



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

TECNOLOGÍA SUPERIOR EN CONSTRUCCIÓN

Trabajo de Integración Curricular

“ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRIO TRADICIONAL VERSUS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRIO CON RAP, APL, Y GRIPPER 67.”

TUTOR: Ing. Alvaro Barona Sanchez.

Alumno: Estuardo Jhovanny Muñoz Secaira

Quito, Ecuador

Índice.

INTRODUCCIÓN.....	7
ANTECEDENTES.....	8
PROBLEMA.....	10
OBJETIVOS.....	11
OBJETIVO GENERAL.....	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
CAPÍTULO I.....	12
1.1. Situación Actual.....	12
1.2. Diagnóstico.....	15
1.2.2. Iniciativas de Investigación y Desarrollo.....	16
1.3. Actores del Mercado.....	17
1.3.1. Generación de Residuos en el Aeropuerto de Quito:.....	18
1.4. Beneficios de las Mezclas Asfálticas con Polvo de Llanta.....	19
CAPITULO II.....	20
2.1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	20
2.1.1. RAP (Recycled Asphalt Pavement).....	21
2.1.2. Propiedades y utilidad del RAP.....	21
2.1.3. Granulometría del RAP.....	22
2.1.4. Análisis cuantitativo del contenido de asfalto en el material reciclado.....	22
2.1.5. Gravedad específica de los agregados.....	23
2.1.6. Polvo de llanta de avión.....	24
2.1.7. Aditivo de Adherencia.....	25
2.1.8. Emulsión asfáltica.....	26
2.1.9. Mezcla Asfáltica en Frío.....	28
CAPITULO 3.....	30
3.1. METODOLOGÍA.....	30
3.1.1 Tipo de estudio.....	30
3.2. Método de investigación.....	32
3.2.1. Procedimientos y herramientas empleadas para la obtención de datos.....	32
3.3. Caracterización de los materiales y ensayos.....	33

3.3.1. Caracterización agregados.....	33
3.3.2. Muestreo en campo (ASTM D75 – INEN 695).....	33
3.3.3. Análisis granulométrico (ASTM C136 - MOP 2002)	34
3.3.4. Procedimiento.....	35
3.3.5. Cálculos	35
3.4. Gravedad específica de los agregados (ASTM C 127- ASTM C 128).	36
3.4.1. Agregado Grueso.	37
3.4.2. Agregado fino.....	38
3.4.3. Gravedad Especifica Neta de los Agregados (Gsa, Gse, Gsb).	40
3.4.4. Extracción cuantitativa de aglutinante de asfalto por el método de ignición (AASHTO T308-08).	40
3.5. Determinación de porcentaje de emulsión teórico.....	41
3.5.1. Ensayos realizados al polvo de llanta (filler).....	42
3.6. Ensayos realizados a la emulsión asfáltica (Css-1h).....	43
3.7. Viscosidad- Saybolt Furol, 25 °C (NTE INEN 1981, ASTM D 244)	44
3.9. Asentamiento 5 días (ASTM D6930, INEN 910).	45
3.10. Estabilidad de almacenamiento 24 horas (ASTM D6930, INEN 909)	46
3.11. Residuo por evaporación (ASTM D6934, INEN 905).....	46
3.12. Prueba del tamiz N°20 (ASTM D6933, INEN 906).	46
3.13. Penetración (ASTM D5, INEN 918).....	47
3.14. Ductilidad (ASTM 133, INEN 916).	48
3.15. Resultados de ensayos.....	48
CAPÍTULO 4.	48
4.1. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA	48
4.1.1. Diseño de mezclas asfálticas segun el método Marshall.....	48
4.1.2. Elaboración de Briquetas	50
4.1.3. Determinación Visual de la Humedad Óptima del RAP	50
4.1.4. Integración del Aditivo GRIPPER 67 a la Emulsión Asfáltica	51
4.1.5. Procedimiento de Preparación de Mezcla para Briquetas	51
4.2. Configuración Experimental: RAP – Polvo de Llanta – Emulsión – Aditivo	52
4.3 Determinación de la Gravedad Específica Bulk	52

4.4. Ensayo Marshall – Estabilidad en Estado Húmedo.....	53
4.5. Ensayo Marshall – Estado Seco.....	53
CAPÍTULO 5.	54
5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS - MATERIALES	54
5.1.1. Resultados Técnicos ojo.....	54
5.2 Análisis Granulométrico de los materiales pétreos.....	54
5.3 Análisis Granulométrico del RAP	55
5.4. Gravedad Específica de los Agregados	57
5.5 Extracción de bitumen método de ignición.....	61
5.6 Porcentaje óptimo de emulsión para la mezcla en frio (MAF) y el RAP.....	63
5.6.1. Determinación del Porcentaje Óptimo de Emulsión Mezcla asfáltica	63
5.7 Determinación del Porcentaje Óptimo de Emulsión RAP.....	64
CAPITULO 6	66
6.1. ENSAYO MARSHALL	66
6.1.1. Evaluación y análisis de Briquetas	66
6.1.2. Análisis Técnico de Resultados – Mezcla Óptima con 6.5% de Emulsión.....	70
6.2 ENSAYO MARSHALL (RAP).....	71
6.2.1 Evaluación y Análisis de Especímenes con RAP	71
6.2.2. Análisis Técnico de Resultados – Mezclas Asfálticas con Componentes Reciclados y Aditivo de Adherencia.....	76
6.2.3. Parámetros Mecánicos y Volumétricos	76
6.2.4. ANÁLISIS TÉCNICO POR MEZCLA.....	80
6.2.5. INTERPRETACIÓN TÉCNICA	81
CAPÍTULO 7.	82
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
CONCLUSIONES TÉCNICAS MEZCLA EN FRIO.....	82
RECOMENDACIÓN TÉCNICA – MEZCLA EN FRÍO	83
CONCLUSIONES TECNICAS MEZCLAS EN FRIO CON RAP	84
RECOMENDACIÓN TÉCNICA MEZCLAS EN FRIO CON RAP.....	84
ESTIMACIÓN DE COSTOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRIO.....	85
BIBLIOGRAFÍA.....	88

ANEXOS.....	94
-------------	----

Índice de Ilustraciones.

Figura 1 <i>Empresa Quiport</i>	7
Figura 2 <i>El asfalto es 100% reciclable</i>	9
Figura 3 <i>Ubicación Aeropuerto Internacional Mariscal sucre</i>	11
Figura 4 <i>Montículos de caucho granulado.</i>	13
Figura 5 <i>Estado de las vías acceso al aeropuerto</i>	16
Figura 6 <i>Estadísticas de reciclaje polvo de llanta de avión, asfalto reciclado aeropuerto Mariscal Sucre Quito</i>	18
Figura 7 <i>Desechos de neumáticos</i>	19
Figura 8 <i>Análisis granulométrico polvo de llanta</i>	43
Figura 9 <i>Requisitos de emulsiones asfálticas catiónicas</i>	44
Figura 10 <i>Curva granulométrica mezcla de materiales</i>	55
Figura 11 <i>Curva Granulométrica Rap</i>	57

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Especificaciones técnicas</i> -----	25
Tabla 2 <i>Análisis Granulométrico</i> -----	34
Tabla 3 <i>Cuadro de limites</i> -----	36
Tabla 4 <i>Granulometría Caucho (Polvo llanta de avión)</i> -----	42
Tabla 5 <i>Resultados de ensayos emulsion</i> -----	48
Tabla 6 <i>Diseño De Mezcla Asfáltica En Frio</i> -----	55

Tabla 7	<i>Análisis Granulométrico del RAP</i>	56
Tabla 8	<i>Gravedad Específica de los Agregados</i>	59
Tabla 9	<i>Gravedad específica del RAP</i>	60
Tabla 10	<i>Gravedad específica del RAP</i>	61
Tabla 11	<i>Cálculo del contenido de asfalto</i>	62
Tabla 12	<i>Determinación del Porcentaje Óptimo de Emulsión RAP</i>	65
Tabla 13	<i>Ensayo Marshall</i>	67
Tabla 14	<i>Ensayo Marshall</i>	68
Tabla 15	<i>Ensayo Marshall RAP</i>	73
Tabla 16	<i>Ensayo Marshall RAP</i>	74
Tabla 17	<i>Ensayo Marshall</i>	78

INTRODUCCIÓN

Quiport es la entidad encargada del mantenimiento de las pistas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito, como se aprecia en la **Figura 1**; busca optimizar el rendimiento y la durabilidad de las mezclas asfálticas empleadas en las vías secundarias cercanas a las pistas de despegue y aterrizaje. Con este propósito, propone una solución innovadora que aproveche materiales reciclados, como el asfalto recuperado de pavimentación (RAP) y el polvo de llanta de avión (APL), en conjunto con el aditivo GRIPPER 67 y una emulsión asfáltica, destinados a la formulación de mezclas asfálticas en frío. Esta propuesta surge como respuesta a la acumulación de RAP y polvo de neumático generado por las actividades de mantenimiento, lo cual representa un problema de contaminación y ocupación de espacio en las instalaciones del aeropuerto.

Figura 1

Empresa Quiport



Nota. Adaptada de *Mantenimiento de pista en el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito* [Fotografía], por Quiport, 2025, (<https://www.quiport.com/cierres-programados-del-aeropuerto-de-quito-por-mantenimiento-preventivo/>).

La investigación planteada en este presente trabajo de titulación, tiene como objetivo comparar el desempeño mecánico de las mezclas convencionales y las que incorporan RAP y APL, bajo condiciones de laboratorio que simulen el entorno real del aeropuerto. Para ello, se aplicarán ensayos de laboratorio basados en el manual del Instituto del Asfalto MS – 2 (Mix Design Methods) y el manual Ms14(Asphalt Cold Mix), evaluando propiedades como la resistencia y durabilidad de las mezclas.

El proyecto no solo busca optimizar el mantenimiento vial y reducir costos, sino también promover la sostenibilidad ambiental al reutilizar materiales que de otro modo representarían desechos contaminantes. Además, apoya ciudades y comunidades sostenibles, lo cual se articula en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 11 y 12. Además el plan enfatiza que se utiliza mucha menos energía que con el asfalto mezclado en caliente, lo que ayuda al Aeropuerto de Quito a administrar sus recursos de manera más efectiva y dejar una menor huella de carbono.

ANTECEDENTES.

A nivel mundial, la industria de la construcción vial ha buscado alternativas más sostenibles y eficientes para la producción de mezclas asfálticas, debido al creciente interés por Disminuir tanto la huella ecológica como los costos vinculados al empleo de materiales vírgenes y métodos convencionales en caliente. En este escenario, las mezclas asfálticas en frío han adquirido importancia debido a su eficiencia energética, simplicidad en su colocación y reducción significativa en la generación de emisiones contaminantes durante los procesos de producción y aplicación.

Paralelamente, el uso de material reciclado, como el RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), ha demostrado ser una estrategia efectiva para aprovechar los residuos de pavimentos antiguos, como lo muestra en la **Figura 2**, contribuyendo a la economía circular y reduciendo la necesidad

de agregados nuevos. Asimismo, la incorporación de caucho pulverizado proveniente de neumáticos de avión y del aditivo Gripper 67 diseñados para optimizar la cohesión interna, la aptitud para ser manipuladas y sus características estructurales en mezclas en frío ha emergido como una línea de investigación innovadora y en expansión.

Figura 2

El asfalto es 100% reciclable



Nota. Adaptada de *El asfalto es 100% reciclable [Imagen]*. X. por Curro Lucas, 2019,

(https://x.com/curro_lucas/status/1182745447036833792).

Si bien existen múltiples investigaciones sobre la aplicación de RAP y aditivos en mezclas asfálticas en caliente, el conocimiento sobre su comportamiento en mezclas en frío sigue siendo limitado. En consecuencia, resulta imprescindible realizar un análisis comparativo del desempeño mecánico entre mezclas convencionales en frío y aquellas modificadas con RAP, caucho de neumático de avión y el aditivo Gripper 67, para determinar su pertinencia técnica y económica en el ámbito de las obras viales.

PROBLEMA

Esta investigación tiene como objetivo abordar los desafíos ambientales y operativos derivados de la acumulación de residuos de pavimento asfáltico reciclado (RAP) y caucho de neumático de avión en el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito. Dichos residuos, generados del mantenimiento frecuente de las pistas ante el elevado tránsito aéreo, constituyen un problema relevante en términos de almacenamiento y riesgo de contaminación ambiental. Adicionalmente, las vías adyacentes a las pistas, sometidas a variaciones térmicas diurnas-nocturnas y alto flujo vehicular, exigen soluciones de pavimentación más resistentes y sostenibles.

La presente investigación aborda el desarrollo y perfeccionamiento de mezclas asfálticas en frío, integrando materiales reciclados como RAP y partículas de caucho provenientes de neumáticos aeronáuticos, empleando aditivos como GRIPPER 67 para potenciar la adherencia y el comportamiento mecánico de las mezclas.

El alcance de la investigación se delimita a las vías adyacentes a las pistas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, ubicadas dentro de la parroquia de Tababela, al este de Quito, como se aprecia en la **Figura 3**. El grupo social involucrado comprende a los usuarios del aeropuerto, comunidades locales, y personal de mantenimiento vial. Asimismo, se analizan las implicaciones ambientales y económicas para la ciudad de Quito y sus zonas periféricas, promoviendo estrategias sostenibles en la gestión de residuos y mantenimiento de infraestructura vial.

Esta iniciativa busca no solo apuntar al mejoramiento de la infraestructura vial del entorno aeroportuario, sino que también se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la ONU, en particular aquellos orientados a ciudades y comunidades sostenibles, así como a la producción y consumo responsables. Para garantizar la viabilidad y aplicación práctica de los

resultados obtenidos, resulta esencial la cooperación interinstitucional entre Quiport, entidades gubernamentales y centros académicos como la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Figura 3

Ubicación Aeropuerto Internacional Mariscal sucre



Nota. Adaptada de Wyndham Quito Airport, Ecuador [Mapa], Google, 2025, Google Maps,

(<https://www.google.com/maps/@-0.1199145,-78.3581908,8085m/data>)

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

El objetivo es evaluar la viabilidad técnica y económica de estas mezclas mediante ensayos como el método Marshall, determinando la proporción óptima de materiales reciclados que garantice estabilidad y durabilidad en las vías.

Comparar el desempeño estructural de mezclas asfálticas frías (MAF) con y sin asfalto recuperado de pavimentación (RAP) y polvo de neumático de avión (APL), emulsion asfáltica y aditivo GRIPPER 67, bajo condiciones de laboratorio que simulen las condiciones reales de las vías adyacentes a la pista de despegue y aterrizaje del aeropuerto.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las propiedades de los componentes reciclados, polvo de neumático de avión y aditivo Gripper 67.
- Caracterizar las propiedades del RAP, polvo de llanta de avión y aditivo Gripper 67.
- Mejorar la formulación técnica de mezclas asfálticas frías empleando RAP, polvo de neumático de avión empleando material reciclado, polvo de neumático de avión en diferentes porcentajes y aditivo Gripper 67.
- Determinar la dosificación óptima de caucho pulverizado proveniente de neumático de avión que potencie la resistencia mecánica y la trabajabilidad de la mezcla asfáltica en frío, derivado del estudio de los parámetros evaluados mediante la metodología Marshall.
- Determinar a través de pruebas de laboratorio las variaciones en las características mecánicas de la mezcla utilizando el ensayo Marshall.

CAPÍTULO I

1.1. Situación Actual

El mantenimiento anual de las pistas del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre de Quito, gestionado por la empresa Quiport, genera un volumen significativo de residuos, principalmente pavimento asfáltico reciclado (RAP) y caucho pulverizado proveniente de neumáticos de avión (APL). La acumulación de estos materiales representa una problemática relevante desde una perspectiva logística y ambiental, agravada debido a la carencia de un sistema estructurado para su gestión y disposición final, como se aprecia en la **Figura 4**

Figura 4

Montículos de caucho granulado.



Nota. Adaptada de *Caucho granulado*, por Construex, s.f.

(https://www.construex.com.ec/exhibidores/caucho_granulado)

Esta problemática no solo compromete la operatividad del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, sino que también representa un riesgo latente de contaminación del suelo. Debido a la acumulación inadecuada de residuos asfálticos. Adicionalmente, las vías adyacentes a la pista de aterrizaje evidencian un deterioro acelerado atribuible a las exigentes cargas mecánicas generadas por el tráfico pesado vinculado a las operaciones aeroportuarias, así como a la incidencia de condiciones climáticas variables propias de la región.

Las mezclas asfálticas convencionales empleadas en las vías adyacentes al aeropuerto han evidenciado una pérdida progresiva de efectividad, lo que implica un incremento en las necesidades presupuestarias asociadas al mantenimiento, una mayor frecuencia de intervenciones y riesgos asociados a la seguridad operacional. Ante este escenario, resulta imperativo desarrollar soluciones innovadoras y sostenibles orientadas a mejorar el desempeño de las mezclas

asfálticas, al tiempo que se optimiza la gestión de los residuos generados en procesos de mantenimiento aeroportuario.

En este contexto, se plantea la formulación de una mezcla asfáltica en frío (MAF) que integre (RAP), polvo de neumático aeronáutico (APL), emulsión asfáltica y el GRIPPER como aditivo de adherencia. Esta alternativa busca no solo potenciar las propiedades mecánicas de la mezcla, sino también fomentar una gestión más eficiente de los materiales reciclados, en sintonía con las metas globales de sostenibilidad definidas en la agenda 2030, orientados a promover comunidades sostenibles y una administración responsable de los recursos.

El planteamiento del problema enfatiza las ventajas técnicas y ambientales de las mezclas asfálticas frías frente a las convencionales. Entre estas se destacan la reducción del consumo energético durante su fabricación, la minimización de emisiones de vapores tóxicos y partículas contaminantes, así como la reutilización de materiales reciclados como el RAP y el APL. Además, esta estrategia contribuye a la implementación de un modelo de economía circular, favoreciendo la reducción, reutilización y valorización de residuos, lo que se traduce en una menor extracción de recursos naturales y una significativa mitigación del impacto ambiental.

La propuesta de este trabajo de integración se centra en analizar el desempeño mecánico en diferentes mezclas: una mezcla en frío convencional elaborada con agregados naturales y emulsión asfáltica, y una mezcla en frío que incorpora material reciclado de pavimento, polvo de neumático aeronáutico, emulsión asfáltica, aditivo de adherencia. Para evaluar la efectividad de estas mezclas, se empleará el ensayo Marshall y los lineamientos del manual MS14, bajo condiciones de laboratorio que simulen el ambiente real de las vías cercanas a las pistas del aeropuerto.

Este análisis permitirá determinar la resistencia, durabilidad y estabilidad de las mezclas, con el objetivo de identificar una formulación óptima que soporte el clima frío y el tráfico intenso característicos del entorno aeroportuario. En particular, el estudio busca definir la cantidad adecuada de polvo de neumático aeronáutico que debe incorporarse a la formulación de la mezcla para maximizar su desempeño.

La inclusión del aditivo de adherencia es clave, ya que permite mejorar la cohesión entre los materiales, asegurando una mezcla más homogénea y resistente. Al optimizar estos componentes, se espera obtener una mezcla que no solo reduzca costos de mantenimiento, sino que también prolongue la vida útil de las vías, minimizando así la frecuencia de intervenciones y el uso de recursos adicionales.

1.2. Diagnóstico

Situación Actual y Contexto

Generación y Gestión de Residuos

El Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre, administrado por Quiport, enfrenta desafíos significativos en la gestión de residuos derivados del mantenimiento de sus pistas. Anualmente, se generan aproximadamente 7,000 m³ de RAP y entre 4.5 a 5 toneladas de polvo de neumático aeronáutico debido al desgaste de neumáticos durante los aterrizajes, donde las llantas pueden alcanzar temperaturas de hasta 300°C. Estos residuos, acumulados al aire libre, representan problemas de espacio y potenciales riesgos ambientales, como la contaminación del suelo y aguas subterráneas. (Espinoza Naranjo, 2023).

1.2.1. Estado de las Vías Adyacentes

Las vías de acceso y las vías cercanas a las pistas presentan un deterioro acelerado, atribuible a la alta carga vehicular y condiciones climáticas variantes del sector, como se aprecia en la **Figura 5**. Las mezclas asfálticas convencionales utilizadas han perdido efectividad, incrementando los costos de mantenimiento y comprometiendo la seguridad operacional. (Moya Sáenz, 2024) .

Figura 5

Estado de las vías acceso al aeropuerto



Nota. Fotografía tomada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

1.2.2. Iniciativas de Investigación y Desarrollo

En respuesta a esta problemática, se han desarrollado investigaciones enfocadas en la elaboración de mezclas frías que incorporan RAP y caucho pulverizado de neumático

aeronáutico. Estas formulaciones buscan mejorar la durabilidad y desempeño estructural de las vías, promoviendo al mismo tiempo la sostenibilidad mediante el aprovechamiento de materiales reciclados. Estudios recientes evidencian que la inclusión de un 1% de polvo de llanta incrementa significativamente la estabilidad de la mezcla, alcanzando valores de hasta 1,750 lb conforma a los resultados del ensayo Marshall. (Wilson Cando Tipán, 2024)

1.3. Actores del Mercado

Quiport

Como operador del aeropuerto, Quiport lidera las iniciativas de mantenimiento y sostenibilidad, promoviendo el uso de materiales reciclados en las mezclas asfálticas para las vías secundarias.

Instituciones Académicas

La Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE) y la Universidad Central del Ecuador (UCE) han realizado investigaciones fundamentales en la formulación y evaluación de mezclas asfálticas frías que incorporan pavimento reciclado (RAP) y caucho de neumático pulverizado. Estos estudios han contribuido al avance del conocimiento técnico y el campo de la ingeniería civil promoviendo el desarrollo de soluciones sostenibles y de alto rendimiento para la rehabilitación de pavimentos

Empresas de Reciclaje y Pavimentación

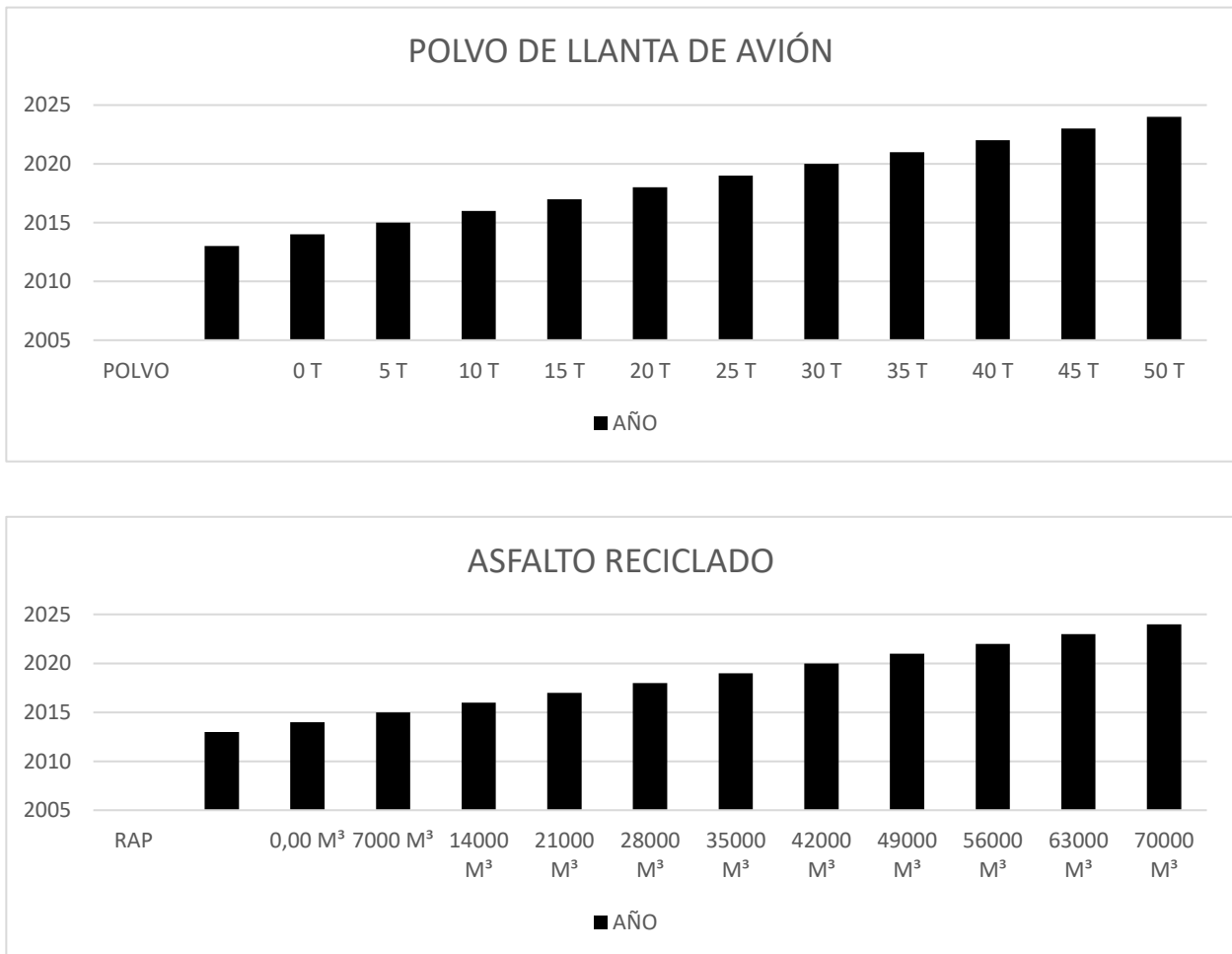
En Quito, existen empresas dedicadas al reciclaje de neumáticos y producción de caucho triturado, así como consorcios de pavimentación vial que podrían adoptar estas mezclas sostenibles en sus proyectos. (Pablo Renán Mora Campos, 2013)

1.3.1. Generación de Residuos en el Aeropuerto de Quito:

Aproximadamente 7,000 m³ de RAP y entre 4.5 a 5 toneladas de neumático aeronáutico anualmente (Espinoza Naranjo, 2023). Como se demuestra en la **Figura 6**.

Figura 6

Estadísticas de reciclaje polvo de llanta de avión, asfalto reciclado aeropuerto Mariscal Sucre Quito



Nota. Gráfico realizado por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

Desecho de Neumáticos en Ecuador:

Ecuador desecha anualmente aproximadamente 1,2 millones, como se aprecia en la **Figura 7** de los cuales una parte considerable es abandonada en vertederos o incinerados de manera inadecuada. Esta práctica no solo representa un problema de gestión de residuos voluminosos, sino que también genera impactos negativos en el ecosistema. Asimismo, se advierten consecuencias para la salud pública derivadas de la exposición a emisiones tóxicas y residuos no tratados (Pablo Renán Mora Campos, 2013).

Figura 7

Desechos de neumáticos



Nota. Adoptada de *la miniatura del video* Ecuador: Se reciclaron 1,2 millones de llantas en 2023, por J. Kronfle, 2023, YouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=cicqL4rOhbE>)

1.4. Beneficios de las Mezclas Asfálticas con Polvo de Llanta.

La incorporación de caucho pulverizado proveniente de neumáticos en mezclas asfálticas en frío representa una estrategia técnica eficaz con el propósito de potenciar características como la tolerancia al esfuerzo repetitivo y la deformabilidad ante cargas repetidas. Estos efectos se traducen en una mayor vida útil del pavimento, dado que el material absorbe mejor las tensiones

inducidas por el tráfico, mitigando la formación de fisuras y deformaciones permanentes.

Asimismo, se evidencian beneficios económicos al reducir los costos asociados a labores de mantenimiento y rehabilitación, lo cual refuerza la viabilidad de esta solución en proyectos de infraestructura vial sostenible.

CAPITULO II

2.1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

El uso progresivo de caucho en mezclas asfálticas en frío, ha ido evolucionando progresivamente como respuesta a las crecientes inquietudes por el medio ambiente y la sostenibilidad. Este desarrollo no se le puede atribuir a una sola organización, sino que ha sido el resultado de múltiples iniciativas dentro del sector de la construcción vial y la gestión de residuos. A partir de las últimas décadas del siglo pasado, se ha evidenciado una tendencia a incorporar este material, impulsado principalmente por la gran cantidad de llantas desechadas y la necesidad de adoptar soluciones más ecológicas para su reutilización y reducir su impacto negativo en el entorno.

Los estudios más relevantes que fundamentan el presente proyecto de integración curricular son:

- Valoración de la respuesta mecánica de formulaciones asfálticas en estado frío elaboradas con pavimento reciclado (RAP).
- Determinación del impacto del caucho de neumático de avión sobre mezclas asfálticas no calentadas con incorporación total de RAP.
- Análisis del efecto del aditivo Gripper 67 en la performance de mezclas asfálticas frías que utilizan RAP como agregado principal.

2.1.1. RAP (Recycled Asphalt Pavement).

Se entiende por pavimento asfáltico reciclado (RAP) al conjunto de materiales recuperados de capas de pavimentos existentes que ya no se hallan en óptimas condiciones o que han sido extraídas durante labores de mantenimiento o reconstrucción de infraestructura vial.

Este material, constituido por agregados minerales como (piedra, arena) recubiertos de asfalto envejecido, se reincorporan en nuevas mezclas asfálticas, ya sean en caliente o en frío. Su utilización contribuye a la reducción del uso de recursos vírgenes, a la reducción de los gastos asociados al proceso productivo y a la mitigación del impacto ambiental, al valorizar residuos que, en caso contrario, serían descartados.

2.1.2. Propiedades y utilidad del RAP

El (RAP) corresponde a un compuesto que ha experimentado envejecimiento durante su vida útil, debido a diversos procesos como la oxidación, volatilización de componentes livianos, polimerización, tixotropía, sinéresis y separación de elementos por absorción, lo que altera sus propiedades, especialmente las del ligante asfáltico (Roberts, Materiales de mezcla asfáltica en caliente, diseño de mezclas y construcción, 1996). Esta transformación del ligante puede generar dificultades al mezclarse con asfalto nuevo, ya que se forman conglomerados que reducen la eficacia del proceso de mezclado (Oliver, 2001). Además, el precalentamiento del RAP previo a su incorporación mejora la compatibilidad entre ligantes envejecidos y vírgenes facilitando una mezcla más homogénea y eficaz (Silva H. M., 2015)

Utilidad.

El material reciclado se emplea en distintos tipos de pavimentos, como los de hormigón compactado, permeable o autocompactante, así como en bloques y morteros. Su uso reduce la

demanda de agregados naturales, lo que permite reducir los gastos asociados al transporte y logística de materiales, y de producción en obra, además, mejora características como la trabajabilidad, la resistencia a la fractura y el comportamiento ante ciclos de congelación-descongelación. A nivel estético, su aplicación también ayuda a reducir el material acumulado en los márgenes de las vías, mejorando así el aspecto visual del entorno vial (Rout, 2023).

Finalmente, el uso de RAP se alinea con los principios de sostenibilidad al promover prácticas de reciclaje y optimizar la gestión de residuos dentro del sector de la construcción (Rout, 2023)

2.1.3. Granulometría del RAP.

Permite caracterizar la estructura granulométrica del conjunto de partículas, lo cual es fundamental para evaluar su uso en mezclas asfálticas recicladas. Este procedimiento se lleva a cabo mediante el ensayo de tamizado, el cual clasifica las partículas según su granulometría y cuantifica el porcentaje en masa que atraviesa cada tamiz específico (INV., 2013). Una adecuada gradación de los agregados es fundamental para garantizar la trabajabilidad, la eficiencia en la compactación y el desarrollo de propiedades mecánicas óptimas en la mezcla; en caso contrario, pueden verse afectadas negativamente sus características volumétricas y estructurales (Roberts, 2009).

2.1.4. Análisis cuantitativo del contenido de asfalto en el material reciclado

Determinar el porcentaje de asfalto presente en el pavimento asfáltico reciclado resulta esencial para el diseño adecuado de mezclas recicladas, ya que este parámetro incide directamente en las propiedades de calidad y desempeño mecánico del producto. Según el Instituto Nacional de Vías de Colombia ((INV)., 2013), se hace un análisis específico para saber

cuánto ligante asfáltico hay en el material reciclado. Esta información es clave para no pasarse ni quedarse corto con el nuevo asfalto que se añade.

Este análisis consiste básicamente en separar el asfalto del resto de la mezcla usando solventes y luego calcular qué porcentaje representa ese asfalto con respecto a la masa total del RAP ((INV)., 2013)

Sin embargo, algo importante a tener en cuenta es que la cantidad de asfalto en el RAP no siempre es la misma. Como mencionan (Mallick, 2018), esta puede variar mucho dependiendo de dónde proviene el material y cómo fue procesado. Si la mezcla final tiene mucho o muy poco asfalto, su comportamiento en la vía puede verse afectado negativamente, sobre todo en cuanto a resistencia y duración.

2.1.5. Gravedad específica de los agregados

A la hora de diseñar mezclas asfálticas, es clave conocer algunas propiedades físicas de los agregados, entre ellas su gravedad específica en distintas condiciones. Estos datos permiten entender mejor el comportamiento del material dentro de la mezcla.

La gravedad específica representa la relación entre la densidad del agregado y la del agua, expresando cuántas veces dicho material supera el peso de un volumen equivalente de agua bajo condiciones térmicas controladas (Martínez & Ruiz, 2010).

Cuando se habla de gravedad específica saturada y superficialmente seca (SSS), se refiere a la medida tomada cuando el agregado está completamente mojado por dentro, pero seco por fuera. Esta condición es bastante usada porque refleja el estado más común del material al momento de mezclarse con el asfalto (López & Herrera, 2012).

Por otro lado, la gravedad específica aparente mide la densidad del agregado sin considerar los poros que pueden llenarse de agua. Esta versión da una idea más clara de la parte sólida del material (Torres & Sánchez, 2011). Estas diferencias ayudan a determinar cuánto asfalto necesita la mezcla y cómo se comportará con el tiempo. Un mal cálculo en estas propiedades puede afectar la durabilidad o estabilidad de la vía.

2.1.6. Polvo de llanta de avión

Las llantas de avión son muy diferentes a las que usamos en autos comunes. Están hechas para resistir condiciones bastante exigentes, como altas velocidades, temperaturas extremas y mucho peso durante el aterrizaje y el despegue. Según (Pérez & Zamora, 2011), estas ruedas están diseñadas con estructuras reforzadas y materiales especiales que les permiten funcionar de manera segura en pistas de aeropuertos.

Estas llantas están compuestas por varias partes como el cinturón de acero, la banda de rodadura, el talón y una carcasa interna que trabaja junto con el resto del conjunto para darle fuerza y durabilidad al neumático (Aguilar & Sánchez, 2009). Gracias a esa composición resistente, una vez que se reciclan, su polvo de caucho puede usarse para mejorar mezclas asfálticas.

Para que ese polvo de llanta se pueda utilizar en mezclas, debe cumplir ciertas condiciones. La norma ecuatoriana NTE INEN 2680:2013 establece, por ejemplo, que el caucho reciclado debe tener muy poca humedad (menos del 0,75 %), y estar libre de metales visibles. También debe pasar por un tamiz No. 8, lo que significa que las partículas deben ser bastante pequeñas (Ecuador., 2013).

2.1.7. Aditivo de Adherencia

Gripper 67 es un promotor de adhesión en forma de éster orgánico líquido a 25 °C. Está diseñado para mezclas asfálticas en caliente o tibias y para mezclas de parcheo. Ofrece resistencia térmica elevada y gran afinidad con áridos calcáreos y silíceos, y es compatible con PPA (polímeros para mejora del asfalto). Como se observa en la **Tabla 1**

Usos y aplicaciones

- **Industrias:** Asfalto en caliente/tibio y mezclas de parcheo.
- **Propósito:** Optimizar la interacción físico-química entre el ligante y los áridos, favoreciendo su unión y desempeño en la mezcla.
- **Compatibilidad:** Se puede utilizar junto con PPA en la formulación

Tabla 1

Especificaciones técnicas

Parámetro	Detalle
Forma	Líquida a 25° C
Base química	Éster orgánico
Afinidad con áridos	Excelente con silicio y calizo
Rango de dosificación	0,3 %-1,0 % sobre peso del asfalto en caliente; dosis específica mayor para mezclas de parcheo
Resistencia térmica	Alta, adecuado para procesos de mezclado en caliente

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

Resumen.

Gripper 67 es un aditivo líquido de alta eficiencia para mejorar la adhesión en pavimentos asfálticos, eficiente a bajas dosificaciones y compatible con PPA. Recomendado en dosis de 0,3 %–1 % según tipo de mezcla, con rendimiento probado en áridos de calcio y sílice, ideal para aplicaciones en Latinoamérica.

Los aditivos que se utilizan con mayor frecuencia para mejorar la adherencia en mezclas asfálticas suelen incluir aminas, compuestos orgánicos con grupos funcionales activos y ciertos agentes tensioactivos. Su función principal es facilitar el contacto entre el ligante asfáltico y los agregados minerales, reduciendo la tensión superficial y mejorando la capacidad del ligante para cubrir completamente los áridos (Pérez-Jiménez et al., 2013).

Entre los beneficios más destacados del uso de estos aditivos se encuentra la mejora en la resistencia al desprendimiento de los componentes de la mezcla, especialmente en condiciones ambientales adversas como la humedad elevada y las temperaturas altas (López Montero & Miró Recasens, 2017).

No obstante, algunos estudios también advierten que una dosificación excesiva de estos aditivos puede alterar las propiedades viscoelásticas del ligante, acelerando su envejecimiento y reduciendo la durabilidad del pavimento (Silva H. M., 2015).

2.1.8. Emulsión asfáltica.

La emulsión asfáltica está compuesta por asfalto, agua y un emulsificante que ayuda a mantener todo unido. Este tipo de producto permite aplicar el asfalto a temperatura ambiente, lo que lo hace más seguro, fácil de manejar y menos contaminante. Gracias a su buena adherencia, se usa en trabajos como riegos de liga y lechadas asfálticas. Cuando se etiqueta como “CCS-1h”,

se indica que su proceso de fraguado o rompimiento es lento, ideal para ciertos trabajos en climas cálidos o con tráfico reducido.

Historia de las emulsiones asfálticas.

El uso de emulsiones asfálticas comenzó hace más de un siglo. En 1903 se tienen registros de su aplicación en caminos de California. En México, en los años 20, empresas petroleras empezaron a producirlas de forma industrial, facilitando su uso masivo en carreteras. En las décadas siguientes, especialmente a partir de los años 60, se perfeccionaron las fórmulas y los métodos de producción, haciendo que estas emulsiones sean más estables y útiles en muchas aplicaciones viales (Pérez & Blanco, 2015).

Composición.

Una emulsión está hecha principalmente de:

- **Asfalto:** Es el componente principal, representa entre el 55 % y el 70 % del total.
- **Agua:** Ayuda a mantener el asfalto líquido y facilita su aplicación.
- **Emulsionantes:** Son productos químicos (también llamados surfactantes) que permiten que el agua y el asfalto se mezclen bien. Dependiendo del tipo de químico, la emulsión puede ser catiónica, aniónica o no iónica (Jiménez & Valverde, 2018).

Tipos de emulsiones.

Las emulsiones se clasifican principalmente por el tipo de carga eléctrica que tienen y por la velocidad con la que se "rompen" o se separan para que el asfalto se adhiera a la superficie:

- **Catiónicas:** Tienen carga positiva. Son las más utilizadas hoy en día porque se adhieren mejor a los áridos minerales.

- **Aniónicas:** Tienen carga negativa. Se usaron más en el pasado, pero hoy son menos comunes (López & Ramírez, 2019).

Según su velocidad de rompimiento:

- **Rápido rompimiento:** Usadas en riegos de liga o sellos donde se necesita una adhesión inmediata.
- **Rompimiento medio:** Ideales para mezclas en frío con bajo contenido de material fino.
- **Rompimiento lento:** Se aplican en mezclas frías en planta y para estabilización de suelos.
- **Para impregnación:** Útiles para preparar bases antes de colocar una capa asfáltica.
- **Súper estables:** Especiales para reciclar pavimentos o estabilizar suelos muy sueltos (Silva & Gómez, 2020).

2.1.9. Mezcla Asfáltica en Frío.

La mezcla asfáltica en frío consiste en la integración de áridos gruesos y finos como piedra triturada y arena junto con un ligante asfáltico líquido, comúnmente en forma de emulsión, permitiendo su aplicación sin requerimientos térmicos elevados. A diferencia de la mezcla en caliente, no requiere calentar el asfalto, lo que la hace más económica y amigable con el medio ambiente (Muñoz & Castillo, 2019).

Gracias a su fácil aplicación y bajo costo, es muy usada para trabajos menores como bacheo o reparaciones en zonas alejadas. Se fabrica generalmente entre 0 °C y 40 °C, lo que reduce el uso de energía y permite su uso sin necesidad de equipos pesados (Carrera & Sánchez, 2020).

Propiedades principales.

Producción en planta con emulsión.

Estas mezclas se preparan con emulsiones asfálticas en plantas especializadas sin calentar los materiales. Esto permite ahorrar energía y reducir emisiones. Aunque se pueden transportar fácilmente, necesitan tiempo de curado para que se endurezcan correctamente y obtengan la resistencia adecuada (Ramírez & Paredes, 2017).

Componentes.

Los ingredientes principales son agregados (como grava y arena), un ligante (emulsión asfáltica), agua y, a veces, un solvente. Es esta combinación con agua lo que la diferencia de otras mezclas que requieren calor (Delgado & Torres, 2021).

Diseño de la mezcla.

El diseño de este tipo de mezcla se realiza a temperatura ambiente, a diferencia de la mezcla en caliente que se trabaja a 140 °C. Se utilizan diferentes métodos de diseño, dependiendo del país. Por ejemplo, en EE. UU. es común el método Super Pave, mientras que en Europa o Asia se prefiere el método Marshall (Fernández & López, 2020).

Rendimiento.

Estas mezclas ofrecen ventajas ambientales y económicas, aunque suelen tener menor estabilidad y más vacíos de aire que las mezclas calientes. El desempeño de la mezcla está condicionado por diversos parámetros, entre ellos la naturaleza del ligante asfáltico, las propiedades de los áridos, el periodo de curado y las condiciones ambientales presentes durante su aplicación (Cruz & Navarro, 2018).

Curado.

A diferencia de las mezclas calientes que se endurecen rápido, las frías requieren más tiempo. Este proceso se llama curado, y ocurre cuando se evapora el agua, dejando que el ligante tome sus propiedades finales y se adhiera correctamente a los agregados (Delgado & Torres, 2021).

Demanda Teórica de Asfalto Residual.

Este valor estima cuánta emulsión se necesita para cubrir bien todas las partículas de los agregados. Se basa en el tamaño y textura de las piedras, y aunque es útil para calcular una cantidad mínima, no reemplaza el ajuste que se debe hacer en el diseño real según el desempeño esperado (González & Mora, 2017).

Contenido Óptimo de Agua.

El agua es clave en la mezcla en frío. Si se usa poca, la mezcla queda seca y difícil de aplicar; si se usa demasiada, se vuelve inestable y difícil de compactar. Por eso, se hacen ensayos para encontrar el punto exacto donde se logra la máxima densidad sin afectar la calidad del pavimento (Ríos & Gómez, 2019).

CAPITULO 3.

3.1. METODOLOGÍA

3.1.1 Tipo de estudio

La investigación planteada se desarrolla bajo una modalidad experimental con carácter comparativo, orientada al análisis de diferencias entre variables o condiciones específicas:

- Una mezcla asfáltica convencional (MAF): Diseñada con agregados vírgenes, y solución asfáltica líquida.
- Mezcla asfáltica en frío con RAP – APL – GRIPPER 67 (MAF- R): Elaborada con RAP (Asfalto Recuperado de Pavimentación), solución asfáltica líquida, polvo de neumático de avión y el modificador de desempeño GRIPPER 67.

Se comparará el comportamiento mecánico de ambas mezclas mediante ensayos de laboratorio, (ensayo Marshall) para evaluar su desempeño en términos de:

- **Estabilidad Seca (Dry Stability)** Evaluar el comportamiento estructural bajo sollicitaciones de carga (tráfico) sin humedad presente.
- **Estabilidad Húmeda (Wet Stability)** Determinar la resistencia al daño por humedad (desprendimiento del ligante asfáltico, pérdida de cohesión)
- **Gravedad Específica Bulk Seca (Dry Bulk Specific Gravity)** Permite evaluar la densidad compactada real de la mezcla.
- **Porcentaje de Humedad Absorbida (%H Absorbida)** indica la **capacidad de absorción de los agregados y la mezcla** una vez curada.
- **Cambio o Pérdida de estabilidad.** Se medirá la tendencia de la mezcla a deformarse o desintegrarse bajo carga o condiciones ambientales adversas.
- **Porcentaje total de vacíos.** Se medirá el porcentaje de aire presente en la mezcla compactada.

3.2. Método de investigación

La estrategia investigativa adoptada corresponde a un enfoque experimental desarrollado en condiciones controladas de laboratorio, lo que permite una evaluación sistemática de las variables involucradas. Se elaborarán muestras de ambas mezclas asfálticas en frío y se someterán a los ensayos mencionados anteriormente. La información obtenida será procesada mediante técnicas estadísticas con el objetivo de detectar variaciones relevantes en las propiedades mecánicas de las mezclas evaluadas.

3.2.1. Procedimientos y herramientas empleadas para la obtención de datos.

Se contemplan diversas metodologías y dispositivos orientados al conjunto sistemático de información pertinente para el estudio.

- **Elaboración de las muestras:** Se utilizarán equipos de laboratorio como mezcladoras, compactadoras, y hornos de temperaturas controladas para preparar las muestras de las mezclas asfálticas frías.
- **Ensayos de laboratorio:** Se emplearán instrumentos especializados para realizar los ensayos de compresión, resiliencia, tracción indirecta, tenacidad a la fractura y densidad.
- **Hojas de cálculo:** Los datos recolectados serán procesados mediante herramientas de hojas de cálculo, lo que permitirá su organización, análisis estadístico y representación gráfica de forma estructurada.

Consideraciones adicionales.

Se debe establecer un diseño experimental adecuado que permita controlar los factores que podrían afectar el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas frías. Es importante utilizar materiales de calidad y seguir procedimientos estandarizados durante la elaboración de las

muestras y la ejecución de los ensayos, el análisis estadístico debe ser riguroso y considerar las características de los datos obtenidos.

3.3. Caracterización de los materiales y ensayos

En el desarrollo del presente plan de integración curricular se emplearon materiales como RAP, emulsión asfáltica, polvo de llantas de avión y el aditivo GRIPPER 67, suministrado por el Ing. Carlos Mercado (Quimi Kao). Los agregados pétreos fueron proporcionados por Todo Maquinas, mientras que el RAP y el polvo de llanta provinieron del Aeropuerto Mariscal Sucre. Se analizaron la granulometría de los agregados y el RAP, se evaluó la estabilidad de la emulsión y se caracterizó el polvo de llanta. La composición del aditivo se respaldó con su ficha técnica correspondiente.

3.3.1. Caracterización agregados.

El pavimento asfáltico reciclado (RAP), utilizado en este estudio, fue obtenido en el Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre (Quito). Dicho material presenta tres niveles de recubrimiento: partículas con asfalto envejecido y finos; agregados parcialmente recubiertos; y otros con cobertura mínima o nula. Previo a su incorporación en las mezclas, el RAP fue secado al aire, tamizado y fraccionado para su adecuada manipulación, conforme a lo estipulado en las especificaciones del MOP - 001-f 2002 para construcción de caminos y puentes.

3.3.2. Muestreo en campo (ASTM D75 – INEN 695)

Las porciones del árido serán extraídas de un sitio de almacenamiento, siguiendo la recomendación de la norma ASTM D75, la cual sugiere tomar tres porciones representativas: una de la parte superior, otra del centro y una más de la base de la pila.

El objetivo de un muestreo adecuado es obtener una representación fiel de las características y condiciones reales del material. El resultado del ensayo estará condicionado de la capacidad del personal encargado de la recolección, así como del correcto manejo de los equipos y herramientas.

3.3.3. Análisis granulométrico (ASTM C136 - MOP 2002)

El análisis granulométrico tiene la finalidad de establecer la proporción de partículas del material que logran pasar por aberturas de tamaños específicos. Los resultados se expresan en función del peso de cada fracción, indicando su respectivo porcentaje con relación a la masa inicial de la muestra. Como se muestra en la **Tabla 2**

Tabla 2

Análisis Granulométrico

Granulometría							
Masa inicial seca gr		1100,00 gr					
Designación malla		Masas, g		Porcentajes		Limites	
		Masa retenida	Masa retenida acumulada	% Retenido acumulado	% Que pasa	Granulometría 1/2"	
mm	ASTM					min	max
62,5	2 1/2"	0,00	0,00	0,0	100,0	100	100
50	2"	0,00	0,00	0,0	100,0	100	100
37,5	1 1/2"	0,00	0,00	0,0	100,0	100	100
25	1"	0,00	0,00	0,0	100,0	100	100
19	3/4	0,00	0,00	0,0	100,0	100	100
12,5	1/2	37,40	37,40	3,4	96,6	90	100
9,5	3/8	180,40	217,80	19,8	80,2	75	95
4,75	No. 4	180,40	398,20	36,2	63,8	50	70
2,38	No. 8	126,50	524,70	47,7	52,3	35	60
1,18	No.16	184,80	709,50	64,5	35,5	20	45
0,60	No.30	139,70	849,20	77,2	22,8	15	35
0,30	No.50	135,30	984,50	89,5	10,5	10	25
0,15	No. 100	37,40	1021,90	92,9	7,1	5	15
0,075	No. 200	36,30	1058,20	96,2	3,8	2	10
Pasa 200		41,80	1100,00	100,0	0,0		

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

El análisis granulométrico resultante permite verificar si el material analizado cumple con los requisitos establecidos para el diseño de mezclas en frío, conforme a los límites estipulados por la normativa MOP 2002.

3.3.4. Procedimiento.

Para el análisis granulométrico del RAP, las muestras fueron secadas en horno a 60 °C durante 24 horas hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, se homogeneizaron por cuarteo manual sobre superficie limpia de laboratorio, volteando el material tres veces desde su capa superficial. Se emplearon tamices conforme a la norma MOP 2002 (2 ½” a N°200), colocados en orden descendente. El tamizado se efectuó parcialmente de forma mecánica ($\leq 10\,000$ rpm, hasta tamiz N°4, durante 10 minutos) y manualmente en los restantes, limitando la carga a 7 kg/cm². La operación manual finalizó al superar menos del 1 % de material retenido. Se evitó adherencia mediante golpeteo lateral rotativo. El peso retenido en cada tamiz fue registrado, verificando que la diferencia con el peso inicial no excediera el 0.3 %, criterio de validez del procedimiento.

3.3.5. Cálculos

Ecuación:

- Porcentaje retenido

$$\% \text{ retenido} = \text{Peso retenido parcial} / W_t * 100$$

En donde:

- W_t es el sumatorio total del peso de la muestra en gramos
- Porcentaje retenido acumulado: Cantidad acumulado expresado en porcentaje en cada tamiz.

$$\% \text{ retenido acumulado} = \Sigma \% \text{ retenido acumulado.}$$

➤ Curva granulométrica

Para la elaboración de la curva granulométrica, los límites están de acuerdo a lo recomendado en las especificaciones del MOP 2022, o la norma ASTM D3515 Tabla 1.

Para este proyecto escogeremos la gradación por su tamaño máximo nominal de 1/2", como se observa en la **Tabla 3**

Tabla 3

Cuadro de límites

COMPOSITION OF ASPHALT PAVING MIXTURES (ASTM D3515)

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	2 in. (50 mm)		1 1/2 in. (37,5 mm)		1 in. (25,0 mm)		3/4 in. (19,0 mm)		1/2 in. (12,5 mm)	
		MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.
2 1/2"	63,00	100	100								
2"	50,00	90	100	100	100						
1 1/2"	37,50	---	---	90	100	100	100				
1"	25,00	60	80	---	---	90	100	100	100		
3/4"	19,00	---	---	56	80	---	---	90	100	100	100
1/2"	12,50	35	65	---	---	56	80	---	---	90	100
3/8"	9,50	---	---	---	---	---	---	56	80	---	---
4	4,75	17	47	23	53	29	59	35	65	44	74
8	2,36	10	36	15	41	19	45	23	49	28	58
16	1,18	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
30	0,600	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
50	0,300	3	15	4	16	5	17	5	19	5	21
100	0,150	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
200	0,075	0	5	0	6	1	7	2	8	2	10

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

3.4. Gravedad específica de los agregados (ASTM C 127- ASTM C 128).

Definición.

La gravedad específica se entiende como la proporción entre la densidad del agregado y la densidad del agua, lo que permite obtener una referencia del vínculo entre el peso y el

volumen del material. Esta característica es fundamental para analizar cómo se distribuyen el peso y el volumen de los agregados dentro de la mezcla, y sirve como base para establecer la cantidad adecuada de emulsión en el diseño. Dicha proporción influirá directamente en las propiedades y el desempeño de la mezcla durante su aplicación.

3.4.1. Agregado Grueso.

➤ Procedimiento.

Para conseguir la muestra requerida, el material se divide mediante cuarteo y se homogeniza adecuadamente. Posteriormente, se extrae la cantidad mínima necesaria para realizar el ensayo, tomando en cuenta el tamaño máximo nominal del agregado. La muestra se obtiene de todas las partículas que retiene el tamiz N° 4, esta se lava con la finalidad de que se desprenda todo el polvo adherido a las partículas, de ser necesario se utilizara un agente dispersante (jabón).

Después, la muestra se sumerge en agua por un periodo de 20 a 28 horas. Transcurrido este tiempo, se seca superficialmente utilizando un paño, rodando el agregado sobre este hasta que se observe, a simple vista, que no queda humedad en la superficie. Para mayor precisión, se recomienda realizar este procedimiento por separado para cada fracción de agregado. Luego se vuelve a pesar la muestra, obteniendo el valor "B".

Luego, el agregado se coloca dentro de un recipiente con agua a una temperatura controlada entre 21 y 25 °C, asegurándose de que todos los granos queden completamente sumergidos. Es importante que el hilo de suspensión utilizado para pesar sea lo más fino posible. Se realiza una última pesada bajo el agua, registrando el valor correspondiente como "C".

Finalmente, el agregado se colocará en un recipiente y se secará en un horno a 60°C hasta obtener masa constante, dejar enfriar y pesar, registrar este valor como "A".

Cálculos.

Los cálculos se realizan conforme a lo establecido en la norma ASTM C 127

$$\text{Gravedad específica de masa (seca)} = \frac{A}{B - C}$$

$$\text{Gravedad específica de masa (SSD)} = \frac{B}{B - C}$$

$$\text{Gravedad específica de aparente} = \frac{A}{A - C}$$

Donde:
$$\text{Absorción} = \frac{B-A}{A} * 100\%$$

A= Peso de la muestra secada al horno (gramos)

B= Peso de la muestra satura con superficie seca SSD (gramos)

C= Peso de la muestra sumergida en agua (gramos)

3.4.2. Agregado fino.

➤ Procedimiento.

El material a emplear debe ser previamente homogenizado y dividido mediante el método de cuarteo. Luego, se selecciona una muestra representativa, asegurándose de que pase completamente por el tamiz N°4 (4.75 mm), con un peso aproximado de 1.5 kg. A continuación, la muestra se cubre completamente con agua y se deja en inmersión entre 20 y 28 horas.

Transcurrido este periodo, se procede a decantar el agua cuidadosamente. Luego, el agregado se extiende sobre una bandeja y se expone a una corriente de aire tibio, revolviéndolo constantemente para lograr un secado uniforme. Cuando la muestra alcanza visualmente una condición cercana a la de superficie seca saturada (SSS), se coloca en un molde cónico. Se compacta con 25 golpes utilizando una varilla, y se retira el molde de manera vertical. Si la muestra aún conserva humedad superficial, conservará la forma del molde. En cambio, cuando el

agregado empieza a desmoronarse ligeramente, se considera que ha alcanzado la condición de superficie seca. En ese momento, se pesa la muestra, obteniendo el dato A.

Por otro lado, se llena el picnómetro con agua hasta un nivel predeterminado. Luego se introducen 500 g de agregado fino y se añade agua hasta alcanzar aproximadamente el 90 % del volumen del recipiente. Usando un generador de vacío, se eliminan los vacíos de aire presentes en el interior del picnómetro. Se asegura que tanto la muestra como el agua estén dentro del rango de temperatura entre 21 y 25 °C. Finalmente, se pesa el conjunto del picnómetro con la muestra y el agua, registrando este valor como dato B.

Cálculos.

Los cálculos se realizan conforme a lo establecido en la norma ASTM C 128

$$\text{Gravedad específica de masa (seca)} = \frac{A}{B + 500 - C}$$

$$\text{Gravedad específica de masa (SSD)} = \frac{500}{B + 500 - C}$$

$$\text{Gravedad específica de aparente} = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\text{Absorción} = \frac{500 - A}{A} * 100\%$$

Donde:

A = Peso de la muestra secada al horno (gramos)

B = Peso del frasco (picnómetro) con agua (gramos)

C = Peso del frasco + la muestra + el agua, hasta la marca de calibración (gramos)

500 = Peso del agregado fino en gramos estado SSD (Superficie Saturada Seca)

3.4.3. Gravedad Específica Neta de los Agregados (G_{sa} , G_{se} , G_{sb}).

Cuando la mezcla total de agregados está conformada por diversas fracciones como agregado grueso, agregado fino y filler que presentan distintas gravedades específicas, se debe calcular una gravedad específica combinada o neta. Esta se obtiene aplicando una fórmula que considera la proporción y la gravedad específica individual de cada componente dentro de la mezcla.

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{P_g}{G_g} + \frac{P_i}{G_i} + \frac{P_f}{G_f}}$$

Donde:

P_g , P_i , P_f : Porcentaje en peso de los agregados grueso, intermedio y fino

G_g , G_i , G_f : Gravedad específica de los agregados grueso, intermedio y fino

3.4.4. Extracción cuantitativa de aglutinante de asfalto por el método de ignición (AASHTO T308-08).

El ensayo tiene como objetivo establecer el porcentaje de asfalto presente en la mezcla mediante un proceso de ignición, elevando la temperatura hasta alcanzar el punto de inflamación del ligante asfáltico. Este procedimiento se realiza en un horno especializado, conforme a lo establecido por la norma AASHTO T308-08.

Conocer el contenido de asfalto presente en el material reciclado (RAP) es fundamental, ya que permite estimar la cantidad adecuada de emulsión a incorporar en el diseño de la mezcla asfáltica en frío. Esta estimación es clave para asegurar que el pavimento alcance un desempeño mecánico óptimo y una mayor vida útil.

Procedimiento.

El horno debe se precalienta entre 535 °C y 545 °C. La muestra, completamente seca (100 °C a 110 °C), se homogeniza y distribuye en la canasta, registrando su masa inicial con una balanza calibrada. Esta se ingresa al controlador del horno de ignición, verificando una diferencia máxima de ±5 g respecto al valor programado. La combustión se mantiene activa hasta que la variación de masa sea menor al 0,01 % durante 3 minutos continuos. Luego, se enfría la muestra y se determina su masa final.

Cálculos.

Los cálculos se realizan conforme a lo establecido en la norma AASHTO T308-08.

$$\%C.A. = \frac{(A - B)}{A} * 100$$

En donde:

%C.A. Representa el porcentaje de asfalto residual presente en la muestra de agregado RAP

A Representa el peso de la muestra inicial

B Representa el peso de la muestra final

3.5. Determinación de porcentaje de emulsión teórico.

A partir de los resultados experimentales obtenidos, es posible estimar el contenido teórico óptimo de emulsión requerido para el diseño de una mezcla asfáltica en frío. Este valor se determina aplicando la fórmula específica desarrollada por el instituto del asfalto manual Ms14 (Asphalt Cold Mix)

DEMANDA DE EMULSIÓN APROXIMADO DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS

ECUACIÓN =» P = (0,05A+0,1B+0,5C) *(0,7)

a = 57 % retenido en tamiz #8 entero

b = 38 % pasa el 8 y retiene 200

C = 4,82 % pasa el tamiz 200

F = 0,7 Factor 0,7 representa el residuo del betún

P = 6,3 % de emulsion teórico

3.5.1. Ensayos realizados al polvo de llanta (filler)

Análisis granulométrico del filler (ASTM D 546).

El propósito del ensayo es identificar cómo se distribuyen los tamaños de las partículas en el polvo de llanta de avión. Como se indica en la **Tabla 4**. Esta información es esencial para evaluar la influencia que tiene la granulometría del polvo de caucho en el comportamiento de las mezclas asfálticas en frío.

Tabla 4

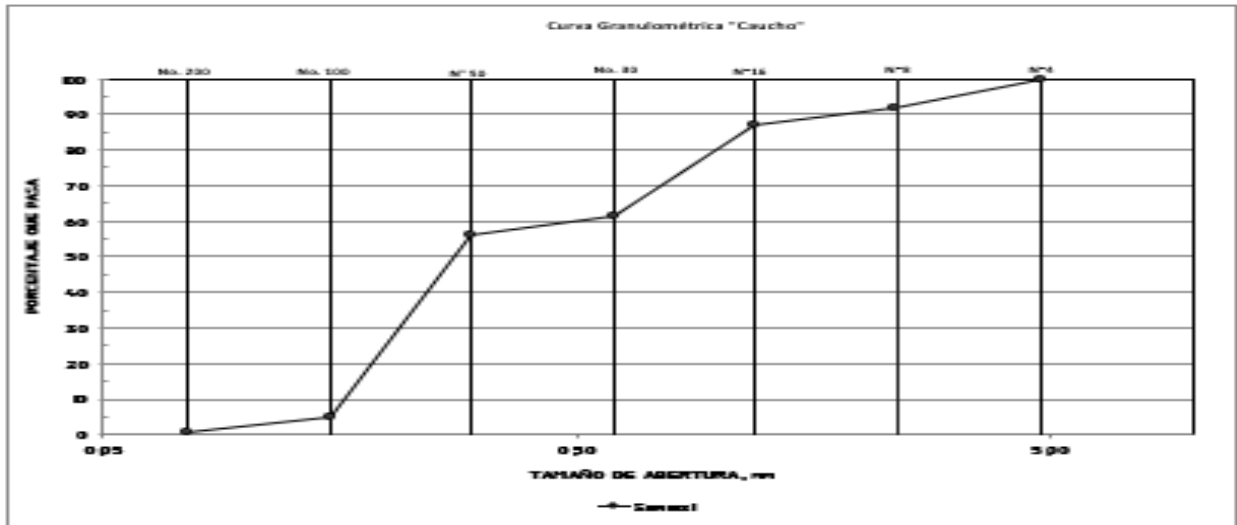
Granulometría Caucho (Polvo llanta de avión)

Granulometría Caucho (Polvo llanta de avión)					
Masa inicial seca.		1429,20 gr			
Designación malla		Masas, g		Porcentajes	
		Masa retenida	Masa retenida acumulada	% Retenido acumulado	% Que pasa
mm	ASTM				
4,75	N°4	0,00	0,00	0,0	100,0
2,36	N°8	117,80	117,80	8,2	91,8
1,18	N°16	66,48	184,28	12,9	87,1
0,600	N°30	104,33	549,81	38,5	61,5
0,300	N°50	76,51	626,32	43,8	56,2
0,150	N°100	80,09	1359,91	95,2	4,8
0,075	N°200	43,01	1417,42	99,2	0,8
Pasa 200		11,78	1429,20	100,0	0,0

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025)

Figura 8

Análisis granulométrico polvo de llanta



Nota. Gráfico realizado por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

3.6. Ensayos realizados a la emulsión asfáltica (Css-1h).

En esta investigación se empleó emulsión CSS-1h, de tipo catiónico y curado lento, formulada con asfalto de alta dureza y baja viscosidad. Su uso es frecuente como ligante en mezclas en frío, así como en reciclaje de pavimentos, estabilización de suelos, sellado superficial y riegos de adherencia (IMPTEK, 2021). Dada su importancia en el diseño propuesto, se deben ejecutar ensayos específicos conforme a la **Figura 9**, norma MOP-001-F-2002, sección 810, para validar su calidad y durabilidad.

Figura 9

Requisitos de emulsiones asfálticas catiónicas

PROPIEDAD	ROTURA RAPIDA		ROTURA MEDIA						ROTURA LENTA			
	CRS-1		CRS-2		CMS-2		CMS-2h		CSS-1		CSS-1h	
	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx
VISCOSIDAD:												
FUROL, a 25 gC, s.	-	-	-	-	-	-	-	-	20	100	20	100
FUROL, a 50 gC, s.	20	100	100	400	50	450	50	450	-	-	-	-
ESTABILIDAD AL ALMACENAJE 24 h, %	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
DEMULSIFICACION: 35 ml .8% sds, %	40	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CUBRIMIENTO												
agregado seco	-	-	-	-	bueno		bueno		-	-	-	-
luego rociado	-	-	-	-	pobre		pobre		-	-	-	-
agregado humedo	-	-	-	-	pobre		pobre		-	-	-	-
luego rociado	-	-	-	-	pobre		pobre		-	-	-	-
CARGA DE PARTICULA	+		+		+		+		+		+	
MEZCLA CON CEMENTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	-	2,0
ENS. DEL TAMIZ	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1	-	0,1
DESTILACION: ACEITE DESTILADO %	-	3	-	3	-	12	-	12	-	-	-	-
RESIDUO, %	60	-	65	-	65	-	65	-	57	-	57	-
ENSAYOS EN EL RESIDUO:												
PENETRACION, a 25 grados, 100 gr, 5 s.	100	250	100	250	100	250	40	90	100	250	40	90
DUCTILIDAD, a 25 grados, 5 cm/m. cm.	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-	40	-
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO %	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-	97.5	-
TEMPERATURA DE EMPLEO:												
ALMACENAMIENTO	50	85	50	85	50	85	50	85	10	60	10	60
MEZCLA EN PLANTA	-	-	-	-	10	70	10	70	10	70	10	70
MEZCLA EN SITIO	-	-	-	-	20	70	20	70	20	70	20	70
TRATAMIENTO SUPERFICIAL	50	85	50	85	-	-	-	-	-	-	-	-

Nota. Adaptada de *especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes* (p. 675), por MOP 001-F-2000.

3.7. Viscosidad- Saybolt Furol, 25 °C (NTE INEN 1981, ASTM D 244)

Este ensayo de viscosidad Saybolt Furol a 25 °C, conforme a NTE INEN 1981 y ASTM D 244, permite evaluar la capacidad de la emulsión para fluir y adherirse adecuadamente a los agregados. Consiste en medir, en segundos, el tiempo que tarda un volumen de 60 cm³ en atravesar un tubo hasta un recipiente, manteniendo la muestra a temperatura constante. Este procedimiento garantiza que la emulsión posea la viscosidad adecuada para aplicaciones en pavimentación.

3.8. Carga de partícula (ASTM D7402, INEN 908).

Este ensayo de carga de partícula (ASTM D7402, INEN 908) permite identificar la polaridad de la emulsión asfáltica (catiónica o aniónica), según el tipo de carga eléctrica de las

partículas de betún. Esta propiedad influye en la interacción con los agregados. El procedimiento consiste en aplicar corriente continua entre 8 y 10 mA a una muestra colocada entre electrodos; si se forma una película sobre el cátodo y la corriente baja a ≤ 2 mA, se concluye que la emulsión es catiónica. Este análisis es esencial para garantizar el desempeño del material en mezclas en frío, reciclaje y tratamientos superficiales.

3.9. Asentamiento 5 días (ASTM D6930, INEN 910).

Este procedimiento resulta fundamental para evaluar el comportamiento de las emulsiones asfálticas durante su almacenamiento, especialmente en lo referente a la estabilidad de la suspensión y la propensión del betún a sedimentarse con el paso del tiempo. El ensayo se extiende por un periodo de cinco días y requiere el uso de dos probetas de vidrio de 500 ml de capacidad, lo que permite obtener mediciones precisas y reproducibles.

Para su ejecución, se llena cada probeta con una cantidad específica de emulsión, la cual debe permanecer en reposo absoluto durante todo el periodo de ensayo, sin ser agitada ni manipulada. Es indispensable mantener condiciones ambientales constantes, particularmente en lo que respecta a temperatura y humedad, con el fin de evitar interferencias externas que puedan alterar el proceso de sedimentación.

Finalizado el tiempo de reposo, se extraen muestras de las zonas superior e inferior de cada probeta. Estas se someten a análisis comparativos en cuanto a composición, densidad y concentración de partículas de betún, con el propósito de determinar el grado de uniformidad en la suspensión. Este análisis permite establecer la capacidad de la emulsión para conservar una distribución homogénea de sus componentes, aspecto clave para su desempeño en campo.

La evaluación de la estabilidad y sedimentación es determinante para verificar que la emulsión mantenga sus propiedades durante el almacenamiento, lo que repercute directamente en la calidad, eficacia y durabilidad de las soluciones de pavimentación. Este ensayo constituye un criterio técnico esencial para validar la idoneidad del producto antes de su aplicación en obra.

3.10. Estabilidad de almacenamiento 24 horas (ASTM D6930, INEN 909)

El ensayo de estabilidad de almacenamiento a 24 horas (ASTM D6930, INEN 909) permite evaluar la tendencia del betún a sedimentarse en la emulsión. Se coloca una muestra en un cilindro de vidrio graduado y se mantiene en reposo durante 24 horas. Pasado este tiempo, se comparan las características de las fracciones superior e inferior para determinar el nivel de segregación, ofreciendo una medida de la estabilidad temporal del producto.

3.11. Residuo por evaporación (ASTM D6934, INEN 905)

Este ensayo permite cuantificar el contenido de betún en una emulsión asfáltica, eliminando los componentes volátiles mediante calentamiento. Se colocan tres muestras (49–51 g) en vasos de precipitado y se someten a una temperatura constante de 160–163 °C durante 2 horas. Luego, se compara la masa inicial y final para calcular el porcentaje de asfalto, garantizando así la uniformidad del producto para aplicaciones viales.

3.12. Prueba del tamiz N°20 (ASTM D6933, INEN 906).

El ensayo de retención en tamiz N°20 permite verificar la uniformidad de la emulsión asfáltica mediante el cálculo del porcentaje de partículas retenidas. Se realiza sobre una muestra previamente homogenizada, la cual se filtra con movimientos controlados. La masa retenida se compara con el total original, y un porcentaje dentro de los límites normativos indica adecuada

dispersión. Valores elevados pueden evidenciar impurezas o aglomeraciones que comprometen la calidad y el desempeño del producto en pavimentación.

3.13. Penetración (ASTM D5, INEN 918).

Este ensayo permite determinar la consistencia y resistencia de una emulsión asfáltica mediante la medición de la profundidad de penetración de una aguja en una muestra de 100 gramos, durante un intervalo de 5 segundos, a una temperatura constante de 25 °C. El resultado se expresa en décimas de milímetro, equivalentes a centésimas de centímetro.

Para su ejecución, se acondiciona la emulsión asegurando su homogeneidad y la ausencia de burbujas de aire. Posteriormente, se vierte en un recipiente adecuado y se calibra el equipo de penetración, posicionando la aguja en contacto directo con la superficie de la muestra.

El procedimiento contempla tres mediciones en puntos distintos de la emulsión, con el objetivo de obtener datos representativos. La aguja, cuyas características dimensionales y de masa están normalizadas, se deja descender libremente durante cinco segundos. La profundidad alcanzada se registra con precisión mediante un sistema de lectura calibrado.

Cada valor obtenido se documenta por separado, y el resultado final se determina como el promedio de las tres mediciones. Este valor proporciona una referencia objetiva sobre el grado de consistencia de la emulsión, permitiendo evaluar su dureza o suavidad bajo las condiciones térmicas del ensayo.

3.14. Ductilidad (ASTM 133, INEN 916).

El ensayo de ductilidad permite determinar la capacidad de elongación de la emulsión asfáltica antes de fracturarse. Se utiliza una briqueta moldeada que se somete a tracción continua a $5 \pm 0,25$ cm/min y $25 \pm 0,5$ °C. La longitud alcanzada antes de romperse se registra como valor de ductilidad, indicando la resistencia del material a esfuerzos de tracción.

3.15. Resultados de ensayos.

A continuación, se muestra una tabla que sintetiza los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

Tabla 5

Resultados de ensayos emulsion

Tabla de resultados Emulsion Asfáltica CSS - 1H				
Ensayo	Unidades	Valor	Especificación	Cumple
Viscosidad - Saybolt Furol a 25° c	SSF	38,65	20 - 100	si
Carga de partícula	-	Positiva	Positiva - Negativa	si
Asentamiento 5 días	%	0,5	0 - 5	si
Estabilidad al almacenamiento 24 horas	%	0,03	0 - 1	si
Residuo por evaporación	%	61,7	Min 57	si
Prueba del tamiz N° 20	%	0,01	0 - 0,1	si
Penetración	Dmm	61	40 - 90	si
Ductilidad	Cm	59	Min. 40	si

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

CAPÍTULO 4.

4.1. DISEÑO DE LA MEZCLA ASFALTICA

4.1.1. Diseño de mezclas asfálticas según el método Marshall

En Ecuador, no existe una normativa específica para el diseño de mezclas asfálticas en frío con materiales reciclados. Por tal motivo, el MOP 2002 sugiere emplear como referencia el

Manual Básico de Emulsiones Asfálticas del Instituto del Asfalto, que especifica los ensayos requeridos. Según el MS-19, se debe aplicar el método Marshall, basado en la norma ASTM D 1559, para evaluar la estabilidad y la deformación plástica de especímenes cilíndricos. Estos parámetros permiten validar la resistencia estructural y flexibilidad frente a condiciones climáticas. Con ello, se busca comparar el desempeño de la mezcla propuesta y analizar el efecto del polvo de llanta y del aditivo Gripper 67

Para esta investigación se decidió analizar los siguientes parámetros que presentara esta mezcla asfáltica:

- **Estabilidad Seca (Dry Stability)**
- **Estabilidad Húmeda (Wet Stability)**
- **Gravedad Específica Bulk Seca (Dry Bulk Specific Gravity)**
- **Porcentaje de Humedad Absorbida (%H Absorbida)**
- **Cambio o Perdida de estabilidad.**
- **Porcentaje total de vacíos.**

El procedimiento Marshall establece parámetros iniciales para la preparación de muestras, especificando el uso de agregados cuyo tamaño máximo nominal no exceda una pulgada. Estos criterios son fundamentales para garantizar la uniformidad y representatividad de los especímenes utilizados en los ensayos.

Los especímenes empleados deben ser cilíndricos, con dimensiones estandarizadas de 63 mm de espesor y 100 mm de diámetro. Para cada condición experimental, se debe contar con un

mínimo de tres muestras, lo que permite obtener resultados reproducibles y estadísticamente confiables

La carga se aplica de forma perpendicular al eje cilíndrico de cada espécimen, empleando el equipo Marshall. Esta orientación garantiza una evaluación adecuada de la resistencia a la carga en condiciones similares a las del tráfico vehicular.

4.1.2. Elaboración de Briquetas

Para la fabricación de briquetas se estableció la dosificación adecuada del agregado reciclado (RAP), conforme a lo estipulado en el MOP 2002, el cual indica una masa entre 900 y 1100 g. Se confeccionaron tres briquetas con masas de 900 g, 1000 g y 1100 g, respectivamente, como parte de una evaluación preliminar. Al aplicar el proceso de compactación con 50 golpes por cara, los especímenes de 1000 g y 1100 g excedieron las dimensiones estándar de espesor y diámetro. Como resultado, se determinó que 900 g representa el peso óptimo para los diseños.

4.1.3. Determinación Visual de la Humedad Óptima del RAP

Se llevó a cabo un ensayo visual para identificar el contenido de humedad de pre-revestimiento en el RAP, utilizando porcentajes de **1%, 2% y 3%** respecto al peso total del material. La humedad óptima se considera cuando el material presenta superficie saturada seca.

- El **1%** resultó insuficiente para humedecer completamente el agregado.
- El **2%** logró cubrir completamente el agregado sin generar brillo superficial, lo cual cumple con las condiciones óptimas para la mezcla.
- El **3%**, aunque cubrió totalmente el RAP, produjo una película superficial brillante, señal de sobresaturación.

4.1.4. Integración del Aditivo GRIPPER 67 a la Emulsión Asfáltica

Se aplicó un procedimiento de fusión controlado entre la emulsión asfáltica y GRIPPER 67. Siguiendo las recomendaciones técnicas del fabricante, se empleó una proporción de 1% respecto al peso de la emulsión, con preferencia por dicho valor para obtener resultados óptimos.

La mezcla se homogeneizó utilizando un taladro modificado como agitador mecánico. Cabe resaltar que, según el fabricante, esta mezcla debe utilizarse en menos de 24 horas, ya que el aditivo pierde sus propiedades aglutinantes con el tiempo y se sedimenta.

4.1.5. Procedimiento de Preparación de Mezcla para Briquetas

- Paso 1: Los 900 g de RAP se colocan en un recipiente metálico, se adicionan 27 g de agua (3%) sobre el peso de la muestra, se mezcla manualmente con guantes de caucho durante 4 minutos, empleando movimientos radiales de adentro hacia afuera.
- Paso 2: Se incorpora la emulsión asfáltica en porcentaje óptimo (4.5%) y se agita manualmente por un mínimo de 4 minutos, conservando la técnica de mezcla radial.
- Paso 3: Se coloca el caucho de llanta a la mezcla previamente emulsionada y se continúa la agitación manual durante al menos 3 minutos, manteniendo el mismo patrón de mezcla.
- Paso 4: Se prepara el molde colocando un papel filtro en su base, el cual es impregnado con aceite mediante brocha para evitar adherencias. Se realizan 15 golpes perimetrales y 10 centrales con una varilla. Luego, se cubre nuevamente con papel filtro y se aplica una ligera capa de aceite.
- Paso 5: Antes de la compactación, se verifica el estado mecánico del martillo, engranajes lubricados y en condiciones óptimas. Se inserta correctamente el molde en la máquina

electromecánica y se programa para 50 golpes por cara, como lo establece el MS-19 para mezcla en frío. Tras la primera serie de golpes, se gira el espécimen y se repite el procedimiento.

- Paso 6: Posterior a la compactación, las briquetas se dejan reposar por 24 horas, luego son desmoldadas cuidadosamente mediante el uso de un gato extrusor.

4.2. Configuración Experimental: RAP – Polvo de Llanta – Emulsión – Aditivo

Para el primer conjunto experimental se elaboraron 15 briquetas, evaluando combinaciones de polvo de llanta en proporciones de 1%, 1.5%, 2% y 2.5% y 3% tanto en estado seco como húmedo. Siguiendo el criterio mínimo de tres especímenes por combinación, se aplicaron todos los pasos metodológicos previamente descritos.

4.3 Determinación de la Gravedad Específica Bulk

Para calcular la gravedad específica aparente (Bulk) de las briquetas bituminosas, se procede a medir espesor y diámetro en cuatro puntos por muestra, obteniendo un promedio representativo por espécimen.

Posteriormente, se registran los siguientes pesos:

- Peso en aire
- Peso sumergido
- Peso en condición de superficie saturada seca

La condición de superficie saturada seca se logra al sumergir el espécimen en agua durante 3 a 5 minutos, luego se extrae, se elimina el exceso de agua superficial con toalla y se pesa.

4.4. Ensayo Marshall – Estabilidad en Estado Húmedo

El procedimiento se inicia colocando el espécimen en un sistema de vacío, aplicando una presión de 100 mm de mercurio durante 1 hora, para este propósito se utilizó el picnómetro tipo RICE para garantizar una saturación completa.

Después de la saturación, se determina el peso saturado, y los especímenes se trasladan a la prensa Marshall, donde se aplica una carga constante de 50 mm/minuto. Este ensayo permite obtener el parámetro de estabilidad estructural.

Finalizado el ensayo, los especímenes se colocan en horno de secado por 24 horas a una temperatura controlada entre 105°C y 115°C, con el propósito de obtener el **peso seco**.

4.5. Ensayo Marshall – Estado Seco

Una vez obtenida la gravedad específica Bulk, el espécimen se seca en horno por 24 horas o más a una temperatura entre 40°C y 50°C, hasta alcanzar una masa constante.

Se procede a envolver cada muestra en bolsas plásticas, que luego son sumergidas en un baño térmico tipo María durante una hora a 25°C, simulando condiciones climáticas de campo.

Finalmente, los especímenes se someten nuevamente a la prensa Marshall, aplicando una carga constante de 50 mm/minuto para evaluar la estabilidad mecánica bajo condiciones secas.

CAPÍTULO 5.

5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ENSAYOS - MATERIALES

5.1.1. Resultados Técnicos ojo

Con la finalidad de alcanzar los objetivos establecidos en el plan de integración curricular, se llevaron a cabo ensayos técnicos que incluyeron el análisis granulométrico de los materiales pétreos para la elaboración de la mezcla asfáltica en frío, el pavimento asfáltico reciclado (RAP) y del polvo de llanta, junto con la extracción de betún del RAP y la aplicación del ensayo Marshall, incorporando todas las pruebas requeridas por dicho método.

5.2 Análisis Granulométrico de los materiales pétreos

El análisis granulométrico constituye una etapa fundamental para caracterizar el material pétreo proveniente de la planta asfáltica Todo Maquinas ya que permite determinar la distribución porcentual de partículas en función de su capacidad para atravesar mallas con aberturas normalizadas. Esta evaluación se lleva a cabo mediante tamizado en seco, siguiendo el procedimiento establecido en las especificaciones técnicas, y los resultados obtenidos se expresan como porcentaje en masa respecto a la masa total de la muestra, separando cada fracción granulométrica.

La generación de la curva granulométrica es clave para interpretar el comportamiento del material en función de su estructura y potencial desempeño dentro de la mezcla asfáltica en frío, como se demuestra en la **Figura 10**. Esta curva permite identificar si el agregado cumple con los intervalos granulométricos exigidos por la normativa MOP 2002, y la normativa ASTM D 3515 tabla 1 que define rangos de gradación para mezclas en frío estabilizadas con emulsiones asfálticas.

Tabla 6

Diseño De Mezcla Asfáltica En Frio

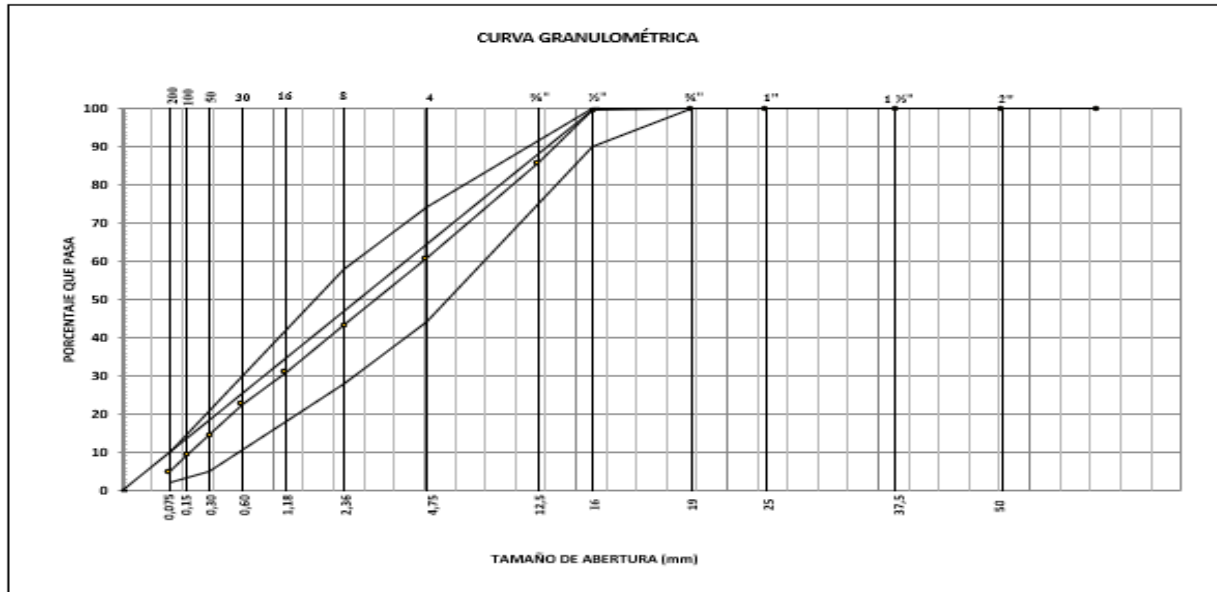
PORCENTAJE DE MEZCLA DE LOS AGREGADOS

MALLA		2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4 "	1/2 "	3/8"	N° 4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	N°200
ABERTURA	(mm)	63	50	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
ESPECIFICACIÓN	MÍN	100	100	100	100	100	90	---	44	28	---	---	5	---	2
	MÁX	100	100	100	100	100	100	---	74	58	---	---	21	---	10
AGREGADO A	(ARENA)	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,00	100,00	98,80	67,20	43,50	27,90	17,00	11,20	7,20
AGREGADO B	(Interm.)	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,00	99,08	88,20	72,74	55,47	43,08	28,07	17,90	8,30
AGREGADO C	(Grueso)	100	100,0	100,0	100,0	100,0	98,80	65,32	12,90	2,37	1,84	1,40	0,99	0,61	0,28
MEZCLA AGREGADOS		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,5	85,8	60,7	43,2	31,0	22,6	14,5	9,3	4,8

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

Figura 10

Curva granulométrica mezcla de materiales



Nota. Gráfico realizado por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

5.3 Análisis Granulométrico del RAP

El estudio granulométrico del RAP tuvo como objetivo determinar la curva de gradación del material. Para ello, se seleccionaron los límites granulométricos conforme a la normativa

vigente del MOP 2002 y la normativa ASTM D3515 Tabla 1, logrando cumplir con los rangos especificados, como se observa en la **Tabla 7** correspondiente.

Cabe señalar que, si bien el RAP contenía partículas de hasta 1", debido a restricciones impuestas por los equipos de laboratorio y las dimensiones limitadas de los moldes de compactación, se decidió trabajar con partículas de 3/4" como tamaño máximo para la elaboración de las briquetas.

Tabla 7

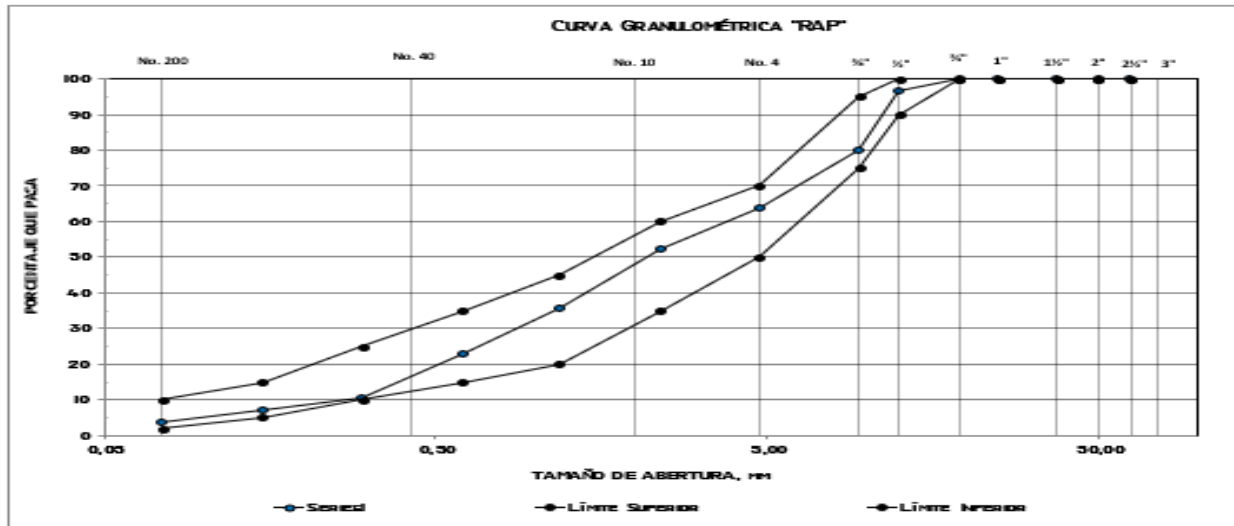
Análisis Granulométrico del RAP

Granulometría		1100,00 gr					
Masa inicial seca gr		1100,00 gr					
Designación malla		Masas, g		Porcentajes		Limites	
		Masa retenida	Masa retenida acumulada	% Retenido acumulado	% Que pasa	Granulometría 1/2"	
mm	ASTM					min	max
62,5	2 1/2"	0,00	0,00	0,0	100,0	100	100
50	2"	0,00	0,00	0,0	100,0	100	100
37,5	1 1/2"	0,00	0,00	0,0	100,0	100	100
25	1"	0,00	0,00	0,0	100,0	100	100
19	3/4	0,00	0,00	0,0	100,0	100	100
12,5	1/2	37,40	37,40	3,4	96,6	90	100
9,5	3/8	180,40	217,80	19,8	80,2	75	95
4,75	No. 4	180,40	398,20	36,2	63,8	50	70
2,38	No. 8	126,50	524,70	47,7	52,3	35	60
1,18	No.16	184,80	709,50	64,5	35,5	20	45
0,60	No.30	139,70	849,20	77,2	22,8	15	35
0,30	No.50	135,30	984,50	89,5	10,5	10	25
0,15	No. 100	37,40	1021,90	92,9	7,1	5	15
0,075	No. 200	36,30	1058,20	96,2	3,8	2	10
Pasa 200		41,80	1100,00	100,0	0,0		

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

Figura 11

Curva Granulométrica Rap



Nota. Gráfico realizado por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

5.4. Gravedad Específica de los Agregados

La determinación de la gravedad específica de los agregados es un procedimiento esencial dentro del análisis físico de materiales utilizados en mezclas asfálticas, ya que permite caracterizar la densidad relativa de los componentes pétreos con respecto al agua. Este parámetro es fundamental para definir proporciones volumétricas, estimar el contenido de vacíos, y optimizar el diseño de mezclas asfálticas estabilizadas con emulsión.

La correcta obtención de estos valores es indispensable para garantizar que los agregados reciclados utilizados en mezclas en frío posean características físico-mecánicas compatibles con los requerimientos del diseño estructural del pavimento y su desempeño a largo plazo bajo condiciones de carga y clima variables.

Para el desarrollo del ensayo, tanto de los materiales pétreos como el material reciclado (RAP) se segmenta en dos fracciones granulométricas de acuerdo con su comportamiento frente al tamizado, tal como se puede observar en la **Tabla 8**

- Fracción gruesa: material retenido en el tamiz N°4 (4.75 mm)
- Fracción fina: material que pasa a través del tamiz N°4

Este fraccionamiento permite aplicar los procedimientos diferenciados de acuerdo a las normas técnicas correspondientes:

- ASTM C 127 para agregados gruesos
- ASTM C 128 para agregados finos

Mediante estos ensayos se obtienen los siguientes parámetros físicos:

- Gravedad específica aparente: masa del agregado seco respecto al volumen excluyendo los poros permeables
- Gravedad específica bulk (promedio o a granel): relación entre la masa del agregado seco y su volumen total incluyendo los poros accesibles al agua
- Porcentaje de absorción: capacidad del agregado para retener agua dentro de sus poros accesibles, indicador de su porosidad y estabilidad

Tabla 8

Gravedad Específica de los Agregados

GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO GRUESO (ASTM C 127)

Peso en el Aire	3626	gr
Peso Sat. Sup. Seca	3691	gr
Peso en el Agua	2298	gr

Gravedad Específica Bulk	2,603	gr/cm₃
Gravedad Específica SSS	2,650	gr/cm₃
Gravedad Específica AP	2,730	gr/cm₃

% de Absorción 1,78

GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO INTERMEDIO PARTE GRUESA (3/8) (ASTM C 127)

Peso en el Aire	1430	gr
Peso Sat. Sup. Seca	1548	gr
Peso en el Agua	897	gr

Gravedad Específica Bulk	2,196	gr/cm³
Gravedad Específica SSS	2,378	gr/cm³
Gravedad Específica AP	2,685	gr/cm³

% de Absorción 8,29

GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO INTERMEDIO (3/8) PARTE FINA (ASTM C 128)

Peso en el Aire	474,01	gr
Peso Pic + agua	657,88	gr
Peso Sat. Sup. Seca	500,00	gr
Peso Pic. + agua + muestra	942,91	gr

Gravedad Específica Bulk	2,205	gr/cm³
Gravedad Específica SSS	2,326	gr/cm³
Gravedad Específica AP	2,508	gr/cm³

% de Absorción 5,48

GRAVEDAD ESPECÍFICA PONDERADA DEL AGREGADO INTERMEDIO (3/8) (ASTM C 127)

% Total:	100,00	
% Material	Retenido	Pasante
	11,80	88,20
Gs:	2,196	2,205
% Abs.:	8,29	5,48
Gs_Ponderado:	2,204	g/cm3
%Abs._Ponderado:	5,71	%

GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL AGREGADO FINO (ASTM C 128) - ARENA

Peso en el Aire (A) =	481,74	gr	Gravedad Específica Bulk	1,995	gr/cm³
Peso Pic + agua (E) =	667,32	gr	Gravedad Específica SSS	2,070	gr/cm³
Peso Sat. Sup. Seca (B)=	500,00	gr	Gravedad Específica AP	2,158	gr/cm³
Peso Pic. + agua + muestra (D) =	925,83	gr			

% de Absorción	3,79
-----------------------	------

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

Gravedad especifica del RAP

Tabla 9

Gravedad especifica del RAP

Gravedad Especifica Agregado Grueso - Rap (Retenido Tamiz No. 4)	
Descripción	Datos
Peso SSS	1615,0 gr
Peso Aparente - Sumergido=	943,0 gr
Peso Seco	1598,2 gr
Resultados	
Estado	Gs
Gravedad Especifica Bulk	2,378
Gravedad Especifica SSS	2,403
Gravedad Especifica Aparente	2,439
% Absorción=	1,05 %

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

Tabla 10

Gravedad específica del RAP

Gravedad Especifica Agregado Fino - Rap (Pasante Tamiz No. 4)	
Descripción	Datos
Peso Seco	489,84
Peso Pic. + Agua=	657,88
Peso Pic. + agua + Muestra=	932,36
Peso SSS=	500,00
Resultados	
Estado	Gs
Gravedad Especifica Bulk	2,172
Gravedad Especifica SSS	2,217
Gravedad Especifica Aparente	2,275
% Absorción=	2,07 %

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

5.5 Extracción de bitumen método de ignición

Norma de referencia: ASTM D6307 – Standard Test Method for Asphalt Content of Hot-Mix Asphalt by Ignition Method

El ensayo de extracción de bitumen por ignición es un método que permite determinar el contenido de ligante (asfalto) en una mezcla asfáltica, mediante la quema controlada de la muestra en un horno a altas temperaturas, provocando la evaporación y combustión del bitumen, dejando solo los agregados minerales.

Este método se realiza sin el uso de disolventes y es ampliamente utilizado por su rapidez y seguridad ambiental frente a los métodos químicos tradicionales.

Procedimiento:

➤ Preparación de la muestra:

Se toma una muestra representativa de mezcla asfáltica (500 a 2000 g aprox.).

Se registra el peso exacto de la muestra junto con la bandeja (peso inicial total).

➤ Introducción al horno:

Se coloca la muestra en el horno de ignición, precalentado (usualmente a 538 °C o 1000 °F).

Se inicia el ciclo de combustión. El horno registra automáticamente la pérdida de masa.

➤ Ignición y quemado:

Durante el proceso, el asfalto se quema y los gases se filtran. El horno controla el tiempo y la estabilidad del peso. El proceso termina cuando la masa se estabiliza.

Cálculo del contenido de asfalto:

Tabla 11

Cálculo del contenido de asfalto

Información general del ensayo:

Identificación de la muestra	
------------------------------	--

Datos del ensayo en muestra seca, método A:

Masa del conjunto de bandejas (balanza externa), g	3388,93
Masa total inicial (balanza externa), g	5040,24
Masa inicial de la muestra, g	1651,31
Masa total (balanza horno), g	5044,10
masa total final (balanza externa), g	4918,34
Masa final de la muestra, g	1529,41

Contenido mineral del extracto:

Porcentaje de pérdida (valor del ticket) (%)	7,52
----------------------------------------------	-------------

Contenido de ligante corregido (%)	7,38
------------------------------------	-------------

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

➤ **Enfriamiento y limpieza:**

Se dejan enfriar los agregados, que pueden ser reutilizados para un ensayo de granulometría.

5.6 Porcentaje óptimo de emulsión para la mezcla en frío (MAF) y el RAP

5.6.1. Determinación del Porcentaje Óptimo de Emulsión Mezcla asfáltica

Con base en los datos obtenidos, se estimó el porcentaje efectivo de emulsión para la mezcla asfáltica, integrando los resultados obtenidos de los ensayos de granulometría, y extracción de betún.

Se consideraron los siguientes parámetros granulométricos:

- Porcentaje retenido en tamiz N°8 = **57 %**
- Porcentaje pasante en tamiz N° 8 y que retiene N° 200 = **38**
- Porcentaje pasante en tamiz N° 200 = **4.82%**

Además, se aplicaron los factores técnicos:

- **Factor F = 0.7**, relacionado con el residuo del betún

$$\begin{array}{l}
 \text{ECUACIÓN =»} \quad \mathbf{P = (0,05A+0,1B+0,5C) *(0,7)} \\
 \mathbf{a = 57} \quad \% \text{ retenido en tamiz \#8 entero} \\
 \mathbf{b = 38} \quad \% \text{ pasa el 8 y retiene 200} \\
 \mathbf{C = 4,82} \quad \% \text{ pasa el tamiz 200} \\
 \mathbf{F = 0,7} \quad \text{Factor 0,7 representa el residuo del betún} \\
 \mathbf{P = 6,3} \quad \% \text{ de emulsion teórico}
 \end{array}$$

DEMANDA DE EMULSIÓN APROXIMADO DE LA COMBINACIÓN DE AGREGADOS

Mediante estos datos combinados se calculó el contenido efectivo de emulsión, considerando tanto la gradación de los materiales como las características físicas del agregado, lo que permite establecer un diseño balanceado y funcional para mezclas asfálticas en frío.

5.7 Determinación del Porcentaje Óptimo de Emulsión RAP

Con base en los datos obtenidos, se estimó el porcentaje efectivo de emulsión para el pavimento asfáltico reciclado (RAP), integrando los resultados obtenidos de los ensayos de granulometría, extracción de betún y luego de realizar el ensayo de residuo por evaporación el valor es del 61.7%. Como se puede observar en la

Tabla 12

Se consideraron los siguientes parámetros granulométricos:

- **Porcentaje pasante en tamiz N°4 (4.75 mm)** 63.80 %
- **Porcentaje retenido en tamiz N°4** 36.20 %
- **Porcentaje retenido en tamiz N°8** 47.70 %
- **Porcentaje pasante en tamiz N°8** 52.30 %
- **Porcentaje pasante en tamiz N°200** 3.80 %

Además, se aplicaron los factores técnicos:

- **Factor K = 0.2**, asociado al contenido pasante del tamiz N°200
- **Factor F = 1**, relacionado con el nivel de absorción del agregado granular

Tabla 12

Determinación del Porcentaje Óptimo de Emulsión RAP

Método del Instituto del Asfalto Ms-19	
% Residuo asfáltico de la emulsión:	61,70 %
% Pasa Tamiz No. 4=	63,80 %
% Retenido Tamiz No. 4=	36,20 %
% Emulsión Tentativo=	
Para Base	6,79 %
Para Carpeta	9,00 %
% Emulsión Efectivo Ms-21	
% retenido tamiz No. 8=	47,70 %
% pasa tamiz No. 8=	52,30 %
% pasa tamiz No. 200=	3,80 %
K - factor relacionado con el pasante Tamiz No. 200=	0,2
F - factor relacionado con la absorción del material granular=	1
% Emulsión Tentativo=	9,37 %
% emulsión efectiva=	2,5 %

Factor K	Límites		K
	Inferior	Superior	
Si %pasa T.No. 200	11	15	0,15
Si %pasa T.No. 200	6	10	0,1
Si %pasa T.No. 200	6	-	0,2

Relacionado con la absorción del material granular		
Factor F		
F=	2	Alta Absorción
F=	0,7-1	Absorción Media

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

Mediante estos datos combinados calculó el contenido efectivo de emulsión, considerando tanto la gradación del RAP como las características físicas del agregado, lo que permite establecer un diseño balanceado y funcional para mezclas asfálticas en frío.

CAPITULO 6

6.1. ENSAYO MARSHALL

6.1.1. Evaluación y análisis de Briquetas

Finalizado el proceso experimental del ensayo Marshall aplicado a los dos grupos de especímenes, se procede al análisis detallado de los resultados obtenidos. Este estudio considera el comportamiento individual de cada briqueta, así como su comportamiento colectivo, diferenciando además su desempeño bajo condiciones húmedas y secas. Esta doble perspectiva permite identificar con mayor claridad las variaciones físicas y mecánicas que presentan los especímenes, facilitando una comprensión más profunda sobre cómo influyen los distintos estados de humedad en sus propiedades estructurales.

En particular, el análisis busca detectar tendencias y patrones que puedan correlacionarse con la dosificación de materiales reciclados, el tipo de ligante utilizado, y otros factores de diseño que inciden en la respuesta del material frente a las cargas aplicadas. Esta fase del estudio es crucial para validar la viabilidad del uso de mezclas con pavimento reciclado en aplicaciones reales, y aporta información sustantiva para formular recomendaciones técnicas sobre su comportamiento y optimización en el contexto de pavimentación con mezclas en frío.

Grupo 1: Materiales + Emulsion Estado Seco

Tabla 13

Ensayo Marshall

Briquetas: Material + Emulsión + Aditivo (Secas)

Emulsión	Asfalto Residual	Nº	D - Peso en Aire	F - Peso SSS	E - Peso en Agua	G (Grav. Especifica Bulk)	Volumen Briqueta	A Residuo de Asfalto	K Cont. Agua testigo	Gd (Grav. Especifica Bulk Seca)	VMA (Vacíos de Agregado Mineral)	V - (Total de Vacíos)	Estabilidad Medida	Factor de Correccion Estabilidad	Estabilidad Corregida	Estabilidad Promedio
5,50 %	0,40 %	1	1102,61 gr	1105,55 gr	632,95 gr	2,333	473	0,40 %	0,58 %	2,320	13,23 %	12,33 %	2600	0,89	2314 Lb	2321
		2	1088,41 gr	1092,56 gr	630,00 gr	2,353	463	0,40 %	0,58 %	2,339	12,50 %	11,58 %	2400	0,89	2136 Lb	
		3	1096,80 gr	1100,78 gr	633,59 gr	2,348	467	0,40 %	0,58 %	2,334	12,69 %	11,78 %	2825	0,89	2514 Lb	
6,00 %	0,43 %	4	1093,77 gr	1097,46 gr	635,28 gr	2,367	462	0,43 %	0,58 %	2,353	12,03 %	11,02 %	4450	0,96	4272 Lb	4245
		5	1104,43 gr	1108,48 gr	639,75 gr	2,356	469	0,43 %	0,58 %	2,343	12,41 %	11,41 %	4300	0,93	3999 Lb	
		6	1098,31 gr	1101,80 gr	635,95 gr	2,358	466	0,43 %	0,58 %	2,344	12,36 %	11,36 %	4650	0,96	4464 Lb	
6,50 %	0,47 %	7	1116,17 gr	1120,19 gr	656,65 gr	2,408	464	0,47 %	0,59 %	2,394	10,53 %	9,42 %	3780	0,89	3364 Lb	3182
		8	1116,04 gr	1120,00 gr	655,09 gr	2,401	465	0,47 %	0,59 %	2,387	10,80 %	9,70 %	3290	0,89	2928 Lb	
		9	1127,00 gr	1115,05 gr	653,62 gr	2,442	461	0,47 %	0,58 %	2,428	9,24 %	8,12 %	3500	0,93	3255 Lb	
7,00 %	0,51 %	10	1108,90 gr	1113,39 gr	652,60 gr	2,407	461	0,51 %	0,59 %	2,392	10,61 %	9,42 %	3700	0,89	3293 Lb	3278
		11	1117,89 gr	1121,02 gr	653,32 gr	2,390	468	0,51 %	0,59 %	2,376	11,21 %	10,04 %	3850	0,89	3427 Lb	
		12	1119,82 gr	1123,11 gr	653,06 gr	2,382	470	0,51 %	0,59 %	2,369	11,51 %	10,33 %	3500	0,89	3115 Lb	
7,50 %	0,54 %	13	1128,16 gr	1130,66 gr	660,55 gr	2,400	470	0,54 %	0,59 %	2,386	10,89 %	9,62 %	3500	0,89	3115 Lb	2907
		14	1127,44 gr	1130,74 gr	662,65 gr	2,409	468	0,54 %	0,59 %	2,395	10,57 %	9,29 %	3300	0,89	2937 Lb	
		15	1129,09 gr	1132,23 gr	661,96 gr	2,401	470	0,54 %	0,59 %	2,387	10,85 %	9,58 %	3000	0,89	2670 Lb	

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

Grupo 2: Materiales + Emulsion Estado Húmedo

Tabla 14

Ensayo Marshall

Briquetas: Material + Emulsión + Aditivo (Humedas)

Emulsión	Asfalto Residual	Nº	D - Peso en Aire	F - Peso SSS	E - Peso en Agua	G (Grav. Especifica Bulk)	Volumen Briqueta	A - (Residuo de Asfalto)	K4,K5,K6 - (Conte. Agua testigo)	Gd (Grav. Especifica Bulk Seca)	VMA - (Vacíos en el Agregado Mineral)	V - (Total de Vacíos)	Estabilidad Medida	Factor de Correccion Estabilidad	(Estabilidad Corregida)	Estalididad Promedio	% de perdida de estabilidad	Humedad Absorbida
5,50 %	0,40 %	1	1161,45	1164,44	667,70	2,338	497	0,4 %	1,29 %	2,308	13,66 %	12,75 %	1350	0,89	1201,5	1179	49,20 %	1,29 %
		2	1154,26	1165,10	664,81	2,307	500	0,4 %	1,29 %	2,278	14,80 %	13,91 %	1200	0,89	1068			
		3	1161,05	1162,92	658,08	2,300	505	0,4 %	1,29 %	2,271	15,07 %	14,18 %	1425	0,89	1268,25			
6,00 %	0,43 %	4	1138,31	1141,02	648,07	2,309	493	0,4 %	1,22 %	2,281	14,70 %	13,73 %	2230	0,96	2140,8	2124	49,96 %	1,22 %
		5	1169,73	1171,14	664,98	2,311	506	0,4 %	1,22 %	2,283	14,63 %	13,66 %	2150	0,93	2000			
		6	1143,36	1145,55	648,90	2,302	497	0,4 %	1,22 %	2,275	14,96 %	13,99 %	2325	0,96	2232			
6,50 %	0,47 %	7	1138,84	1140,01	658,55	2,365	481	0,5 %	1,25 %	2,336	12,68 %	11,60 %	2200	0,89	1958	1987	37,58 %	1,25 %
		8	1124,51	1126,62	646,08	2,340	481	0,5 %	1,25 %	2,311	13,61 %	12,55 %	2145	0,89	1909			
		9	1133,67	1135,44	652,05	2,345	483	0,5 %	1,25 %	2,316	13,42 %	12,35 %	2250	0,93	2092,5			
7,00 %	0,51 %	10	1128,62	1134,22	649,17	2,327	485	0,5 %	1,19 %	2,300	14,08 %	12,94 %	1850	0,89	1647	1678	48,82 %	1,19 %
		11	1126,67	1133,33	640,15	2,285	493	0,5 %	1,19 %	2,258	15,64 %	14,52 %	1925	0,89	1713			
		12	1131,83	1134,41	650,18	2,337	484	0,5 %	1,19 %	2,310	13,69 %	12,54 %	1880	0,89	1673,2			
7,50 %	0,54 %	13	1145,52	1150,04	653,37	2,306	497	0,5 %	1,21 %	2,279	14,88 %	13,67 %	2030	0,89	1806,7	1808	37,81 %	1,21 %
		14	1133,50	1146,56	644,47	2,258	502	0,5 %	1,21 %	2,231	16,68 %	15,50 %	1965	0,89	1749			
		15	1128,68	1133,52	656,00	2,364	478	0,5 %	1,21 %	2,336	12,77 %	11,53 %	2100	0,89	1869			

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

ANÁLISIS

Resumen de Resultados						
% Asfalto Residual	Estabilidad Seca	Estabilidad Húmeda	% Cambio de Estabilidad	Densidad Bulk Seca	% De Humedad Absorbida	% Total de Vacíos
5,50	2321	1179	49,20 %	2,286	1,29	13,62
6,00	4245	2124	49,96 %	2,280	1,22	13,79
6,50	3182	1987	37,58 %	2,321	1,25	12,17
7,00	3278	1678	48,82 %	2,289	1,19	13,34
7,50	2907	1808	37,81 %	2,282	1,21	13,57

% Emulsión Optima	Parámetros "Ms-14"	Valor Calculado	Especificación
6,5 %	Estabilidad seca	3200 lb	min 500lb
	Estabilidad húmeda	2000 lb	
	Cambio de estabilidad	44,50 %	max 50%
	Gs Bulk Seca	2,30	-
	Total de Vacíos	12,87 %	2%-18%
	Humedad Absorbida	1,22 %	Max 4%

6.1.2. Análisis Técnico de Resultados – Mezcla Óptima con 6.5% de Emulsión

Los resultados obtenidos del ensayo Marshall permiten determinar que la mezcla óptima con un porcentaje de emulsión del 6.5% cumple satisfactoriamente con los parámetros establecidos en los estándares técnicos aplicables. A continuación, se analiza el comportamiento de los especímenes desde una perspectiva mecánica y físico-química, comparando las condiciones secas y húmedas, así como los efectos derivados del cambio de humedad:

- **Estabilidad Seca:** Se alcanzó una resistencia máxima de 3200 lb, valor ampliamente superior al mínimo requerido de 500 lb según normativa, lo que evidencia una excelente capacidad de soporte frente a esfuerzos de carga bajo condiciones estándar.
- **Estabilidad Húmeda:** La mezcla mostró una resistencia de 2000 lb bajo condiciones saturadas, lo que indica una buena retención de propiedades mecánicas frente a la presencia de humedad, con un desempeño superior a la mayoría de mezclas convencionales en frío.
- **% de Cambio de Estabilidad:** Se registró una variación del 44.5%, manteniéndose por debajo del límite máximo permitido de 50%. Este indicador demuestra la resistencia relativa de la mezcla frente a procesos de humectación, lo cual es crucial para su durabilidad en ambientes húmedos o en zonas con alta pluviosidad.
- **Densidad Bulk Seca:** El valor de densidad a 2.30 g/cm³ sugiere una compactación eficiente, así como una correcta distribución de vacíos y material ligante, lo que contribuye a la integridad estructural de la mezcla.
- **% Total de Vacíos:** La mezcla presenta un contenido de vacíos del 12.87%, cifra que se encuentra dentro del rango óptimo establecido entre 2% y 18%. Este equilibrio

permite tanto una adecuada compactación como una permeabilidad controlada que evita deterioros prematuros.

- **% de Humedad Absorbida:** El nivel de absorción fue de apenas 1.22%, considerablemente inferior al límite máximo de 4%, lo que demuestra una baja susceptibilidad al ingreso de agua en la estructura de la mezcla.

Estos resultados validan el uso de mezclas en frío con materiales pétreos de la planta asfáltica Todo Maquinas como una alternativa sostenible y eficiente en obras de pavimentación. Además, se destacan las ventajas técnicas relacionadas con la durabilidad, la resistencia mecánica y el comportamiento frente a la humedad, posicionando esta solución como una opción viable para su implementación en vías urbanas y rurales de bajo a medio volumen de tránsito.

6.2 ENSAYO MARSHALL (RAP)

6.2.1 Evaluación y Análisis de Especímenes con RAP

Como parte del proceso de validación técnica de mezclas en frío con componentes reciclados, se ha realizado el ensayo Marshall sobre dos grupos de briquetas conformadas con pavimento reciclado (RAP), polvo de neumático de avión y el aditivo de adherencia Gripper 67. Esta combinación busca potenciar tanto el desempeño mecánico como la sostenibilidad ambiental de los materiales propuestos para obras de pavimentación.

Finalizada la fase experimental, se procede al análisis detallado de los especímenes, evaluando su comportamiento de forma individual y conjunta, bajo dos condiciones de ensayo: estado seco y estado húmedo. Esta estrategia permite caracterizar con mayor precisión las

respuestas físicas y estructurales del material ante la presencia de humedad, aspecto crítico en zonas de elevada pluviosidad o drenaje limitado.

El estudio se enfoca en detectar patrones de desempeño que puedan relacionarse con la proporción de RAP y caucho granulado, así como con la acción del aditivo Gripper 67 sobre la cohesión interna y la adherencia de los agregados. Esta etapa resulta esencial para establecer criterios técnicos que permitan optimizar el diseño de mezclas asfálticas recicladas, promoviendo su uso como una solución eficaz, duradera y sostenible en vías de bajo y medio tránsito.

Grupo 1

Tabla 15

Ensayo Marshall RAP

Briquetas: Rap + Emulsión + Aditivo (Secas)

Emulsión	Asfalto Residual	Nº	D - Peso en Aire	F - Peso SSS	E - Peso en Agua	G (Grav. Especifica Bulk)	Volumen Briqueta	A Residuo de Asfalto	K Cont. Agua testigo	Gd (Grav. Especifica Bulk Seca)	VMA (Vacíos de Agregado Mineral)	V - (Total de Vacíos)	Estabilidad Medida	Factor de Correccion Estabilidad	Estabilidad Corregida	Estabilidad Promedio
2,50 %	1,54 %	1	1061,26 gr	1063,01 gr	553,85 gr	2,084	509	1,54 %	0,53 %	2,074	13,40 %	10,29 %	2150	1,00	2150,00 Lb	2127
		2	1069,59 gr	1071,69 gr	559,24 gr	2,087	512	1,54 %	0,53 %	2,076	13,28 %	10,17 %	2130	1,00	2130,00 Lb	
		3	1055,87 gr	1057,32 gr	550,59 gr	2,084	507	1,54 %	0,53 %	2,073	13,43 %	10,32 %	2100	1,00	2100,00 Lb	
3,50 %	2,16 %	4	1065,30 gr	1067,78 gr	559,08 gr	2,094	509	2,16 %	0,54 %	2,083	13,52 %	9,17 %	1890	1,00	1890,00 Lb	1853
		5	1058,04 gr	1060,54 gr	554,55 gr	2,091	506	2,16 %	0,54 %	2,080	13,65 %	9,31 %	1870	1,00	1870,00 Lb	
		6	1071,01 gr	1074,23 gr	559,76 gr	2,082	514	2,16 %	0,53 %	2,071	14,03 %	9,71 %	1800	1,00	1800,00 Lb	
4,50 %	2,78 %	7	1075,86 gr	1077,60 gr	561,00 gr	2,083	517	2,78 %	0,54 %	2,072	14,51 %	8,99 %	2000	1,00	2000,00 Lb	2025
		8	1065,23 gr	1068,56 gr	561,26 gr	2,100	507	2,78 %	0,54 %	2,089	13,81 %	8,24 %	1975	1,00	1975,00 Lb	
		9	1082,40 gr	1084,76 gr	568,29 gr	2,096	516	2,78 %	0,54 %	2,085	13,97 %	8,41 %	2100	1,00	2100,00 Lb	
5,50 %	3,39 %	10	1072,70 gr	1075,22 gr	564,96 gr	2,102	510	3,39 %	0,54 %	2,091	14,22 %	7,45 %	1750	1,00	1750,00 Lb	1742
		11	1083,91 gr	1085,79 gr	569,87 gr	2,101	516	3,39 %	0,54 %	2,090	14,28 %	7,51 %	1750	1,00	1750,00 Lb	
		12	1073,03 gr	1076,48 gr	567,41 gr	2,108	509	3,39 %	0,55 %	2,097	14,00 %	7,21 %	1725	1,00	1725,00 Lb	
6,50 %	4,01 %	13	1091,50 gr	1093,31 gr	567,86 gr	2,077	525	4,01 %	0,54 %	2,067	15,74 %	7,88 %	1490	0,96	1430,40 Lb	1405
		14	1076,20 gr	1079,43 gr	564,06 gr	2,088	515	4,01 %	0,55 %	2,077	15,30 %	7,39 %	1440	1,00	1440,00 Lb	
		15	1095,26 gr	1097,48 gr	570,36 gr	2,078	527	4,01 %	0,54 %	2,067	15,72 %	7,85 %	1400	0,96	1344,00 Lb	

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

Grupo 2

Tabla 16

Ensayo Marshall RAP

Briquetas: Rap + Emulsión + Aditivo (Humedas)

Emulsión	Asfalto Residual	Nº	D - Peso en Aire	F - Peso SSS	E - Peso en Agua	G (Grav. Especifica Bulk)	Volumen Briqueta	A - (Residuo de Asfalto)	K4,K5,K6 - (Conte. Agua testigo)	Gd (Grav. Especifica Bulk Seca)	VMA - (Vacíos en el Agregado Mineral)	V - (Total de Vacíos)	Estabilidad Medida	Factor de Correccion Estabilidad	(Estabilidad Corregida)	Estalidat Promedio	% de perdida de estalidat	Humedat Absorbidat
2,50 %	1,54 %	1	951,98 gr	954,74 gr	489,90 gr	2,048	465	1,54 %	0,29 %	2,042	14,72 %	11,65 %	1150	1,19	1368,5	1477	30,55 %	0,29 %
		2	932,96 gr	935,97 gr	480,90 gr	2,050	455	1,54 %	0,33 %	2,044	14,65 %	11,59 %	1200	1,25	1500			
		3	913,99 gr	916,20 gr	468,90 gr	2,043	447	1,54 %	0,25 %	2,038	14,87 %	11,81 %	1250	1,25	1562,5			
3,50 %	2,16 %	4	916,53 gr	918,20 gr	470,90 gr	2,049	447	2,16 %	0,19 %	2,045	15,10 %	10,83 %	1050	1,25	1312,5	1229	33,68 %	0,22 %
		5	922,93 gr	924,77 gr	473,98 gr	2,047	451	2,16 %	0,20 %	2,043	15,18 %	10,92 %	950	1,25	1188			
		6	919,57 gr	921,92 gr	475,60 gr	2,060	446	2,16 %	0,26 %	2,055	14,69 %	10,40 %	950	1,25	1187,5			
4,50 %	2,78 %	7	914,34 gr	916,72 gr	475,90 gr	2,074	441	2,78 %	0,27 %	2,069	14,64 %	9,12 %	1150	1,32	1518	1387	31,49 %	0,25 %
		8	918,18 gr	921,43 gr	476,00 gr	2,061	445	2,78 %	0,36 %	2,054	15,24 %	9,77 %	1090	1,25	1363			
		9	923,02 gr	924,14 gr	475,10 gr	2,056	449	2,78 %	0,12 %	2,053	15,29 %	9,81 %	1025	1,25	1281,25			
5,50 %	3,39 %	10	931,24 gr	933,24 gr	471,57 gr	2,017	462	3,39 %	0,22 %	2,013	17,44 %	10,92 %	850	1,19	1012	1118	35,82 %	0,19 %
		11	923,99 gr	925,79 gr	471,85 gr	2,035	454	3,39 %	0,20 %	2,032	16,67 %	10,09 %	970	1,19	1154			
		12	914,98 gr	916,24 gr	465,10 gr	2,028	451	3,39 %	0,14 %	2,025	16,93 %	10,36 %	950	1,25	1187,5			
6,50 %	4,01 %	13	932,98 gr	934,43 gr	465,06 gr	1,988	469	4,01 %	0,16 %	1,985	19,08 %	11,53 %	700	1,19	833	887	36,89 %	0,21 %
		14	932,78 gr	934,96 gr	467,58 gr	1,996	467	4,01 %	0,24 %	1,991	18,82 %	11,24 %	745	1,19	887			
		15	932,58 gr	934,50 gr	465,10 gr	1,987	469	4,01 %	0,21 %	1,983	19,16 %	11,61 %	790	1,19	940			

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

ANALISIS

Resumen de Resultados						
% Asfalto Residual	Estabilidad Seca	Estabilidad Húmeda	% Cambio de Estabilidad	Densidad Bulk Seca	% De Humedad Absorbida	% Total de Vacíos
2,50	2127	1477	30,55 %	2,041	0,29	11,68
3,50	1853	1229	33,68 %	2,048	0,22	10,71
4,50	2025	1387	31,49 %	2,059	0,25	9,56
5,50	1742	1118	35,82 %	2,023	0,19	10,46
6,50	1405	887	36,89 %	1,986	0,21	11,46

% emulsión Optima	Parámetros "Ms-14"	valor Calculado	Especificación
4,5 %	Estabilidad seca	1830 lb	min 500lb
	Estabilidad húmeda	1270 lb	
	Cambio de estabilidad	33,50 %	max 50%
	Gs Bulk Seca	2,05	-
	Total de Vacíos	9,93 %	2%-18%
	Humedad Absorbida=	0,23 %	Max 4%

6.2.2. Análisis Técnico de Resultados – Mezclas Asfálticas con Componentes Reciclados y Aditivo de Adherencia

Los datos obtenidos del ensayo Marshall permiten evaluar el comportamiento mecánico y volumétrico de mezclas en frío formuladas con materiales reciclados (RAP), caucho micronizado proveniente de llantas de avión y el aditivo Gripper 67. Esta configuración se orienta hacia la sostenibilidad y la mejora del desempeño estructural en pavimentos de bajo y medio volumen de tránsito.

A continuación, se presenta el análisis técnico de la mezcla óptima determinada con un porcentaje de emulsión del 4.5%, en función de los criterios de la norma MS-14:

6.2.3. Parámetros Mecánicos y Volumétricos

➤ **Estabilidad Seca: 1830 lb**

Supera ampliamente el mínimo requerido de 500 lb, demostrando una excelente resistencia a la carga en condiciones normales.

➤ **Estabilidad Húmeda: 1270 lb**

Indica una buena conservación de propiedades mecánicas frente a la acción del agua, con una pérdida relativamente controlada.

➤ **% Cambio de Estabilidad: 33.50%**

Se mantiene por debajo del límite máximo permitido (50%), lo que confirma una alta capacidad de retención estructural frente a procesos de saturación.

➤ **Densidad Bulk Seca: 2.05 g/cm³**

Refleja una compactación eficiente y adecuada distribución del ligante, con buenos

niveles de cohesión interna gracias al efecto sinérgico entre el RAP, el caucho y el aditivo.

➤ **% Vacíos Totales: 9.93%**

Dentro del intervalo óptimo de 2% a 18%, lo que garantiza permeabilidad controlada y estabilidad volumétrica.

➤ **% Humedad Absorbida: 0.23%**

Muy por debajo del límite máximo (4%), lo cual demuestra baja susceptibilidad a la absorción de agua y excelente comportamiento frente a infiltraciones.

Grupo 3

Tabla 17

Ensayo Marshall

Briquetas: Rap + Emulsión + Polvo de llanta (Diferentes Porcentajes) + Aditivo.

Emulsión	Asfalto Residual	Porcentaje de polvo de llanta	D - Peso en Aire	F - Peso SSS	E - Peso en Agua	G (Grav. Specifica Bulk)	Volumen Briqueta	A - (Residuo de Asfalto)	K4,K5,K6 - (Conte. Agua testigo)	Gd (Grav. Specifica Bulk Seca)	VMA - (Vacíos en el Agregado Mineral)	V - (Total de Vacíos)	Estabilidad Medida	Factor de Correccion Estabilidad	(Estabilidad Corregida)	Estabilidad Promedio
4,50 %	2,78 %	1,00	951,98 gr	954,74 gr	469,90 gr	1,963	485	1,54 %	0,29 %	1,958	18,23 %	15,30 %	1150	0,86	989	1118
			932,96 gr	935,97 gr	460,90 gr	1,964	475	1,54 %	0,33 %	1,958	18,25 %	15,31 %	1200	0,93	1116	
			913,99 gr	916,20 gr	450,90 gr	1,964	465	1,54 %	0,25 %	1,960	18,16 %	15,22 %	1250	1,00	1250	
4,50 %	2,78 %	1,50	916,53 gr	918,20 gr	457,90 gr	1,991	460	2,16 %	0,19 %	1,988	17,49 %	13,35 %	1050	0,96	1008	935
			922,93 gr	924,77 gr	461,98 gr	1,994	463	2,16 %	0,20 %	1,990	17,38 %	13,23 %	950	0,93	884	
			919,57 gr	921,92 gr	461,60 gr	1,998	460	2,16 %	0,26 %	1,993	17,28 %	13,13 %	950	0,96	912	
4,50 %	2,78 %	2,00	914,34 gr	916,72 gr	470,90 gr	2,051	446	2,78 %	0,27 %	2,046	15,59 %	10,14 %	1150	0,93	1070	1022
			918,18 gr	921,43 gr	471,00 gr	2,038	450	2,78 %	0,36 %	2,031	16,18 %	10,77 %	1090	0,93	1014	
			923,02 gr	924,14 gr	470,10 gr	2,033	454	2,78 %	0,12 %	2,030	16,22 %	10,80 %	1025	0,96	984	
4,50 %	2,78 %	2,50	931,24 gr	933,24 gr	461,57 gr	1,974	472	3,39 %	0,22 %	1,970	19,19 %	12,81 %	850	0,93	791	868
			923,99 gr	925,79 gr	461,85 gr	1,992	464	3,39 %	0,20 %	1,988	18,47 %	12,03 %	970	0,93	902	
			914,98 gr	916,24 gr	456,10 gr	1,988	460	3,39 %	0,14 %	1,986	18,55 %	12,12 %	950	0,96	912	
4,50 %	2,78 %	3,00	932,98 gr	934,43 gr	450,06 gr	1,926	484	4,01 %	0,16 %	1,923	21,59 %	14,27 %	700	0,93	651	693
			932,78 gr	934,96 gr	451,58 gr	1,930	483	4,01 %	0,24 %	1,925	21,50 %	14,18 %	745	0,93	693	
			932,58 gr	934,50 gr	451,10 gr	1,929	483	4,01 %	0,21 %	1,925	21,50 %	14,17 %	790	0,93	735	

Nota. Tabla realizada por el autor (Muñoz Jhovanny, 2025).

Análisis

Resumen de resultados				
%Caucho	Grav.Espec. Bulk	Grav.Espec. Bulk Seca	Total de vacíos %	Estabilidad
1,00	1,964	1,958	15,28	1118
1,50	1,994	1,990	13,23	935
2,00	2,041	2,036	10,57	1022
2,50	1,985	1,981	12,32	868
3,00	1,928	1,925	14,20	693

% emulsión Optima	Parámetros "Ms-14"	valor Calculado	Especificación
4,5 %	Estabilidad seca	1830 lb	min 500lb
	Estabilidad húmeda	1270 lb	
	Cambio de estabilidad	33,50 %	max 50%
	Gs Bulk Seca	2,05	-
	Total de Vacíos	9,93 %	2%-18%
	Humedad Absorbida=	0,23 %	Max 4%

6.2.4. ANÁLISIS TÉCNICO POR MEZCLA

1.00 % de caucho

- Gravedad específica bulk: 1.964
- Vacíos totales: 15.28 %
- Estabilidad Marshall: 1118 lb
- **Observación:** Alta estabilidad, vacíos elevados.

1.50 % de caucho

- Gravedad específica bulk: 1.994
- Vacíos totales: 13.23 %
- Estabilidad Marshall: 935 lb
- **Observación:** Buena densidad, caída de estabilidad.

2.00 % de caucho

- Gravedad específica bulk: 2.041
- Vacíos totales: 10.57 %
- Estabilidad Marshall: 1022 lb
- **Observación:** Mejor balance entre densidad y estabilidad.

2.50 % de caucho

- Gravedad específica bulk: 1.985
- Vacíos totales: 12.32 %
- Estabilidad Marshall: 868 lb
- **Observación:** Disminuye estabilidad vacíos aceptables.

3.00 % de caucho

- Gravedad específica bulk: 1.928
- Vacíos totales: 14.20 %
- Estabilidad Marshall: 693 lb
- **Observación:** Baja estabilidad vacíos elevados.

6.2.5. INTERPRETACIÓN TÉCNICA

Estabilidad Marshall: El valor más alto se obtiene con 1 % de caucho (1118 lb), pero los vacíos superan el 15 %, lo que puede afectar la durabilidad.

Gravedad específica y vacíos: El mejor desempeño estructural se observa a 2 % de caucho, con mayor densidad (2.041) y vacíos dentro del rango recomendado por la MS-14 (2 %–18 %).

Tendencia: A partir de 2 % de caucho, se observa caída progresiva en estabilidad y densidad, lo que indica sobrecarga de material elástico que puede interferir en la compactación y cohesión interna.

El 2.00 % de caucho se presenta como el porcentaje óptimo, ya que:

- Ofrece una alta densidad aparente (2.041), señal de buena compactación.
- Mantiene los vacíos en un nivel favorable (10.57 %), asegurando trabajabilidad y resistencia.
- Logra una estabilidad considerable (1022 lb), superior al mínimo exigido (500 lb) según MS-14.

CAPÍTULO 7.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES TÉCNICAS MEZCLA EN FRÍO

Los resultados obtenidos del ensayo Marshall demuestran que la mezcla en frío con 6.5% de emulsión residual y pavimento reciclado posee un desempeño técnico destacado en términos de estabilidad, compactación y resistencia a la humedad. A continuación, se resumen las principales conclusiones:

- **Alta Estabilidad Mecánica:** La resistencia bajo condiciones secas alcanza las 3200 lb, superando ampliamente los mínimos técnicos, lo que garantiza la capacidad portante de la mezcla en aplicaciones viales.
- **Buena Retención frente a Humedad:** Con una pérdida de estabilidad del 44.5%, la mezcla conserva propiedades estructurales incluso en presencia de agua, favoreciendo su aplicación en climas lluviosos o con alta humedad ambiental.
- **Adecuada Compactación y Densidad:** La densidad de 2.30 g/cm³ sugiere un óptimo nivel de compactación, reflejando una buena relación entre vacíos y ligante.
- **Control Hidráulico Eficiente:** El bajo porcentaje de humedad absorbida (1.22%) y vacíos totales dentro del rango ideal aseguran durabilidad y resistencia frente a deformaciones por infiltración.
- **Viabilidad Técnica y Ambiental:** El uso de material reciclado en combinación con emulsión asfáltica permite una solución económica, ambientalmente sustentable y técnicamente confiable para pavimentos de bajo y medio volumen de tránsito.

RECOMENDACIÓN TÉCNICA – MEZCLA EN FRÍO

Con base en el desempeño observado, se recomienda implementar esta mezcla en frío en obras de rehabilitación, mantenimiento y pavimentación de vías urbanas y rurales con bajo y medio volumen de tránsito, donde se priorice sostenibilidad, economía y rapidez constructiva.

Para garantizar su eficacia y durabilidad en campo, se sugiere:

- **Controlar estrictamente la dosificación de emulsión (6.5%)**, mediante mezclado homogéneo y tiempos de curado adecuados.
- **Aplicar compactación mecánica óptima** con equipos vibratorios o de presión continua, para alcanzar la densidad indicada sin provocar segregación.
- **Realizar seguimiento proconstrucción** para validar la retención de estabilidad bajo condiciones húmedas, especialmente en zonas de alta pluviosidad.
- **Establecer protocolos de control de calidad** en laboratorio y en obra, que incluyan pruebas de humedad, densidad y estabilidad conforme a normas MOP 2002 y ASTM D 1559.
- **Considerar ajustes en granulometría y aditivos**, según condiciones locales del RAP disponible y clima, para optimizar rendimiento estructural y ambiental.

Este tipo de mezcla representa una estrategia eficiente frente a los desafíos actuales de infraestructura vial, alineando desempeño técnico con criterios de sostenibilidad y reutilización de recursos.

CONCLUSIONES TECNICAS MEZCLAS EN FRIO CON RAP

La incorporación de RAP, polvo de llanta de avión y el aditivo de adherencia Gripper 67 en mezclas asfálticas en frío ha demostrado ser una alternativa viable desde el punto de vista mecánico, volumétrico y ambiental. Los resultados obtenidos en los ensayos Marshall revelan que la mezcla cumple con los criterios establecidos en la normativa MS-14, destacándose por su alta estabilidad en estado seco y húmedo, baja susceptibilidad al agua y una óptima relación de vacíos.

El uso de materiales reciclados, combinado con tecnologías de aditivos modernos, no solo favorece la sostenibilidad de los proyectos viales, sino que también mejora el comportamiento estructural de las capas asfálticas, haciendo posible su aplicación en vías de tráfico bajo a medio.

RECOMENDACIÓN TÉCNICA MEZCLAS EN FRIO CON RAP

Se recomienda considerar esta formulación de mezcla como una alternativa para intervenciones de rehabilitación y mantenimiento vial en zonas urbanas y rurales, especialmente donde se requiera un enfoque ambientalmente responsable y de bajo costo. Para futuras investigaciones, se sugiere:

- Realizar ensayos de durabilidad a largo plazo (fatiga y deformación permanente) para evaluar el comportamiento en condiciones reales.
- Evaluar el desempeño ante temperaturas extremas para ampliar su aplicación geográfica.
- Considerar la compatibilidad de este tipo de mezcla con diferentes tipos de carpeta de rodadura y tratamientos superficiales.

Los resultados evidencian que la mezcla propuesta no solo cumple con los parámetros técnicos establecidos, sino que ofrece ventajas adicionales relacionadas con:

- **Durabilidad mejorada:** El caucho de llanta de avión aporta elasticidad y resistencia al agrietamiento.
- **Adherencia superior:** Gripper 67 mejora la cohesión del ligante con los agregados, favoreciendo la compactación y la resistencia al deslizamiento.
- **Aprovechamiento de residuos:** El uso de RAP y caucho reciclado reduce el impacto ambiental y los costos de producción, como se puede observar en las **páginas sub siguientes.**
- **Viabilidad constructiva:** Por sus propiedades y desempeño, la mezcla es una opción viable para tramos de infraestructura vial con exigencias mecánicas moderadas.

ESTIMACIÓN DE COSTOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO

El costo estimado para producir un metro cúbico de mezcla asfáltica en frío varía dependiendo de la metodología de cálculo:

- **Estimación indirecta a partir de precios por metro cuadrado:**

El generador de precios **CYPE Ingenieros (Ecuador)** reporta un costo de **USD 10,23 por m²** para un pavimento de mezcla bituminosa en frío con **8 cm de espesor**

Convertido a volumen:

$$8 \text{ cm} = 0,08 \text{ m de espesor}$$

$$\text{Entonces, } 10,23 \text{ USD/m}^2 \div 0,08 \text{ m} = \text{USD } 128,00 \text{ por m}^3$$

➤ **Estimación directa desde análisis de precios unitarios:**

Un análisis técnico específico para Quito (proveído por IMPTEK – Chova del Ecuador) calcula el costo de materiales para mezcla asfáltica en frío a granel en **USD 85 por m³**, sin incluir IVA ni otros costos indirectos como transporte, equipos o mano de obra.

➤ **Consideraciones importantes**

Estos cálculos no incluyen transporte, mano de obra, equipos, medios auxiliares, costos indirectos ni IVA. El grado (%) de RAP usado, el tipo de emulsión, agregados y el uso de aditivos influyen tanto en desempeño como en costo.

➤ **Mezcla Asfáltica en Frío Convencional (sin RAP)**

Concepto	Costo estimado por m³ (USD)
Materiales (agregados + emulsión asfáltica)	85.00
Mano de obra (colocación + compactación)	15.00
Transporte (acarreo locales)	10.00
Equipos (mezcladora, rodillo, herramientas)	8.00
Subtotal sin IVA	118.00
IVA (12%)	14.16
Total con IVA	132.16 USD/m³

➤ **Mezcla Asfáltica en Frío con RAP (30–50%)**

Concepto	Costo estimado por m³ (USD)
Materiales (RAP + emulsión/aditivos)	55.00
Mano de obra (requiere igual o más por preparación del RAP)	17.00
Transporte (considera recolección y traslado de RAP)	12.00
Equipos (cribado, mezclado, compactación)	9.00
Subtotal sin IVA	93.00
IVA (12%)	11.16
Total con IVA	104.16 USD/m³

➤ **Comparación Final**

Tipo de Mezcla	Costo Total Aprox. (USD/m³ con IVA)
Mezcla en frío convencional	132.16
Mezcla en frío con RAP (30–50%)	104.16
Diferencia estimada	28.00 (~21 % ahorro)

Nota: Para esta estimación de precios no se considera valor alguno de Polvo de neumático de avión ya que el mismo fue proporcionado por parte de la empresa Quiport. Sin embargo, existe fuentes específicas con datos actualizados donde indican que el valor de polvo de caucho es de \$ 0.28 por kilo.

BIBLIOGRAFÍA.

- (INV), I. N. (2013). Determinación del contenido de ligante asfáltico en materiales reciclados. Instituto Nacional de Vías de Colombia.
- Aguilar, J. M., & Sánchez, L. (2009). Componentes y estructura de neumáticos para vehículos pesados. (1ª ed.). Editorial Ingeniería Automotriz.
- Carrera, J., & Sánchez, M. (2020). Aplicaciones y ventajas de las mezclas asfálticas en frío en mantenimiento vial. *Revista Técnica de Ingeniería Civil*, 22(3), 55–65.
- Cruz, F., & Navarro, M. (2018). Factores que afectan el desempeño de mezclas asfálticas en frío: una revisión. *Revista de Ingeniería Civil y Medio Ambiente*, 12(3), 59–72.
- Delgado, M. R., & Torres, S. (2021). Composición y propiedades de mezclas asfálticas en frío para pavimentos flexibles. *Revista Iberoamericana de Materiales*, 15(3), 77–88.
- Ecuador., M. d. (2013). Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2680:2013 – Caucho reciclado para mezclas asfálticas. Requisitos (Norma técnica). Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Espinoza Naranjo, D. G. (2023). Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/42573>
- Fernández, J., & López, R. (2020). Métodos de diseño de mezclas asfálticas: comparación internacional. *Revista de Ingeniería de Pavimentos*, 18(4), 112–125.
- Gaona, S., & Matabay, R. (2017). Impacto de las Compras Públicas en las Asociaciones de Producción Textil de la Economía Popular y Solidaria en la Ciudad de Quito, en el

Periodo 2014-2016. Quito: Universidad Central del Ecuador. Obtenido de

<http://www.dspace.uce.edu.ec:8080/bitstream/25000/10828/1/T-UCE-0005-100-2017.pdf>

- González, J., & Mora, L. (2017). Determinación del contenido óptimo de emulsión en mezclas asfálticas en frío. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Civil*, 11(1), 34–42.
- INV., I. N. (2013). Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino (norma INV E-213-13). Instituto Nacional de Vías.
- Jiménez, A., & Valverde, C. (2018). Componentes y proporciones en emulsiones asfálticas: asfalto, agua y agentes emulsionantes. Informe técnico. Universidad / Institución.
- López Montero, T., & Miró Recasens, J. R. (2017). El daño por humedad en las mezclas asfálticas. Plataforma Tecnológica Española de la Carretera.
- López, M., & Herrera, J. (2012). Propiedades físicas de los agregados para mezclas asfálticas. (1ª ed.). Editorial Técnica de Construcción.
- López, M., & Ramírez, J. (2019). Tecnología de emulsiones asfálticas en pavimentos viales. Editorial Vialtech.
- Mallick, R. B.-K. (2018). Diseño y rendimiento de mezclas asfálticas recicladas. CRC Press.
- Martínez, L., & Ruiz, M. (2010). Propiedades físicas y mecánicas de los agregados para pavimentos. (1ª ed.). Editorial Ingeniería y Construcción.

- Moya Sáenz, G. E. (2024). Pontificia Universidad Católica del Ecuador Repositorio Nacional. Obtenido de https://repositorio.puce.edu.ec/items/b5cc2db7-ba30-4aff-984c-0c184df13b13/full?utm_source=chatgpt.com
- Muñoz, A. P., & Castillo, R. (2019). Estudio comparativo entre mezclas asfálticas en frío y en caliente: aspectos técnicos y ambientales. . Revista Latinoamericana de Ingeniería Civil, 14(2), 102–115.
- Oliver, J. (2001). La influencia del ligante en RAP sobre las propiedades del asfalto reciclado. International Journal of Road Materials and Pavement Design, 311 – 325. Obtenido de International Journal of Road Materials and Pavement Design.
- Pablo Renán Mora Campos, M. M. (2013). propuesta económica, técnica y operativa para la creación de una empresa recicladora de llantas desechadas de vehículos para producir polvo de caucho y comercializarlo en la ciudad de quito: caso práctico aplicación en el asfalto. Obtenido de <https://1library.co/document/yr3j2ojy-propuesta-economica-operativa-recicladora-desechadas-vehiculos-comercializarlo-aplicacion.html>
- Pérez, A., & Zamora, F. (2011). Diseño y materiales para ruedas de equipos aeroportuarios . (1ª ed.). Editorial Ingeniería Aeroespacial.
- Pérez, R., & Blanco, J. (2015). Evolución histórica y tecnológica de las emulsiones asfálticas en la infraestructura vial. Revista de Ingeniería Civil y Transporte.
- Ramírez, L., & Paredes, F. (2017). Producción y propiedades de mezclas asfálticas en frío: eficiencia energética y desempeño. . Revista de Ingeniería y Medio Ambiente, 10(1), 23–34.

- Ríos, M. C., & Gómez, A. (2019). Influencia del contenido de agua en mezclas asfálticas en frío: ensayos y resultados. *Revista de Ingeniería y Materiales*, 16(2), 88–97.
- Roberts, F. L.-J. (1996). *Materiales de mezcla asfáltica en caliente, diseño de mezclas y construcción*. (1.^a ed.). Fundación Educativa de la Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos.
- Roberts, F. L.-J. (2009). *Materiales de mezcla asfáltica en caliente, diseño de mezclas y construcción*. (2^a ed.). Fundación Educativa de la Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos.
- Rout, J. K. (2023). Aplicación de material reciclado en pavimentos: hormigón compactado, permeable, autocompactante, bloques y morteros. . *Journal de Ingeniería de Materiales Reciclados*,, 45–62.
- Silva, H. M. (2015). Uso de ligantes rejuvenecedores en mezclas asfálticas recicladas: evaluación de las propiedades y del comportamiento mecánico. *Revista Ingeniería de Construcción*, 103–114.
- Silva, R. M., & Gómez, F. (2020). Clasificación y aplicaciones de emulsiones asfálticas según su rompimiento. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Civil*, 18(1), 35-48.
- Torres, R. G., & Sánchez, M. (2011). *Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de agregados para pavimentos*. (1^a ed.). Editorial Construcción y Materiales.
- Valdivieso, A., Siluk, C., & Michelin, C. (2022). Análisis Prospectivo Estratégico del Sector Textil Productivo Ecuatoriano para Incrementar la Competitividad en las Exportaciones. *SIGMA*, 13. doi:<https://doi.org/10.24133/sigma.v9i02.2827>

- Wilson Cando Tipán, J. J. (2024). Innovación en mezclas asfálticas en frío incorporando RAP y polvo de llanta de avión del aeropuerto de Quito. *European Public & Social Innovation Review*, 5.
- González, M., Herrera, P., & Castro, L. (2016). Tecnología de mezclas bituminosas en frío. Editorial Vial.
- Pérez, A., & Blanco, J. (2015). Historia del asfalto y sus aplicaciones modernas. *Revista de Ingeniería Civil*, 22(4), 45–52.
- Jiménez, F., & Valverde, S. (2018). Química y comportamiento de emulsiones asfálticas. Instituto Español del Asfalto.
- López, D., & Ramírez, H. (2019). Clasificación y uso de emulsiones en pavimentos *flexibles*. *Revista Caminos*, 35(2), 66–74.
- Silva, M., Torres, C., & Molina, R. (2020). Estudio técnico sobre emulsiones para conservación vial. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Muñoz, L., Herrera, P., & León, J. (2019). Mezclas asfálticas sostenibles: fundamentos y aplicaciones. *Revista Infraestructura Vial*, 34(2), 22–30.
- Carrera, D., & Sánchez, V. (2020). Tecnología del asfalto en frío para conservación vial. Editorial Caminos.
- Ramírez, E., & Paredes, M. (2017). Propiedades físicas de mezclas bituminosas con emulsión. *Revista Ingeniería Civil y Transporte*, 19(3), 87–94.
- Delgado, F., Torres, L., & Ávila, C. (2021). Diseño y comportamiento de mezclas frías en pavimentación rural. Universidad Técnica del Norte.
- Fernández, M., & López, R. (2020). Guía práctica para el diseño de mezclas bituminosas en climas tropicales. Universidad de Antioquia.

- Cruz, J., & Navarro, G. (2018). Evaluación del desempeño mecánico de mezclas asfálticas recicladas en frío. *Revista Obras y Materiales*, 27(1), 51–59.
- González, H., & Mora, D. (2017). Determinación del asfalto residual en mezclas frías: revisión de métodos. *Revista Ingeniería Vial*, 21(4), 45–52.
- Ríos, K., Martínez, C., & Zúñiga, A. (2019). Influencia del contenido de agua en mezclas asfálticas frías. *Revista Técnica de Ingeniería Civil*, 23(1), 61–69.

ANEXOS.

Ensayos a los Materiales

Granulometría Agregados Grueso y Fino



Ensayo de Abrasión

Ensayo Equivalente de Arena



Gravedad Específica del Agregado Grueso



Gravedad Específica del Agregado Fino



Ensayos a la Emulsion Asfáltica

Carga de Particula



Ensayo del Tamiz 20



Viscosidad Saybolt Furol



Residuo por Evaporación



Ensayo de estabilidad y Asentamiento de la Emulsion



Ensayo de Penetración



Ensayo de Ductilidad

