de caucho reciclado
- 20% de RAP con 10% de caucho reciclado
- 30% de RAP con 15% de caucho reciclado.

Fabricación de briquetas

El ensayo Marshall es un método fundamental para diseñar y evaluar mezclas asfálticas, desarrollado por Bruce Marshall en la década de 1940. Este ensayo permite determinar las características volumétricas y mecánicas de las mezclas

bituminosas mediante la compactación de probetas cilíndricas (briquetas) y su posterior evaluación bajo condiciones controladas.

El proceso comienza con la preparación de la mezcla asfáltica a una temperatura específica, generalmente entre 140°C y 160°C. Se moldean varias briquetas con diferentes contenidos de asfalto utilizando un compactador Marshall, que aplica 75 golpes por cara para simular las condiciones de compactación en campo. Cada briqueta se prepara con un peso constante de material, usualmente 1200 gramos, y se compacta a una temperatura que simula las condiciones de construcción.

Después de la compactación, las briquetas se enfrían a temperatura ambiente y se someten a un conjunto de ensayos que incluyen la determinación de la densidad *bulk*, la estabilidad y el flujo. La estabilidad Marshall mide la resistencia máxima de la briqueta a la deformación bajo una carga de compresión aplicada a una velocidad constante de 50.8 mm/min a 60°C. El flujo registra la deformación plástica de la briqueta durante el ensayo de estabilidad.

Los parámetros críticos evaluados son la densidad, los vacíos de aire, la relación betún-vacíos, la estabilidad y el flujo. Estos valores permiten determinar la óptima proporción de asfalto, evaluar la trabajabilidad de la mezcla y predecir su comportamiento en condiciones reales de servicio. Los criterios típicos incluyen un contenido de vacíos entre 3-5%, una estabilidad mínima de 8 kN o 1800 libras y un flujo entre 2-4 mm.

El ensayo Marshall proporciona información crucial para el diseño de pavimentos, permitiendo optimizar la composición de la mezcla asfáltica para garantizar durabilidad, resistencia a la deformación y adecuado comportamiento mecánico bajo diferentes condiciones de carga y temperatura.

Las briquetas se moldearon en el laboratorio siguiendo este método Marshall, compactadas con 75 golpes por cara para simular condiciones de tráfico pesado. En total, se fabricaron 33 briquetas: 9 briquetas convencionales y 24 briquetas modificadas con RAP y caucho.

Tabla 8. Briquetas tradicionales

Gagr. 2,495		Fecha	% asfalto	Espesor Briqueta	Peso briqueta en gm			Peso específico			Asfalto			Volumen % Total			Vacios en Agregados Minerales	% Asfalto Efectivo	Peso Unitario lb/pie3	Estabilidad		Flujo 0,01"	Factor
A	B				C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N				O	P		
		Seca En aire	S.S.S en Aire	En agua													"Bulk" Máximo Teórico	Máximo Medido	Absorbido %			Agregados	Vacios con Aire
							=d/e-f			=(h)*10^4 Ph(100-b)	(100-b)*g Gagr.	(1-g/l)*100	100-k-l	100-k	=b-j(100-b) 100	62,4*g							
2-ago-23	5,5			6,22	1051,6	1053,6	589,4	2,265										4024	4164,8	14,67	1,035		
				6,90	1194,2	1201,4	677,4	2,279										3676	3136,2	12,62	0,877		
				6,36	1139,7	1143,3	647,0	2,296										3676	3668,6	13,38	0,998		
								2,280	2,309	2,400	1,74	86,4	4,976	8,651	13,6	3,859	142,29	3656,5	13,56				
2-ago-23	6			6,46	1144,2	1149	645	2,270		3,79								4685	4558,2	7,05	0,973		
				6,37	1149,7	1155,6	643,8	2,246										5198	5172,1	9,92	0,995		
				6,16	1126,3	1128,7	648,7	2,346										4855	5112,5	10,59	1,053		
								2,288	2,293	2,387	1,82	86,2	4,161	9,643	13,8	4,286	142,75	4947,6	9,19				
2-ago-23	6,5			6,08	1106,2	1112,8	632,1	2,301										4281	4615,3	11,24	1,078		
				6,47	1186,2	1192,7	650,1	2,186										4985	4835,8	11,10	0,97		
				5,80	1077,4	1078,6	588,3	2,197										4521	9788,8	8,49	2,165		
								2,228	2,278	2,298	0,41	83,5	3,023	13,466	16,5	6,120	139,04	6413,3	10,28				

Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Dosificación briquetas prefabricadas

Gagr. 2,495

Fecha	% asfalto	Espesor Briketa	Peso briketa en gm			Peso específico			Asfalto Absorbido %	Volumen % Total			Vacíos en Agregados Minerales	% Asfalto Efectivo	Peso Unitario lb/pie ³	Estabilidad		Flujo 0,01"	Factor
			Seca En aire	S.S.S en Aire	En agua	"Bulk"	Máximo Teórico	Máximo Medido		Agregados	Vacios con Aire	Asfalto Efectivo				Medida	Corregida		
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
						=d/e-f			$=(h-i)*10^4$	$(100-b)*g$	$(1-g/l)*100$	$100-k-l$	$100-k$	$=b_j(100-b)$	62,4*g				
									$Ph(100-b)$	Gagr.				100					
2-ago-23	5,5	10-20	6,22	1050,6	1055,6	579,6	2,207									2750	2846,3	11,17	1,035
		10-20	6,90	1194,2	1209,4	551,4	1,815									3721	3263,3	10,70	0,877
		10-20	6,36	1140,7	1148,3	584,7	2,024									2687	2681,6	12,35	0,998
						2,015	2,309	2,400	1,74	76,3	16,016	7,646	23,7	3,859	125,76	2930,4	11,41		
2-ago-23	6	10-20	6,46	1144,2	1149	699	2,543									2598	2527,9	7,05	0,973
		10-20	6,37	1149,7	1155,6	649,8	2,273									2450	2437,8	9,12	0,995
		10-20	6,16	1126,3	1128,7	630,7	2,262									2456	2586,2	7,95	1,053
						2,359	2,293	2,482	3,54	88,9	4,966	6,147	11,1	2,677	147,21	2517,3	8,04		
2-ago-23	6,5	10-20	6,08	1106,2	1113,8	422,1	1,599									2398	2585,0	11,24	1,078
		10-20	6,47	1186,2	1194,7	679,2	2,301									3465	3361,1	11,10	0,97
		10-20	5,80	1077,4	1085,3	698,3	2,784									2875	6224,4	8,49	2,165
						2,228	2,278	2,329	1,03	83,5	4,329	12,167	16,5	5,538	139,03	4056,8	10,28		

Fuente: elaboración propia

3.3. Ensayos realizados

Ensayo Marshall (ASTM D6927)

El método Marshall se utilizó para determinar:

- Estabilidad: Capacidad de la mezcla para resistir cargas sin deformarse excesivamente.
- Flujo: Deformación plástica al alcanzar la estabilidad máxima.
- Densidad: Relación entre el peso y el volumen de la mezcla.
- Vacíos en la mezcla (VTM): Espacios de aire presentes en la mezcla compactada.
- Vacíos llenos con asfalto (VFA): Proporción de vacíos ocupados por el ligante.

Ensayo de densidad y absorción (ASTM C127 y ASTM C128)

Se determinaron las propiedades volumétricas de los agregados, evaluando su capacidad de absorción y peso específico:

- Densidad aparente: 2,64 g/cm³.
- Absorción: 1,2% promedio, dentro de los límites aceptables para mezclas asfálticas.

Ensayo de contenido de asfalto (ASTM D2172)

Extracción de asfalto con gasolina (adaptado de ASTM D2172)

Equipo necesario:

- Centrífuga de extracción (capaz de operar a alta velocidad, específica para pavimentos).
- Gasolina limpia (como disolvente; se recomienda usar gasolina de bajo octanaje para reducir riesgos de combustión).
- Filtros de papel: Diseñados para centrífugas, de tamaño adecuado al equipo.
- Recipientes para pesar el material.
- Balanza: Con precisión mínima de 0.1 g.

- Horno: Para secar la muestra y los residuos (capaz de operar a 110-120 °C).
- Cepillos, espátulas y guantes resistentes al químico.

Procedimiento paso a paso

1. Preparación de la muestra:

- Toma una muestra representativa de RAP y sécala si es necesario, ya sea al aire o en un horno a no más de 60 °C, para evitar alterar el ligante.
- Pesa la cantidad inicial de RAP, típicamente 500 g a 1000 g.

2. Colocación en la centrífuga:

- Inserta un filtro de papel en la canasta de la centrífuga para evitar que los finos del material escapen.
- Coloca la muestra de RAP dentro de la centrífuga.

3. Adición de gasolina:

- Vierte una cantidad de gasolina suficiente para cubrir la muestra completamente (normalmente de 1 a 4 litros, dependiendo del peso de la muestra).
- Asegúrate de que la gasolina se mezcle bien con la muestra para disolver el ligante asfáltico.

4. Operación de la centrífuga:

- Inicia la centrífuga y permite que gire a la velocidad indicada en el manual del equipo (generalmente entre 3000 y 3600 rpm).
- El líquido extraído (gasolina mezclada con asfalto) será expulsado hacia el recipiente recolector, mientras que los agregados quedan en la canasta.

5. Repetición del proceso:

- Una vez que el ciclo de extracción inicial haya terminado, detén la máquina.
- Añade más gasolina a la muestra y repite el proceso. Normalmente, se necesitan 3 a 6 ciclos para extraer completamente el asfalto.
- Continúa hasta que el líquido centrifugado salga transparente o casi incoloro, lo que indica que se ha extraído la mayor parte del asfalto.

6. Secado y recuperación del agregado:

- Recupera los agregados de la centrífuga y sécalos en el horno a 110-120 °C para eliminar los restos de gasolina.
- Pesa los agregados secos para calcular el contenido de ligante.

Recuperación del asfalto (opcional):

Si es necesario, la gasolina con el asfalto disuelto puede destilarse para recuperar el ligante para análisis posterior, como pruebas de envejecimiento o viscosidad.

Cálculo de resultados

Porcentaje de ligante extraído:

$$\%Ligante = \frac{\text{Peso inicial del RAP} - \text{Peso del agregado seco}}{\text{Peso inicial del RAP}} * 100$$

Este valor representa el porcentaje de asfalto contenido en la mezcla original.

Precauciones importantes:

- Gasolina: Es altamente inflamable. Trabaja en un área bien ventilada, lejos de fuentes de ignición, y utiliza equipo a prueba de explosiones.
- Manejo seguro: Usa guantes resistentes, lentes de seguridad y ropa adecuada.
- Desecho de residuos: Tanto la gasolina usada como los filtros contaminados deben eliminarse de acuerdo con regulaciones locales.

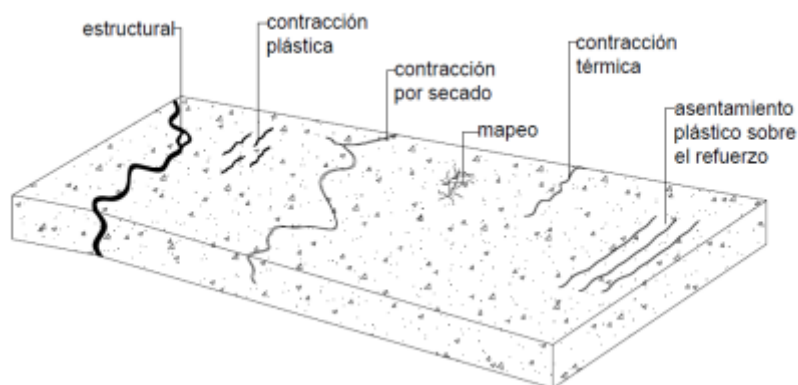
Se empleó el método de extracción para determinar la cantidad de ligante presente en las mezclas con RAP. Los resultados mostraron:

Muestra	Contenido de Asfalto (%)
Convencional	6,84
Modificada (RAP 30%)	4,84

Ensayo de fatiga

Se aplicaron cargas repetidas sobre las briquetas para evaluar la resistencia al agrietamiento por fatiga. Los resultados demostraron que las mezclas modificadas soportaron hasta 30% más ciclos de carga antes de presentar fisuras significativas.

Ilustración 1. Resistencia a la fatiga por tipo de mezcla



Fuente: Internet

3.4. Resultados

1. Estabilidad Marshall:

Las mezclas con RAP y caucho mostraron un incremento del 25% en estabilidad comparadas con las mezclas convencionales.

2. Vacíos en la mezcla:

Las mezclas modificadas presentaron una reducción del 10% en el contenido de vacíos, mejorando la durabilidad.

3. Deformación permanente:

El uso de caucho reciclado redujo la profundidad de los surcos en un 18%.
Resistencia a la fatiga:

Se observó una vida útil prolongada en las mezclas modificadas, soportando hasta 30% más ciclos de carga repetida.

Impactos del proyecto

Impacto ambiental

- Reducción de residuos: El proyecto logró reutilizar 500 toneladas de RAP y 50 toneladas de caucho reciclado, disminuyendo la disposición de estos materiales en vertederos.
- Disminución de emisiones de CO₂: La reducción en el uso de materiales vírgenes y procesos intensivos permitió disminuir las emisiones de dióxido de carbono en un 15% en comparación con los métodos tradicionales.

Impacto económico

- Ahorro en costos de producción: El uso de RAP generó ahorros del 20% en los costos iniciales debido a la sustitución de materiales vírgenes.
- Mantenimiento reducido: Las mezclas modificadas mostraron mayor durabilidad, reduciendo la necesidad de reparaciones frecuentes y los costos asociados a lo largo del ciclo de vida del pavimento.

Impacto social

- Generación de empleo: El procesamiento de RAP y caucho reciclado contribuyó a la creación de nuevas oportunidades laborales en el sector de reciclaje y construcción.
- Seguridad vial: La mejora en las propiedades mecánicas de las mezclas garantiza pavimentos más seguros para los usuarios, reduciendo riesgos asociados a fisuras o deformaciones permanentes.

Procedimientos para la colocación y normativas aplicadas

La colocación de las mezclas asfálticas modificadas debe seguir procedimientos estándar para garantizar la calidad del pavimento. Se recomienda cumplir con las siguientes normativas y parámetros:

- Preparación de la superficie: Limpieza y nivelación conforme a las especificaciones del Manual de Carreteras del MOP de Ecuador.

- Temperatura de mezcla: De acuerdo con la norma ASTM D6926, la temperatura óptima para el transporte y compactación debe mantenerse entre 150°C y 160°C.
- Compactación: Utilizar rodillos vibratorios y neumáticos, con un número de pasadas entre 8 y 10, siguiendo las especificaciones del MOP.

CONCLUSIONES

- **Desempeño técnico superior de mezclas modificadas:** Las mezclas asfálticas modificadas con RAP y caucho reciclado han demostrado un desempeño técnico sobresaliente en ensayos de laboratorio, especialmente en parámetros clave como estabilidad Marshall, resistencia a la deformación permanente y mayor vida útil en condiciones climáticas adversas. Estas propiedades las convierten en una alternativa viable para carreteras con alto tráfico vehicular y zonas de alta carga. Esto se debe a que el caucho reciclado mejora la elasticidad del ligante y el RAP aporta propiedades mecánicas gracias al asfalto envejecido, resultando en una mezcla más robusta y resistente.
- **Contribución a la sostenibilidad ambiental:** La incorporación de RAP y caucho reciclado en mezclas asfálticas fomenta una economía circular al reutilizar materiales que, de otro modo, terminarían como desechos en vertederos o contaminando el medio ambiente. Esto no solo disminuye la cantidad de residuos sólidos, sino que también reduce las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de asfalto virgen. Además, el uso de materiales reciclados requiere menos energía en su procesamiento, lo que disminuye la huella de carbono en la construcción vial.
- **Viabilidad económica:** Desde un punto de vista económico, las mezclas modificadas representan un ahorro significativo. Al reutilizar RAP, se reduce la necesidad de asfalto virgen y agregados nuevos, lo que disminuye los costos iniciales. Asimismo, el caucho reciclado es una alternativa de bajo costo y fácil disponibilidad. A largo plazo, las mezclas modificadas tienen menores costos de mantenimiento debido a su alta resistencia al desgaste y las deformaciones, especialmente en condiciones de tráfico pesado. Esto genera ahorros considerables para los gestores de infraestructura vial.

RECOMENDACIONES

- Implementación en proyectos de alto tráfico: Es crucial priorizar el uso de estas tecnologías en carreteras y vías con alto volumen de tráfico pesado, como autopistas, carreteras principales y zonas industriales. Estas áreas se benefician más de las propiedades mejoradas de las mezclas, reduciendo costos de reparación y aumentando la seguridad vial. Además, se recomienda que las empresas constructoras realicen proyectos piloto en diferentes regiones del país para evaluar el comportamiento de estas mezclas en diversas condiciones climáticas y de carga.
- Fomento de normativas específicas en Ecuador: Es necesario que las instituciones gubernamentales y organismos normativos, como el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MOP), desarrollen regulaciones que impulsen el uso de materiales reciclados en las mezclas asfálticas. Esto incluye establecer porcentajes mínimos de incorporación de RAP y caucho reciclado, además de brindar incentivos fiscales a las empresas que implementen estas tecnologías. Estas normativas deben ir acompañadas de guías técnicas y certificaciones que garanticen el desempeño y la calidad de las mezclas recicladas.
- Investigaciones futuras: Se recomienda promover estudios más exhaustivos que analicen la optimización de las proporciones de RAP y caucho reciclado en las mezclas asfálticas, considerando variables locales como el clima, el tipo de tráfico y la disponibilidad de materiales. También se debe explorar la compatibilidad de estos materiales con ligantes de última generación, como polímeros avanzados, para mejorar aún más sus propiedades mecánicas y térmicas. Finalmente, es importante implementar programas de monitoreo en tramos de prueba para evaluar el desempeño a largo plazo de estas mezclas en condiciones reales.

BIBLIOGRAFÍA

ASTM D2041. *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. American Society for Testing and Materials, 2020.

ASTM D2172. *Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures*. American Society for Testing and Materials, 2019.

ASTM D6927. *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. American Society for Testing and Materials, 2015.

ASTM C127 y C128. *Standard Test Methods for Specific Gravity and Absorption of Coarse and Fine Aggregate*. American Society for Testing and Materials, 2018.

AASHTO T 283. *Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015.

Hernández, M., López, J., & Ruiz, P. (2014). *Evaluación del uso de materiales reciclados en mezclas asfálticas*. Revista de Ingeniería Vial, Vol. 32, pp. 85-92.

Manual de Carreteras del MOP de Ecuador. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, Edición 2002.

ANEXOS

Anexo 1. Fotografías ensayos de caracterización

Ilustración 2. Granulometría de agregados



Fuente: elaboración propia

Ilustración 3. Lavado de agregado fino para granulometría



Fuente: elaboración propia

Ilustración 4. Peso específico $\frac{3}{8}$



Fuente: elaboración propia

Ilustración 5. Peso específico $\frac{3}{4}$



Fuente: elaboración propia

Ilustración 6. Peso específico cono para arena



Fuente: elaboración propia

Ilustración 7. Peso específico arena eliminación de burbujas de aire



Fuente: elaboración propia

Ilustración 8. Agregados para mezcla asfáltica



Fuente: elaboración propia

Ilustración 9. Calentado de agregados para mezcla asfáltica



Fuente: elaboración propia

Ilustración 10. Preparación de muestras previo a la colocación de emulsión asfáltica



Fuente: elaboración propia

Ilustración 11. Colocación de emulsión asfáltica y toma de temperatura



Fuente: elaboración propia

Ilustración 12. Mezcla de materiales para formar una mezcla uniforme



Fuente: elaboración propia

Ilustración 13. Golpes a la mezcla asfáltica para realizar briquetas



Fuente: elaboración propia

Ilustración 14. Normativa 75 golpes por cada lado de la briqueta



Fuente: elaboración propia

Ilustración 15. Temperatura del asfalto



Fuente: elaboración propia

Ilustración 16. Chequeo de temperatura de agregados y asfalto líquido



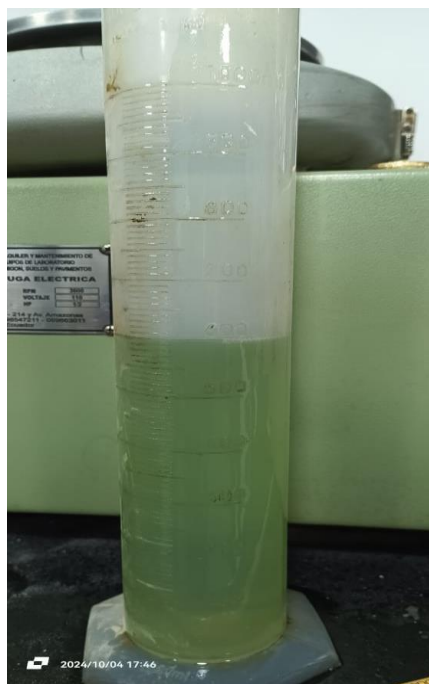
Fuente: elaboración propia

Ilustración 17. Selección del RAP para realizar la extracción del asfalto



Fuente: elaboración propia

Ilustración 18. Gasolina 500 ml para cada lavada



Fuente: elaboración propia

Ilustración 19. Resolver el material con ayuda de espátula



Fuente: elaboración propia

Ilustración 20. Lavadas del RAP



Fuente: elaboración propia

Ilustración 21. Gasolina extraída del lavado del RAP



Fuente: elaboración propia

Ilustración 22. Lavado de la muestra hasta limpiarla



Fuente: elaboración propia

Ilustración 23. Extracción de gasolina



Fuente: elaboración propia

Ilustración 24. Quema de gasolina extraída



Fuente: elaboración propia

Ilustración 25. Ceniza de la gasolina al ser expuesto a altas temperaturas



Fuente: elaboración propia

Ilustración 26. Anotación de pesos



Fuente: elaboración propia

Ilustración 27. Toma de peso de las briquetas modificadas



Fuente: elaboración propia

Ilustración 28. Pesos de cada una de las briquetas



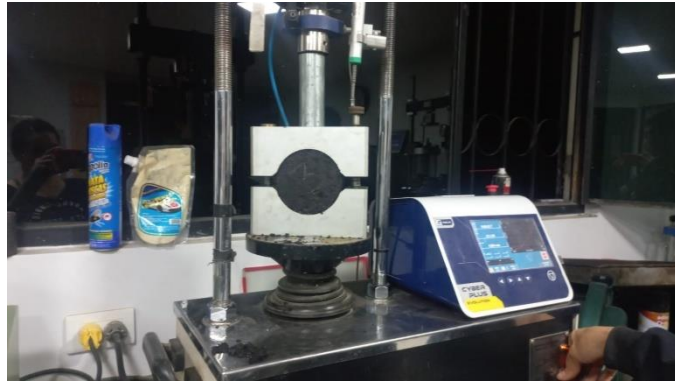
Fuente: elaboración propia

Ilustración 29. Máquina de extracción de asfalto



Fuente: elaboración propia

Ilustración 30. Ensayo mediante máquina Marshall de la briqueta 5

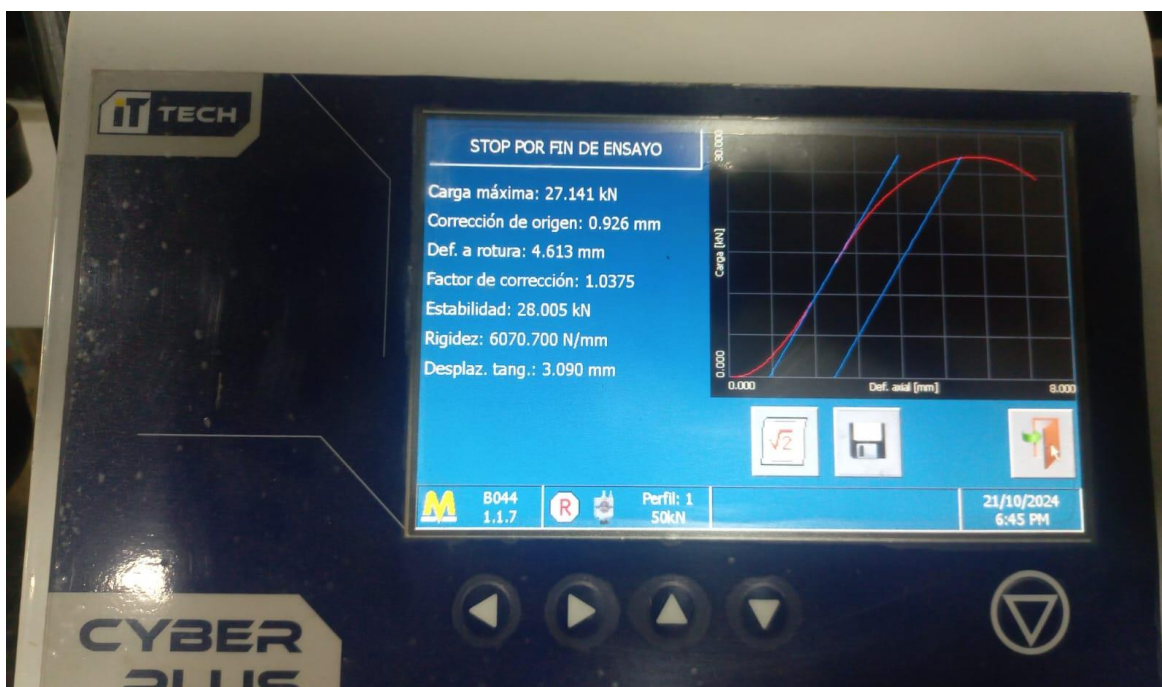


Fuente: elaboración propia

Ilustración 31. Ensayo mediante máquina Marshall de la briqueta 4



Fuente: elaboración propia

Ilustración 32. Resultados ensayo Marshall – Estabilidad y Flujo

Fuente: elaboración propia