

# ¡ POSGRADOS !

## MAESTRÍA EN VIALIDAD Y TRANSPORTE

RPC-SO-05-No.087-2024

### OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON  
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN  
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

### TEMA:

EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL  
USO DE MATERIAL FRESADO RECICLADO  
EN EL RECAPEO ASFÁLTICO EN LA CALLE  
JUAN MONTALVO DESDE LA CALLE EMILIO  
ABAD HASTA LA CALLE CACHA, EN LA  
CIUDAD DE AZOGUES

### AUTORES:

JENNY MERCEDES ÁLVAREZ LEMA  
PATRICIO HOMERO ORTEGA VÁZQUEZ

### DIRECTOR:

DANIEL LEÓNIDAS CÁRDENAS JARAMILLO

CUENCA – ECUADOR

2026

## **Autores:**



### **Jenny Mercedes Álvarez Lema**

Ingeniera Civil.

Candidata a Magíster Vialidad y Transporte por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

jalvarezl8@est.ups.edu.ec



### **Patricio Homero Ortega Vázquez**

Ingeniero Civil.

Candidato a Magíster Vialidad y Transporte por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

portegav@est.ups.edu.ec

## **Dirigido por:**



### **Daniel Leónidas Cárdenas Jaramillo**

Ingeniero Civil.

Magister en Ingeniería y Vialidad y Transporte por parte de la Universidad de Cuenca, Ecuador.

dcardenasj@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

#### **DERECHOS RESERVADOS**

2026 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

JENNY MERCEDES ÁLVAREZ LEMA

HOMERO PATRICIO ORTEGA VÁZQUEZ

Evaluación técnica y económica del uso de material fresado reciclado en el recapeo asfáltico en la calle Juan Montalvo desde la calle Emilio Abad hasta la calle Cacha, en la ciudad de Azogues

## **DEDICATORIA**

A Dios, por siempre guiar mi vida, por darme la fuerza para no decaer en los momentos difíciles y la sabiduría para alcanzar esta meta profesional.

A mi amada esposa Anali, por ser mi pilar fundamental, por su paciencia infinita, su comprensión en mis largas horas de estudio y por siempre creer en mí, incluso cuando las fuerzas faltaban. Este logro también es tuyo.

A mi hija Amirah, mi mayor inspiración y el motor que impulsa mis días. Todo este esfuerzo es para demostrarte que, con perseverancia y fe, los sueños se construyen y se hacen realidad. Esto es para ti, mi pequeña.

Con amor,  
Homero Ortega

## **AGRADECIMIENTO**

Mi gratitud infinita a Dios, por permitirme terminar esta etapa de mi vida con salud y rodeado de amor.

A mi madre, padre y hermanas, por ser mi refugio seguro. Gracias por estar siempre conmigo, por inculcarme valores de trabajo y honestidad, y por ese apoyo incondicional que ha sido la base de mi desarrollo personal y profesional.

A la Universidad Politécnica Salesiana con sus docentes, por brindarme los conocimientos necesarios para aportar al desarrollo vial de mi ciudad. Un agradecimiento especial a mi director de tesis, Ing. Daniel Cárdenas, por su guía acertada y su exigencia académica que elevó el nivel de esta investigación.

Homero Ortega

## **DEDICATORIA**

A Dios, por ser mi guía constante, por iluminar mi camino aun en los momentos de incertidumbre y por brindarme la fortaleza necesaria para perseverar. A Él le debo cada oportunidad, cada aprendizaje y la bendición de culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres, cuyo amor incondicional y sacrificios silenciosos han sido el cimiento sobre el cual he construido mis sueños. Gracias por enseñarme con su ejemplo el valor de la disciplina, la responsabilidad y la humildad. Cada logro alcanzado es también reflejo de su entrega, de su apoyo infatigable y de su fe inquebrantable en mí.

A mis hermanos, quienes han sido mi compañía permanente, mi motivación y mi refugio. Gracias por las palabras de aliento, por la paciencia en los momentos de mayor exigencia y por estar siempre presentes, celebrando mis avances y dándome fuerza cuando más lo necesitaba. Su cariño y complicidad han sido fundamentales para llegar hasta aquí.

A cada uno de ustedes, les dedico este trabajo con profundo agradecimiento, porque este logro no es solo mío: es resultado del amor, la unión y el apoyo que me han acompañado a lo largo de todo este camino

Jenny Alvarez

## **AGRADECIMIENTO**

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia, cuyo amor, apoyo y confianza han sido fundamentales para alcanzar esta meta. Su acompañamiento constante, sus palabras de aliento y su fortaleza en los momentos difíciles me dieron la motivación necesaria para continuar y culminar este proceso académico.

A la Universidad Politécnica, agradezco por brindarme la formación profesional, las herramientas académicas y las experiencias que contribuyeron a mi crecimiento personal y técnico. A mis docentes, gracias por compartir sus conocimientos, orientar mi aprendizaje y guiarme con responsabilidad y dedicación.

A todos quienes hicieron posible este logro, mi profundo reconocimiento.

Jenny Alvarez

# TABLA DE CONTENIDO

Resumen .....	11
Abstract .....	12
1. Introducción .....	13
2. Determinación del Problema.....	16
2.1 Objetivos.....	17
2.1.1 Objetivo General.....	17
2.1.2 Objetivos Específicos .....	17
3. Marco teórico referencial.....	18
3.1 Generalidades de los pavimentos .....	18
3.1.1 Definición del pavimento .....	18
3.1.2 Tipos de pavimentos.....	19
3.2 Deterioro y rehabilitación de pavimentos.....	20
3.2.1 Tipos de deterioro en pavimentos flexibles .....	21
3.2.2 Función del recapeo en la rehabilitación vial.....	31
3.3 Material fresado reciclado (rap) en mezclas asfálticas .....	32
3.3.1 Propiedades físicas de las mezclas asfálticas con rap .....	33
3.3.2 Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con RAP .....	40
3.4 Diseño de mezclas asfálticas POR EL Método Marshall .....	42
4. Materiales y metodología.....	44
4.1 Diseño de Mezclas Asfálticas con material RAP .....	61
4.2 Diseño Experimental y Dosificación de Mezclas con RAP .....	78
4.2.1. Dosificación de Agregados y Ligante por Grupo .....	79
4.2.2. Elaboración y Ensayo de Especímenes (Briquetas) .....	79
5. Resultados y discusión.....	82
5.1 Discusión de Resultados Técnicos .....	82
5.2 Análisis Económico Comparativo .....	82
5.1.1. Comparación de Costos de Materiales.....	84
5.1.2. Ahorro en Ligante Asfáltico (El mayor impacto) .....	85
5.1.3. Matriz Comparativa de Costos de Producción (/m3) .....	85
6. Conclusiones y Recomendaciones.....	88
7. Referencias .....	93

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tabla de rangos granulométricos para pavimentos recuperados (RAP).....	36
<b>Tabla 2.</b> Resultados del Análisis Granulométrico del RAP. ....	50
<b>Tabla 3.</b> Resultados de Contenido de Finos del RAP.....	53
<b>Tabla 4.</b> Resultados de Gravedad Específica y Absorción (RAP - Fracción Gruesa). ....	56
<b>Tabla 5.</b> Parámetros del ensayo de abrasión Los Ángeles aplicados al material RAP. ..	58
<b>Tabla 6.</b> Gradación de la muestra de RAP utilizada en el ensayo de abrasión Los Ángeles. ....	58
<b>Tabla 7.</b> Resultados del ensayo de abrasión Los Ángeles del material RAP. ....	59
<b>Tabla 8.</b> Contenido de Asfalto Residual (Ensayo de Extracción) RAP. ....	61
<b>Tabla 9.</b> Resultados del Análisis Granulométrico (Material Agregado Triturado $\frac{3}{4}$ ). ....	62
<b>Tabla 10.</b> Resultados del Análisis Granulométrico (Material Agregado Triturado $\frac{3}{8}$ ). ....	63
<b>Tabla 11.</b> Resultados del Análisis Granulométrico (Material Polvo de Trituración). ....	64
<b>Tabla 12.</b> Resultados de Análisis Granulométrico (Material Arena). ....	66
<b>Tabla 13.</b> Ensayo de Abrasión (Material Agregado Triturado $\frac{3}{4}$ ) .....	67
<b>Tabla 14.</b> Ensayo de Abrasión (Material Agregado Triturado $\frac{3}{8}$ ). ....	67
<b>Tabla 15.</b> Ensayo de Contenidos finos y limpieza (Arena) .....	68
<b>Tabla 16.</b> Combinación Granulométrica de Agregados .....	69
<b>Tabla 17.</b> Gravedades específicas de los agregados de la mezcla de diseño.....	72
<b>Tabla 18.</b> Gravedades específicas de la mezcla de diseño.....	72
<b>Tabla 19.</b> Ensayo de Estabilidad y Flujo en la prensa Marshall de la mezcla de diseño. ....	74
<b>Tabla 20.</b> Dosificación definitiva de la fórmula de trabajo. ....	77
<b>Tabla 21.</b> Resumen de gravedades específicas de los componentes y de la mezcla.....	78
<b>Tabla 22.</b> Verificación de parámetros Marshall con las especificaciones de diseño. ....	78
<b>Tabla 23.</b> Dosificación de Materiales por Grupo Experimental .....	79
<b>Tabla 24.</b> Resultados de Ensayos Marshall .....	80
<b>Tabla 25.</b> Precios Unitarios de la Mezcla Asfáltica en Planta.....	82
<b>Tabla 26.</b> Análisis de Precios Unitarios Colocación Carpeta Asfáltica 3" .....	83
<b>Tabla 27.</b> Comparación real de costos de producción. ....	85

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructura tipo de un pavimento flexible.....	19
<b>Figura 2.</b> Estructura tipo de un Pavimento Rígido .....	20
<b>Figura 3.</b> Ahuellamiento .....	22
<b>Figura 4.</b> Hundimiento.....	23
<b>Figura 5.</b> Ondulaciones o corrugaciones de la superficie asfáltica .....	24
<b>Figura 6.</b> Hinchamiento .....	25
<b>Figura 7.</b> Fisuras Longitudinales .....	26
<b>Figura 8.</b> Fisura transversal .....	27
<b>Figura 9.</b> Fisura en bloque .....	28
<b>Figura 10.</b> Fisura tipo piel de cocodrilo .....	29
<b>Figura 11.</b> Fisuras por reflexión de juntas .....	30
<b>Figura 12.</b> Fisuras por desprendimientos.....	31
<b>Figura 13.</b> Equipo Marshall para determinar estabilidad y flujo.....	41
<b>Figura 14.</b> Ubicación de la calle Juan Montalvo .....	44
<b>Figura 15.</b> Estado actual de la vía .....	45
<b>Figura 16.</b> Estado actual de la vía (Tramo final) .....	46
<b>Figura 17.</b> Diseño de la estructura vial.....	46
<b>Figura 18.</b> Preparación muestra y cuarteo.....	48
<b>Figura 19.</b> Preparación de tamices.....	48
<b>Figura 20.</b> Conjunto de tamices colocado en el agitador mecánico .....	49
<b>Figura 21.</b> Curva Granulométrica RAP.....	51
<b>Figura 22.</b> Preparación muestra fina RAP .....	52
<b>Figura 23.</b> Lavado muestra fina RAP.....	52
<b>Figura 24.</b> Saturación de la muestra RAP .....	54
<b>Figura 25.</b> Condición Saturada Superficialmente Seca de la muestra RAP.....	55
<b>Figura 26.</b> Pesaje Sumergido de la muestra RAP .....	55
<b>Figura 27.</b> Preparación muestra RAP.....	57
<b>Figura 28.</b> Preparación del Centrifugado para muestra RAP .....	60
<b>Figura 29.</b> Curva Granulométrica Agregado Triturado 3/4. ....	63
<b>Figura 30.</b> Curva Granulométrica Agregado Triturado 3/8. ....	64
<b>Figura 31.</b> Curva Granulométrica Polvo de Trituración.....	65
<b>Figura 32.</b> Curva Granulométrica Arena.....	66
<b>Figura 33.</b> Curva Granulométrica formula .....	70
<b>Figura 34.</b> Homogeneización de la mezcla asfáltica con incorporación de RAP .....	71
<b>Figura 35.</b> Compactación de especímenes mediante el Martillo Marshall.....	71
<b>Figura 36.</b> Prensa Marshall .....	73
<b>Figura 37.</b> Relación de Porcentaje de Vacíos de Asfalto respecto al porcentaje de Asfalto.....	75
<b>Figura 38.</b> Vacíos en el Agregado Mineral (VMA) en función del contenido de asfalto.....	75
<b>Figura 39.</b> Relación de Vacíos Llenos de Asfalto (VFA) respecto al porcentaje de ligante. ....	76
<b>Figura 40.</b> Relación entre la Densidad Bulk (Gmb) y el contenido de asfalto.....	76
<b>Figura 41.</b> Variación de la Estabilidad Marshall en función del porcentaje de asfalto..	76
<b>Figura 42.</b> Comportamiento del Flujo Marshall respecto al contenido de asfalto.....	77

EVALUACIÓN TÉCNICA Y  
ECONÓMICA DEL USO DE  
MATERIAL FRESADO RECICLADO  
EN EL RECAPEO ASFÁLTICO EN  
LA CALLE JUAN MONTALVO  
DESDE LA CALLE EMILIO ABAD  
HASTA LA CALLE CACHA, EN LA  
CIUDAD DE AZOGUES

AUTOR(ES):

PATRICIO HOMERO ORTEGA VÁZQUEZ

JENNY MERCEDES ALVAREZ LEMA

## RESUMEN

---

La presente investigación evalúa tanto la factibilidad técnica como la financiera del uso de material fresado reciclado (RAP, del inglés Reclaimed Asphalt Pavement) en el recapeo asfáltico en la calle Juan Montalvo desde la calle Emilio Abad hasta la calle Cacha, en la ciudad de Azogues. El objetivo principal fue determinar el porcentaje óptimo para la sustitución de material de cantera por RAP obteniendo un equilibrio óptimo entre costo y desempeño técnico del pavimento. La metodología empleó un diseño basado en el método Marshall, comparando una mezcla de control (0% RAP) frente a tres escenarios con sustitución del 10%, 20% y 30% de material fresado. Se caracterizó el RAP, determinando un 5.0% de contenido de asfalto residual. Los ensayos de laboratorio probaron que el incremento de RAP aumenta la estabilidad de la mezcla, pero reduce su flujo. Los resultados técnicos determinaron que la mezcla con 20% de RAP es la opción más eficiente, alcanzando una estabilidad de 2,915 lbs y un porcentaje de vacíos del 4.3%, cumpliendo con las especificaciones requeridas para cargas vehiculares altas; mientras que la mezcla con 30% fue descartada por tener un contenido de vacíos que excedía el rango permitido. En lo económico, mediante los Análisis de Precios Unitarios, se demostró que la incorporación del 20% de RAP reduce el costo de elaboración de la mezcla asfáltica de \$99.24 USD/m<sup>3</sup> a \$86.32 USD/m<sup>3</sup>, generando un ahorro del 13.02% (equivalente a \$12.92 USD/m<sup>3</sup>). Por lo que se concluye que el reciclaje de pavimento es una alternativa sostenible que mejora la Estabilidad Marshall y optimiza los recursos públicos sin comprometer la vida útil de la vía.

Palabras clave: Pavimento flexible, Material fresado (RAP), Mezcla asfáltica, Método Marshall, Análisis de precios unitarios, Análisis económico.

## ABSTRACT

This research evaluates both the technical and financial feasibility of using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for asphalt resurfacing on Juan Montalvo Street, from Emilio Abad Street to Cacha Street, in the city of Azogues. The main objective was to determine the optimal substitution rate of virgin aggregate with RAP to achieve an ideal balance between cost and technical pavement performance. The methodology employed a Marshall mix design, comparing a control mix (0% RAP) against three scenarios with 10%, 20%, and 30% RAP substitution. Characterization of the RAP revealed a residual asphalt content of 5.0%. Laboratory tests demonstrated that increasing RAP content enhances mix stability but reduces flow. Technical results identified the 20% RAP mixture as the most efficient option, achieving a stability of 2,915 lbs and 4.3% air voids, thus meeting specifications for heavy traffic; conversely, the 30% mixture was discarded because its air void content exceeded allowable limits. Economically, a Unit Price Analysis demonstrated that incorporating 20% RAP reduces asphalt mix production costs from \$99.24 USD/m<sup>3</sup> to \$86.32 USD/m<sup>3</sup>, generating savings of 13.02% (equivalent to \$12.92 USD/m<sup>3</sup>). Consequently, it is concluded that pavement recycling is a sustainable alternative that improves Marshall Stability and optimizes public resources without compromising the road's service life.

Keywords: Flexible pavement, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Asphalt mixture, Marshall method, Unit price analysis, Economic analysis.

# 1. INTRODUCCIÓN

---

En Ecuador, los procesos de rehabilitación vial estatal y urbana han priorizado históricamente metodologías convencionales basadas en reconstrucciones totalmente granulares o recapeos con mezclas asfálticas en caliente (HMA) producidas en planta, utilizando áridos de cantera y ligante asfáltico nuevo, seguido del desalojo del RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) proveniente de la capa de rodadura deteriorada. Estas prácticas han permitido restituir la transitabilidad, pero no han considerado el análisis del aporte estructural del material recuperado in situ, lo que ha generado dependencia de materias primas no renovables, mayores plazos operativos y costos elevados por consumo energético, producción en planta y transporte de materiales nuevos hacia los sitios de intervención.

En cuanto a costos, la rehabilitación convencional implica un alto consumo de energía térmica y combustibles durante la fase de producción en planta proceso normado bajo estándares de diseño y especificación como el manual MS-2 del Asphalt Institute, el cual reporta que la producción HMA demanda altos requerimientos energéticos y mantiene dependencia predominante de derivados de petróleo y áridos nuevos. Así mismo, estudios han confirmado que el desalojo y no reutilización del RAP incrementa los costos de transporte de agregados ígneos desde nuevas canteras, el consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas, factores críticos en regiones montañosas húmedas (Huang et al., 2005; Johnson & Brown, 2019).

La conservación vial de pavimentos flexibles urbanos comprende múltiples métodos: recapeo con mezcla en caliente (HMA), tratamientos superficiales bituminosos (TSB) para prolongar la vida útil, reconstrucción totalmente granular, estabilización de bases ígneas con cemento tipo Base Vial y reciclaje in situ de la estructura envejecida mediante procesos en frío. Los tratamientos bituminosos como TSB han sido ampliamente evaluados como alternativas complementarias para mitigar el deterioro superficial, aunque su éxito depende de la capacidad de soporte real de la base granular y del correcto diseño del paquete estructural (González Herrera, 2013).

En Colombia, el diseño, incorporación y comportamiento a la fatiga del RAP estabilizado a partir del RAP fue evaluado mediante ensayos Marshall bajo lineamientos normativos secundarios del INVIAS 461-13 del Instituto Nacional de Vías, en donde, Herver (2014) demostró que 10 cm de base reciclada estabilizada con curado mínimo de 14 días alcanzó resistencias adecuadas a la fatiga y coeficientes Marshall comparables al triturado virgen clásico, pudiendo sustituir espesores granulares convencionales de hasta el doble sin requerir refuerzo estructural adicional al segundo año, verificado mediante análisis de deflexión. El estudio también evidenció reducción de transporte, menor consumo de combustibles y mitigación de emisiones contaminantes inducidas por producción de áridos nuevos.

Campoverde y Uyaguari (2021), en una investigación desarrollada en la zona Guangarcucho – Jadán, provincia del Azuay realizaron un análisis comparativo entre la rehabilitación vial empleando RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) como insumo dentro de bases estabilizadas y nuevas mezclas asfálticas, frente a la rehabilitación convencional ejecutada por la empresa ASFALTAR EP. La investigación determinó que la estabilización con un 5% de cemento de bases, alcanzó la resistencia requerida de 25 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, permitió descartar la combinación con emulsión por presentar vacíos excesivos (12–15%) y rigidez elevada, y evidenció que el aprovechamiento del RAP in situ redujo la necesidad de extracción de agregados nuevos, mitigó los costos de transporte y generó un ahorro significativo superior a 56 mil USD, demostrando viabilidad técnica superior en fatiga y eficiencia económica respecto a la intervención tradicional.

No obstante, la adopción de estas tecnologías sigue siendo limitada y no normada. Aunque se han registrado experiencias preliminares e investigaciones académicas en el contexto nacional, destacando estudios puntuales en ciudades como Cuenca (Campoverde & Uyaguari, 2021); estas iniciativas no han sido sistematizadas ni escaladas a nivel nacional, principalmente por la ausencia de normativa técnica específica, la escasa inversión en laboratorios de caracterización de mezclas recicladas, y la resistencia institucional a cambiar modelos tradicionales de mantenimiento vial.

En este contexto, este estudio plantea analizar la alternativa de la reutilización de RAP, en el cantón Azogues, situado en la región andina del país, donde el deterioro del

sistema vial urbano se ha acelerado como resultado de su topografía accidentada, el clima húmedo, la ausencia de un sistema de drenaje eficiente y el crecimiento progresivo de vehículos de carga pesada. Este escenario se agrava por las limitaciones presupuestarias, que dificultan la ejecución de planes de rehabilitación integral.

Además, evaluar técnica y económicamente la utilización de RAP en diferentes proporciones, en combinación con material de cantera en porcentajes de 100%, 90%, 80% y 70% en mezclas asfálticas aplicadas en el recapeo de la calle Juan Montalvo, en el tramo ubicado entre la calle Emilio Abad y Cacha, en la ciudad de Azogues; y de esta manera, establecer un punto de partida para futuras iniciativas que promuevan la utilización de materiales reciclados en la infraestructura vial de la ciudad de Azogues, optimizando recursos y reduciendo el impacto ambiental.

## 2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

En el cantón Azogues, el tramo de la calle Juan Montalvo, comprendido entre las calles Emilio Abad y Cacha, presenta deterioro estructural prematuro asociado a: deficiencias en el diseño del paquete de pavimento, inconsistencias en los procesos constructivos, uso de materiales con desempeño subóptimo y estimaciones de demanda de tránsito y carga vehicular que no representan las condiciones operativas reales de la vía. Estas fallas han derivado en pérdida de capacidad estructural, disminución del confort de rodadura y mayor necesidad de refuerzos superficiales para sostener la transitabilidad.

Las intervenciones en este corredor se han limitado a recapeos convencionales con mezcla asfáltica en caliente elaborada con agregados y ligante nuevos, sin evaluar el aporte de la base existente ni el potencial real de reutilización del RAP. Esta práctica mantiene dependencia de recursos vírgenes, incrementa costos logísticos de producción y transporte, y no garantiza mejoras en la capacidad portante, al no sustentarse en un diagnóstico estructural de soporte.

En este contexto, la reutilización de pavimento asfáltico recuperado —Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)— representa una alternativa técnica y económica con potencial para mejorar la estructura de la vía y reducir costos de conservación. Sin embargo, la ausencia de lineamientos normativos nacionales aplicados al RAP en la vialidad urbana ecuatoriana limita su adopción, manteniendo predominio de soluciones convencionales con menor enfoque en sostenibilidad y eficiencia presupuestaria.

Por lo tanto, se establece como problema de investigación la falta de evaluación técnica del RAP como componente estructuralmente funcional dentro del recapeo asfáltico urbano, aplicado al corredor Emilio Abad – Calle Cacha de la calle Juan Montalvo, cuya condición actual compromete la eficiencia operativa de la movilidad local y el uso óptimo de los recursos de rehabilitación vial.

## 2.1 OBJETIVOS

### 2.1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnica y económicamente el uso de RAP en diferentes proporciones en combinación con material de cantera en porcentajes de 100%, 90%, 80% y 70%, en mezclas asfálticas aplicadas en el recapeo de la calle Juan Montalvo, desde la calle Emilio Abad hasta la calle Cacha, obteniendo un equilibrio óptimo entre costo y desempeño técnico del pavimento, utilizando la metodología Marshall.

### 2.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar mezclas asfálticas que incorporen diferentes combinaciones de RAP y material de cantera (100%, 90%, 80% y 70%), y analizar sus propiedades mecánicas mediante pruebas de laboratorio, siguiendo el diseño de mezclas asfálticas con el método Marshall.
2. Comparar el rendimiento técnico y económico de la rehabilitación asfáltica con y sin uso de RAP, evaluando variables como costos de producción, transporte, aplicación, y desempeño estructural del pavimento en la ciudad de Azogues.
3. Establecer criterios de optimización para la combinación de RAP y material de cantera en mezclas asfálticas, determinando las proporciones más eficientes en términos de costo y desempeño técnico para su aplicación en entornos urbanos con condiciones similares.

## 3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

---

Este capítulo tiene como objetivo establecer conceptos, definiciones y procedimiento necesario sobre el uso de RAP en mezclas asfálticas para su aplicación en el recapeo vial urbano. La incorporación de RAP en proyectos de rehabilitación vial representa una estrategia que responde a las nuevas exigencias técnicas, ambientales y económicas que enfrenta la infraestructura vial en América Latina, especialmente en territorios con limitaciones presupuestarias, altos niveles de deterioro vial y ausencia de normativa específica.

La fundamentación teórica abordará las bases de la ingeniería vial moderna, el comportamiento estructural de los pavimentos flexibles, los principios del reciclaje asfáltico, las propiedades del material RAP, así como las metodologías de diseño y evaluación más reconocidas, como el método Marshall.

### 3.1 GENERALIDADES DE LOS PAVIMENTOS

#### 3.1.1 DEFINICIÓN DEL PAVIMENTO

Se define al pavimento como una estructura compuesta por una o múltiples capas, cuya función es resistir cargas estáticas y dinámicas aplicadas en su superficie. A lo largo de su vida útil, debe garantizar la adecuada transmisión de estas solicitaciones hacia la subrasante, a través de los materiales que conforman sus capas, evitando que se sobrepasen los esfuerzos admisibles (V. Tom, 2019).

En este contexto, la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 1993), establece que la definición de pavimento puede abordarse desde dos enfoques: el ingenieril y el del usuario. Desde la perspectiva de la ingeniería, el pavimento constituye una estructura apoyada en su totalidad sobre la subrasante, la cual se debe preparar para sostener un número de capas con distintos espesores, el cual se denomina paquete estructural y está diseñado para soportar las cargas durante un periodo. En contraste, desde la perspectiva de un usuario, el pavimento se concibe como

un plano destinado a brindar seguridad y comodidad en el tránsito, garantizando así un nivel de servicio de calidad adecuada.

### 3.1.2 TIPOS DE PAVIMENTOS

#### Pavimentos Flexibles

Según Alvarado (2019), este tipo de pavimento es una estructura formada con diversas capas que permiten distribuir las cargas inducidas por el tráfico vehicular hacia la subrasante, evitando deformaciones. Estructuralmente, estas capas se organizan de acuerdo a su capacidad de carga y se clasifican en:

- **Carpeta asfáltica:** representa la superficie de circulación y la parte visible del pavimento, donde se concentran las principales deformaciones ocasionadas por las cargas vehiculares.
- **Base:** se localiza inmediatamente bajo el nivel de rodadura y tiene la función de absorber en su mayor parte los esfuerzos transmitidos por el flujo vehicular. En vías con volúmenes de tráfico bajos o medios, se suelen emplear bases de tipo granular; en cambio, en carreteras sometidas a altos niveles de carga vehicular, es común utilizar bases estabilizadas mediante agentes cementantes.
- **Subbase:** se encuentra entre la subrasante y la base, tiene la función de aportar soporte uniforme y permanente.
- **Subrasante:** corresponde al terreno de fundación, el cual debe estar compuesto por suelos compactables hasta alcanzar al menos un 95 % de compactación. Su función es proporcionar estabilidad a las capas superiores y disipar los esfuerzos transmitidos.

**Figura 1.** Estructura tipo de un pavimento flexible.

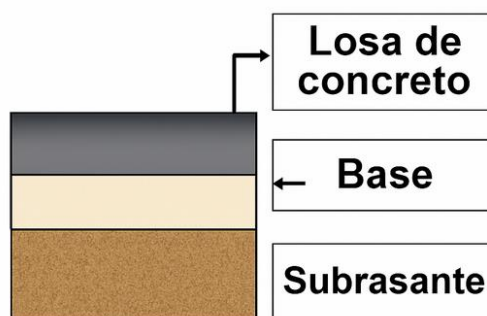


*Nota.* La ilustración detalla la configuración estratigráfica del sistema flexible. Obtenido de: Guía de pavimentos 2020.

## Pavimento Rígido

Torres (2007) señala que los pavimentos rígidos, también denominados hidráulicos, están compuestos por una combinación homogénea de cemento hidráulico, agua, agregados finos y gruesos, la cual normalmente se coloca en una sola capa. Su conformación estructural puede incorporar una base y/o subbase, conformando así una losa de concreto cuyas dimensiones geométricas y espesor se ajustan de acuerdo a las condiciones de diseño y las exigencias del tránsito. Este pavimento presenta una gran resistencia a la flexión, aunque su comportamiento estructural se ve influenciado de manera significativa por los cambios de temperatura.

**Figura 2.** Estructura tipo de un Pavimento Rígido



*Nota:* Esquema de los estratos que integran el sistema de pavimento rígido. Obtenido de: Guía de pavimentos 2020.

### 3.2 DETERIORO Y REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS

Miller y Sagba (2024) indican que el deterioro de las vías urbanas con pavimento asfáltico obedece a la acumulación progresiva de daños durante su operación, producto de la acción conjunta del tráfico vehicular, el clima, los materiales empleados y la calidad constructiva, lo que se traduce en una respuesta estructural en términos de esfuerzos. Entre las características principales de este pavimento destacan el diseño de la mezcla bituminosa, las propiedades geomecánicas de los materiales de las capas granulares, la flexibilidad estructural y la necesidad de un mantenimiento continuo.

El pavimento como elemento fundamental de la infraestructura vial, está expuesto de manera constante a diversas condiciones de carga y factores ambientales que provocan

su progresivo deterioro, el cual se manifiesta en forma de grietas, baches, deformaciones y pérdida de la capa superficial del pavimento (Rojas, 2024).

Esta situación, afecta directamente la comodidad, la seguridad vial y la operatividad funcional de la red de transporte. Frente a ello, la ingeniería vial ha desarrollado técnicas de mantenimiento y rehabilitación que permiten restaurar parcial o totalmente la funcionalidad del pavimento, optimizando su ciclo de vida. Para seleccionar la estrategia de intervención está sujeta a la severidad del daño, del tipo de estructura existente y de parámetros técnicos y económicos que orienten una gestión racional de los activos viales.

### 3.2.1 TIPOS DE DETERIORO EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

A continuación, se detalla las deformaciones persistentes o también denominado daño persistente en pavimentos flexibles:

#### ➤ **Ahuellamiento**

El ahuellamiento se define como un hundimiento longitudinal que se desarrolla siguiendo la trayectoria de las ruedas de los vehículos. Se identifica este fenómeno cuando la extensión dañada sobrepasa los 6 metros. Este fenómeno se produce debido a la acumulación de deformaciones permanentes en capa del paquete estructural o en el suelo de fundación, como resultado de las repeticiones de carga. Si el área de impacto es reducida, el daño suele reflejarse en la capa de rodadura y suelen ir acompañadas de desplazamientos laterales y desprendimientos de la superficie del pavimento. En contraste, cuando el radio de influencia es mayor, las deformaciones se generan en las capas inferiores o en la fundación del pavimento (MOPC, 2016).

#### **Posibles Causas:**

Tal como se muestra la Figura 3, el ahuellamiento puede originarse por diferentes causas, entre los que se enfatizan:

- Baja estabilidad de las mezclas asfálticas debido a deficiencias en la compactación o a una dosificación inadecuada.

- Insuficiente capacidad estructural en las capas del pavimento o de la subrasante, ya sea por infiltración de agua o por la baja calidad de los materiales.
- Espesores de pavimento inadecuados para soportar las cargas previstas.
- Aumento excesivo de las cargas vehiculares.

**Figura 3. Ahuellamiento**



*Nota:* La figura representa el deterioro en pavimentos flexibles denominado ahuellamiento. Obtenido de: Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito (2014).

#### ➤ **Hundimiento**

El MOPC (2016) define el hundimiento como la presencia de una depresión en el pavimento, localizada en un tramo específico de la vía. Esta falla puede manifestarse tanto en los bordes como en el interior de la calzada. En numerosas ocasiones, las depresiones resultan poco visibles y únicamente se evidencian después de precipitaciones, cuando se observa estancamiento de agua o manchas de humedad. En otros casos, se presentan deformaciones notorias que pueden ser ondulaciones extensas o depresiones severas y puntuales.

#### **Posibles causas:**

El hundimiento puede originarse por distintos factores, entre los cuales destacan:

- Consolidación o asentamiento o de capas compresibles en la fundación (ondulaciones extensas).
- Deficiencias en las prácticas constructivas.

Pérdida de capacidad portante derivada del incremento de humedad en los estratos del pavimento o en el suelo de soporte, tal como se ilustra en la Figura 4.

**Figura 4. Hundimiento**



Nota: La figura representa las fallas denominadas hundimiento en pavimentos flexibles. Obtenido de: <https://asefma.es/wp-content/uploads/2019/05/31.-patologias-5.pdf>

#### ➤ **Corrugación**

El MOPC (2016) describe la ondulación como una irregularidad en el pavimento que se manifiesta mediante la formación de crestas y valles consecutivos, dispuestos de manera transversal a la dirección del flujo vehicular. La distancia entre estas deformaciones suele ser inferior a 3 metros, oscilando comúnmente entre 60 y 90 cm, tal como se ilustra en la Figura 5.

#### **Posibles causas:**

La formación de ondulaciones en la calzada se vincula mayormente con las cargas de los vehículos, combinada con ciertas condiciones, tales como:

- Capas superficiales (asfalto o base) con estabilidad baja y deformabilidad elevada, aunque bien adheridas a la capa inferior de soporte. Esta condición suele presentarse en tramos de frenado, aceleración o pendientes pronunciadas, donde las cargas horizontales ejercidas por los vehículos crean esfuerzos elevados.
- Incremento de las temperaturas de servicio.
- Deficiencias en el proceso constructivo, tales como exceso de ligante, contaminación de las mezclas asfálticas o falta.
- Presencia excesiva de agua en las capas granulares o en la subrasante.

**Figura 5.** Ondulaciones o corrugaciones de la superficie asfáltica



*Nota.* Corrugaciones en pavimentos flexibles. Obtenido de: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación. <https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identifici%C3%B3n-fallas.pdf>

➤ **Hinchamiento**

El MOPC (2016) define el hinchamiento como el alzamiento de la superficie de la carpeta asfáltica, el cual puede manifestarse de manera accidentada y pronunciada en un área pequeña, o bien presentarse como una onda progresiva de más de 3 metros de extensión que altera la vía. En los dos escenarios, este tipo de deformación puede estar acompañado por la aparición de grietas como se observa en la Figura 6.

**Posibles causas:**

En el contexto climático del país, donde no existe el fenómeno de congelación, el inicio de estas fallas se asocia únicamente a procesos de expansión, derivados de:

- Variaciones volumétricas en fundaciones arcillosas con alto potencial expansivo.
- Tratamiento inadecuado de suelos arcillosos expansivos durante las etapas de ejecución y compactación de los taludes o subrasante.
- Contaminación de la materia prima que integran los estratos del pavimento o de la subrasante con materia orgánica.

**Figura 6. Hinchamiento**



*Nota.* Deterioro de tipo hinchamiento severidad alta. Obtenido de: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación, por Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2016.

<https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identificaci%C3%B3n-fallas.pdf>

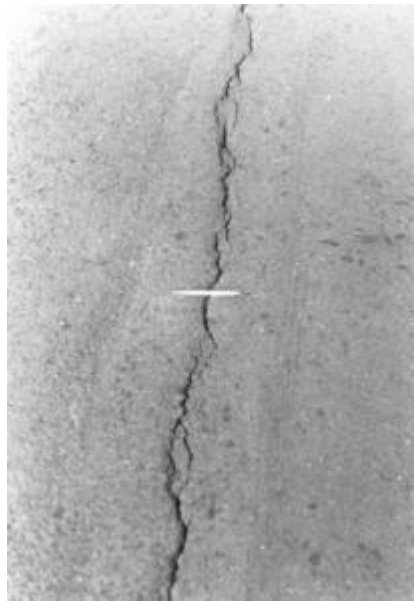
➤ **Fisura Longitudinal**

De acuerdo con Niola (2015), las fisuras longitudinales son aquellas que se desarrollan de forma paralela al eje del pavimento asfáltico, mientras que las fisuras transversales se generan aproximadamente en ángulos rectos respecto a la dirección de construcción de la vía como se observa en la Figura 7.

**Posibles causas:**

- Falta de adherencia del ligante asfáltico en los laterales de la junta.
- Compactación deficiente en la zona de la junta.
- Empalme de materiales con diferentes rigideces.

**Figura 7. Fisuras Longitudinales**



*Nota.* Fisura longitudinal severidad media. Obtenido de: <https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identifici%C3%B3n-fallas.pdf>

➤ **Fisura Transversal**

Las fisuras perpendiculares corresponden a interrupciones que se desarrollan en la carpeta asfáltica perpendicular al eje del flujo vehicular. Estas fisuras constituyen un indicio de la presencia de esfuerzos de tensión en alguna de las capas de la estructura del pavimento, los cuales superan la resistencia del material afectado (MOP, 2002) .

La ubicación de las grietas en el carril puede ofrecer información relevante sobre su origen. Cuando se presentan en zonas de carga, suelen estar asociadas a problemas de fatiga estructural, mientras que en áreas cercanas a los bordes pueden deberse a deficiencias en la contención lateral (Asphalt Institute, 2007)

Entre las principales causas que se detalla en la Figura 8, generan fisuras transversales se pueden citar:

- Dimensionamiento inadecuado del espesor de la estructura frente a las cargas de tránsito.
- Contaminación o falta de ancho en estratos inferiores, o deficiente contención lateral.
- Retracción térmica de la mezcla asfáltica causada por la pérdida de ductilidad, ya sea por exceso de finos, oxidación del ligante asfáltico o gradientes térmicos frecuentes.

- Agrietamiento reflejado a causa de movimientos en las capas inferiores, especialmente en bases estabilizadas con cemento o losas de hormigón.
- Defectos en la ejecución de juntas de construcción.
- Contracción de terraplenes o movimientos diferenciales en la subrasante (Asphalt Institute, 2007).

**Figura 8.** Fisura transversal



*Nota.* Fisura transversal de severidad media-alta en el pavimento. Obtenido de: <https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identifici%C3%B3n-fallas.pdf>

#### ➤ **Fisura en bloques**

La fisuración en bloque se caracteriza por la fragmentación de la superficie de rodadura en secciones cuadrangulares o rectangulares, con dimensiones superiores a 0.30 m por lado. Este tipo de deterioro se diferencia de la fisuración tipo piel de cocodrilo, ya que se desarrolla en áreas con cargas constantes, mientras que la fisuración en bloque aparece generalmente en zonas no cargadas. No obstante, es frecuente que estas evolucionen hacia piel de cocodrilo debido a la acción repetida del tránsito. Además, la piel de cocodrilo presenta bloques más irregulares, con mayor número de lados y ángulos agudos como se puede observar en la Figura 9. (Álvarez, 2024).

#### **Posibles causas:**

- La contracción de la carpeta asfáltica por variaciones térmicas diarias.
- El endurecimiento del asfalto a causa de la oxidación de la mezcla o del uso de un mal ligante para el clima de la zona.
- La reflexión de fisuras provenientes de las estabilizaciones utilizadas en la base.

- Interacción entre la variación volumétrica de la fracción fina de los agregados y el empleo de asfaltos de baja penetración.

**Figura 9.** Fisura en bloque



*Nota.* Fisura de bloque severidad media-alta en pavimentos flexibles. Obtenido de: <https://ipcproyectos.co/2024/07/08/patologias-pavimentos-flexibles/>

#### ➤ **Fisura Tipo Piel de Cocodrilo**

La fisuración por fatiga, también denominada piel de cocodrilo, se caracteriza por una serie de fisuras conectadas que forman polígonos irregulares semejantes a la piel de un cocodrilo. Este daño se genera principalmente por el agotamiento del pavimento, debido a la repetición de cargas vehiculares que exceden la capacidad estructural de la carpeta asfáltica y su estructura.

Los orígenes más frecuentes de este tipo de fisuración incluyen:

- Espesor estructural insuficiente frente a las cargas vehiculares.
- Deformaciones en la subrasante, que inducen esfuerzos adicionales en la estructura.
- Endurecimiento de la mezcla asfáltica en franjas de carga por oxidación del ligante.
- Dificultades de drenaje, que reducen la capacidad portante de las capas granulares.
- Compactación incorrecta de capas granulares o carpeta asfáltica.
- Deficiencias en la producción de la mezcla asfáltica, tales como exceso de ligante, uso de asfaltos de alta penetración (que aumentan la deformabilidad) o contenido insuficiente de asfalto.
- Intervenciones de mantenimiento deficientes, juntas defectuosas o soluciones que no corrigen el deterioro estructural de fondo.

Las fisuras suelen iniciarse en la base de la carpeta asfáltica y propagarse hacia la parte superior. Este tipo de deterioro se considera una falla estructural severa, la cual generalmente se acompaña de ahuellamientos cuando la base o la subbase presentan debilidades como se evidencia en la Figura 10 (Álvarez, 2024).

**Figura 10.** Fisura tipo piel de cocodrilo



*Nota.* Fisura de tipo piel de cocodrilo en pavimentos flexibles. Obtenido de: <https://ipcproyectos.co/2024/07/08/patologias-pavimentos-flexibles/>

#### ➤ Fisura por Reflexión de Juntas

Tal como se puede observar en la Figura 11, se identifica la presencia de fisuras por reflexión de juntas, un tipo de deterioro que se presenta en pavimentos conformados por una superficie asfáltica puesta sobre losas de hormigón. Este deterioro ocurre cuando las juntas del pavimento rígido subyacente se proyectan hacia la capa asfáltica, generando fisuras que reproducen la geometría de las juntas originales (MOPC, 2016).

#### Posibles Causas:

- Períodos de apertura y cierre de juntas, producto de cambios térmicos y en el contenido de humedad de las losas.
- Aunque las cargas del tránsito no son la causa primaria, sí activan el proceso de acuerdo a los mayores movimientos que se generan en las juntas bajo cargas pesadas.
- Grosor insuficiente de la carpeta asfáltica o ausencia de refuerzos y retardadores de transmisión de fisuras, como aditivos en la mezcla, geotextiles o refuerzos especiales.

**Figura 11.** Fisuras por reflexión de juntas



*Nota.* Fisuras por reflexión de juntas severidad baja. Obtenido de: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación, por MOPC, 2016.

➤ **Desintegración por Desprendimiento de Agregados**

En la Figura 12 se evidencia el deterioro progresivo de la capa de rodadura, conocido como desintegración superficial o ravelling, se produce como resultado de la disgregación y desprendimiento del material fino que conforma la mezcla. Este deterioro se manifiesta con una textura rugosa y abierta, dando la apariencia de que la superficie se desintegra en pequeños trozos. Se presenta con mayor frecuencia en tratamientos superficiales asfálticos y mezclas en frío, pudiendo cubrir grandes extensiones de la calzada o concentrarse en las huellas de rodadura (MOPC, 2016).

**Posibles Causas**

- Endurecimiento excesivo del bitumen debido al sobrecalentamiento en la producción de la mezcla.
- Deficiente dosificación de ligante asfáltico o una mal gradación de los materiales pétreos.
- Pérdida de adherencia entre el ligante y los agregados por la presencia de agua, especialmente con áridos de naturaleza hidrófila, contaminados o húmedos.
- Oxidación del ligante tras largos periodos de servicio, sobre todo en mezclas con un contenido de vacíos alto y expuestas a climas severos.
- Fractura en los agregados por compactación inadecuada, tránsito vehicular o causas naturales.

- Altas solicitaciones tangenciales en zonas de curvas, rampas o maniobras, combinadas con los factores anteriores.

**Figura 12.** Fisuras por desprendimientos



*Nota.* Fisura por desprendimientos severidad baja. Obtenido de: Identificación de fallas en pavimentos y técnicas de reparación, por MOPC, 2016.

### 3.2.2 FUNCIÓN DEL RECAPEO EN LA REHABILITACIÓN VIAL.

La técnica del recapeo, también conocida como *asphalt overlay*, representa una estrategia fundamental dentro de los esquemas de conservación y rehabilitación de pavimentos. Este procedimiento se basa en la aplicación de una o más capas de mezcla asfáltica sobre una estructura vial existente con cierto nivel de deterioro, previa preparación de su superficie. El objetivo principal es restaurar las condiciones de servicio, extender la vida útil del pavimento y mejorar o recuperar su capacidad estructural, sin necesidad de ejecutar una reconstrucción completa (The Asphalt Institute, 1998).

El recapeo puede ser estructural o no estructural, dependiendo de la función que desempeñe dentro del sistema de pavimento.

#### 1. Recapeo no estructural:

Se aplica con espesores reducidos (por lo general inferiores a 5 cm), y tiene como finalidad mejorar las condiciones superficiales de rodadura, como la textura, la resistencia al deslizamiento y la impermeabilidad.

## 2. Recapeo estructural

Se diseña con un enfoque más profundo, pues su espesor y características mecánicas están pensadas para aportar resistencia adicional ante las cargas vehiculares, absorbiendo esfuerzos y distribuyéndolos hacia la estructura del pavimento

El recapeo debe partir de una evaluación exhaustiva del estado de pavimento existente, con la finalidad de identificar fallas, mecanismos de deterioro predominantes, condición de adherencia entre capas, etc. Para estas evaluaciones existen diferentes herramientas, entre las cuales se tiene: Ensayos de deflexión con *Falling Weight Deflectometer* (FWD), estudios de perfil longitudinal, levantamiento visual con clasificación de fallas según el Índice de Condición del Pavimento (PCI), y análisis de la funcionalidad mediante medición de la macro y micro textura (Forero, 2021).

Es importante mencionar que debe existir una adecuada preparación de superficie, para garantizar la adherencia y el buen comportamiento del asfalto. La preparación incluye: fresado de las zonas deformadas, eliminación de baches, la limpieza mecánica o manual del polvo suelto, y la aplicación de un riego de adherencia que facilite la unión entre la capa existente y la nueva mezcla asfáltica (Cuelho, Mokwa, & Akin, 2006). Además, la no adhesión entre capas puede conllevar a fenómenos de delaminación, deslizamiento, fisuración prematura o desintegración localizada.

El recapeo es una alternativa económica y operativa viable, en especial en vías urbanas en donde se requiere una intervención rápida y con la menor afectación a la movilidad.

Esta alternativa se inserta en un modelo de gestión del pavimento por desempeño, donde se prioriza la intervención antes de que las fallas alcancen niveles críticos, reduciendo costos a largo plazo y maximizando la rentabilidad de la inversión pública.

### 3.3 MATERIAL FRESADO RECICLADO (RAP) EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

El RAP se obtiene mediante el proceso de fresado de capas asfálticas existentes. En el caso analizado, este material residual es trasladado a un sitio de acopio temporal hasta que sea requerido para su incorporación en nuevas estructuras de pavimento o en

labores de rehabilitación. El RAP se caracteriza por su heterogeneidad, reflejada en variaciones tanto en el contenido de asfalto como en la granulometría. De manera general, presenta un bajo contenido de finos, lo cual condiciona sus propiedades mecánicas y su desempeño en mezclas recicladas (Buitrago & González, 2016).

Aunque el RAP es un material reciclado, se deben seguir ciertas recomendaciones para su uso. Entre las más importantes se encuentra evitar la incorporación de RAP proveniente de pavimentos que presenten deformaciones plásticas (ahuellamiento), dado que estas afectan negativamente las propiedades mecánicas del material y su función en nuevas estructuras de pavimento.

El material de RAP añadido a las mezclas asfálticas se convierte en una opción técnica, económica y ambientalmente eficiente hacia una recuperación de pavimentos flexibles. Ya que se obtiene un material compuesto por agregados y una fracción de ligante bituminoso envejecido, lo cual permite reducir significativamente el consumo de materiales de cantera y los precios de elaboración de nuevas mezclas asfálticas. Además, permite priorizar la intervención de fallas antes de que las mismas alcancen niveles críticos; esto reduce costos a largo plazo y maximiza la rentabilidad de la inversión pública.

### 3.3.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS CON RAP

Se analizarán las propiedades físicas del RAP, ya que conocer las características del material reciclado es fundamental en el diseño de nuevas mezclas asfálticas. Es necesario realizar ensayos que determinen su densidad, granulometría, contenido de humedad, absorción, así como el asfalto residual. Cuando el porcentaje de asfalto residual en el RAP es menor al 3%, este puede considerarse simplemente como un material en la nueva mezcla. En cambio, si el porcentaje de asfalto excede el 3%, este valor debe ser tomado en cuenta y restado del porcentaje óptimo de ligante de la mezcla nueva, a fin de evitar un exceso de asfalto que comprometa el desempeño del pavimento (Rivero, 2018).

➤ **Contenido de asfalto presente en el RAP**

Rivero (2018) señala que, aunque el RAP es un material reciclado y, por ende, ha sufrido cierto deterioro, conserva una proporción significativa de asfalto original. Por esta razón, es fundamental obtener el contenido de asfalto residual del RAP, este se considerará en el diseño de la mezcla cuando su porcentaje supere el 3%. Para ajustar la cantidad de ligante en el diseño, se debe quitar al porcentaje óptimo el valor correspondiente al presente en el RAP, ponderado según el porcentaje de RAP que aumentara en la mezcla. Este procedimiento se formaliza mediante la ecuación 1 (Rivero, 2018).

$$Pb(\text{Virgen}) = Pb(\text{Óptimo}) - PRAP \times Pb(\text{RAP}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- $Pb(\text{Virgen})$ : % de asfalto nuevo en la mezcla.
- $Pb(\text{Óptimo})$ : % de asfalto óptimo para la mezcla.
- $PRAP$ : % de RAP a utilizar.
- $Pb(\text{RAP})$ : % de asfalto contenido en el RAP.

Para establecer el porcentaje de ligante asfáltico residual en el RAP, es posible utilizar diversas normas técnicas. Entre ellas se encuentran la ASTM D2172, que establece los métodos de prueba estándar para la extracción cuantitativa de betún de mezclas bituminosas de pavimento, y la norma colombiana INVI 732, que regula la extracción de asfalto y la evaluación de las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP (Rivero, 2018). En el presente estudio, se aplicó la norma ASTM D2172 para calcular el contenido de asfalto residual en el RAP, por lo que es fundamental para optimizar el diseño de la mezcla asfáltica.

➤ **Granulometría (INEN 696/ ASTM C 136)**

La granulometría de un agregado permite identificar la gradación del material, lo que resulta fundamental para evaluar su influencia en la fracción del material analizado y en su permeabilidad. En el caso de los agregados que contienen RAP, este procedimiento consiste en separar el material según los tamaños de abertura de los tamices,

obteniendo cantidades proporcionales de cada fracción, lo que permite caracterizar adecuadamente la granulometría del material reciclado (Lara, 2018).

Asimismo, es necesario estudiar la curva granulométrica, que representa gráficamente la estructura del material y permite analizar parámetros fundamentales de clasificación, tales como el diámetro efectivo, el coeficiente de uniformidad y la curvatura, los cuales son esenciales para evaluar el comportamiento mecánico y la adecuación del suelo o agregado, en este caso del RAP, para su uso en nuevas mezclas asfálticas (Lara, 2018).

El análisis granulométrico se realiza mediante el método de tamizado, en el cual se pone una cantidad determinada de material seco sobre una sucesión de tamices con tamaños de aberturas decrecientes. Tras el proceso de tamizado, se obtiene el peso de material retenido en cada tamiz para calcular el porcentaje acumulado, lo que posibilita el análisis granulométrico del árido. Este procedimiento es fundamental en la presente investigación, ya que permite determinar la cantidad de agregado necesario para la elaboración de briquetas de ensayo, asegurando la representatividad y uniformidad del material utilizado (Espinoza & Guayaquil, 2023).

El análisis granulométrico permite obtener la cantidad de material para la fabricación de las briquetas. Se presenta la Tabla 1. de granulometría para pavimentos recuperados (RAP), establecida según la norma vigente MOP 001-F-2002, sección 405, la cual especifica los rangos granulométricos recomendados para este tipo de material.

**Tabla 1.** Tabla de rangos granulométricos para pavimentos recuperados (RAP)

Número	Tamiz	Porcentaje en peso que pasa							
	Abert. mm	¾"	½"	3/8"	N°4				
1"	50.8	100							
¾"	19	90	100	100					
½"	12.7	-	90	100	100				
3/8"	9.5	56	80		90	100			100
N°4	4.75	35	65	44	74	55	85	80	100
N°8	2.36	23	49	28	58	32	67	65	100
N°16	1.18	-						40	80
N°30	0.6	-						25	65
N°50	0.3	5	19	5	21	7	23	7	40
N°100	0.15	-						3	20
N°200	0.075	2	8	2	10	2	10	2	10

Nota. Esta tabla de franjas granulométricas para pavimentos recuperados (RAP).

Obtenido de: Sección 405.5, Norma MOP001-F-2002.

Espinoza & Guayaquil (2023) establecen las siguientes ecuaciones para determinar la curva granulométrica:

- Porcentaje retenido:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{Peso retenido parcial}}{Wt} * 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

$Wt$  Representa el sumatorio total del peso de la muestra, g

- Porcentaje retenido acumulado

Este porcentaje se obtiene después de la acumulación de cada uno de los porcentajes retenidos por cada uno de los tamices

$$\% \text{ retenido acumulado} = \sum \% \text{ retenidos} \quad \text{Ecuación 2}$$

- Porcentaje pasante

$$\% \text{ pasante} = 100 - \% \text{retenido acumulado} \quad \text{Ecuación 3}$$

Conforme a lo establecido en el numeral 405-5.04 de la Norma MOP001-F-2002, correspondiente a Ensayos y Tolerancias, los agregados destinados a la capa de rodadura deberán presentar una granulometría con tamaño nominal máximo de 1/2", lo cual implica que el 100 % del material debe pasar el tamiz de 3/4". Este criterio se encuentra alineado con los rangos granulométricos definidos en la Tabla VII-5 del Manual MS-19, donde se establecen los límites admisibles para este tipo de mezcla asfáltica.

➤ **Densidad**

En las mezclas asfálticas, la densidad se establece como masa por volumen de la mezcla. Esta propiedad puede determinarse siguiendo los procedimientos de ensayo establecidos en la ASTM D2041, que describe el método estándar para medir la densidad teórica máxima de mezclas de pavimentación bituminosa (Peñaranda & Sánchez, 2021).

Según el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2012) el procedimiento consiste en utilizar probetas Marshall compactadas, las cuales se colocan dentro de bolsas plásticas. Mediante el uso de una cámara de vacío, se elimina completamente el aire presente, asegurando el sellado de la bolsa. Posteriormente, la probeta se hunde en agua para determinar su densidad a partir de la correlación entre masa y volumen.

Peñaranda & Sánchez (2021) establecen las siguientes ecuaciones para calcular la densidad:

$$\text{Gravedad específica bulk} = \frac{A}{[C + (B - A)] - E - \frac{(B - A)}{FT}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

A: Masa de la muestra seca al aire, g;

B: Masa de la muestra seca sellada, g;

C: Masa final de la muestra luego de removerla de la bolsa, g;

E: Masa de la muestra sellada sumergida en agua, g;

FT: Gravedad específica aparente del material plástico de la bolsa a  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  ( $77 \pm 1.8^\circ\text{F}$ ), suministrada por el fabricante.

$$\text{Densidad} = (\text{Gravedad específica bulk}) * (\gamma) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $\gamma$ : Densidad del agua a  $25^\circ\text{C}$  ( $77^\circ\text{F}$ ) ( $997.0 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.997 \text{ g/cm}^3$  o  $62.4 \text{ lb/pe}^3$ ).

➤ **Gravedad específica máxima teórica (Gmm)**

La gravedad específica máxima teórica (Gmm) se define como la relación entre la masa de un volumen dado de mezcla asfáltica y la masa de un volumen igual de agua destilada, ambos medidos a la misma temperatura, considerando que la mezcla no contiene vacíos de aire. Esta propiedad es fundamental para caracterizar la densidad máxima alcanzable de la mezcla y constituye un parámetro clave en el diseño y control de mezclas asfálticas, particularmente para la determinación del contenido de vacíos y la densidad relativa (Peñaranda & Sánchez, 2021).

Según el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2012), el procedimiento para determinar la gravedad específica consiste en tomar una muestra de la mezcla asfáltica (RAP) suelta, previamente seca al horno y pesada. Luego se introduce a un recipiente al que se le añade agua destilada, de la cual han sido eliminados los vacíos con equipos especializados. Posteriormente, se añade la cantidad de agua necesaria hasta alcanzar el nivel indicado, se registran los pesos correspondientes para obtener la gravedad específica de la mezcla.

Se consigue la gravedad específica con la siguiente ecuación:

$$\text{Gravedad específica} = \frac{B}{A+B-C-\frac{A}{Vc}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

B: Masa seca en el aire, g;

A: Masa combinada, g;

C: Masa mezcla y de las bolsas sumergidas, g;

Vc: Gravedad específica aparente combinada en dos bolsas plásticas a  $25^\circ\text{C}$ .

➤ **Contenido de vacíos con aire**

Peñaranda & Sánchez (2021) señalan que los vacíos de aire en una mezcla asfáltica representan las áreas existentes entre los áridos cubiertos de asfalto en su estado compactado. Estos vacíos son esenciales, ya que permiten que el ligante envuelva adecuadamente en la compactación adicional inducida por el tránsito vehicular. Para determinar esta propiedad, se aplican los pasos establecidos en la norma ASTM D3203, que especifica el cálculo del porcentaje de vacíos de aire en mezclas abiertas y densas. Previo al cálculo del contenido de vacíos con aire, es necesario determinar la gravedad específica bulk de la mezcla compactada y la gravedad específica máxima, valores que luego se emplean en la ecuación correspondiente para obtener el porcentaje de vacíos (Peñaranda & Sánchez, 2021).

$$V_A = \left[ 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$G_{mm}$ : Gravedad específica máxima.

$V_A$ : % de vacíos con aire de la mezcla asfáltica.

$G_{mb}$ : Gravedad específica de la mezcla compactada

➤ **Resistencia a la Fragmentación**

Una propiedad fundamental de los agregados empleados en mezclas asfálticas con (RAP) es la resistencia a la fragmentación, también conocida como resistencia al desgaste por abrasión e impacto. Esta propiedad se relaciona directo con la durabilidad y capacidad estructural de la mezcla, ya que los agregados que se fragmentan fácilmente bajo cargas dinámicas pueden comprometer la integridad del pavimento. La resistencia a la fragmentación se evalúa comúnmente mediante el ensayo de la máquina de Los Ángeles, tal como lo establece la norma ASTM C131/C131M-20, evalúa la pérdida de masa de los agregados cuando son sometidos a impactos y abrasión bajo condiciones controladas de laboratorio (ASTM, 2020).

Este ensayo es crítico en mezclas que incorporan RAP, dado que los agregados recuperados pueden haber sufrido degradación durante su vida útil previa, lo que puede afectar su desempeño si no se seleccionan adecuadamente.

El Manual de Diseño de Mezclas del Asphalt Institute (MS-2) destaca que los agregados reciclados deben ser evaluados rigurosamente en cuanto a su resistencia mecánica, incluyendo su capacidad para resistir el desgaste por cargas repetidas, a fin de garantizar un buen comportamiento a largo plazo del pavimento (Asphalt Institute, 2007).

Adicionalmente, la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) indica que, si bien el uso de RAP en mezclas asfálticas aporta beneficios económicos y ambientales, su desempeño está fuertemente condicionado por las características físicas y mecánicas de los componentes reciclados, especialmente su resistencia al desgaste y la fragmentación (FHWA, 2016).

### 3.3.2 Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con RAP

#### ➤ Estabilidad y flujo

La estabilidad corresponde a la capacidad para deformarse y desplazarse, ocasionado por las cargas vehiculares, mientras que el flujo se relaciona con la deformación plástica máxima registrada en el instante en que el espécimen alcanza su resistencia máxima. Estas características se determinan siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D1559 *Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*, la cual establece la metodología para evaluar la resistencia al flujo plástico en mezclas bituminosas mediante el empleo del equipo Marshall (INVIAS, 2012).

La obtención de los valores de estabilidad y flujo se realiza de manera simultánea sobre briquetas tipo Marshall, previamente dispuestas en un baño de agua. Una vez cumplida esta etapa, las probetas son sometidas a cargas aplicadas a través de la prensa Marshall bajo condiciones estandarizadas, tal como se observa en la Figura 13 (INVIAS, 2012).

**Figura 13.** Equipo Marshall para determinar estabilidad y flujo



Nota. En la figura se encuentra el equipo Marshall para establecer la estabilidad y flujo. Obtenido de: <https://www.cuevadelcivil.com/2015/04/ensayo-marshall.html>

El ensayo Marshall debe ejecutarse en las 24 horas después de la compactación de las briquetas. Para su acondicionamiento, estas pueden colocarse en agua de 30 a 40 minutos, con una temperatura controlada de  $(60 \pm 1) ^\circ\text{C}$ . De manera paralela, se requiere limpiar cuidadosamente las guías y las superficies internas de las mordazas de ensayo antes de montar las probetas, lubricando las barras para garantizar el libre desplazamiento de la mordaza superior. Durante el procedimiento, la temperatura de las mordazas debe mantenerse en un rango de 20 a 40  $^\circ\text{C}$ . En caso de emplearse baño de agua, este debe retirarse totalmente de las mordazas antes de iniciar el ensayo (INVIAS, 2012).

Una vez que la probeta es retirada del baño o del horno, se quita la humedad en exceso y se centra en la mordaza inferior de la prensa. Posteriormente, se ubica la mordaza superior junto con el dial de deformación, verificando que el sistema quede correctamente alineado. Antes de aplicar la carga, el medidor de flujo se ajusta a cero y su vástago se mantiene en contacto constante con la mordaza superior, asegurando la precisión durante la ejecución del ensayo (INVIAS, 2012).

Finalmente, la carga se aplica a una velocidad de deformación de  $(50 \pm 5 \text{ mm/min})$ , hasta alcanzar la falla, definida como el punto en que la carga máxima comienza a disminuir. Todo el procedimiento, desde la extracción de la probeta hasta su falla, no debe exceder los 30 segundos (INVIAS, 2012).

### 3.4 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EL MÉTODO MARSHALL

El método Marshall constituye un procedimiento para caracterizar las propiedades mecánicas y volumétricas de las mezclas asfálticas a través de la compactación de briquetas cilíndricas, denominadas briquetas, que posteriormente son sometidas a ensayos en condiciones controladas. De acuerdo con Rosero (2025), el proceso inicia con la preparación de la mezcla a temperaturas comprendidas generalmente entre  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $160 \text{ }^\circ\text{C}$ , seguida del moldeo de un conjunto de briquetas con diferentes porcentajes de ligante. Para ello, se emplea el compactador Marshall, que aplica 75 impactos en cada cara de la muestra con el fin de simular la compactación de campo. Las briquetas se elaboran con un peso uniforme de aproximadamente (1200 g) y se compacta a la temperatura representativa de la ejecución en obra.

Una vez moldeadas, se dejan enfriar a temperatura ambiente y luego se realizan ensayos como la determinación de la densidad aparente, el flujo y la estabilidad. La estabilidad Marshall evalúa la máxima resistencia que la muestra puede soportar una carga de compresión antes de deformarse, esta aplicada a una velocidad constante de  $50.8 \text{ mm/min}$  a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , mientras que el flujo mide la deformación plástica desarrollada durante la prueba.

Los resultados obtenidos de porcentaje de vacíos, densidad, estabilidad, relación asfalto-vacíos y flujo, son claves para obtener el contenido de ligante óptimo, analizar la facilidad de trabajo de la mezcla y anticipar su conducta en condiciones de servicio. Entre los criterios de aceptación más comunes se incluye un rango de vacíos entre 3 % y 5 %, estabilidad mínima de 1800 lb y valores de flujo entre 2 y 4 mm. La información derivada del ensayo resulta esencial para el diseño de pavimentos, ya que posibilita optimizar la composición de la mezcla asfáltica y garantizar su durabilidad, resistencia a

la deformación y adecuado desempeño estructural frente a las cargas y variaciones de temperatura (Rosero, 2025).



Nota. Ubicación calle Juan Montalvo, en el contexto urbano. La imagen destaca el tramo específico de la vía seleccionada para el estudio del recapeo con RAP (Fuente: Adaptado de Google Maps, 2024).

Coordenadas	Este	Norte
Inicio	739595	9696383
Final	739430	9696337

El proceso inició con una inspección detallada del estado superficial del pavimento, durante la cual se identificaron y clasificaron las principales patologías viales, tales como fisuras longitudinales y transversales, baches, desprendimientos de material y deformaciones plásticas, conforme se ilustra en la Figura 15 para el tramo inicial y en la Figura 16 para el tramo final de la vía. La caracterización del daño se realizó de manera sistemática, lo que permitió establecer la magnitud y severidad del deterioro en cada sección evaluada.

**Figura 15.** Estado actual de la vía



Nota. Estado actual de la calle Juan Montalvo tramo inicial (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 16. Estado actual de la vía (Tramo final)**



Nota. Estado actual de la calle Juan Montalvo tramo final (Fuente: Propia, 2025).

De acuerdo con la información proporcionada por el Municipio de Azogues, los estudios disponibles incluyen el estudio de tránsito, considerando tanto la intensidad promedio diaria (IPD) como la composición vehicular; el estudio de la subrasante; el factor de confiabilidad; y la serviciabilidad, con especial énfasis en la proporción de cargas vehiculares pesadas del transporte público y vehículos livianos, factores que inciden directamente en el nivel de desgaste de la estructura vial. El diseño de la estructura vial propuesto se presenta en la Figura 17.

**Figura 17. Diseño de la estructura vial.**

DATOS INICIALES			
Número de Ejes Equivalentes	113000	Índice de Servicio Inicial (Po)	4.2
Confiabilidad	85 %	Índice de Servicio Final (Pt)	2.2
Desviación estándar normal ( $Z_R$ )	-1.04	$\Delta$ PSI	2
So Factor de corrección - predicción del tránsito y comportamiento de la estructura	0.45	Número de Capas	3

MÉTODO AASHTO 93								
CAPA	Descripción	Módulo Elástico psi	ai	mi	SN necesario	Di in	Di* in	SN*
1	Capa Asfáltica	400000	0.420	1	1.345	3.20	2.50	1.05
2	Base granular	28500	0.130	0.9	0.671	5.74	8.00	0.936
3	Mejoramiento	15800	0.076	0.8	0.710	11.67	12.00	0.7296
4	Subrasante	4873						
						2.696		2.716

**NOMENCLATURA**

ai	Coefficiente estructural de la capa i	Di*	Espesor de capa i-ésima corregido
mi	Coefficiente de drenaje de la capa i	SN*	Número estructural corregido
Di	Espesor de la capa i		

Nota. Estudios de factibilidad y diseños definitivos de pavimentación y obras complementarias para la construcción de aceras y soterramiento de cables para las vías

urbanas de la ciudad de Azogues (Calle Juan Montalvo) (Fuente: Municipio de Azogues, 2025).

- **Recolección y caracterización del RAP:**

Se recogieron muestras de fresado provenientes de pavimentos previamente rehabilitados, las cuales fueron transportadas al laboratorio para su procesamiento y análisis. Durante este procedimiento, se tomaron en cuenta las características físicas y químicas del material, incluyendo granulometría, resistencia a la fragmentación, contenido de asfalto residual, contenido de finos y densidad de partículas.

El RAP fue analizado y clasificado en base a las especificaciones técnicas de reciclaje determinadas por la normativa local vigente, así como tomando en consideración criterios y procedimientos de referencia provenientes de estudios internacionales. Estos análisis permitieron determinar la idoneidad del RAP para su reincorporación en nuevas mezclas asfálticas y rehabilitaciones de pavimento.

#### ***Análisis Granulométrico***

En esta etapa se desarrolló una de las actividades fundamentales del proyecto: el análisis granulométrico del agregado fino, agregado grueso y del material RAP, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM C136.

El muestreo y la preparación del material se realizaron mediante cuarteo, tal como se muestra en la Figura 18, y la muestra obtenida fue secada en horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C hasta alcanzar masa constante, con el fin de eliminar la humedad que pudiera afectar los resultados del ensayo.

**Figura 18.** Preparación muestra y cuarteo



Nota. Preparación y muestreo RAP (Fuente: Propia, 2025).

**Selección de Tamices:** Mediante tamices de malla cuadrada estandarizados, colocados de mayor a menor respecto a la abertura, incluyendo los tamaños de control indicados en la Figura 19: 1 pulg. (25.0 mm),  $\frac{3}{4}$  pulg. (19.0 mm),  $\frac{1}{2}$  pulg,  $\frac{3}{8}$  pulg, No. 4, No. 8, hasta No. 200 y fondo.

**Figura 19.** Preparación de tamices



Nota. Selección de tamices para análisis granulométrico (Fuente: Propia, 2025).

Tamizado Mecánico: La muestra seca, con un peso inicial registrado (P1), se puso en el tamiz superior. Conforme se ilustra en la Figura 20, los tamices se sometieron a vibración mediante una tamizadora mecánica, durante un tiempo suficiente para garantizar que las partículas tuvieran la oportunidad de pasar por las aberturas correspondientes.

**Figura 20.** Conjunto de tamices colocado en el agitador mecánico



Nota. Tamizado para análisis granulométrico (Fuente: Propia, 2025).

Pesaje: Se determinó la masa retenida del material en cada tamiz con una exactitud de 0.1 gramos.

Cálculos: Se calcularon los porcentajes parciales retenidos, acumulados y el porcentaje que pasa en los tamices, determinando así la curva granulométrica.

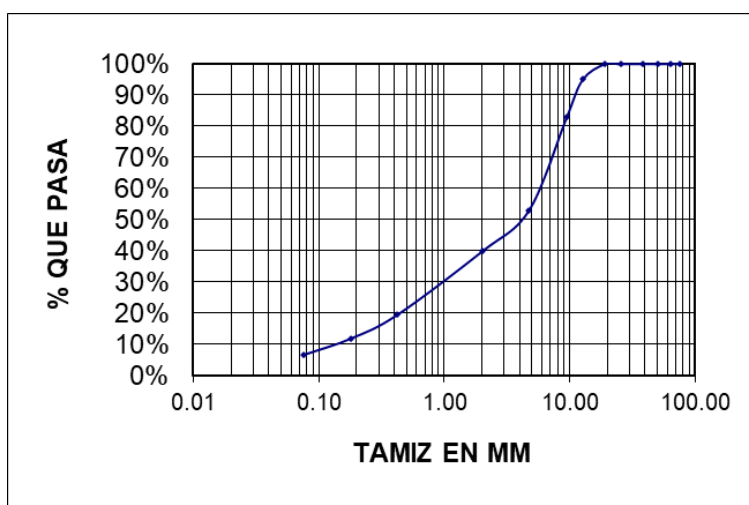
Los resultados del análisis se presentan en la **Tabla 2**, mientras que la representación gráfica de la distribución granulométrica del RAP se muestra en la **Figura 21**.

**Tabla 2.** Resultados del Análisis Granulométrico del RAP.

Tamiz (mm)	Tamiz (U.S.)	Peso Ret Parcial (g)	Peso Ret Acum. (g)	% Ret.	% PASA	Espec. MOP (Rango)	Estado	
76.2	3 "	0	0	0.00%	100.00%	-	-	
38.1	1 1/2 "	0	0	0.00%	100.00%	-	-	
25.4	1 "	0	0	0.00%	100.00%	-	-	
19.05	3/4 "	0	0	0.00%	100.00%	100	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	
12.7	1/2 "	250	250	5.00%	95.00%	90 - 100	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	
9.525	3/8 "	600	850	17.00%	83.00%			
4.75	No. 4	1500	2350	47.00%	53.00%	44 - 74	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	
<b>Fracción Fina</b>	<b>(Pasa No.4)</b>	<b>2,650 g</b>						
<b>TOTAL MUESTRA</b>		<b>5000</b>						
2	No. 10	115	115	13.25%*	39.75%			
0.425	No. 40	210	325	20.24%*	19.51%	5 - 21	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	
0.18	No. 80	80	405	7.71%*	11.80%			
0.075	No. 200	55	460	5.30%*	6.50%	02 - 10	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	
<b>Fondo</b>		<b>90</b>						

Nota. Resultados del Análisis Granulométrico material de RAP, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 21.** Curva Granulométrica RAP.



Nota. Curva Granulométrica material de RAP, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

Estos resultados confirman que la granulometría del RAP se ajusta a las especificaciones para mezclas asfálticas densas, situándose el tamaño crítico de las partículas entre 19 mm y 25 mm. Esto favorece la estructura mineral de la nueva mezcla, permitiendo espesores de capa de rodadura adecuados para vías urbanas.

### **Contenido de finos**

El ensayo se realizó conforme a la norma ASTM D1140, con el objetivo de determinar con precisión el contenido de partículas finas (limos y arcillas) presentes en el material RAP. A diferencia del tamizado en seco, este método utiliza agua para disolver los grumos y asegurar que todas las partículas menores a 75 $\mu$ m pasen a través de la malla.

Preparación de la Muestra: Como se muestra en la Figura 22, se seleccionó una muestra representativa del material que pasa el tamiz No. 4, secada previamente en horno a 110  $\pm$  5° C hasta obtener una masa constante.

**Figura 22.** Preparación muestra fina RAP



Nota. Preparación de material fino RAP para obtención de Contenido de finos (Fuente: Propia, 2025).

**Pesaje Inicial (P1):** Se registró la masa seca de la muestra antes del lavado. Para asegurar la precisión, se utilizó una balanza con sensibilidad de 0.1 g.

**Lavado:** La muestra se colocó en un recipiente y se cubrió con agua. Se agitó vigorosamente para separar las partículas finas adheridas a los agregados más gruesos, como se puede observar en la Figura 23.

El agua turbia (con los finos en suspensión) se vertió cuidadosamente sobre el tamiz No. 200 (0.075 mm), evitando el derrame de partículas gruesas.

**Figura 23.** Lavado muestra fina RAP



Nota. Lavado del RAP para obtención de contenido de finos (Fuente: Propia, 2025).

Repetición: Este proceso de adición de agua, agitación y decantación se repitió hasta que el agua de lavado salió totalmente clara, indicando que todos los finos habían sido eliminados.

Secado Final (P2): El material retenido en el tamiz No. 200 se devolvió al recipiente, se secó en el horno a  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  hasta masa constante y se pesó.

Cálculo: La diferencia entre el peso inicial y el peso final corresponde a la cantidad de finos que pasan el tamiz No. 200.

Los resultados obtenidos del ensayo de contenido de finos se resumen en la Tabla 3, evidenciando que el material cumple con los rangos establecidos en la normativa aplicable.

**Tabla 3.** Resultados de Contenido de Finos del RAP.

Parámetro	Variable	Valor	Unidad
Muestra Analizada	-	RAP (Fracción Fina)	-
(A) Peso de la Muestra Seca antes del Lavado	P1	550	g
(B) Peso de la Muestra Seca después del Lavado	P2	514.3	g
(C) Peso de Finos Eliminados por Lavado [A - B]	W finos	35.7	g
Porcentaje de Finos (Pasa Tamiz No. 200)	C/A * 100	6.5	%
Especificación	-	6.0 - 12.0	%
Cumplimiento	-	CUMPLE	-

Nota. Resultados Contenido de finos RAP (Fuente: Propia, 2025).

### Densidad de Bulk (Peso Unitario) en Agregados Suelos y Compactos

El ensayo se realizó siguiendo la norma ASTM C127, aplicable para la fracción del RAP retenida en el tamiz No. 4 (4.75 mm). Este procedimiento es fundamental para calcular el volumen que ocupará el material en la mezcla asfáltica y para corregir las dosificaciones por volumen.

Preparación de la Muestra: Se lavó el material RAP suavemente para eliminar el polvo superficial o partículas extrañas, procurando no desprender la película de asfalto adherida. Posteriormente, se secó en horno a  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  hasta masa constante.

**Saturación:** La muestra seca se sumergió en agua a temperatura ambiente ( $23 \pm 2^\circ \text{C}$ ) durante un periodo de  $24 \pm 4$  horas, como se evidencia en la Figura 24. Este paso es crítico para llenar los poros accesibles del agregado con agua.

**Figura 24.** Saturación de la muestra RAP



Nota. Saturación material RAP para obtención Densidad Bulk (Fuente: Propia, 2025).

**Condición Saturada Superficialmente Seca (SSS):** Tal como se ilustra en la Figura 25, la muestra fue retirada del agua y se secó superficialmente haciéndola rodar sobre un paño absorbente hasta eliminar toda película visible de agua, pero manteniendo la humedad interna de los poros. En esta condición, se registró el peso de la muestra (B).

**Figura 25.** Condición Saturada Superficialmente Seca de la muestra RAP.



Nota. Preparación SSS RAP para obtención Densidad Bulk (Fuente: Propia, 2025).

Pesaje Sumergido: Inmediatamente después, la muestra se colocó dentro de una canastilla de alambre y se sumergió en un tanque de agua, registrando su peso sumergido (C), se muestra en la Figura 26. La balanza utilizada permitió realizar esta medición hidrostática con precisión.

**Figura 26.** Pesaje Sumergido de la muestra RAP



Nota. Pesaje RAP para obtención Densidad Bulk (Fuente: Propia, 2025).

Secado Final: Finalmente, la muestra se retiró del agua y se secó nuevamente en el horno a  $110 \pm 5^\circ \text{C}$  hasta peso constante, registrando su peso seco final (A).

Los valores obtenidos de gravedad específica Bulk, gravedad específica aparente y porcentaje de absorción se detallan en la **Tabla 4**.

**Tabla 4.** Resultados de Gravedad Específica y Absorción (RAP - Fracción Gruesa).

Parámetro	Variable de Cálculo	Valor Obtenido	Unidad
(A) Peso de la Muestra Seca en Horno	A	3000	g
(B) Peso de la Muestra SSS (Saturada Superficialmente Seca)	B	3045	g
(C) Peso de la Muestra Sumergida en Agua	C	1854.5	g
Gravedad Específica Bulk (Masa Unitaria)	$A/(B-C)$	2.52	-
Gravedad Específica Bulk (Condición SSS)	$B/(B-C)$	2.558	-
Gravedad Específica Aparente	$A/(A-C)$	2.619	-
Porcentaje de Absorción	$\frac{\{(B-A) / A\}}{100} *$	1.5	%

Nota. Gravedad específica y absorción RAP (Fuente: Propia, 2025).

#### **Resistencia a la fragmentación – Ensayo de abrasión Los Ángeles (ASTM C131/C131M)**

La resistencia a la fragmentación del material RAP se evaluó mediante el ensayo de abrasión Los Ángeles, conforme a la norma ASTM C131/C131M. La preparación de la muestra para el ensayo se presenta en la Figura 27. El ensayo se ejecutó sometiendo el agregado grueso a un proceso de abrasión e impacto dentro de un tambor de acero rotatorio que contiene una carga abrasiva de esferas metálicas.

Preparación de la Muestra: Se lavó y secó el agregado en horno a una temperatura constante de  $110 \pm 5^\circ \text{C}$ . Posteriormente, se separó el material en fracciones de tamaño mediante tamizado para conformar la muestra de ensayo.

**Figura 27.** Preparación muestra RAP



Nota. Resistencia a la fragmentación del RAP (Fuente: Propia, 2025).

Selección de la Graduación (Método B): Considerando el tamaño máximo nominal del agregado del proyecto (19 mm o  $\frac{3}{4}$ " ), se seleccionó la Graduación B. Se preparó una muestra compuesta por:

- 2500  $\pm$  10 g de material pasante del tamiz  $\frac{3}{4}$ " (19.0 mm) y retiene en  $\frac{1}{2}$ " (12.5 mm).
- 2500  $\pm$  10 g de material pasante del tamiz  $\frac{1}{2}$ " (12.5 mm) y retiene en  $\frac{3}{8}$ " (9.5 mm).
- Peso total de la muestra (P1): 5000 g.

Carga Abrasiva: Se introdujo el material en la máquina de Los Ángeles junto con las cargas abrasivas correspondiente a la Graduación B, consistente en 11 bolas de acero con un peso de 4584 g. aproximado.

Ejecución del Ensayo: Se giro el tambor con una velocidad de 30 a 33 rpm hasta completar exactamente 500 rev. Durante este proceso, el material fue golpeado y arrastrado por las esferas, simulando el desgaste por tráfico vehicular.

**Tamizado Final:** Al finalizar las revoluciones, se retiró la muestra del tambor y se pasó por el tamiz No. 12 (1.70 mm). El material que pasó dicho tamiz se consideró como pérdida por degradación.

**Lavado y Pesaje (P2):** El material retenido en el tamiz No. 12 (agregado grueso remanente) se enjuagó y se puso nuevamente en horno hasta masa constante, luego se pesó con una exactitud de 1 gramo.

Los parámetros operativos del ensayo se resumen en la Tabla 5, mientras que la gradación de la muestra utilizada se detalla en la Tabla 6. Finalmente, los resultados obtenidos del desgaste por abrasión, expresados como porcentaje de pérdida de material, se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 5.** Parámetros del ensayo de abrasión Los Ángeles aplicados al material RAP.

Ensayo de Abrasión Los Ángeles: Material RAP	
Parámetro	Detalle
Método Seleccionado	C (Fracción gruesa media)
Número de Esferas (Carga abrasiva)	8 esferas
N. de Revoluciones	500 rev
Tiempo de rotación	15 mins

Nota. Parámetros Ensayo de Abrasión Los Ángeles: Material RAP (Fuente: Propia, 2025).

**Tabla 6.** Gradación de la muestra de RAP utilizada en el ensayo de abrasión Los Ángeles.

Gradación de la Muestra		
Tamaño de las aberturas del tamiz (Pasa / Retenido)	Cantidad Requerida (g)	Cantidad Muestra (g)
3/8" (9.5 mm) - 1/4" (6.3 mm)	2500 ± 10	2500
1/4" (6.3 mm) - N.4 (4.75 mm)	2500 ± 10	2500
<b>Peso Total de la Muestra</b>	5000 ± 10	<b>5000</b>

Nota. Gradación Material RAP (Fuente: Propia, 2025).

**Tabla 7.** Resultados del ensayo de abrasión Los Ángeles del material RAP.

Resultados del Desgaste		
Descripción	Variable	Valor
Peso Inicial	Pi	5000 g
Peso Final (Retenido en Tamiz #12)	Pf	3850 g
<b>Porcentaje de Desgaste</b>	<b>% Desgaste</b>	<b>23.00%</b>

Nota. Resultados desgaste Material RAP (Fuente: Propia, 2025).

En este proyecto, la determinación de la resistencia a la fragmentación del material RAP resultó fundamental para validar su viabilidad como insumo en la elaboración de mezclas asfálticas recicladas, asegurando que cumpla con los requisitos mínimos de durabilidad y resistencia mecánica exigidos para su reutilización.

#### **Extracción de Asfalto por medio de Centrifugado**

El ensayo se realizó conforme al Método A de la norma ASTM D2172, utilizando un equipo de extracción centrífuga para separar el ligante asfáltico de los agregados pétreos del material RAP.

Preparación de la Muestra: Se puso una muestra representativa de material RAP mediante cuarteo. La muestra se secó en horno a  $110 \pm 5$  °C hasta alcanzar masa constante para quitar la humedad higroscópica.

Pesaje Inicial (P1): Se registró la masa de la muestra seca de mezcla asfáltica (aproximadamente 1500 g) y se colocó en el tazón del extractor.

Disolución: Se añadió el solvente (gasolina) hasta cubrir totalmente la muestra. Se dejó reposar y se agitó manualmente para asegurar la desintegración del asfalto adherido a los agregados.

Centrifugado: A continuación, se colocó el anillo de papel filtro previamente pesado y seco sobre el borde del tazón, se ajustó la tapa del equipo y se inició la centrifugación,

incrementando gradualmente la velocidad hasta 3600 rpm, permitiendo la evacuación del solvente con el asfalto disuelto, tal como se muestra en la Figura 28.

**Figura 28.** Preparación del Centrifugado para muestra RAP



Nota. Obtención porcentaje de asfalto del RAP (Fuente: Propia, 2025).

Lavados Sucesivos: Se repitió el proceso de adición de solvente y centrifugado (mínimo 3 ciclos) hasta que el líquido drenado salió de color claro (amarillo pálido o transparente), indicando que todo el asfalto había sido extraído.

Recuperación de Finos: El papel filtro se retiró, se secó y se pesó para obtener la cantidad de material fino atrapado en él.

Secado y Pesaje Final (P2): Los agregados lavados se retiraron del tazón y se secaron en horno a  $110 \pm 5$  °C para evaporar cualquier residuo de solvente. Finalmente, se registró la masa del agregado limpio seco.

Los resultados obtenidos del contenido de asfalto residual para las dos muestras analizadas se presentan en la Tabla 8, donde se observa un contenido promedio de ligante cercano al 5.0 %, valor coherente con mezclas asfálticas densas para capas de rodadura.

**Tabla 8.** Contenido de Asfalto Residual (Ensayo de Extracción) RAP.

Parámetro	Unidad	Muestra 1	Muestra 2
(A) Peso Total de la Mezcla (RAP) Seca	g.	1500	1500
(B) Peso del Filtro Antes del Ensayo	g.	12.5	12.5
(C) Peso del Filtro Después del Ensayo	g.	14.8	15.1
(D) Aumento de Peso en Filtro (Finos atrapados) [C - B]	g.	2.3	2.6
(E) Peso del Agregado Lavado y Seco	g.	1421.2	1423.9
(F) Peso Total de Agregados (Limpios + Finos) [E + D]	g.	1423.5	1426.5
(G) Peso del Asfalto Extraído [A - F]	g.	76.5	73.5
Contenido de Asfalto (Pb) [ (G / A) x 100]	%	5.10%	4.90%

Nota. Resultados Ensayo de Extracción Material RAP (Fuente: Propia, 2025).

#### 4.1 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON MATERIAL RAP

Se diseñaron tres tipos de mezclas asfálticas con adhesión de RAP, en proporciones de 10%, 20% y 30% respecto al peso total de la mezcla. El objetivo de este proceso fue evaluar el desempeño mecánico y volumétrico de las mezclas resultantes frente a las condiciones de carga y tráfico propias del sector de estudio. La formulación de estas mezclas se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en el *Manual de Diseño de Mezclas Asfálticas* del Instituto del Asfalto (Asphalt Institute, 2007), documento de referencia internacional que establece las pautas para garantizar la calidad, durabilidad y resistencia de las capas asfálticas en pavimentos flexibles.

##### **Caracterización de Agregados (Material de Cantera)**

Previo al diseño de las mezclas asfálticas, se procedió a la recolección y caracterización de los agregados pétreos provenientes de la cantera que utiliza el GAD Municipal de Azogues. Los materiales evaluados corresponden al ripio triturado de 3/4" y 3/8", polvo de piedra y arena.

Ahora se describen los ensayos realizados para validar su calidad acorde a las especificaciones de la norma MOP.

## Análisis Granulométrico de Agregados (ASTM C136)

Se estableció la distribución del tamaño de partículas para cada uno de los materiales pétreos (3/4", 3/8", polvo y arena) mediante el método de tamizado en seco establecido en la norma ASTM C136. El procedimiento consistió en el lavado, secado y tamizado de muestras representativas a través de la serie de mallas estandarizadas. El objetivo de este ensayo fue obtener las curvas granulométricas individuales para definir la estructura de la mezcla asfáltica.

Los resultados del análisis granulométrico del agregado triturado de 3/4" se presentan en la Tabla 9, mientras que su correspondiente curva granulométrica se ilustra en la Figura 29.

De manera similar, los resultados del agregado triturado de 3/8" se muestran en la Tabla 10, y su curva granulométrica se presenta en la Figura 30.

Para el polvo de trituración, los resultados del análisis granulométrico se detallan en la Tabla 11, mientras que la curva granulométrica correspondiente se presenta en la Figura 31.

Finalmente, el análisis granulométrico del material arena se resume en la Tabla 12, y su respectiva curva granulométrica se muestra en la Figura 32.

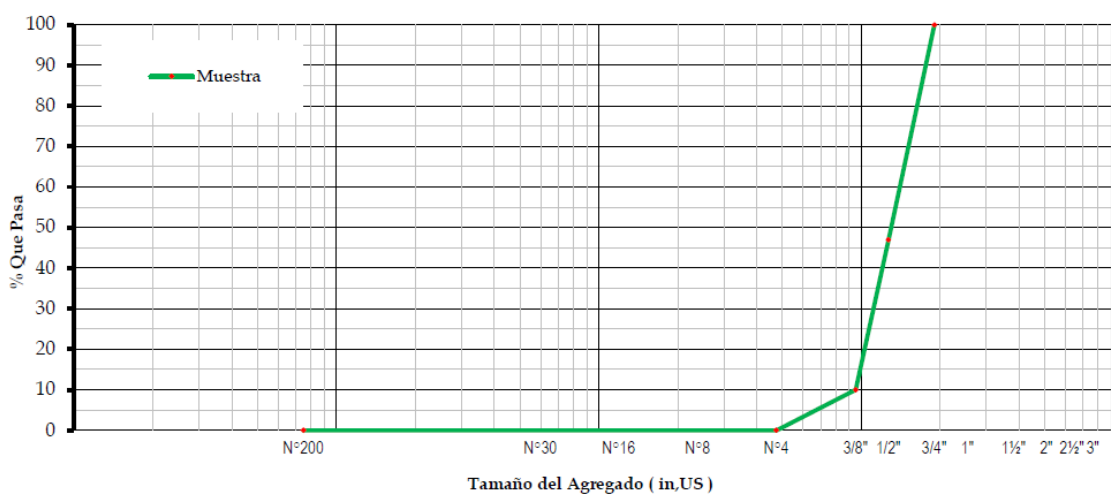
**Tabla 9.** Resultados del Análisis Granulométrico (Material Agregado Triturado ¾).

<b>Masa Muestra Seca</b>	6,496 g	<b>Masa Muestra Reducida Seca</b>	40.00 g	<b>Pérdida</b>	0.00%
<b>Masa Gruesa</b>	6,456 g	<b>Masa Después del Lavado</b>	40.00 g		
<b>Masa Fina</b>	40 g	<b>Pérdida por Lavado</b>	0%		
<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Ret. Parcial (g)</b>	<b>Ret. Acumulado (g)</b>	<b>% Ret. Acumulado</b>	<b>% Que Pasa</b>
<b>3"</b>	76.2	-	-	-	<b>100</b>
<b>2 1/2"</b>	63.5	-	-	-	<b>100</b>

2"	50.8	-	-	-	100
1 1/2"	38.1	-	-	-	100
1"	25.4	-	-	-	100
3/4"	19	-	-	-	100
1/2"	12.7	3,380	3,380	52.03	48
3/8"	9.53	2,429	5,809	89.42	10.6
N° 4	4.75	647	6,456	99.38	0.62
N° 8	2.38	40	6,496	100	0
N° 16	1.19	0	6,496	100	0
N° 30	0.6	0	6,496	100	0
N° 200	0.08	0	6,496	100	0

Nota. Resultados del Análisis Granulométrico material de 3/4, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 29.** Curva Granulométrica Agregado Triturado 3/4.



Nota. Curva Granulométrica material Agregado Triturado 3/4, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

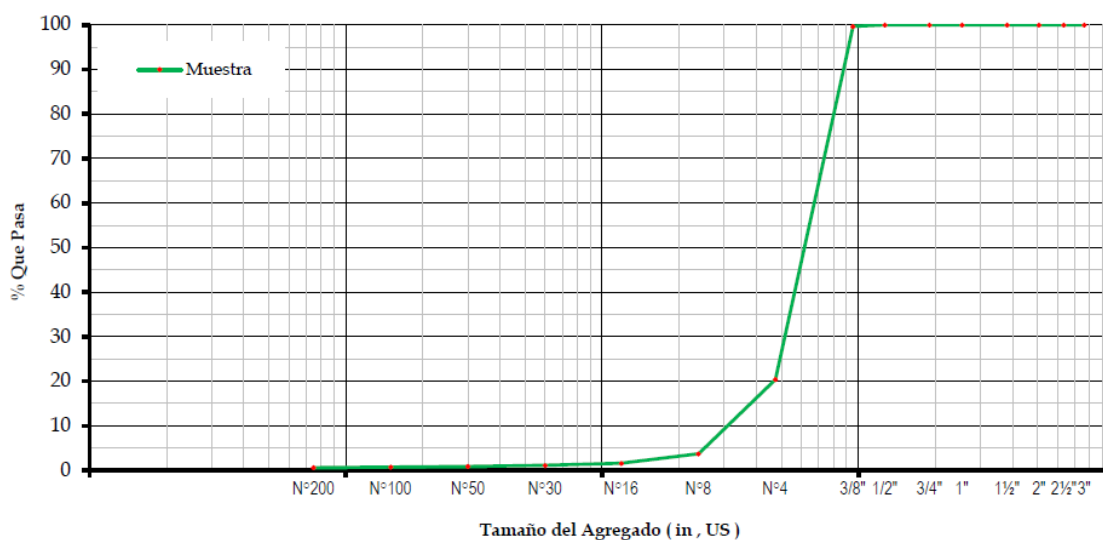
**Tabla 10.** Resultados del Análisis Granulométrico (Material Agregado Triturado 3/8).

Masa Muestra Seca	12,173 g	Masa Muestra Reducida Seca	1,001.03 g	Pérdida	0.02%
Masa Gruesa	9,687 g	Masa Después del Lavado	972.10 g		
Masa Fina	2,484 g	Pérdida por Lavado	3%		
Tamiz	Abertura (mm)	Ret. Parcial (g)	Ret. Acumulado (g)	% Ret. Acumulado	% Que Pasa

3"	76.2	-	-	-	100
2 1/2"	63.5	-	-	-	100
2"	50.8	-	-	-	100
1 1/2"	38.1	-	-	-	100
1"	25.4	-	-	-	100
3/4"	19	-	-	-	100
1/2"	12.7	-	-	-	100
3/8"	9.53	39	39	0.32	100*
N° 4	4.75	9,648.00	9,687	79.58	20.42
N° 8	2.38	819.4	11,720	96.28	3.72
N° 16	1.19	103.29	11,977	98.39	1.61
N° 30	0.6	24.83	12,038	98.89	1.11
N° 50	0.3	10.1	12,063	99.1	0.9
N° 100	0.15	6.47	12,079	99.23	0.77
N° 200	0.08	5.75	12,094	99.35	0.65

Nota. Resultados del Análisis Granulométrico material de 3/8, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 30.** Curva Granulométrica Agregado Triturado 3/8.



Nota. Curva Granulométrica material Agregado Triturado 3/8, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

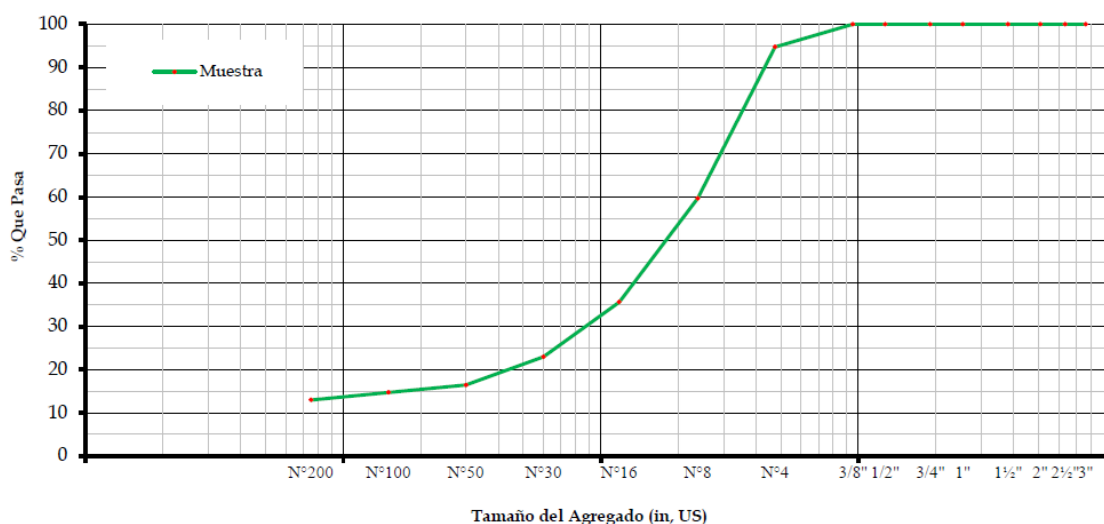
**Tabla 11.** Resultados del Análisis Granulométrico (Material Polvo de Trituración).

Masa Muestra Seca	1,001 g	Masa Muestra Reducida Seca	947.49 g	Pérdida	0.07%
Masa Gruesa	53 g	Masa Después del Lavado	843.23 g		
Masa Fina	947 g	Pérdida por Lavado	11%		

Tamiz	Abertura (mm)	Ret. Parcial (g)	Ret. Acumulado (g)	% Ret. Acumulado	% Que Pasa
3"	76.2	-	-	-	100
2 1/2"	63.5	-	-	-	100
2"	50.8	-	-	-	100
1 1/2"	38.1	-	-	-	100
1"	25.4	-	-	-	100
3/4"	19	-	-	-	100
1/2"	12.7	-	-	-	100
3/8"	9.53	-	-	-	100
N° 4	4.75	53	53	5.25	94.8
N° 8	2.38	350.8	403	40.3	59.7
N° 16	1.18	240.15	643	64.3	35.7
N° 30	0.6	127.36	771	77.03	23
N° 50	0.3	65.16	836	83.54	16.5
N° 100	0.15	17.28	853	85.27	14.7
N° 200	0.08	17.3	871	87	13

Nota. Resultados del Análisis Granulométrico material de polvo de trituración, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 31.** Curva Granulométrica Polvo de Trituración



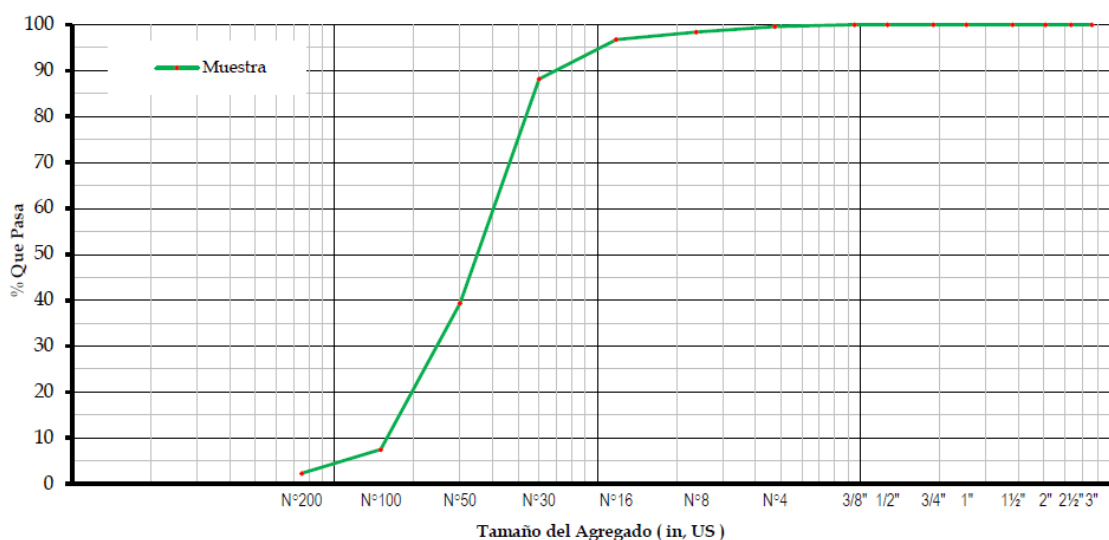
Nota. Curva Granulométrica material de polvo de trituración, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

**Tabla 12.** Resultados de Análisis Granulométrico (Material Arena).

<b>Masa Muestra Seca</b>	1,000 g	<b>Masa Muestra Reducida Seca</b>	995.64 g	<b>Pérdida</b>	0.04%
<b>Masa Gruesa</b>	4 g	<b>Masa Después del Lavado</b>	973.00 g		
<b>Masa Fina</b>	996 g	<b>Pérdida por Lavado</b>	2%		
<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Ret. Parcial (g)</b>	<b>Ret. Acumulado (g)</b>	<b>% Ret. Acumulado</b>	<b>% Que Pasa</b>
3"	76.2	-	-	-	100
2 1/2"	63.5	-	-	-	100
2"	50.8	-	-	-	100
1 1/2"	38.1	-	-	-	100
1"	25.4	-	-	-	100
3/4"	19	-	-	-	100
1/2"	12.7	-	-	-	100
3/8"	9.53	-	-	-	100
N° 4	4.75	4	4	0.4	99.6
N° 8	2.38	11.88	16	1.59	98.4
N° 16	1.18	16.17	32	3.2	96.8
N° 30	0.6	85.95	118	11.8	88.2
N° 50	0.3	488.26	606	60.62	39.4
N° 100	0.15	318.49	925	92.47	7.5
N° 200	0.08	52.13	977	97.68	2.3

Nota. Resultados del Análisis Granulométrico material de arena, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 32.** Curva Granulométrica Arena




Nota. Curva Granulométrica material de arena, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

## Resistencia a la Fragmentación (Abrasión Los Ángeles - ASTM C131)

Para garantizar que el material pétreo soporte las cargas abrasivas del tráfico y la trituración durante la compactación, se evaluó la dureza de los agregados gruesos (fracciones 3/4" y 3/8") mediante la Máquina de Los Ángeles, conforme a la norma ASTM C131. Se omiten los detalles procedimentales extensos dado que la metodología aplicada es idéntica a la descrita posteriormente para el material RAP. El criterio de aceptación para capas de rodadura exige un desgaste inferior al 30 - 40%.

Los resultados del ensayo para el agregado triturado de 3/4" se presentan en la Tabla 13, mientras que los resultados correspondientes al agregado triturado de 3/8" se muestran en la Tabla 14, evidenciando en ambos casos valores de desgaste inferiores a los límites máximos permitidos por la normativa MOP.

**Tabla 13.** Ensayo de Abrasión (Material Agregado Triturado 3/4)

Ensayo de Abrasión: Árido 3/4"			
Tamaño de las aberturas del tamiz		Gradación Requerida (g)	Gradación Muestra (g)
19.0 mm (3/4 in.) a 12.5 mm (1/2 in.)		2500 ± 10	2500
12.5 mm (1/2 in.) a 9.5 mm (3/8 in.)		2500 ± 10	2500
<b>Totales</b>			<b>5000</b>
Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
<b>B</b>	Masa inicial de la muestra de ensayo	<b>5000</b>	g
<b>C</b>	Masa retenida en tamiz 1.70mm (#12) post-ensayo	<b>4391</b>	g
<b>D</b>	<b>Valor de degradación (Desgaste)</b>	<b>12.2</b>	%
Especificación MOP 2002:		Máx.	40%
Estado: CUMPLE 			

Nota. Resultados del ensayo de Abrasión Material de 3/4, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

**Tabla 14.** Ensayo de Abrasión (Material Agregado Triturado 3/8).

Ensayo de Abrasión: Árido 3/8"		
Tamaño de las aberturas del tamiz	Gradación Requerida (g)	Gradación Muestra (g)
9.5 mm (3/8 in.) a 6.3 mm (1/4 in.)	2500 ± 10	2500

6.3 mm (1/4 in.) a 4.75 mm (N°4)		2500 ± 10	2500
<b>Totales</b>			<b>5000</b>
<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>B</b>	Masa inicial de la muestra de ensayo	<b>5000</b>	g
<b>C</b>	Masa retenida en tamiz 1.70mm (#12) post-ensayo	<b>4421</b>	g
<b>D</b>	<b>Valor de degradación (Desgaste)</b>	<b>11.6</b>	%
Especificación MOP 2002:		Máx.	40%
Estado: CUMPLE 			

Nota. Resultados del ensayo de Abrasión Material de 3/8, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

#### Contenido de Finos y Limpieza (ASTM D1140 / Equivalente de Arena)


La limpieza de los agregados finos se verificó mediante los ensayos de contenido de finos (ASTM D1140) y equivalente de arena (ASTM D2419). Los resultados obtenidos para la arena se presentan en la Tabla 15, confirmando el cumplimiento de los valores mínimos exigidos para tránsito pesado.

- Contenido de Finos (ASTM D1140): Se determinó el porcentaje de material pasante del tamiz No. 200 mediante lavado, asegurando que el contenido de polvo mineral no exceda los límites de plasticidad permitidos.
- Equivalente de Arena (ASTM D2419): Se evaluó la proporción de finos plásticos en la fracción fina.

El procedimiento seguido se ajusta a los estándares internacionales, garantizando que los materiales vírgenes están libres de recubrimientos orgánicos o exceso de limos.

**Tabla 15.** Ensayo de Contenidos finos y limpieza (Arena)

Tipo de Lectura	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Lectura de arcilla	6.7	6.7	6.8
Lectura de arena + Aparato (10 in)	14	14.1	14.1
Lectura de arena	4	4.1	4.1

Equivalente de arena (Muestra individual)	60	62	61
<b>Parámetro</b>	<b>Valor Promedio</b>	<b>Especificación (Norma)</b>	<b>Estado</b>
Equivalente de Arena (EA)	61%	MOP 2002	CUMPLE 
		Mínimo: 50% (Tráfico Pesado)	

Nota. Resultados del ensayo de equivalente de arena, almacenado en la planta de Asfalto del GAD Municipal de Azogues (Fuente: Propia, 2025).

### Proceso del Método Marshall para el Diseño de Mezclas Asfálticas

El desarrollo se realizó en base a la norma (AASHTO T245), siguiendo los pasos para determinar la dosificación óptima de ligante asfáltico que garantice durabilidad, estabilidad y resistencia a la deformación

### Combinación Granulométrica de Agregados

La combinación óptima de los agregados se determinó mediante ajuste gráfico y tanteo, cuyos resultados se presentan en la Tabla 16. La curva granulométrica resultante de la mezcla de diseño se muestra en la Figura 33, observándose que se encuentra completamente dentro de la faja de trabajo establecida por la normativa MOP. La combinación seleccionada para la mezcla de control fue la siguiente:

- Árido 3/4": 15%
- Árido 3/8": 25%
- Arena (Río Upano): 10%
- Polvo de Piedra: 50%

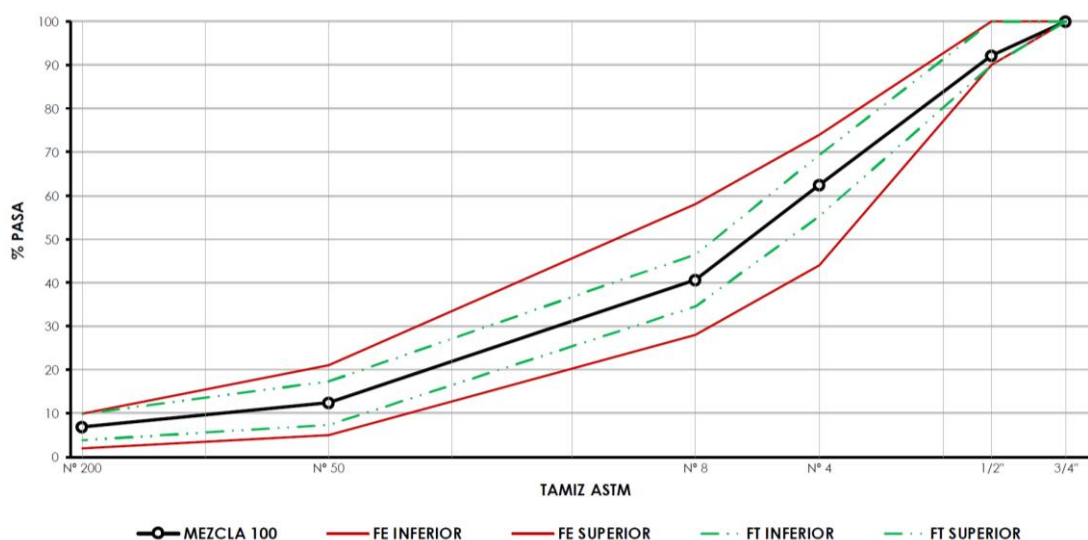
**Tabla 16.** Combinación Granulométrica de Agregados

Granulometría de la Mezcla de Áridos								
Tamiz (ASTM)	Tamiz (mm)	Árido 3/4 (15%)	Árido 3/8 (25%)	Arena Río (10%)	Polvo Piedra (50%)	MEZCLA	Espec. MOP 2002	Faja de Trabajo
3/4"	19	100	100	100	100	<b>100</b>	100 - 100	100 - 100
1/2"	12.5	48	100	100	100	<b>92.2</b>	90 - 100	90 - 100

N° 4	4.75	0	20.4	99.6	94.8	<b>62.5</b>	44 - 74	55 - 69
N° 8	2.36	0	3.7	98.4	59.7	<b>40.6</b>	28 - 58	35 - 47
N° 50	0.3	0	0.9	39.4	16.5	<b>12.4</b>	5 - 21	7 - 17
N° 200	0.075	0	0.7	2.3	13	<b>6.9</b>	2 - 10	4 - 10

Nota. Combinación Granulométrica para mezcla de diseño (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 33.** Curva Granulométrica formula



Nota. Curva de Combinación Granulométrica para mezcla de diseño (Fuente: Propia, 2025).

Como se observa en la Figura 33, la curva granulométrica de diseño se ubica dentro de la faja de trabajo. El cumplimiento normativo se detalla en los puntos de control críticos.

### Preparación y Mezclado de Materiales

El proceso de homogeneización de la mezcla asfáltica con incorporación de RAP se ilustra en la Figura 34. Se calentaron los agregados pétreos y el material RAP en horno hasta alcanzar la temperatura de mezcla establecida ( $160 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Simultáneamente, el cemento asfáltico (AC-20) se llevó a una temperatura de  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  para asegurar la viscosidad adecuada para el recubrimiento.

Se elaboraron series de probetas variando el contenido de asfalto en incrementos de 0.5%, garantizando una mezcla homogénea antes de la compactación.

**Figura 34.** Homogeneización de la mezcla asfáltica con incorporación de RAP



Nota. Proceso de mezclado con el RAP Y Agregados

### **Compactación de Especímenes (Briquetas)**

La mezcla caliente se vertió en los moldes metálicos precalentados. La compactación se realizó mediante el martillo Marshall, aplicando 75 golpes por cada cara de la probeta, simulando las condiciones de presión de un tráfico pesado urbano, acorde a la realidad de la calle Juan Montalvo. El procedimiento de compactación de las briquetas mediante el martillo Marshall se muestra en la Figura 35.

**Figura 35.** Compactación de especímenes mediante el Martillo Marshall



Nota. Compactación de especímenes mediante el Martillo Marshall (75 golpes/cara).

### Determinación de la Gravedad Específica Bulk (Densidad)

Tras el enfriamiento y desmolde (24 horas), se determinó la Gravedad Específica Bulk ( $G_{mb}$ ) de cada briqueta siguiendo la norma ASTM D2726. Se registraron los pesos secos al aire, sumergido en agua y saturado superficialmente seco (SSS). Los valores de gravedad específica de los agregados que conforman la mezcla se presentan en la Tabla 17, mientras que las gravedades específicas globales de la mezcla asfáltica se resumen en la Tabla 18.

**Tabla 17.** Gravedades específicas de los agregados de la mezcla de diseño.

Gravedades Específicas de los Componentes (Agregados)						
Procedencia (Material)	Tamaño Máx. Nominal	% Dosificación	G. Específica Agregado (Gbulk)	G. Específica SSS (Gbulk)	G. Específica Aparente (Gsa)	Absorción (%)
Árido 3/4	3/4"	15	2.63	2.67	2.73	1.31
Árido 3/8	Nº 4	25	2.57	2.61	2.68	1.6
Arena (Río Upano)	Nº 4	10	2.61	2.65	2.72	1.53
Polvo de Piedra	Nº 4	50	2.64	2.69	2.79	2.03

Nota. Resultados de Gravedades Específicas de los agregados de la mezcla de diseño (Fuente: Propia, 2025).

**Tabla 18.** Gravedades específicas de la mezcla de diseño

Gravedades Específicas de la Mezcla Asfáltica en Caliente			
Descripción	Símbolo	Resultado	Observación / Nota Técnica
Gravedad específica del betún	Gb	<b>1.01</b>	Incluye aditivo. Dosificación: 0.05% en peso del CA.
Gravedad esp. agregados (Bulk)	Gsb	<b>2.62</b>	Calculado ponderado según la dosificación.
Gravedad esp. aparente	Gsa	<b>2.74</b>	Calculado ponderado según la dosificación.
Gravedad mezcla máx. (1)	Gmm_1	<b>2.44</b>	Densidad máx. mezcla suelta (Lab) con 6.0% CA.
Gravedad mezcla máx. (2)	Gmm_2	<b>2.42</b>	Densidad máx. mezcla suelta (Lab) con 6.5% CA.
Gravedad mezcla máxima (Prom)	Gmm	<b>2.43</b>	Valor asumido promedio para el diseño.

Gravedad específica efectiva	Gse	<b>2.68</b>	Calculada con %CA óptimo de 6.25% (para 4% vacíos).
------------------------------	-----	-------------	---

Nota. Resultados de Gravedades Específicas de los agregados de la mezcla de diseño (Fuente: Propia, 2025).

### Ensayo de Estabilidad y Flujo

Las briquetas se sumergieron en baño maría a  $60 \pm 1$  °C durante 30 minutos. Inmediatamente después, fueron sometidas a carga en la Prensa Marshall hasta la falla.

- Estabilidad: Carga máxima resistida (kg o lbf).
- Flujo: Deformación vertical en el instante de carga máxima (0.01 pulgadas o mm).

La ejecución del ensayo de estabilidad y flujo se realizó en la prensa Marshall, como se observa en la Figura 36. Los resultados obtenidos para los diferentes contenidos de asfalto se presentan en la Tabla 19.

**Figura 36.** Prensa Marshall



Nota. Ejecución del ensayo de Estabilidad y Flujo en la prensa Marshall.

**Tabla 19.** Ensayo de Estabilidad y Flujo en la prensa Marshall de la mezcla de diseño.

% AC	Espec	Peso Aire (g)	Peso Agua (g)	Peso SSS (g)	Vol. Bulk (cm <sup>3</sup> )	Gravedad Esp. Bulk (Gmb)	G.E. Max Teórica (Gmm)	Peso Unit. (kg/m <sup>3</sup> )	% Va	% VMA	% VFA	Estab. Corr. (lbs)	Flujo 0.01"
5	A	1165.4	655.1	1169.2	514.1	2.267						2283	9.8
	B	1218.7	683.5	1222.4	538.9	2.261						2151	10.3
	C	1198.2	671.8	1201.5	529.7	2.262						2190	10
<b>PROM</b>					<b>527.6</b>	<b>2.263</b>	<b>2.481</b>	<b>2263</b>	<b>8.8</b>	<b>17.8</b>	<b>50.6</b>	<b>2208</b>	<b>10</b>
5.5	A	1161.6	656.1	1164	507.9	2.287						2209	10.5
	B	1213.4	684.9	1215.2	530.3	2.288						2132	11.2
	C	1225.1	689.1	1227.1	538	2.277						2460	11.6
<b>PROM</b>					<b>525.4</b>	<b>2.284</b>	<b>2.465</b>	<b>2284</b>	<b>7.3</b>	<b>17.5</b>	<b>58.1</b>	<b>2267</b>	<b>11.1</b>
6	A	1235.3	702.5	1239	536.5	2.31						2434	12.5
	B	1256.9	713.2	1260.7	547.5	2.313						2249	12.8
	C	1200.4	681.8	1204	522.2	2.318						2341	11.9
<b>PROM</b>					<b>535.4</b>	<b>2.314</b>	<b>2.439</b>	<b>2314</b>	<b>5.1</b>	<b>16.9</b>	<b>69.6</b>	<b>2341</b>	<b>12.4</b>
6.5	A	1298.4	744.8	1302.3	557.5	2.343						3225	13.3
	B	1190.4	682.5	1194	511.5	2.347						3005	14
	C	1150.4	659.6	1153.9	494.3	2.344						2804	13.8
<b>PROM</b>					<b>521.1</b>	<b>2.345</b>	<b>2.42</b>	<b>2345</b>	<b>3.1</b>	<b>16.2</b>	<b>80.7</b>	<b>3011</b>	<b>13.7</b>

Nota. Resultados de Estabilidad y Flujo de la mezcla de diseño (Fuente: Propia, 2025).

### Análisis Volumétrico (Vacíos)

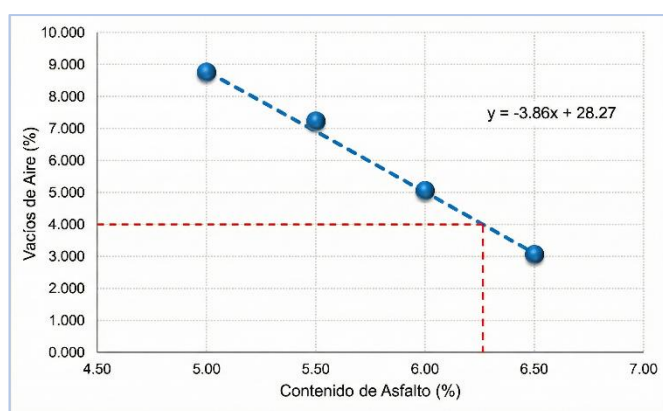
Con los datos de densidad ( $G_{mb}$ ) y la gravedad específica máxima teórica ( $G_{mm}$  o Rice), se calcularon las propiedades volumétricas fundamentales para el desempeño de la mezcla:

- % Vacíos de Aire ( $V_a$ ): Se define como el volumen total de las pequeñas bolsas de aire entre las partículas de agregado recubiertas en la mezcla asfáltica compactada, expresado como porcentaje del volumen total.
- % Vacíos en el Agregado Mineral ( $VMA$ ): Espacio intergranular disponible para asfalto y aire.
- % Vacíos Llenos de Asfalto ( $VFA$ ): Porcentaje del  $VMA$  ocupado por el ligante efectivo.

Las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades volumétricas se analizaron gráficamente. La variación de los vacíos de aire se muestra en la Figura 37, el comportamiento del VMA se presenta en la Figura 38, y la relación del VFA con el contenido de ligante se ilustra en la Figura 39.

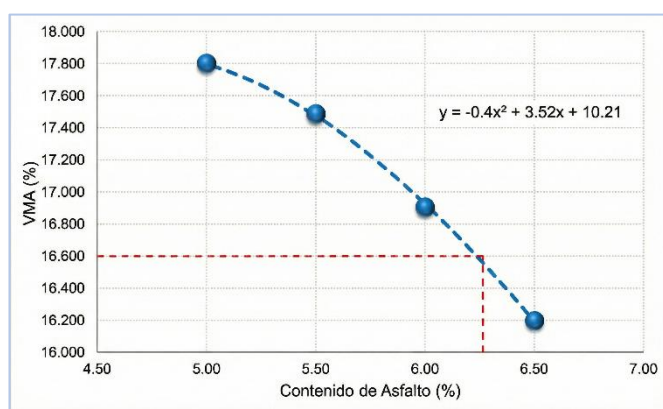
Adicionalmente, la relación entre la densidad bulk y el porcentaje de asfalto se presenta en la Figura 40, mientras que la variación de la estabilidad Marshall y el flujo en función del contenido de ligante se muestran en las Figuras 41 y 42, respectivamente.

**Figura 37.** Relación de Porcentaje de Vacíos de Asfalto respecto al porcentaje de Asfalto.



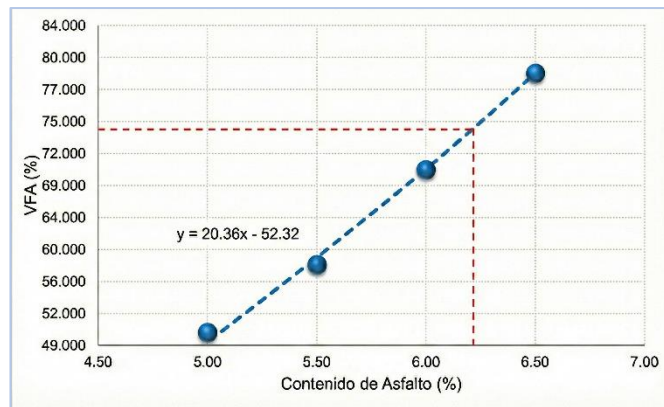
Nota. Porcentaje de los vacíos intergranulares que se encuentran ocupados por el asfalto efectivo (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 38.** Vacíos en el Agregado Mineral (VMA) en función del contenido de asfalto.



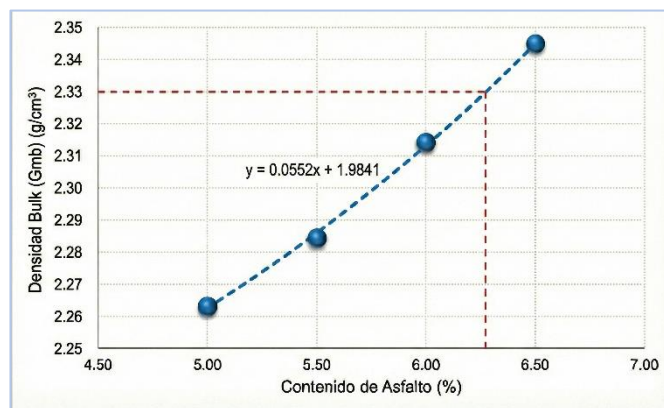
Nota. Análisis del espacio disponible en la estructura de agregados para alojar el asfalto y el aire (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 39.** Relación de Vacíos Llenos de Asfalto (VFA) respecto al porcentaje de ligante.



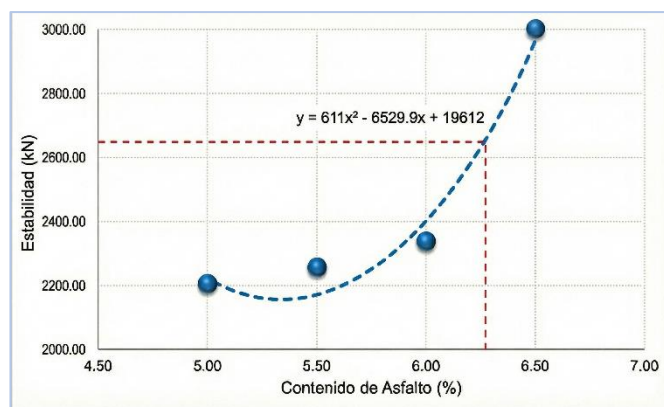
Nota. Porcentaje de los vacíos intergranulares que se encuentran ocupados por el asfalto efectivo (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 40.** Relación entre la Densidad Bulk (Gmb) y el contenido de asfalto.



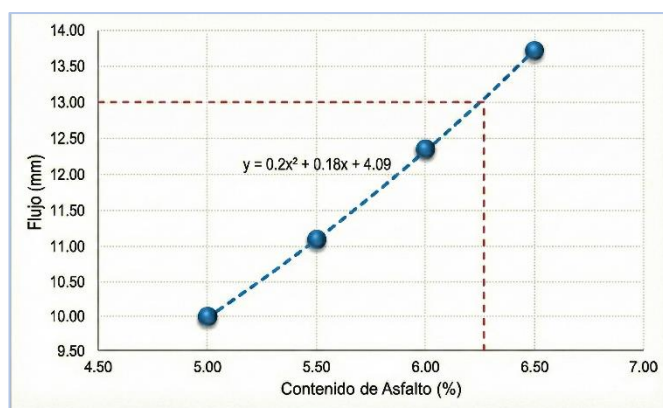
Nota. Evolución de la densidad de la mezcla compactada al variar el porcentaje de ligante asfáltico (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 41.** Variación de la Estabilidad Marshall en función del porcentaje de asfalto



Nota. Tendencia de la resistencia a la deformación plástica de la mezcla bajo diferentes contenidos de ligante (Fuente: Propia, 2025).

**Figura 42.** Comportamiento del Flujo Marshall respecto al contenido de asfalto.



Nota. Relación entre la deformación de la muestra y el incremento del porcentaje de asfalto (Fuente: Propia, 2025).

### Determinación del Contenido Óptimo de Asfalto

Basándose en los resultados anteriores, se seleccionó el contenido óptimo de ligante que cumple con los criterios (4% de vacíos de aire). La dosificación definitiva de la fórmula de trabajo para la mezcla de control se presenta en la Tabla 20, donde se detalla la participación porcentual de cada agregado pétreo y del ligante asfáltico.

**Tabla 20.** Dosificación definitiva de la fórmula de trabajo.

Dosificación de la Mezcla (Agregados y Ligante)		
Material / Parámetro	Porcentaje (%)	Observación
Árido 3/4"	15.00%	
Árido 3/8"	25.00%	
Arena (Río Upano)	10.00%	
Polvo de Piedra	50.00%	
Cemento Asfáltico (AC-20)	<b>6.25%</b>	Del peso total de la mezcla (Pb)
Absorción de áridos (Pba)	0.91%	
Asfalto Efectivo (Pbe)	6.19%	
Filler (Pasante Tamiz #200)	6.89%	

Nota. Detalle de la participación porcentual de cada agregado pétreo y el contenido óptimo de cemento asfáltico establecido para el diseño de la mezcla (Fuente: Propia, 2025).

Las gravedades específicas de los componentes y de la mezcla, necesarias para el cálculo de las propiedades volumétricas, se resumen en la Tabla 21, incluyendo la gravedad específica máxima teórica de la mezcla (Gmm).

**Tabla 21.** Resumen de gravedades específicas de los componentes y de la mezcla.

Propiedades de Gravedad Específica		
Parámetro	Símbolo	Valor
Gravedad específica del betún	Gb	1.014
Gravedad específica bulk de agregados	Gsb	2.616
Gravedad específica aparente	Gsa	2.743
Gravedad específica efectiva	Gse	2.679
Gravedad máxima de la mezcla	Gmm	2.43

Nota. Valores de densidad y gravedad específica (Gsb, Gmm, etc.) determinados en laboratorio, utilizados como base para el cálculo de las propiedades volumétricas (Fuente: Propia, 2025).

La verificación final de los parámetros Marshall para condiciones de **tráfico muy pesado** se presenta en la **Tabla 22**, evidenciándose que la mezcla diseñada cumple con todos los requisitos normativos.

**Tabla 22.** Verificación de parámetros Marshall con las especificaciones de diseño.

Resultados del Ensayo Marshall (Tráfico Muy Pesado)			
Parámetro	Especificación (Rango/Mín)	Resultado de la Mezcla	Estado
Estabilidad (lbs)	> 2200	<b>2,666</b>	✓ Cumple
Flujo (0.01 pulg)	8 - 14	<b>13.03</b>	✓ Cumple
Vacíos de Aire (%)	3 - 5	<b>4</b>	✓ Cumple
VAM (% Vacíos en Agregado Mineral)	13 (Mín)	<b>16.585</b>	✓ Cumple
VFA (% Vacíos llenos de asfalto)	65 - 75	<b>74.705</b>	✓ Cumple
Relación Filler / Betún	0.8 - 1.2	<b>1.11</b>	✓ Cumple

Nota. Comparación de las propiedades mecánicas y volumétricas obtenidas con el contenido óptimo de asfalto (6.25%) frente a los criterios normativos para tráfico muy pesado (Fuente: Propia, 2025).

## 4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL Y DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS CON RAP

Para evaluar la incidencia del RAP en el desempeño del pavimento, se planteó un diseño experimental elaborando briquetas con tres porcentajes de sustitución (10%, 20% y 30%). Como estrategia de control para aislar el efecto del material reciclado, se estableció un contenido de asfalto total objetivo del 6.25% para todos los escenarios,

valor correspondiente al óptimo de la mezcla de control. Si bien la modificación de la matriz pétreo podría teóricamente alterar la demanda de ligante, se mantuvo este parámetro fijo para centrar el análisis en el balance de ligante. En consecuencia, la cantidad de asfalto virgen añadido se ajustó para cada grupo, descontando estrictamente el aporte del ligante envejecido presente en el RAP (determinado en 5.0%) conforme a los criterios de dosificación del Asphalt Institute MS-2.

#### 4.2.1. DOSIFICACIÓN DE AGREGADOS Y LIGANTE POR GRUPO

La estructura granular de la mezcla de control (Agregado 3/4", 3/8", Arena y Polvo de Piedra) fue reajustada proporcionalmente para dar cabida al RAP, garantizando que la granulometría combinada se mantenga dentro de la franja de trabajo de la norma MOP.

La Tabla 23 detalla los porcentajes de cada material pétreo y la dosificación de asfalto virgen para cada escenario de estudio.

**Tabla 23.** Dosificación de Materiales por Grupo Experimental

Componente	Mezcla Control (0% RAP)	Grupo A (10% RAP)	Grupo B (20% RAP)	Grupo C (30% RAP)
<b>Material Pétreo</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>	<b>100.00%</b>
- RAP (Fresado)	0.00%	10.00%	20.00%	30.00%
- Ripio 3/4"	15.0%	13.50%	12.00%	10.50%
- Ripio 3/8"	25.0%	22.50%	20.00%	17.50%
- Arena (Río Upano)	10.00%	9.00%	8.00%	7.00%
- Polvo de Piedra	50.00%	45.00%	40.00%	35.00%
<b>Cemento Asfáltico</b>				
- % Asfalto Total (Diseño)	6.25%	6.25%	6.25%	6.25%
- Aporte Asfalto del RAP	0.00%	0.50%	1.00%	1.50%
- % Asfalto Virgen Añadido	<b>6.25%</b>	<b>5.75%</b>	<b>5.25%</b>	<b>4.75%</b>

Nota. Se presentan los porcentajes de participación definitiva de los agregados y el ligante asfáltico, junto con las propiedades físicas calculadas y la verificación del cumplimiento de los parámetros Marshall (Fuente: Propia, 2025).

#### 4.2.2. ELABORACIÓN Y ENSAYO DE ESPECÍMENES (BRIQUETAS)

Se fabricaron un total de 9 briquetas (3 por cada grupo) compactadas a 75 golpes por cara, simulando las condiciones de tráfico pesado de la calle Juan Montalvo.

Posteriormente, estas fueron sometidas al ensayo de Estabilidad y Flujo Marshall (ASTM D1559) para determinar su comportamiento mecánico.

Los datos generados, que se presentan en la Tabla 24, muestran una tendencia coherente con investigaciones previas (Campoverde & Uyaguari, 2021) y (FHWA, 2018), donde se evidencia un incremento en la rigidez de la mezcla (mayor estabilidad) conforme aumenta el porcentaje de RAP, debido a la mayor viscosidad del ligante residual oxidado.

**Tabla 24.** Resultados de Ensayos Marshall

Grupo	Muestra	% RAP	Densidad Bulk (kg/m <sup>3</sup> )	Estabilidad (lbs)	Flujo (0.01")	% Vacíos (Va)	Relación E/F (lbs/0.01")
A	M-10-1	10%	2,298	2,750	12.8	4.10%	214.8
A	M-10-2	10%	2,305	2,795	12.4	4.00%	225.4
A	M-10-3	10%	2,301	2,795	12.3	4.20%	227.2
<b>Promedio</b>	<b>Grupo 10%</b>		<b>2,301</b>	<b>2,780</b>	<b>12.5</b>	<b>4.10%</b>	<b>222.5</b>
B	M-20-1	20%	2,315	2,890	11.9	4.30%	242.8
B	M-20-2	20%	2,322	2,940	11.7	4.20%	251.2
B	M-20-3	20%	2,318	2,915	11.8	4.40%	247
<b>Promedio</b>	<b>Grupo 20%</b>		<b>2,318</b>	<b>2,915</b>	<b>11.8</b>	<b>4.30%</b>	<b>247</b>
C	M-30-1	30%	2,310	3,120	10.4	5.10%	300
C	M-30-2	30%	2,314	3,180	10.1	5.00%	314.8
C	M-30-3	30%	2,308	3,150	10.1	5.20%	311.8
<b>Promedio</b>	<b>Grupo 30%</b>		<b>2,311</b>	<b>3,150</b>	<b>10.2</b>	<b>5.10%</b>	<b>308.9</b>

Nota. Resumen de los parámetros mecánicos y volumétricos promedio obtenidos para los diseños con incorporación de RAP (Fuente: Propia, 2025).

Relación Estabilidad/Flujo (E/F) o Cociente Marshall: Este parámetro representa la rigidez de la mezcla asfáltica. Se calcula dividiendo el valor de Estabilidad para el Flujo. Un valor más alto indica una mezcla con mayor módulo de rigidez, lo cual se asocia teóricamente con una mayor resistencia a las deformaciones permanentes (ahuellamiento) bajo cargas de tráfico. En este estudio, se reporta la relación E/F para evidenciar el efecto rigidizante que aporta el asfalto envejecido del RAP a la estructura del pavimento.

Como se aprecia en la Tabla 24, existe una correlación directa entre el incremento del porcentaje de RAP y el aumento de los Vacíos de Aire (Va). Mientras la mezcla de control presenta un 4.0% de vacíos, la mezcla con 30% de RAP asciende al 5.1%. Este comportamiento coincide con lo reportado por Rivero (2018) y el Asphalt Institute (MS-2), quienes explican que el ligante asfáltico presente en el RAP ha sufrido un proceso de envejecimiento oxidativo severo.

Este fenómeno incrementa la viscosidad y la rigidez compleja del asfalto residual, generando una mezcla con mayor resistencia interna a la fricción durante el proceso de compactación. En consecuencia, bajo la misma energía de compactación (75 golpes), las partículas recubiertas con asfalto envejecido se acomodan con mayor dificultad, resultando en una estructura granular menos densa y con mayor volumen de vacíos. El valor de 5.1% en la mezcla de 30% evidencia que la rigidez del material superó la capacidad de densificación prevista, excediendo el límite normativo y comprometiendo la impermeabilidad.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS TÉCNICOS

Con base en los resultados experimentales, se lleva a cabo un análisis comparativo integral entre la Mezcla de Control (0% RAP) y la Mezcla con Asfalto Reciclado al 20%. Esta última fue seleccionada por presentar el equilibrio óptimo entre desempeño mecánico y volumétrico: alcanzó una estabilidad de 2,932 lbs (superior a la de control) manteniendo un porcentaje de vacíos del 4.3%, lo que garantiza impermeabilidad y durabilidad. Por el contrario, la mezcla con 30% de RAP fue descartada del análisis económico final debido a que sus vacíos promedio (5.1%) superaron el límite máximo establecido por la normativa MOP. Este comportamiento volumétrico deficiente, atribuible a la resistencia a la compactación inducida por la alta viscosidad del ligante envejecido, representa un riesgo técnico inaceptable de permeabilidad y daño por humedad.

### 5.2 ANÁLISIS ECONÓMICO COMPARATIVO

Se evalúa el costo de acuerdo al análisis de precios unitarios con costos de mano de obra, herramientas, materiales y equipos que el Municipio de Azogues mantiene a la fecha de elaboración del presente trabajo. Teniendo en cuenta los costos directos y rendimiento para la ejecución de cada rubro. Los costos directos de la mezcla asfáltica en planta se presentan en la Tabla 25, mientras que el costo de colocación de la carpeta asfáltica de 3" se detalla en la Tabla 26.

**Tabla 25.** Precios Unitarios de la Mezcla Asfáltica en Planta

Análisis de Precios Unitarios					
Descrip.:	Mezcla Asfáltica en Planta (m3)				
Unidad:	m3				
<b>COSTOS DIRECTOS</b>					
<b>Equipo y herramienta</b>					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total
CARGADORA FRONTAL. 150 HP.	hora	1.00000	30.00	0.05000	1.50

PLANTA MEZCLA ASFALT. EN CALIENT. 100 TON.	hora	1.00000	150.00	0.05000	7.50
GENERADOR. 300 KVA.	hora	1.00000	30.00	0.05000	1.50
Herramienta menor	Hora	5.00 %MO	0.01		0.01
					10.51

Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total
AGREGADO D 3/4"	m3	0.15000	31.66		4.75
ASFALTO TIPO AC-20	Kg	150.00000	0.33		49.00
AGREGADO D 3/8"	m3	0.25000	31.66		7.92
POLVO DE TRITURACION	m3.	0.50000	31.66		15.83
DIESEL 2	lts	13.81530	0.48		6.67
ARENA	m3	0.10000	29.88		2.99
					87.16

Mano de Obra				
Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total
OPERADOR DE CARGADORA FRONTAL	1.00	4.75	0.05000	0.24
MECANICO - SOLDADOR	1.00	4.35	0.05000	0.22
PEON	3.00	4.23	0.05000	0.63
OPERADOR DE PLANTA DE ASFALTO	1.00	4.75	0.05000	0.24
LABORATORISTA	1.00	4.75	0.05000	0.24
				1.57

<b>TOTAL</b>	99.24
--------------	-------

**Tabla 26. Análisis de Precios Unitarios Colocación Carpeta Asfáltica 3"**

### Análisis de Precios Unitarios

**Descrip.:** Colocación Carpeta Asfáltica 3" (sin transporte)

**Unidad:** m2

#### COSTOS DIRECTOS

Equipo y herramienta					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total
Terminadora de asfaltos	hora	1.00000	100.00	0.01000	1.00
Rodillo neumático 80 hp	hora	1.00000	55.00	0.01000	0.55
Rodillo doble Tandem 134 hp	hora	1.00000	55.00	0.01000	0.55
Herramienta menor	Hora	5.00 %MO	0.01		0.01
					2.11

Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio		Total
Mezcla Asfáltica en Planta (m3)	m3	0.08890	99.24		8.82
					8.82

Mano de Obra					
--------------	--	--	--	--	--

Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total
C2-Operador de Rodillo autopropulsado	2.00	4.75	0.01000	0.10
C2-Operador de Acabadora de pavimento asfáltico	1.00	4.75	0.01000	0.05
D2-Albañil	4.00	4.28	0.01000	0.17
E2-Peón	5.00	4.23	0.01000	0.21
				0.53
				11.46

Para determinar la viabilidad financiera, se analizaron los costos directos de producción y puesta en obra. Se estableció como línea base la mezcla asfáltica convencional, cuyo costo directo de producción en planta es de \$99.24 USD/m<sup>3</sup>, sumado al rubro de colocación de carpeta asfáltica de 3 pulgadas, cuyo precio unitario referencial es de \$11.46 USD/m<sup>2</sup>.

Al comparar estos valores con la alternativa sostenible (20% RAP), se determinó que el costo de producción disminuye a \$86.32 USD/m<sup>3</sup> gracias al ahorro en insumos vírgenes. Por otro lado, el costo de colocación (\$11.46 USD/m<sup>2</sup>) se considera invariable para ambas alternativas, dado que la mezcla con RAP demostró una trabajabilidad adecuada en laboratorio, no requiriendo maquinaria especial ni ciclos de compactación adicionales que encarezcan la mano de obra o el equipo en pista.

### 5.1.1. COMPARACIÓN DE COSTOS DE MATERIALES

Según los Análisis de precios unitario base, el costo de los agregados vírgenes (3/4", 3/8", Polvo y Arena) suma un total de \$31.49 USD/m<sup>3</sup>:

**Escenario 20% RAP:** Se sustituye el 20% de este material virgen por RAP.

- Costo Agregado Virgen (80%):  $\$31.49 * 0.80 = 25.19\$ \text{ USD}$ .
- Costo RAP (20%): Se considera un costo operativo de procesamiento (trituración/cribado) estimado en \$4.00/m<sup>3</sup>.
- Costo RAP aportado:  $\$0.20 \text{ m}^3 * 4.00 = 0.80\$ \text{ USD}$ .

**Resultado:** El costo del porcentaje pétreo baja de \$31.49 a \$25.99 USD.

### 5.1.2. AHORRO EN LIGANTE ASFÁLTICO (EL MAYOR IMPACTO)

El APU base contempla 150 kg de Asfalto AC-20 a un precio de \$0.33/kg, totalizando \$49.00 USD.

**Escenario 20% RAP:** Basado en el diseño Marshall, la mezcla de control demanda un 6.25% de cemento asfáltico virgen. En la alternativa sostenible, la incorporación del 20% de RAP (con un contenido de asfalto residual del 5.0%) aporta un 1.0% de ligante a la mezcla total. Esto permite disminuir la dosificación de asfalto nuevo al 5.25%. Esta sustitución parcial representa una reducción relativa del 16% en el consumo de asfalto virgen con respecto a la cantidad requerida en el diseño convencional (calculada como la relación 1.0% / 6.25%), lo que impacta directamente en la disminución del rubro más costoso de la producción.

- Nuevo consumo de AC-20:  $150 \text{ kg} * (1 - 0.16) = 126.0 \text{ kg}$ .
- Nuevo costo de AC-20:  $126.0 \text{ kg} * 0.33 = 41.58 \text{ USD}$ .

### 5.1.3. MATRIZ COMPARATIVA DE COSTOS DE PRODUCCIÓN (/M3)

Manteniendo constantes los costos de Equipo (\$10.51) y Mano de Obra (\$1.57) ya que el proceso de mezclado en planta no varía significativamente, se presenta la comparación final de costos se presenta en la Tabla 27, donde se evidencia una reducción del 13.02 % en el costo directo de producción por metro cúbico de mezcla:

**Tabla 27.** Comparación real de costos de producción.

Rubro (según APU)	Mezcla Convencional (0% RAP)	Mezcla Sostenible (20% RAP)	Diferencia (\$)
<b>Equipos</b>	\$10.51	\$10.51	\$0.00
<b>Mano de Obra</b>	\$1.57	\$1.57	\$0.00
<b>Materiales</b>			
- Asfalto AC-20	\$49.00	\$41.58	<b>\$-7.42</b>
- Agregados Vírgenes	\$31.49	\$25.19	<b>\$-6.30</b>
- RAP (Procesado)	\$0.00	\$0.80	\$0.80
- Diesel / Otros	\$6.67	\$6.67	\$0.00
<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>	<b>\$99.24</b>	<b>\$86.32</b>	<b>\$-12.92</b>
<b>PORCENTAJE DE AHORRO</b>	<b>Ref.</b>	<b>13.02%</b>	

Nota. Evaluación económica que contrasta los rubros de la mezcla frente a la alternativa óptima con 20% de RAP (Fuente: Propia, 2025).

La producción de mezcla con 20% de RAP genera un ahorro neto de \$12.92 USD por cada metro cúbico. Para una vía como la Juan Montalvo, este margen es considerable.

## 5.2. COSTOS DE TRANSPORTE Y APLICACIÓN

Se evaluó el impacto en los rubros complementarios:

Transporte de Materiales (0.28/m<sup>3</sup>-km): Al sustituir el 20% de la matriz pétreo con RAP, se disminuye proporcionalmente el volumen de agregados vírgenes que se transportará desde las canteras, las cuales generalmente se ubican a distancias considerables del centro urbano. Si bien el acopio de RAP también genera un costo de flete hacia la planta, este material se origina dentro del mismo radio urbano (sitio de fresado), lo que implica distancias de acarreo significativamente menores en comparación con los fletes de explotación de cantera. Por consiguiente, aunque existe un costo logístico asociado al reciclaje, el balance global de transporte (medido en m<sup>3</sup>-km) resulta favorable para el proyecto.

Colocación de Carpeta Asfáltica (11.46/m<sup>2</sup>): Este rubro incluye finisher, rodillo liso y neumático. Técnicamente, la mezcla con RAP muestra una trabajabilidad adecuada a 150°C. No se requiere maquinaria adicional ni tiempos extendidos de compactación, por lo que este precio unitario se mantiene invariable, asegurando que el ahorro de producción se traslade íntegramente al costo final de la obra.

## 5.3. ANÁLISIS DE DURABILIDAD Y DESEMPEÑO

La viabilidad económica debe ir de la mano con la técnica. Basado en los ensayos Marshall realizados:

- **Resistencia:** La mezcla con 20% RAP alcanzó una estabilidad promedio de 2,915 lbs, superando a la mezcla convencional (2,650 lbs). Esto implica una estructura de pavimento con mayor rigidez y resistencia a la deformación plástica

(ahuellamiento). Al incrementar la Estabilidad Marshall en un 10% respecto a la mezcla de control, la carpeta asfáltica adquiere una mayor capacidad portante para soportar las solicitaciones de carga del tráfico pesado sin sufrir desplazamientos laterales excesivos.

- **Vida Útil:** Si bien el alcance de esta investigación se limita al diseño Marshall y no incluye ensayos de desempeño fundamental (como Wheel Tracking Test o Viga a Fatiga), el cumplimiento estricto de los parámetros volumétricos y mecánicos de la norma MOP permite inferir un comportamiento idóneo en servicio.

La evaluación de los parámetros Marshall revela que la mezcla con 20% de RAP alcanza una Estabilidad de 2,915 lbs, superando holgadamente el umbral mínimo exigido para tráfico pesado (2,200 lbs), mientras que su Flujo de 11.7 (0.01") asegura que el material conserva la ductilidad necesaria. Desde la mecánica de pavimentos, este incremento en la rigidez sugiere una mayor capacidad para disipar esfuerzos de corte generados por el tráfico lento y las pendientes, propiedad asociada teóricamente a una menor susceptibilidad a deformaciones permanentes, sin incurrir en riesgos de fragilidad.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 6.1. CONCLUSIONES

Tras el desarrollo de la investigación experimental y el análisis económico aplicado al recapeo de la calle Juan Montalvo desde la calle Emilio Abad hasta la calle Cacha, en la ciudad de Azogues, se derivan las siguientes conclusiones:

- **Diseño y Caracterización de Mezclas:** Se logró caracterizar el material fresado (RAP) proveniente de la infraestructura vial de Azogues, determinando que posee una granulometría densa adecuada y un contenido de asfalto residual del 5.0%. Con base en esto, se diseñaron exitosamente tres fórmulas de trabajo mediante el método Marshall, sustituyendo el agregado virgen en porcentajes del 10%, 20% y 30%. Se estableció que, para mantener el desempeño volumétrico, fue necesario realizar un balance de ligante, reduciendo la dosificación de asfalto virgen en proporción directa al aporte del material reciclado.
- **Evaluación del Desempeño Mecánico:** El análisis comparativo evidenció que la incorporación de RAP modifica la reología de la mezcla, incrementando su rigidez.  
**Estabilidad:** La mezcla con 20% de RAP alcanzó una Estabilidad promedio de 2,915 lbs, superando en un 10% a la mezcla convencional (2,650 lbs) y excediendo el mínimo normativo para tráfico pesado.  
**Flujo:** Se registró una disminución del flujo conforme aumentó el porcentaje de reciclado (de 13.0 a 11.7), lo que indica una reducción en la ductilidad.  
**Vacíos:** La mezcla con 30% de RAP presentó un porcentaje de vacíos del 5.1%, superando el límite máximo de la norma NEVI-12, lo cual evidenció problemas de compactabilidad debido a la alta viscosidad del ligante envejecido.

- **Viabilidad Económica y Selección del Óptimo:** Se determinó que el 20% de RAP constituye el porcentaje óptimo de sustitución para las condiciones de Azogues. Esta dosificación ofrece el mejor equilibrio técnico (alta estabilidad y vacíos dentro de norma) y financiero. El Análisis de Precios Unitarios (APU) demostró que esta alternativa reduce el costo directo de producción de la mezcla asfáltica de \$99.24 USD/m<sup>3</sup> (convencional) a \$86.32 USD/m<sup>3</sup>, generando un ahorro neto del 13.02% (equivalente a \$12.92 USD/m<sup>3</sup>). Por el contrario, la opción del 30%, aunque más económica, fue descartada técnicamente por el riesgo de permeabilidad asociado a su alto contenido de vacíos.
- **Eficiencia de Recursos y Sostenibilidad Ambiental:** La incorporación del 20% de RAP permitió sustituir una quinta parte de la matriz pétreo y reducir en un 16% el consumo de ligante asfáltico virgen. Esta optimización de recursos constituye un aporte directo a la sostenibilidad ambiental del cantón Azogues, pues disminuye la presión de explotación sobre las canteras locales (áridos) y reduce la huella de carbono asociada a la refinación y transporte de cemento asfáltico, alineando el mantenimiento vial con los principios de la economía circular.
- **Calidad del Recurso Local:** Se concluye que el material fresado extraído para la calle Juan Montalvo no presenta un nivel de degradación que impida su reutilización. Los ensayos de caracterización demostraron que los agregados recuperados conservan propiedades de dureza (Abrasión Los Ángeles < 40%) y limpieza compatible con los áridos vírgenes. Esto valida que el "desecho" que actualmente gestiona el GAD Municipal posee la calidad geotécnica suficiente para ser reintegrado en la capa de rodadura de vías arteriales, siempre que se garantice su correcto procesamiento (trituration).
- **Mitigación de Pasivos Ambientales y Gestión de Residuos:** La implementación de esta tecnología aporta una solución efectiva a la problemática del RAP en la ciudad de Azogues. Al reintegrar el material fresado al ciclo de vida del pavimento, se evita su disposición final en escombreras o vertederos sanitarios, mitigando el impacto visual y la contaminación de suelos asociada a la

acumulación de desechos viales. Esto valida un modelo de gestión que no solo preserva recursos naturales (agregados vírgenes), sino que elimina pasivos ambientales urbanos, transformando un desecho en un activo de infraestructura.

- **Conclusión General:** El uso de pavimento reciclado en la calle Juan Montalvo es técnica y financieramente viable. La implementación de la mezcla con 20% de RAP permite mejorar la capacidad de soporte de la vía frente a las cargas del transporte público (mayor Estabilidad Marshall) y optimizar el presupuesto municipal, validando la hipótesis de que es posible transitar hacia un modelo de mantenimiento vial más sostenible y eficiente.

## 6.2. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados validados, se proponen los siguientes lineamientos para la implementación de esta tecnología en el cantón Azogues:

- **Criterios de Selección por Tipo de Vía:**

Para vías arteriales de alto tráfico y pendientes pronunciadas (como la calle Juan Montalvo), se recomienda limitar el uso de RAP al 20%. Este porcentaje garantiza la resistencia necesaria al ahuellamiento por frenado de buses, sin riesgo de agrietamiento prematuro.

Para vías residenciales o de tráfico ligero: Se considera técnicamente factible incrementar el porcentaje de RAP hasta un rango del 25% - 30% para maximizar el ahorro económico, dado que las solicitudes de carga por fatiga son menores. Sin embargo, debido a que en este estudio el 30% presentó problemas de compactabilidad (altos vacíos), su implementación en este porcentaje debe estar condicionada obligatoriamente al uso de agentes rejuvenecedores o asfaltos de baja viscosidad. Estos aditivos permitirán recuperar la ductilidad del

ligante envejecido, facilitando la densificación de la mezcla para cerrar los vacíos y garantizar la impermeabilidad requerida ante la alta pluviosidad de la zona.

- **Manejo Crítico de la Humedad:** Dada la alta pluviosidad de la región, es importante techar los acopios de RAP en la planta de asfalto. El RAP tiende a retener humedad (3-5%); si se introduce húmedo al proceso, el consumo de combustible para el secado se eleva, anulando el ahorro económico y provocando problemas de adherencia.
- **Control de Temperatura en Obra:** Debido a la mayor viscosidad del ligante reciclado, la mezcla con RAP pierde trabajabilidad más rápido que una mezcla virgen al enfriarse. Se recomienda que la Dirección de Obras Públicas exigir que la compactación inicie inmediatamente tras el extendido y no se permita continuar si la temperatura de la mezcla desciende del rango de 125°C - 130°C, para asegurar la densidad requerida. Debido a la mayor viscosidad del ligante envejecido en la mezcla con RAP, esta tiende a rigidizarse más rápido al enfriarse, lo que exige un control térmico estricto en pista.
- **Procesamiento del Material:** No se debe alimentar el RAP directamente a la planta. Se recomienda someter el material fresado (RAP) a un proceso de clasificación o zarandeo mecánico. El objetivo principal de esta etapa es separar y disgregar los grumos o aglomerados de asfalto envejecido para obtener un material suelto y uniforme.
- **Institucionalización de la Normativa:** Se sugiere al GAD Municipal de Azogues incluir en los Términos de Referencia (TDR) de futuros contratos de mantenimiento vial la cláusula de "Uso Preferente de Materiales Reciclados", exigiendo un contenido mínimo del 15% de RAP. Esta exigencia deberá estar condicionada al estricto cumplimiento de todos los parámetros volumétricos, mecánicos y de durabilidad establecidos en la normativa o en las especificaciones técnicas vigentes para mezclas asfálticas convencionales. De

---

esta manera, se promueve la sostenibilidad sin comprometer los estándares de calidad del pavimento.

## 7. REFERENCIAS

- AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alvarado, M. (2019). *Diseño y comportamiento estructural de pavimentos flexibles*. Loja: Universidad Técnica Particular de Loja.
- Álvarez, F. (2024). *Ip proyectos*. Obtenido de <https://ipcproyectos.co/2024/07/08/patologias-pavimentos-flexibles/>
- Asphalt Institute. (2007). *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types (MS-2)* (7 ed.). Lexington.
- ASTM. (2020). ASTM D6926 Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus. American Society of Testing Materials.
- Buitrago, J., & González, A. (2016). Caracterización del rap e identificación de su influencia en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente. Bogotá. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/fb3436ae-8e44-47c3-b4bd-8b994b0c6e17/content>
- Campoverde, D., & Uyaguari, P. (2021). Análisis comparativo de alternativas de rehabilitación vial en Guangarcucho–Jadán mediante el uso de material fresado (RAP) y métodos convencionales. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Cuelho, E., Mokwa, R., & Akin, M. (2006). Preventive maintenance treatments of flexible pavements: a synthesis of highway practice. doi:dot\_24852\_DS1.pdf
- Espinoza, D., & Guayaquil, C. (2023). *Diseño de una mezcla asfáltica en frío utilizando rap (pavimento asfáltico reciclado) obtenido del aeropuerto de Quito, adicionando 2%, 3% y 4% de polvo de llanta de avión*. Quito: PUCE.
- FHWA. (2016). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. Obtenido de <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/11021/>
- Forero, P. (2021). *UNIMINUTO*. Obtenido de guía para el uso del deflectómetro de impacto (FWD)
- González Herrera, J. A. (2013). *Manual de conservación vial para pavimentos flexibles*. Quito: Editorial Escuela Politécnica del Ejército.
- Herver, J. (2014). *Evaluación del comportamiento mecánico de bases recicladas estabilizadas con RAP bajo criterios Marshall e INVIAS 461-13*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Huang, Y. H., Bird, R., & Heidrich, O. (2005). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 213-229.
- INVIAS. (2012). Pavimentos asfálticos. En I. N. Vías. Bogotá, Colombia.
- Johnson, P., & Brown, R. (2019). Energy use and emissions in aggregate transportation for pavement rehabilitation. *Transportation Research Record*, 45-56.
- Lara, L. (2018). *Guía de prácticas de laboratorio de hormigones*. Quito: PUCE.

- MOP. (2002). *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes*. Quito: MOP-001-F-2002.
- MOPC. (2016). *Ministerio de obras públicas y comunicaciones*. Obtenido de Departamento de Administración y Evaluación de pavimentos: <https://www.mopc.gob.do/media/2335/sistema-identifici%C3%B3n-fallas.pdf>
- Peñaranda, S., & Sánchez, L. (2021). *Universidad francisco de paula santander ocaña*. Obtenido de [https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/bitstream/handle/20.500.14167/548/Trabajo%20de%20grado%20%20Monograf%C3%ada%20mezclas%20asf%3a1lticas%20en%20caliente%20y%20en%20fr%C3%ado%20con%20RAP%20-%20Est%C3%a1ndar\\_removed.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/bitstream/handle/20.500.14167/548/Trabajo%20de%20grado%20%20Monograf%C3%ada%20mezclas%20asf%3a1lticas%20en%20caliente%20y%20en%20fr%C3%ado%20con%20RAP%20-%20Est%C3%a1ndar_removed.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Rivero, M. (2018). *Diseño de una mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología superpave con la incorporación de 25% de pavimento asfáltico reciclado (RAP), más ensayos de rueda de hamburgo y módulo de rigidez*. Chile.
- Rojas, T. (2024). *Universidad César Vallejo*.
- Rosero, J. (2025). Evaluación de propiedades mecánicas y durabilidad de mezclas asfálticas recicladas modificadas con caucho. Ambato, Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/62694404-a589-4bb3-9f5a-2b13d7ae8f1d/content>
- The Asphalt Institute. (1998). Obtenido de <https://archive.org/details/TheAsphaltHandbookTheAsphaltInstitute1988/page/n364/mode/1up>
- Mathew, T. V. (2019). Introduction to Transportation Engineering [Notas de curso]. Indian Institute of Technology Bombay. <https://www.civil.iitb.ac.in/tvm/nptel/>