

Artículo de Investigación

Innovación en mezclas asfálticas en frío incorporando RAP y polvo de llanta de avión del aeropuerto de Quito

Innovation incold asphalt mixes incorporating RAP and aircraft tire dust from Quito airport

Wilson Cando Tipán¹: Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.

wocando@puce.edu.ec

Jorge Jácome Iza: Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.

jajacomei@puce.edu.ec

Fecha de Recepción: 09/07/2024

Fecha de Aceptación: 01/11/2024

Fecha de Publicación: 06/01/2025

Cómo citar el artículo

Cando Tipán, W. y Jácome Iza, J. (2025). Innovación en mezclas asfálticas en frío incorporando RAP y polvo de llanta de avión del aeropuerto de Quito [Innovation incold asphalt mixes incorporating RAP and aircraft tire dust from Quito airport]. *European Public & Social Innovation Review*, 10, 01-20. <https://doi.org/10.31637/epsir-2025-1244>

Resumen:

Introducción: Este estudio optimiza mezclas asfálticas en frío utilizando RAP (Material Asfáltico Reciclado) y polvo de llanta del Aeropuerto de Quito con el aditivo KAOAMIN12, buscando una solución sostenible para el mantenimiento vial que reduzca residuos y costos, al mismo tiempo que mejora el desempeño del pavimento. **Metodología:** La investigación fue de tipo experimental con un diseño factorial para optimizar la mezcla asfáltica en frío. Se variaron los porcentajes de RAP y polvo de llanta, evaluando las propiedades mecánicas mediante el ensayo Marshall, analizando estabilidad, flujo y resistencia para determinar la proporción óptima de materiales reciclados. **Resultados:** Los resultados indicaron que la estabilidad de la mezcla asfáltica disminuye a medida que aumenta el porcentaje de polvo de llanta. La máxima estabilidad (1750 lb) se obtuvo con un 1% de polvo, mientras que un 2% resultó en la menor estabilidad (1283.33 lb). La incorporación de RAP y polvo de llanta con KAOAMIN12 mostró una reducción en costos y residuos, mejorando el desempeño del

¹ Autor Correspondiente: Wilson Cando Tipán. Pontificia Universidad Católica del Ecuador (Ecuador).

pavimento. **Discusión y Conclusiones:** La investigación demuestra la viabilidad de usar materiales reciclados, como RAP y polvo de llanta, en mezclas asfálticas en frío, optimizando el desempeño del pavimento y contribuyendo a la sostenibilidad en el mantenimiento vial.

Palabras clave: RAP; polvo de llanta; KAOAMIN12; mezcla asfáltica en frío; sostenibilidad; pavimento reciclado; ensayo Marshall; aditivo.

Abstract

Introduction: This study optimises cold asphalt mixes using RAP (Recycled Asphalt Material) and tyre dust from Quito Airport with KAOAMIN12 additive, seeking a sustainable solution for road maintenance that reduces waste and costs, while improving pavement performance.

Methodology: The research was experimental with a factorial design to optimise the cold asphalt mix. The percentages of RAP and tyre dust were varied, and mechanical properties were evaluated using the Marshall test, analysing stability, flow and strength to determine the optimum proportion of recycled materials. **Results:** The results indicated that the stability of the asphalt mixture decreases as the percentage of tyre dust increases. The highest stability (1750 lb) was obtained with 1% dust, while 2% resulted in the lowest stability (1283.33 lb). The incorporation of RAP and tyre dust with KAOAMIN12 showed a reduction in cost and waste, improving pavement performance. **Discussion and Conclusions:** The research demonstrates the feasibility of using recycled materials, such as RAP and tyre dust, in cold asphalt mixes, optimising pavement performance and contributing to sustainability in road maintenance.

Keywords: RAP; tire powder; KAOAMIN12; cold asphalt mixture; sustainability; recycled pavement; Marshall test; additive.

1. Introducción

El actual programa de mantenimiento vial implementado por Quiport produce una cantidad considerable de polvo de llanta y Pavimento Asfáltico Reciclado, en adelante RAP, lo que ocasiona problemas de espacio y contaminación en las instalaciones. En el caso particular del Aeropuerto de Quito, la generación anual de una gran cantidad de RAP sin un destino definido puede tener consecuencias negativas a largo plazo, como la contaminación de suelos y aguas subterráneas.

Con el propósito de abordar esta problemática de manera efectiva, se plantea la utilización de una mezcla asfáltica en frío que incorpora RAP, polvo de llanta, aditivo de adherencia y emulsión asfáltica en las vías secundarias cercanas al aeropuerto. Esta iniciativa busca no solo reutilizar materiales reciclados, reducir costos y promover la sostenibilidad, sino también cumplir con el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 11, referente a ciudades y comunidades sostenibles. En Ecuador, la gestión inadecuada de grandes volúmenes de RAP plantea desafíos ambientales debido a la falta de un plan estructurado para su reutilización.

Quiport (2021), menciona que esta iniciativa no solo representa una solución innovadora para el mantenimiento de las vías, sino que también refleja el compromiso de la corporación con el desarrollo sostenible y la preservación del medio ambiente. De esta manera, se busca integrar prácticas sostenibles en las operaciones del aeropuerto, contribuyendo a la construcción de una ciudad más sostenible y segura para sus habitantes y visitantes.

Además, se destaca que la producción convencional de mezclas asfálticas en caliente conlleva un elevado consumo energético, mientras que la incorporación de RAP en mezclas en frío puede resultar en una reducción significativa de costos y del impacto ambiental.

“El uso de RAP y polvo de llanta de avión en la pavimentación puede tener un impacto significativo en la reducción de residuos y en la mejora de la calidad ambiental. Estudiar y medir el desempeño de estos materiales en el proyecto puede generar información valiosa para futuras iniciativas sostenibles en el sector de la construcción” Daza (2021). Las preocupaciones por la conservación del medio ambiente a nivel mundial hacen que las mezclas en frío representen una alternativa viable pues la producción de estas mezclas implica un ahorro en el consumo de energía, así como una reducción en la generación de vapores tóxicos y polvo.

El pavimento asfáltico reciclado tiene como ventaja la versatilidad ya que permite usar una gran variedad de agregados empujados y se puede usar en diferentes condiciones ambientales. Por lo cual, en el presente trabajo de titulación busca desarrollar una mezcla asfáltica en frío, la cual use como agregado grueso al contenido RAP extraído del fresado de la pista de aterrizaje y a su vez añadir polvo de llanta de avión; adicionalmente, a estos materiales se añade un aditivo.

El fin es encontrar el porcentaje adecuado de polvo de llanta de avión para una mezcla asfáltica en frío a través del ensayo de Marshall, la cual use materiales totalmente reciclados, aumentando el aditivo de adherencia KAOAMIN 12, para lograr resultados óptimos de estabilidad.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Desarrollar una mezcla asfáltica en frío utilizando RAP, añadiendo polvo de llanta de avión en diferentes porcentajes (1%, 1.5%, 2%, y 2.5%) y un aditivo de adherencia KAOAMIN 12, a través del ensayo Marshall con el fin de evidenciar resultados en estabilidad.

1.1.2. Objetivos específicos

Identificar el porcentaje óptimo de polvo de llanta de avión de entre todos los porcentajes propuestos que maximice la estabilidad de la mezcla asfáltica en frío, mediante el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo Marshall.

Evaluar el impacto del aditivo de adherencia KAOAMIN 12 en la estabilidad de la mezcla asfáltica en frío, con los diferentes porcentajes del polvo de llanta de avión.

Analizar la combinación óptima de porcentaje de RAP, polvo de llanta de avión y aditivo de adherencia para establecer el tipo de vía según los resultados obtenidos.

1.2. Hipótesis

Al incorporar RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado), polvo de llanta de avión y el aditivo de adherencia KAOAMIN12 en el diseño de mezclas asfálticas en frío, se logrará una combinación que mejore la resistencia y sostenibilidad de las vías pavimentadas cerca del Aeropuerto de Quito.

2. Metodología

Este estudio adoptó un enfoque experimental para optimizar el diseño de mezclas asfálticas en frío utilizando RAP, polvo de llanta de avión y el aditivo KAOMIN 12.

Esta metodología permitió una evaluación sistemática de las propiedades de las mezclas asfálticas en frío, facilitando la identificación de la combinación óptima de materiales reciclados y aditivos para su aplicación en vías cercanas al Aeropuerto de Quito.

Esta investigación, además, ofrece una exposición exhaustiva del diseño del estudio, proporcionando detalles meticulosos sobre los procedimientos y materiales empleados para la recolección de datos, incluyendo cualquier instrumento o tecnología específica utilizada, y detalla los métodos de análisis de datos aplicados, desde las técnicas estadísticas hasta el software de análisis, asegurando que otros investigadores puedan replicar el estudio o evaluar su rigor metodológico.

2.1. Caracterización de materiales

La caracterización exhaustiva de los materiales constituyó la base fundamental de este estudio. El proceso comenzó con un análisis granulométrico detallado del RAP siguiendo rigurosamente la norma American Society for Testing and Materials, en adelante ASTM C136. Este procedimiento implicó el uso de una serie de tamices normalizados, desde el tamiz de 25.4 mm (1") hasta el tamiz N°200 (0.075 mm). La muestra de RAP se secó previamente en un horno a 110°C hasta alcanzar un peso constante. Luego, se tamizó mecánicamente durante 10 minutos, complementando con tamizado manual para asegurar una separación completa de las partículas. Los pesos retenidos en cada tamiz se registraron con precisión, calculando los porcentajes retenidos y acumulados, así como el porcentaje que pasa por cada tamiz. Estos datos se utilizaron para generar una curva granulométrica que permitió visualizar la distribución del tamaño de partículas del RAP.

La determinación de la gravedad específica de los agregados se realizó mediante los métodos ASTM C127 para agregados gruesos y ASTM C128 para agregados finos. Para los agregados gruesos, se sumergió la muestra en agua durante 24 horas, luego se secó superficialmente y se pesó en aire y en agua. Para los agregados finos, se utilizó el método del picnómetro, saturando la muestra y determinando su peso en diferentes condiciones. Estos ensayos permitieron calcular la gravedad específica aparente, la gravedad específica en condición saturada superficialmente seca (SSS) y la absorción de los agregados.

Adicionalmente, se realizó una extracción cuantitativa del aglutinante asfáltico del RAP utilizando el método de ignición según American Association of State Highway and Transportation Officials, en adelante AASHTO T308-08. Este proceso implicó calentar una muestra de RAP en un horno de ignición a temperaturas entre 535°C y 545°C hasta que el cambio en la masa no excediera el 0.01% en un período de 3 minutos. La diferencia entre el peso inicial y final de la muestra permitió determinar el contenido de asfalto residual en el RAP, un dato crucial para el diseño de la mezcla.

2.2. Determinación del porcentaje de emulsión teórico

Para estimar el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica en la mezcla, se aplicó la fórmula propuesta por el Instituto del Asfalto:

$$P = 0.0035a + 0.045b + kc + F$$

Donde:

P: Proporción de cemento asfáltico en relación con el peso total de la mezcla.

a: Porcentaje de agregado retenido en el tamiz N°8.

b: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz N°8 y queda retenido en el N°200.

c: Porcentaje de agregado que pasa el tamiz N°200.

k: Factor relacionado con la cantidad de finos (varía entre 0.15 y 0.18).

F: Factor de absorción del agregado (varía entre 0 y 2).

Esta fórmula se aplicó utilizando los datos obtenidos del análisis granulométrico y las características de absorción determinadas en los ensayos de gravedad específica. El resultado proporcionó una estimación inicial del contenido óptimo de emulsión, que sirvió como punto de partida para el diseño de la mezcla.

2.3. Caracterización del polvo de llanta

El polvo de llanta de avión, componente innovador en esta investigación, se sometió a un análisis granulométrico detallado según ASTM D546. El procedimiento implicó secar el material a 110°C hasta peso constante, luego tamizarlo a través de una serie de mallas que incluían los tamices de 25.4 mm, 19.1 mm, 9.52 mm, 4.75 mm, 2.36 mm, 0.3 mm y 0.075 mm. El proceso de tamizado se realizó mecánicamente durante 10 minutos, seguido de un tamizado manual para asegurar una separación completa de las partículas.

Los resultados se presentaron en forma de tabla, mostrando el peso retenido en cada tamiz, el porcentaje retenido, el porcentaje acumulado y el porcentaje que pasa. Estos datos se utilizaron para generar una curva granulométrica que permitió visualizar la distribución del tamaño de las partículas del polvo de llanta. El análisis reveló que la mayor concentración de partículas se encontraba entre los tamices N°50 y N°200, lo cual es crucial para entender cómo este material podría interactuar con los otros componentes de la mezcla asfáltica.

2.4. Evaluación de la emulsión asfáltica CSS-1h

La emulsión asfáltica CSS-1h, seleccionada por sus propiedades adecuadas para mezclas en frío, se sometió a una serie de ensayos rigurosos siguiendo la normativa MOP-001-F-2002:

2.4.1. Viscosidad Saybolt Furol (NTE INEN 1981, ASTM D244)

Se midió a 25°C, determinando el tiempo que tarda 60 ml de emulsión en fluir a través de un orificio calibrado. Este ensayo es crucial para evaluar la consistencia de la emulsión y su capacidad de mezclarse con los agregados.

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

Se realizó sumergiendo electrodos en la emulsión y aplicando una corriente eléctrica. La formación de una película gruesa en el cátodo confirmó la naturaleza catiónica de la emulsión, lo cual es importante para su interacción con los agregados.

2.4.3. Asentamiento a 5 días y estabilidad de almacenamiento a 24 horas (ASTM D6930, INEN 910/909)

Estos ensayos evaluaron la tendencia de las partículas de asfalto a sedimentarse. Se llenaron probetas con emulsión y se dejaron reposar durante los períodos especificados, luego se

analizaron muestras de la parte superior e inferior para determinar la diferencia en concentración de asfalto.

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

Se calentaron muestras de emulsión a 163°C durante 2 horas para evaporar los componentes volátiles. El residuo se pesó para determinar el contenido de asfalto en la emulsión.

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

Se pasó una muestra de emulsión a través de un tamiz N°20 para evaluar la presencia de partículas grandes o aglomerados que pudieran afectar su desempeño.

2.4.6. Penetración (ASTM D5, INEN 918)

Se midió la distancia que una aguja estandarizada penetra en una muestra de emulsión bajo condiciones específicas de tiempo (5 segundos), temperatura (25°C) y carga (100 g). Este ensayo evalúa la consistencia de la emulsión.

2.4.7. Ductilidad (ASTM 133, INEN 916)

Se estiró una muestra de emulsión a una velocidad y temperatura controladas hasta su ruptura, midiendo la distancia de elongación. Este ensayo evalúa la capacidad de la emulsión para deformarse sin romperse.

2.5. Diseño de mezclas asfálticas según el método Marshall

En Ecuador, no hay una norma vigente para diseño de mezclas asfálticas en frío con material reciclado. La MOP 2002 recomienda el Manual Básico de Emulsiones Asfálticas, siguiendo el ensayo Marshall (ASTM D 1559) para conocer la estabilidad y fluencia de especímenes cilíndricos. Se evaluaron cuatro casos: RAP con polvo de llanta (1%, 15%, 2%, y 25%), emulsión y aditivo; RAP con emulsión; RAP con polvo de llanta (porcentaje óptimo) y emulsión; y RAP con emulsión y aditivo.

2.5.1. Estabilidad y flujo

La estabilidad mide la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir deformaciones bajo cargas aplicadas. El ensayo Marshall aplica una carga a los especímenes cilíndricos hasta que fallan, determinando la estabilidad de la mezcla.

2.5.2. Elaboración de briquetas

Se prepararon briquetas con diferentes pesos de RAP (900, 1000 y 1100 g), determinando 900 g como el peso óptimo. Se evaluaron diferentes porcentajes de agua (1%, 2%, y 3%) para la pre-entrevista, encontrando que el 2% era óptimo. Se realizó la fusión de la emulsión con el aditivo KAOAMIN 12 al 1%, mezclando lentamente para evitar conglomerados.

2.5.3. Preparación de la mezcla y moldes

Los 900 g de RAP se mezclaron con 2% de agua y luego con 4% de emulsión. Se añadió el polvo de llanta y la mezcla se vertió en moldes, compactándose con un martillo de compactación. Se dejaron reposar por 24 horas antes de ser desmoldadas.

2.5.4. Evaluación de especímenes

Se evaluaron briquetas con diferentes porcentajes de RAP, polvo de llanta y emulsión, siguiendo los pasos mencionados. También se evaluaron briquetas solo con RAP y emulsión, y con RAP, emulsión y polvo de llanta.

Grupo 1

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica, 1% de caucho y aditivo.

Tabla 1

Porcentaje de material respecto al RAP 1%

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
1% Polvo de llanta	9 gr
4% Emulsión Asfáltica	35.64 gr
Aditivo KAOAMIN 12	0.36 gr

Fuente: Elaboración propia.

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica 1.5% de caucho y aditivo.

Tabla 2.

Porcentaje de material respecto al RAP 1,5%

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
1.5% Polvo de llanta	12 gr
4% Emulsión Asfáltica	35.64 gr
Aditivo KAOAMIN 12	0.36 gr

Fuente: Elaboración propia.

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica, 2% de caucho y aditivo

Tabla 3.

Porcentaje de material respecto al RAP 2%

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
2% Polvo de llanta	18 gr
4% Emulsión Asfáltica	35.64 gr
Aditivo KAOAMIN 12	0.36 gr

Fuente: Elaboración propia.

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica, 2.5% de caucho y aditivo.

Tabla 4.

Porcentaje de material respecto al RAP 2,5%

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
2.5% Polvo de llanta	22.5 gr
4% Emulsión Asfáltica	35.64 gr
Aditivo KAOAMIN 12	0.36 gr

Fuente: Elaboración propia.

Grupo 2

- Para briqueta con RAP y emulsión.

Tabla 5.

Porcentaje de material respecto al RAP y emulsión asfáltica

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
4% Emulsión Asfáltica	36 gr

Fuente: Elaboración propia.

Grupo 3

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica y polvo de llanta (optimo 1%).

Tabla 1.

Porcentaje de material respecto al RAP, emulsión asfáltica y polvo de llanta

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
1% Polvo de llanta	9 gr
4% Emulsión Asfáltica	36 gr

Fuente: Elaboración propia

Grupo 4

- Para briqueta con RAP, emulsión asfáltica y aditivo KAOMIN 12

Tabla 2

Porcentaje de material respecto al RAP, emulsión asfáltica y aditivo KAOMIN 12

Porcentaje de material respecto al RAP	
Material RAP	900 gr
2% Agua de pre-envuelta	18 gr
4% Emulsión Asfáltica	35.64 gr
Aditivo KAOAMIN 12	0.36 gr

Fuente: Elaboración propia.

2.6. Gravedad específica Bulk

Se midieron espesores y anchos de cada briqueta, y se determinaron pesos en aire, sumergidos y en superficie saturada seca para calcular la gravedad específica bulk.

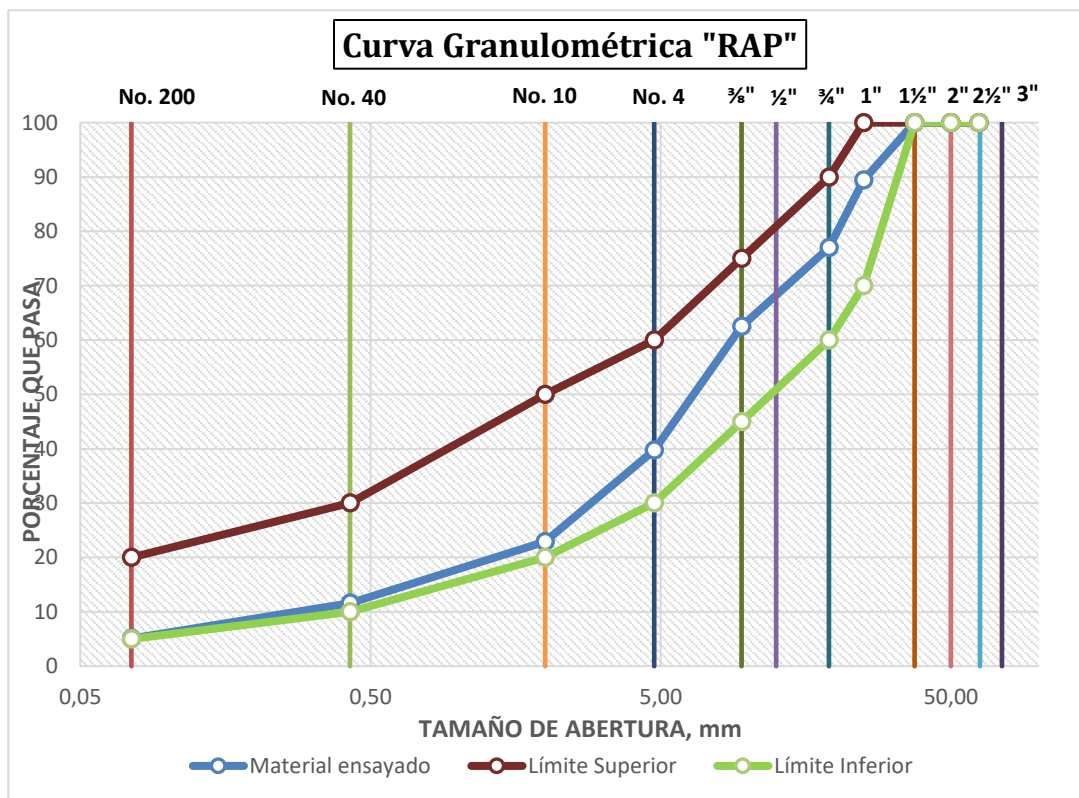
3. Resultados

3.1. Granulometría

Se realizó la granulometría del pavimento asfáltico reciclado (RAP) y el polvo de llanta para obtener la gradación del material. Los resultados mostraron que el material se encuentra dentro de los límites especificados en la MOP-2002. La granulometría del RAP se ajustó para partículas de 3/4" debido a las condiciones de laboratorio.

Figura 1

Curva Granulométrica RAP



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Gravedad Específica de los Agregados

Se determinó la gravedad específica del material grueso y fino del RAP, siguiendo las normas ASTM C 127 y ASTM C 128. Los resultados obtenidos son:

3.2.1. Material Grueso - RAP (Retenido Tamiz No. 4)

Gravedad Específica Bulk: 2.133
Gravedad Específica Aparente: 2.181
Porcentaje de Absorción: 1.01%

3.2.2. Material Fino - RAP (Pasante del Tamiz No. 4)

Gravedad Específica Bulk: 2.313
Gravedad Específica Aparente: 2.365
Porcentaje de Absorción: 0.95%

3.3. Extracción de Bitumen

Se realizó la extracción de bitumen por el método de ignición, obteniendo un porcentaje de asfalto final del 3.14% (anal_resul).

3.4. Porcentaje Óptimo de Emulsión para el RAP

Se determinó el porcentaje óptimo de emulsión para el RAP con un porcentaje de residuo asfáltico del 62%, utilizando factores relacionados con el pasante Tamiz No. 200 y la absorción del material granular. El porcentaje de emulsión efectiva fue de 3.98%.

3.5. Ensayo Marshall

El ensayo Marshall se utilizó para evaluar la estabilidad y el flujo de las mezclas asfálticas con diferentes proporciones de RAP y polvo de llanta de avión. Se realizaron pruebas en estado seco y húmedo para comprender mejor el comportamiento de las mezclas bajo diversas condiciones.

3.5.1. Grupo 1: Briquetas con RAP, Emulsión Asfáltica, 1%, 1.5%, 2%, y 2.5% de Polvo de Llanta y Aditivo

Estado Seco:

- 1% de Polvo de Llanta:

Tabla 3.

Estado Seco 1%

ESTADO SECO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
1%	1750 lb	1750,00 lb
	1700 lb	
	1800 lb	

Fuente: Elaboración propia.

Estabilidad Promedio: 1750 lb

- 1.5% de Polvo de Llanta:

Tabla 4.

Estado seco 1.5%

ESTADO SECO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
1,5%	1600 lb	1616,67 lb
	1660 lb	
	1590 lb	

Fuente: Elaboración propia.

Estabilidad Promedio: 1616.67 lb

- 2% de Polvo de Llanta:

Tabla 5.

Estado seco 2%

ESTADO SECO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
2%	1350 lb	1283,33 lb
	1300 lb	
	1200 lb	

Fuente: Elaboración propia.

Estabilidad Promedio: 1283.33 lb

- 2.5% de Polvo de Llanta:

Tabla 6.

Estado seco 2.5%

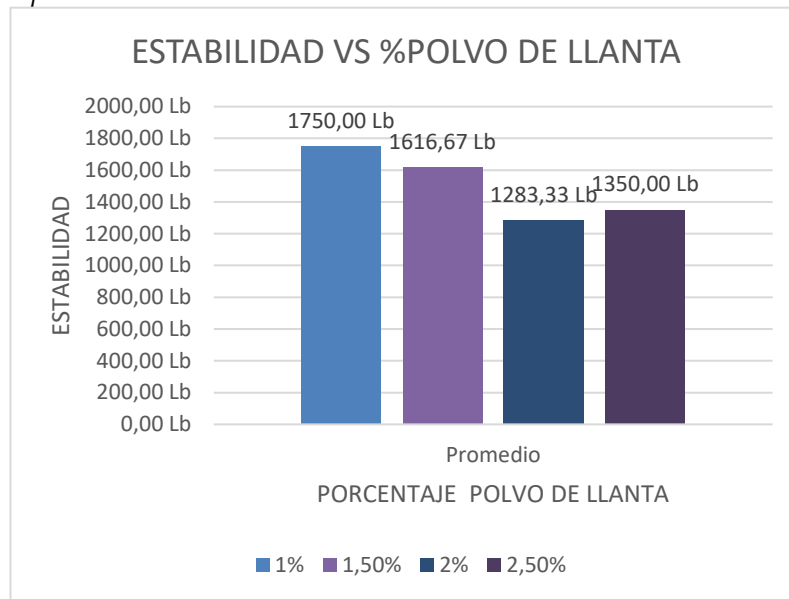
ESTADO SECO		
Briquetas Polvo llanta	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
2,5%	1350 lb	1350,00 lb
	1350 lb	
	1350 lb	

Fuente: Elaboración propia.

Estabilidad Promedio: 1350 lb

Figura 2.

Estabilidad vs % de polvo de llanta



Fuente: Elaboración propia.

La gráfica presentada muestra la relación entre la estabilidad y el porcentaje de polvo de llanta incorporado en las mezclas asfálticas. En el eje vertical se mide la estabilidad en libras (lb), mientras que en el eje horizontal se presentan los diferentes porcentajes de polvo de llanta utilizados: 1%, 1.5%, 2% y 2.5%.

- 1% de polvo de llanta: Se observa una estabilidad promedio de 1750.00 Lb, la más alta entre los cuatro porcentajes evaluados.
- 1.5% de polvo de llanta: Presenta una estabilidad promedio de 1616.67 Lb.
- 2% de polvo de llanta: Muestra una estabilidad promedio de 1283.33 Lb, siendo la más baja entre las muestras analizadas.
- 2.5% de polvo de llanta: Tiene una estabilidad promedio de 1350.00 Lb.

3.5.2. Grupo 2: Briquetas con RAP y Emulsión Asfáltica

Estado Seco:

4.00% de Emulsión:

Tabla 7

Estado seco con emulsión al 4.00%

ESTADO SECO		
Solo con Emulsión	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
4,00 %	1490 lb 1400 lb 1500 lb	1463,33 lb

Fuente: Elaboración propia.

Estabilidad Promedio: 1463.33 lb.

3.5.3. Grupo 3: Briquetas con RAP, Emulsión Asfáltica y Polvo de Llanta Óptimo (1%)

Estado Seco:

Tabla 8.

Estado seco con emulsión al 4.00%

ESTADO SECO		
Briquetas Polvo de llanta optimo	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
1%	1480 lb 1400 lb 1450 lb	1443,33 lb

Fuente: Elaboración propia.

Estabilidad Promedio: 1443.33 lb.

3.5.4. Grupo 4: Briquetas con RAP, Emulsión Asfáltica y Aditivo KAOMIN 12

Estado Seco:

Tabla 9.

RAP, emulsión asfáltica y aditivo KAOMIN 12 en estado seco

ESTADO SECO		
Emulsión 35.64 gr con aditivo 0.36 gr	(Estabilidad Corregida)	Promedio Estabilidad
4,00 %	1200 lb 1200 lb 1350 lb	1250,00 lb

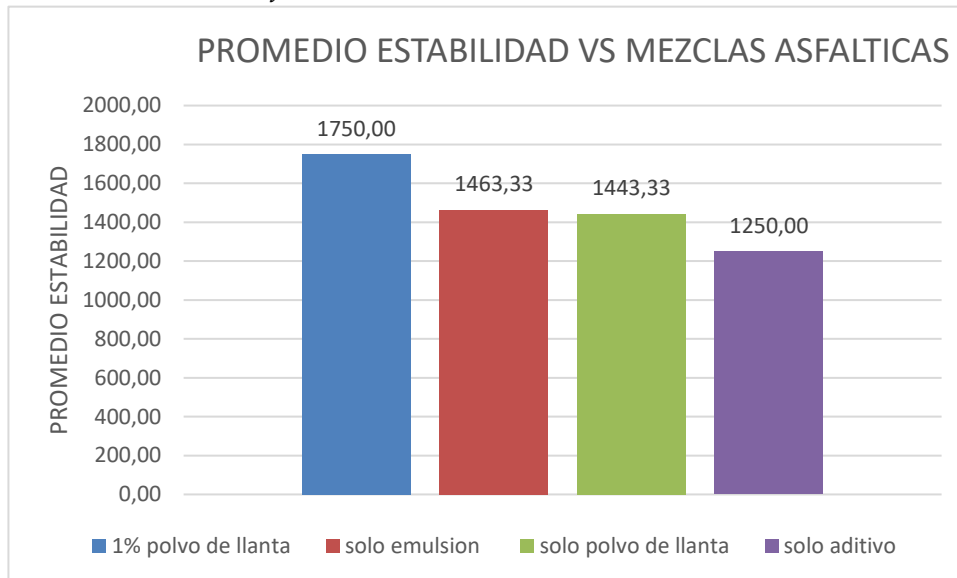
Fuente: Elaboración propia.

Estabilidad Promedio: 1250 lb.

3.5.5. Gráfica de Estabilidad vs Porcentaje de Polvo de Llanta

Figura 3.

Promedio estabilidad vs mezcla asfáltica



Fuente: Elaboración propia.

Esta grafica se realizó una vez que se obtuvo todos los cálculos de la estabilidad promedio en seco para el primer resultado es del grupo 1 y utilizamos el promedio de la briqueta con el 1% de polvo de llanta ya que es el mayor de este grupo, para el segundo resultado solo emulsión es el diseño de la briqueta que está conformada por RAP, agua de pre-enuelta y emulsión, en el tercer resultado solo polvo de llanta o grupo 3 se utilizó el porcentaje de polvo de llanta optimo que fue el 1% con RAP, agua de pre-enuelta y emulsión y el ultimo valor solo aditivo es la emulsión más el aditivo KAOAMIN12 con RAP y agua de pre-enuelta.

Análisis de resultados de estabilidad con la normativa MS-14.

Tabla 15.

Verificación de estabilidad con la normativa MS-14

Verificación de la estabilidad con la normativa MS-14			
	Estabilidad Promedio	Especificación MS-14 (Trafico liviano)	
Grupo 1			
Porcentaje de llanta	(lb)	Min (lb)	Cumple
1% Polvo de llanta y aditivo	1750	500	SI
1,5% Polvo de llanta y aditivo	1616,67		SI
2% Polvo de llanta y aditivo	1283,33		SI
2,5% Polvo de llanta y aditivo	1350		SI
Grupo 2			
Solo RAP y Emulsión	1463,33	500	SI

Grupo 3			
Solo %polvo llanta optimo	1443,33	500	SI
Grupo 4			
Solo aditivo KAOMIN 12	1250,00	500	SI

Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

4.1. La Granulometría del Material

Los resultados de granulometría mostraron que el pavimento asfáltico reciclado (RAP) cumple con los límites establecidos por la MOP-2002. La gradación del material es adecuada para su uso en mezclas asfálticas en frío.

4.2. Estabilidad de las Briquetas

4.2.1. Polvo de Llanta

La incorporación del polvo de llanta mostró una relación inversa entre el porcentaje de polvo y la estabilidad de las mezclas. El 1% de polvo de llanta presentó la mayor estabilidad (1750 lb), mientras que mayores porcentajes redujeron la estabilidad de las mezclas.

4.2.2. Emulsión y RAP

Las briquetas con solo RAP y emulsión presentaron una estabilidad media (1463.33 lb en seco y 1920 lb en húmedo), lo que demuestra una adecuada interacción entre el RAP y la emulsión asfáltica.

4.2.3. KAOMIN12

Las briquetas con el aditivo KAOMIN12 mostraron un aumento significativo en estabilidad en estado húmedo (1873.33 lb) comparado con el estado seco (1250 lb), indicando una mejora en la resistencia a la humedad.

4.3. Comparación con Normativa MS-14

Todas las mezclas, incluyendo las que contienen polvo de llanta y KAOAMIN12, cumplieron con la especificación MS-14 para tráfico liviano, que requiere un mínimo de 500 lb de estabilidad.

4.4. Uso de Polvo de Llanta

Los estudios previos han demostrado que el polvo de llanta puede mejorar ciertas propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, pero los resultados varían según la proporción utilizada. Este estudio confirma que un 1% de polvo de llanta es óptimo para mejorar la estabilidad, mientras que porcentajes mayores pueden ser perjudiciales.

4.5. Emulsiones Asfálticas y RAP

La literatura existente sugiere que las mezclas de RAP con emulsiones asfálticas pueden recuperar parte de las propiedades del asfalto original. Los resultados de este estudio están alineados con estos hallazgos, mostrando que el RAP mezclado con emulsión proporciona una estabilidad adecuada tanto en seco como en húmedo.

4.6. Aditivos en Mezclas Asfálticas

La adición de aditivos como KAOAMIN12 se ha estudiado para mejorar la durabilidad y resistencia a la humedad de las mezclas asfálticas. Este estudio contribuye a la evidencia de que KAOAMIN12 puede aumentar significativamente la estabilidad en condiciones húmedas.

4.7. Sostenibilidad y Costos

El uso de RAP y polvo de llanta no solo mejora las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, sino que también contribuye a la sostenibilidad al reutilizar materiales reciclados y reducir la necesidad de nuevos recursos.

5. Conclusiones

- Al desarrollar el diseño en frío y realizar el ensayo Marshall del pavimento asfáltico reciclado con la emulsión C_{ss}-1h, añadiendo el polvo de llanta de avión en los porcentajes de (1%, 1.5%, 2% y 2.5%) y un aditivo de adherencia KAOMIN 12, se determinó que para el diseño en frío óptimo fueron las briquetas del grupo 1, siendo los especímenes con 1% de polvo de llanta de avión la mejor combinación de estabilidad en estado seco con un promedio de 1700 lb.
- El aditivo de adherencia KAOMIN 12, no fue un elemento favorable en el aumento de estabilidad, el grupo 4 fue el menor de los cuatro grupos en términos de estabilidad. La composición fue: RAP, agua de pre-envuelta, emulsión C_{ss}-1h y aditivo de adherencia, obteniendo un promedio de estabilidad de 1250 lb, pero cabe recalcar su importancia en la cohesión entre los componentes del espécimen, se pudo observar que en el proceso de desmolde de las briquetas que no poseían el aditivo eran vulnerables, teniendo que manipular con cuidado.
- El análisis de la combinación óptima de RAP, emulsión C_{ss}-1h, polvo de llanta de avión y aditivo de adherencia KAOMIN 12 para verificar la estabilidad ha sido satisfactorio. Los resultados obtenidos mediante el ensayo Marshall indican que todas las mezclas cumplen con los límites mínimos establecidos por el MS-14 del Instituto del Asfalto, ya que todos los especímenes superaron las 500 lb de estabilidad. Es importante destacar que, según la norma MS-14, este tipo de mezcla es adecuada para vías con tráfico liviano.
- Al aplicar la fórmula del porcentaje de pérdida de estabilidad, se esperaba obtener resultados positivos. Sin embargo, los datos experimentales revelaron que las briquetas en húmedo presentaron valores mayores que las briquetas en seco, resultando en porcentajes de estabilidad negativos. Este comportamiento se debe a que las briquetas estaban llenas de vacíos, permitiendo que el agua se introdujera en estos espacios y aumentara la estabilidad. Como resultado, el agua mejoró la capacidad de las briquetas para recibir las cargas aplicadas en el ensayo Marshall obteniendo el porcentaje de pérdidas de estabilidad máxima la combinación del grupo 2 constituida por PAP y emulsión C_{ss}-1h en estado seco de 1463.33 lb y en estado húmedo de 1920 lb dándonos

un porcentaje de pérdidas de estabilidad -31.21%. Inmente, la conclusión sintetiza los hallazgos más importantes del estudio, resaltando su contribución al avance del conocimiento en el campo y proponiendo recomendaciones específicas para la práctica, la política, o la investigación futura. Esta sección refleja el valor agregado del estudio, incentivando la reflexión sobre las potenciales direcciones futuras que la investigación podría tomar, basadas en los resultados y discusiones presentadas.

6. Referencias

- Albornoz, Y. (2014). EMULSIONES ASFÁLTICAS. *Laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad de Los Andes*.
- Al-Busaltan, S. (2012). *Mechanical properties of an upgrading cold-mix asphalt using waste material*.
- Asphalt Institute. (1994). *MS-14 Asphalt Cold Mix Manual*. Lexington: KY: Asphalt Institute.
- Crane, D. y Dale, C. (2010). *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration*. John Wiley & Sons.
- Espinoza, G. y Guayaquil, M. (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.
- Federal Aviation Administration (FAA). (2008). *Aircraft Tire Maintenance and Operational Practices*. FAA Advisory Circular.
- Gallego, J. (2010). *Materiales y Productos Bituminosos en la Construcción*. Editorial Reverté.
- García, A. (2018). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. México: Colegio de Ingenieros Civiles de México.
- Garnica, P. y Sesma, J. G. (2005). *Mezclas asfálticas y firmes*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- Garnica, P., Gómez, J. y Sesma, J. (2005). *Mecánica de Suelos*. Editorial Pearson.
- HOLCIM. (2024). HOLCIM. <https://www.holcim.com.ec/agregados-arena-no-lavada>
- Instituto del Asfalto. (1989). *Manual de Pavimentos Asfálticos*. Instituto del Asfalto.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2003). *Manual de Emulsiones Asfálticas*. Publicación Técnica No. 235.
- Instituto Mexicano del Transporte. (2016). *Manual de Ensayo de Materiales*.
- Instituto Nacional de Vías de Colombia. (2013). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Instituto Nacional de Vías.
- Intendencia de Montevideo. (s.f.). DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS. <https://acortar.link/9qGt7b>

- Islam, M., Zaman, M. y Tarefder, R. (2018). Curing evaluation of cold asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 428-437.
- Jain, S. y Singh, B. (2021). Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124378>
- Kalman, B. y Svedinger, H. (2013). Field performance evaluation of cold recycled asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 871-889
- Kamil, H., Dulaimi, A., Al-Mansoori, T., Al-Busaltan, S., Herez, M., Sadique, M. y Abdel-Wahed, T. (2021). The future of eco-friendly cold mix asphalt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111318>
- Kamil, H., Ruddock, F. y Atherton, W. (2016). Rutting Prediction of a Reinforced Cold Bituminous Emulsion Mixture Using Finite Element Modelling. *Procedia Engineering*.
- KAOMIN. (2019). KAOMIN 12 Aditivo promotor de adherencia para mezclas. KAO.
- Malekmohammadi, M., Ameri, M. y Vamegh, H. (2016). Compressive Strength of Cold Bituminous Mixtures. *Construction and Building Materials*, 246-254.
- Mallick, R. y El-Korchi, T. (2018). *Pavement Recycling and Reuse of Material*. CRC Press.
- Mallik, J. y Davidon, D. (1997). Asphalt Emulsions. En A. J. Hoiberg (Ed.) *Bituminous Materials: Asphalts, Tars, and Pitches* (pp. 1-40). Krieger Publishing Company.
- Miranda, F. y Aguiar, J. (2019). MEZCLAS ASFÁLTICAS CON PAV: PAVIMENTOS ASFÁLTICOS RECICLADOS. *PITRA-LanammeUCR*.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. . Universidad Católica de Colombia.
- Montejo, A. (2002). *Pavimentos de Concreto y Mezclas Asfálticas*. Universidad Católica de Colombia.
- MOP. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES ESPECIFICACIONES GENERALES*.
- MS, A. I. (2001). *Principios de construcción de mezclas asfálticas en caliente*. Manual Serie N° 22.
- National Asphalt Pavement Association. (2016). *Manual de Especificaciones de Construcción*. NAPA.
- NTE INEN 2680. (2013). Productos derivados del petróleo. Asfalto modificado con caucho reciclado. Requisitos e inspección.
- Oliver, J. (2001). The Influence of the Binder in RAP on Recycled Asphalt Properties. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 2(3), 311-325.
- Rashidi, H., Mahdi, S. y Shamseddin, S. (2018). Tensile strength evaluation of cold asphalt mixture with cementing emulsion. *Construction and Building Materials*, 403-410.
- Roberts, F., Kandhal, P., Brown, E., Lee, D. y Kennedy, T. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design*. Napa Education Foundation.

- Roberts, F., Kandhal, P., Brown, E., Lee, D. y Kennedy, T. (2009). Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. *National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation*.
- Roberts, F., Kandhal, P., Brown, E., Lee, D. y Kennedy, T. (2009). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction (3rd ed.)*. National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.
- Rodrigues, J., Gomes, M. y Lobo, H. (2013). *Materiales Alternativos en Pavimentos Asfálticos*. Editorial Reverté.
- Rodríguez, R., Castaño, V. y Martínez, M. (2001). EMULSIONES ASFALTICAS. SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES.
- Rout, D., Biswas, S., Shubham, K. y Sinha, A. (2023). A systematic review on performance of reclaimed asphalt pavement (RAP) as sustainable material in rigid pavement construction: Current status to future perspective. *Journal of Building Engineering*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107253>
- Singh, S., Ransinchung, G., Debbarma, S. y Kumar, P. (2018). Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from Sugarcane Mill for production of concrete mixes. *Journal of Cleaner Production*, 174, 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.179>
- Stephens, J., Mahoney, J. y Dippold, C. (2001). Determination of the PG Binder Grade to Use in a RAP Mix.
- Val, M. D. y Kraemer, C. (2004). *Ingeniería de carreteras*. España: McGraw-Hill Interamericana.

CONTRIBUCIONES DE AUTORES/AS, FINANCIACIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Conceptualización: Cando Tipán Wilson; **Validación:** Cando Tipán Wilson **Análisis formal:** Jácome, Jorge; **Todos los/as autores/as han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito:** Cando Tipán Wilson; Jácome Jorge; Bonilla Patricio.

Agradecimientos: Ejemplo: El presente texto nace en el marco de un proyecto entre La Pontificia Universidad Católica, facultad de Ingeniería civil y El aeropuerto Internacional de Quito y su administrador QUIPORT, “Mezclas asfálticas con reciclado y polvo de llanta de avión”.

AUTOR/ES:**Wilson Cando Tipán**

Filiación Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.

Síntesis del currículum del autor de 120 palabras. Wilson Oswaldo Cando Tipán es Ingeniero Civil con una maestría en Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones de CEDEX, España, Maestría En Geotecnia Aplicada por la PUCE y un Máster en Dirección de Empresas Constructoras e Inmobiliarias de la Universidad San Francisco de Quito. Actualmente, es docente en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y consultor particular en mecánica de suelos y pavimentos. Su experiencia abarca la fiscalización y evaluación de vías, estudios de suelos para diversos proyectos de construcción, y la dirección de múltiples investigaciones y publicaciones científicas indexadas en Scopus y Latindex. Está cursando un doctorado en Gestión de Proyectos en la Universidad de Investigación e Innovación de México
wocando@puce.edu.ec

Orcid ID: <https://orcid.org/0009-0003-5768-4407>

Jorge Jácome Iza

Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador.

jajacomei@puce.edu.ec