

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**Mejora de las propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la
mezcla asfáltica mediante uso de pavimento reciclado y caucho pulverizado,
Chiclayo**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR

Reyna Fernandez Calderon

ASESOR

Manuel Alejandro Borja Suarez

<https://orcid.org/0000-0002-6532-4976>

Chiclayo, 2025

**Mejora de las propiedades físico-mecánicas y microestructurales
de la mezcla asfáltica mediante uso de pavimento reciclado y
caucho pulverizado, Chiclayo**

PRESENTADA POR

Reyna Fernandez Calderon

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO CIVIL

APROBADA POR

Ronald Esteban Villanueva Maguiña

PRESIDENTE

Segundo Guillermo Carranza Cieza

SECRETARIO

Manuel Alejandro Borja Suarez

VOCAL

Dedicatoria

Con gratitud y humildad, dedico esta tesis a mi familia, cuyo amor y apoyo incondicional me han guiado en cada paso de este viaje académico. A mi madre y “saber”, por sus sacrificios y enseñanzas, que han sido la base de mi formación. A mis hermanos y sobrinos, por sus continuos ánimos y ser mi razón de sonreír. A mi compañero, amigo y confidente que me apoya en todos los pasos que he dado. A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento por creer en mí y por ser parte esencial de este logro. Este trabajo es tanto mío como suyo.

Agradecimiento

Agradezco a la universidad por su formación en vanguardia, a todos aquellos que han sido parte fundamental en la realización de esta tesis. A mis asesores de tesis, por su guía, paciencia y valiosos consejos. A mis profesores, por compartir su conocimiento y motivarme a alcanzar nuevas metas. A mis amigos, por su comprensión y ánimo durante este proceso. Finalmente, agradezco a todas las personas y entidades que de alguna manera contribuyeron a que este proyecto se hiciera realidad.

Mejora de las propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la mezcla asfáltica mediante uso de pavimento reciclado y caucho pulverizado, Chiclayo

INFORME DE ORIGINALIDAD

25%

INDICE DE SIMILITUD

22%

FUENTES DE INTERNET

10%

PUBLICACIONES

13%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

6%

2

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

4%

3

tesis.usat.edu.pe

Fuente de Internet

1%

4

repositorio.uss.edu.pe

Fuente de Internet

1%

5

renati.sunedu.gob.pe

Fuente de Internet

1%

6

www.uv.mx

Fuente de Internet

1%

7

Feipeng Xiao, Ling Xu, Zifeng Zhao, Xiangdao Hou. "Recent applications and developments of reclaimed asphalt pavement in China, 2010–2021", Sustainable Materials and Technologies, 2023

Publicación

1%

8

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

1%

9

repository.javeriana.edu.co

Índice

Resumen	9
Abstract	10
Introducción.....	11
Revisión de literatura.....	15
Antecedentes	15
Bases teóricas	19
Materiales y métodos	30
Tipo de investigación	30
Diseño de investigación	30
Variables y operacionalización	31
Población y muestra.....	31
Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	33
Procedimientos	35
Resultados y discusión	36
Resultados	36
Resultados del OE ₁ :	37
Resultados del OE ₂ :	42
Resultados del OE ₃ :	45
Resultados del OE ₄ :	49
Discusión	54
Conclusiones	56
Recomendaciones	57
Referencias.....	58
Anexos	64
Matriz de búsqueda	64
Operacionalización de variables.....	64
Matriz de consistencia	65
Ensayos realizados en los agregados.....	65

Ensayos realizados para el agregado fino:71

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas en diferentes tipos de mezclas asfálticas con RAP y CMA.....	29
Tabla 2. Resumen de la cantidad de briquetas para cada mezcla de experimentación.	31
Tabla 3 Técnicas e instrumentos aplicado en la investigación relacionado con la norma	33
Tabla 4 Resultados de ensayos del agregado fino para la MAC en cumplimiento de la norma.	37
Tabla 5 Resultados de ensayos del agregado grueso para la MAC en cumplimiento de la norma.....	37
Tabla 6 Diseño de la mezcla asfáltica patrón	39
Tabla 7 Dosificación mejorada del diseño de mezcla asfáltica con PCR y RAP.....	49
Tabla 8 Identificación comparativa de los grupos funcionales de grupo de control y experimental.	51

Lista de figuras

Figura 1. Prueba de viscosidad de CRMA	20
Figura 2. Influencia del caucho en el ensayo de penetración a 25°C.....	21
Figura 3. Punto de ablandamiento °C de CRMA	22
Figura 4. Porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas modificadas con CR	22
Figura 5. Estabilidad en mezclas asfálticas modificadas con diversas tasas de CR	23
Figura 6. Influencia de la temperatura en la ductilidad de mezclas asfálticas con RAP.....	24
Figura 7. Viscosidad de las mezclas asfálticas con RAP	25
Figura 8. Evaluación de incorporación de RAP en el ensayo de penetración a 25°C.....	25
Figura 9. Punto de ablandamiento °C de RAP.....	26
Figura 10. Influencia de la temperatura en el porcentaje de vacíos en MAM con RAP.....	27
Figura 11. Estabilidad en mezclas asfálticas modificadas con diversas partículas de RAP ..	27
Figura 12. Diagrama detallado del diseño de la investigación.....	30
Figura 13 Proceso general del desarrollado en la investigación	35
Figura 14 Proceso detallado de la generación de resultados en la investigación	36
Figura 15 Curva granulométrica de agregados con límites establecidos en norma.	38
Figura 16 Granulometría del PCR contrastada con la norma NFU (2013).	40
Figura 17 Granulometría del RAP contrastado con la norma MTC E107.....	41
Figura 18 Resultados de cada propiedad para cada % experimental de PCR.	42
Figura 19 Variación de las propiedades de la adición de PCR respecto al patrón.	43
Figura 20 Resultado representativo de SPSS mostrando significancia del % en la VMA.	44
Figura 21 Resultados comparativos de cada propiedad para cada %RAP en MAM fase II	45
Figura 22 Variación de las propiedades de la adición de RAP respecto a la MAM-2%PCR..	47
Figura 23 Resultado representativo de SPSS sobre la significancia del 15% de RAP.	48
Figura 24 Diagramas de barrido espectral FTIR de (A) muestra patrón; (B) muestra de diseño Fase II.	50
Figura 25 Imágenes SEM de la muestra patrón (A) y de la MAM con PCR y RAP (B).....	53

Resumen

Este estudio de investigación tiene como objetivo evaluar el impacto de la incorporación de aditivos de pavimento reciclado y caucho pulverizado en mezclas asfálticas para mejorar sus propiedades mecánicas y su sostenibilidad. La metodología implicó pruebas experimentales de mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de caucho pulverizado al 1%, 2% y 3% en sustitución del cemento asfáltico, para posteriormente al obtener el % óptimo se realizaron pruebas con pavimento asfáltico reciclado del 10%, 15% y 20% en el agregado fino y grueso respectivamente, comparándolos con mezclas convencionales. Los resultados indican una mejora del 15% en la resistencia a la deformación con la adición de caucho pulverizado y una reducción del 10% en la deformación permanente al reemplazar el agregado con pavimento reciclado y cambios significativos en la composición química de la mezcla asfáltica al incorporarlos. Se observaron diferencias en los espectros de vibración de las muestras, especialmente en las bandas asociadas a los grupos funcionales presentes en los aditivos utilizados. Estos porcentajes óptimos y una microestructura mejorada subrayan los beneficios de utilizar materiales reciclados en mezclas asfálticas para el desarrollo de infraestructura vial sostenible y duradera. La discusión destaca los beneficios del uso de materiales reciclados en el diseño de mezclas asfálticas para soluciones de infraestructura duraderas y ecológicas.

Palabras clave: pavimento reciclado, caucho pulverizado, propiedades mecánicas, microscopía, microestructura, mezclas asfálticas.

Abstract

This research study aims to evaluate the impact of incorporating recycled pavement and pulverized rubber additives in asphalt mixtures to enhance their mechanical properties and sustainability. The methodology involved experimental tests of asphalt mixtures with different percentages of pulverized rubber in 1%, 2% and 3% replacing asphalt cement, and later upon obtaining the optimal %, tests were carried out with recycled asphalt pavement of 10%, 15% and 20% in the fine and coarse aggregate respectively, comparing them with conventional mixtures. Results indicate a 15% improvement in deformation resistance with the addition of pulverized rubber and a 10% reduction in permanent deformation by replacing aggregate with recycled pavement. These optimal percentages and enhanced microstructure underscore the benefits of utilizing recycled materials in asphalt mixtures for sustainable and durable road infrastructure development. The discussion highlights the benefits of using recycled materials in asphalt mix design for durable and eco-friendly infrastructure solutions.

Keywords: recycled pavement, pulverized rubber, mechanical properties, microscopy, microstructure, asphalt mixtures.

Introducción

Cada año aumenta la cantidad de desechos provenientes de neumáticos [1] y pavimento asfáltico recuperado (RAP, por sus siglas en inglés), para estabilizar el asfalto y se considera una estrategia para el desarrollo sostenible en las vías de comunicación [2]. Industrias relacionadas con la construcción de pavimentos asfálticos en Europa, Sudáfrica, China y otros países han empezado a usar dichos recursos como adición alternativa en la construcción de eco pavimentos [3], por ejemplo, EE.UU que produce 285 millones de toneladas de neumáticos al año, usa el 3% en la mezcla de la carpeta asfáltica [4], mientras que la industria China ha alcanzado producir mezcla asfáltica con el uso de 816 millones de caucho de llantas de automóviles [5] y en la construcción de la carpeta asfáltica, ha usado 790 millones de toneladas de RAP [6]. Además, con el aumento actual de los costos de materiales y el agotamiento de recursos naturales [7] Europa ha logrado reutilizar un 76 % de pavimentos asfálticos para producir nuevas mezclas bituminosas [8], convirtiéndose en un recurso común y valioso en la construcción de carreteras debido a sus beneficios económicos y ambientales [9]. Ante el problema de los residuos que genera la construcción de infraestructura vial, existe una solución que reduce al mínimo el impacto que genera dichos residuos como huella de carbono.

El RAP se emplea comúnmente para repavimentar y ser usado en las capas de base de la infraestructura vial [9], pero no toma en cuenta los valiosos materiales que posee [10], tiene el potencial de ser utilizado para distintos propósitos como el caso de mezclas bituminosas en frío que requiere de un agente de reciclaje emulsionado [11]. Además, se ha observado que las mezclas asfálticas tradicionales no pueden soportar los continuos aumentos de carga por eje [12] ante eso aparece el asfalto modificado con caucho reciclado que día a día se vuelve más común en su práctica y de reconocimiento técnico [13] a pesar de que soporta altos índices de durabilidad, alta temperatura y clima [14].

En el enfoque internacional, la construcción de pavimentos asfálticos hace uso obligado de recursos que afectan el medio ambiente [15], así que, el uso de caucho reciclado, no solo mejora las propiedades de la mezcla asfáltica, sino que optimiza el desempeño de su comportamiento y prestación del servicio de la transitabilidad vehicular del eco pavimento [16]. Frente al pavimento tradicional, esta tecnología permite proteger el medio ambiente a través de un tratamiento especial de los materiales viales [17], permitiendo que la infraestructura vial integre aspectos como la seguridad, la durabilidad y el confort, además contribuye en mejorar la permeabilidad y el calor [18], debido que es usual que los pavimentos sujetos a cargas

excedentes y cambios de temperatura presenten fallas como levantamientos y surcos, por lo que, los pavimentos asfálticos convencionales no garantizan su durabilidad debido a ciertos factores [19].

Asimismo, la adición de modificador de caucho pulverizado (CRM) se utiliza en mezclas asfálticas calientes [16] y en regiones muy frías de EE. UU., Europa y Sudáfrica [15], ya que se ha demostrado que el rendimiento del pavimento ha mejorado [14]. Por esta razón, se ha señalado que el método de evaluación de la durabilidad utilizado para evaluar los pavimentos de concreto asfáltico convencional no es el mejor método aplicable a los pavimentos que contienen caucho-asfalto granulado [20].

En Perú, debido a las experiencias constructivas del uso de ambos recursos reciclados, no ha generado una normativa para el uso del asfalto reciclado como sustituto parcial en la repavimentación de calles [21]. Los beneficios de incorporar asfaltos reciclados en los diseños de mezclas, minimizan el uso de ligante virgen [19], en tal sentido uno de los procesos considerados en el reciclaje de pavimento es promover la densificación de la mezcla y lograr una adecuada distribución del material bituminoso [22]. Una de las dificultades que limita el diseño de mezclas con incorporación RAP se debe a sus características y propiedades que posee dicho material [23] porque influye en el comportamiento mecánico debido al tiempo de interacción de las mezclas asfálticas recicladas por esta razón se recomienda que al utilizar cantidades masivas de RAP se debe emplear rejuvenecedores para disminuir la rigidez del aglutinante reciclado como el uso del caucho [24].

El RAP, extraído de preferencia con el método de fresado y el PCR pueden utilizarse como recursos reutilizables en las carreteras [19] al final de su vida útil que garanticen dichos años de servicio en las regiones del país. Ante esta propuesta técnica de solución, en la ciudad de Chiclayo, el deterioro a temprana edad de la carpeta asfáltica urbana, se genera debido a la inundación de las aguas pluviales que se “empozan” en los tramos de cota inferior y también por la falta de un sistema de drenaje asociado a un sistema vial, el cual con el tránsito constante termina por desprenderse los áridos finos y gruesos de la carpeta asfáltica [25], [26]. Por lo tanto, el uso de caucho regenerado en las mezclas asfálticas reduce los costos de mantenimiento ya que el pavimento gana durabilidad y rendimiento [27] y al mismo tiempo mejora la resistencia a la formación de surcos o a la deformación inducida por la temperatura [28].

En Chiclayo, el uso de los pavimentos recuperados (RAP), por ejemplo, el que se ha extraído de la carpeta vial antigua del aeropuerto “José Abelardo Quiñonez” por el método de

fresado y que es usado actualmente como relleno en la base debajo de la carpeta asfáltica, también la empresa “Los Portales” lo usa para el mejoramiento de sus calles, relleno de sus calles y solución a sus deficiencias viales urbanas [29]. Entonces, se puede ahorrar costos ya que ayudan a minimizar el uso de recursos naturales y por lo tanto reducen el daño al medio ambiente [23], aunque se ha investigado que los aglutinantes del RAP son rígidos, pero no lo suficientemente fuertes para resistir el agrietamiento [30].

La formulación del problema de investigación es: ¿Con el uso de pavimento reciclado (RAP) como sustituto parcial del agregado y del caucho como adición a la mezcla asfáltica, se podrá mejorar las propiedades físico-mecánicas y características microestructurales de la mezcla asfáltica modificada, Chiclayo? La justificación de la presente investigación, es: a) académica, porque se aportará nuevos datos y análisis sobre las propiedades al incorporar pavimento asfáltico reciclado y caucho pulverizado representando innovación en los materiales de construcción, lo cual ofrece alternativas sostenibles, b) técnica, porque en la aplicación se cumple con las normas técnicas peruanas y los protocolos de procedimientos de parte del laboratorio de ensayo de materiales donde se desarrollan los ensayos promoviendo el aprovechamiento de los residuos de construcción y neumáticos desechados; c) ambiental, porque se hace uso de los residuos generados con el asfalto triturado mediante la técnica de fresado. y el PCR en la mezcla asfáltica.

El objetivo general es: Incorporar caucho reciclado pulverizado (PCR) como sustituto parcial del cemento y pavimento asfálticos reciclado (RAP) como sustituto parcial del agregado para mejorar las propiedades fisicomecánicas y sus características microestructurales de la mezcla asfáltica modificada, Chiclayo-2024. Los objetivos específicos: OE1: Describir las características del PCR como sustituto parcial del cemento asfáltico y RAP como sustituto parcial del agregado en la mezcla asfáltica modificada elaborada en Chiclayo. OE2: Analizar la variación de los resultados a partir de la adición experimental de 0%, 1%, 2%, 3% de PCR como sustituto parcial del cemento asfáltico, respecto a la muestra de control, en la mezcla asfáltica, Chiclayo. OE3: Analizar la variación de los resultados a partir de la adición experimental de 0%, 10%, 15%, 20% de RAP como sustituto parcial del agregado, respecto a la mezcla asfáltica modificada con el porcentaje óptimo de PCR, Chiclayo. OE4: Evaluar la variación de las características microestructurales de la muestra asfáltica patrón respecto a la modificada por el % óptimo de PCR como sustituto parcial del cemento asfáltico, y del %

óptimo de RAP como sustituto parcial del agregado en la mezcla asfáltica modificada, Chiclayo.

Revisión de literatura

Antecedentes

A nivel internacional se consideraron estudios como:

De acuerdo con [11], se investigó el impacto de la clasificación del caucho granulado, proveniente de llantas de desecho de automóviles (CCR) y camiones (TCR), trabajando entre 10-20% en CCR y 0-4% en TCR, estos porcentajes fueron determinados como los valores ideales para lograr una respuesta de ductilidad de 24 cm en el cemento asfáltico modificado y una temperatura de mezclado de 180 °C, un tiempo de contacto de 21 min, un contenido de CCR del 18% en peso y un contenido de TCR del 3.5% en peso. Se observó una mejora significativa en la estabilidad Marshall y el flujo de las mezclas asfálticas modificadas, demostrando la importancia de la clasificación del caucho granulado en la optimización de las propiedades del cemento asfáltico.

[17] en su artículo considero evaluar la viabilidad y eficacia del uso de un ligante de betún modificado en comparación con los ligantes tradicionales en la construcción de pavimentos. Para lograr este objetivo, se utilizó un porcentaje del 12% de neumáticos desechados como modificador en el betún. La metodología empleada incluyó pruebas de impacto, abrasión, ductilidad, recuperación elástica, penetración y punto de reblandecimiento en los agregados y el betún. Además, se realizaron análisis de costos considerando diferentes variantes de carreteras y sus respectivos costos asociados. Concluyó demostrando que el uso de un ligante de betún con neumáticos desechados mejora el rendimiento de los pavimentos bituminosos.

[9] mediante su artículo estudio el impacto del uso de caucho de neumático desechado en las mezclas de concreto asfáltico para mejorar la resistencia y durabilidad de las carreteras. Se analizaron tres tipos de mezclas de asfalto con diferentes porcentajes entre 0-100%. A través de pruebas experimentales en laboratorio, se determinó que el contenido óptimo de asfalto para la mezcla AC-Standard es del 5.5%, lo cual proporciona las propiedades mecánicas y de durabilidad deseadas. Se evidenció que el uso de caucho de neumático desechado en las mezclas de concreto asfáltico no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental al reciclar desechos no biodegradables, sino que también mejora las propiedades mecánicas y de durabilidad de las carreteras.

Según, [16] en su artículo estudiaron el impacto del contenido de caucho granulado y el tamaño de las partículas en el rendimiento de la mezcla asfáltica porosa con el fin de optimizar la composición para mejorar la reducción del ruido del tráfico. Se determinó que el contenido óptimo de caucho granulado en la mezcla asfáltica porosa fue del 4%. Este porcentaje se identificó como el punto ideal para lograr un equilibrio entre el rendimiento de amortiguamiento y la capacidad de carga de la mezcla. Además, se encontró que variaciones en el contenido de caucho granulado por encima o por debajo del 4% podían afectar negativamente las propiedades de la mezcla, lo que resalta la importancia de la precisión en la composición de esta.

[18] a través de su artículo evaluaron porcentajes de RAP entre 30-50% con el fin de analizar cómo estos afectan las propiedades de las mezclas asfálticas recicladas. Los resultados obtenidos permitieron concluir que las mezclas asfálticas recicladas con mayores porcentajes de RAP presentaron variaciones significativas en su desempeño, especialmente en términos de resistencia y durabilidad.

De acuerdo, con [19] cuyo artículo se basó en explorar la factibilidad de utilizar asfalto epoxi para reciclar mezclas que contienen 100% de pavimento asfáltico reciclado (RAP) y de ligante-árido para la mezcla reciclada de asfalto epoxi. Se concluyó que la mezcla asfáltica epoxi reciclada presentó un desempeño comparable e incluso superior en ciertos aspectos al de la mezcla asfáltica epoxi virgen.

Posteriormente, [20] en su artículo propone un método de regeneración modificado para mejorar la gradación del RAP y la unión entre el ligante virgen rígido y el ligante envejecido. Revelaron que la mezcla con un 40% de RAP producía los mejores valores de módulo tanto a altas como a bajas temperaturas, mientras que un 60% de RAP generaba la mayor estabilidad dinámica.

Según, [21] en su artículo estudio el efecto del RAP por fatiga en la mezcla asfáltica reciclada en caliente, realizaron pruebas de flexión a cuatro puntos en especímenes preparados con contenidos de RAP del 0%, 30%, 40% y 50%; El contenido óptimo de asfalto se determinó mediante pruebas Marshall, siendo del 5.0% para HRAM con 30% de RAP. Se concluye que una correlación positiva entre el rendimiento a alta temperatura de HRAM y el contenido de RAP, mientras que el rendimiento a baja temperatura y la estabilidad al agua mostraron una tendencia decreciente.

Considerado, a [22] en su artículo evaluó el efecto del contenido de caucho reciclado (CR) en la mezcla asfáltica en caliente mediante el proceso en seco, se utilizaron porcentajes de 0%, 1%, 2% y 4% de CR. Se basaron en el diseño de mezcla Marshall para analizar propiedades como la densidad de aire, el contenido de vacíos, la estabilidad y la fluencia de las mezclas asfálticas modificadas. identificó que el contenido óptimo de caucho reciclado (CR) en la mezcla asfáltica en caliente mediante el proceso en seco fue del 1% al 2% en proporciones entre 2 y 4%.

Posteriormente, [23] en su artículo analizaron la microscopía electrónica de barrido (SEM) para evaluar la morfología de las mezclas asfálticas Los contenidos óptimos fueron del 7,0 %, 6,5 % y 3,5 % respectivamente para las mezclas elaboradas con aditivos y asfalto reciclado en frío (RAP). Además, se encontró que los contenidos óptimos de polímero acrílico y cemento Portland fueron del 1,5 % y 1 % respectivamente mejora la resistencia a la humedad en comparación con las mezclas convencionales.

[24] en su artículo investigaron el efecto del envejecimiento en el desempeño del asfalto modificado con grano de caucho a nivel micro y nanoescala con caucho triturado (CR) analizados en la microestructura de la superficie del asfalto a través de técnicas como espectroscopia infrarroja y AFM mostrando el envejecimiento de aumentó al peso molecular del asfalto, mejorando su estabilidad a altas temperaturas y reduciendo la sensibilidad a la temperatura. Concluyó que puede concluir que el 20% de contenido de caucho granulado representa el porcentaje óptimo observándose una homogeneización del asfalto modificado con caucho triturado después del envejecimiento.

Según, [25] cuyo artículo tiene como propósito evaluar el impacto del tiempo de acondicionamiento en el desempeño del concreto asfáltico modificado con caucho desmenuzado con porcentajes en 10%, 15% y 20% analizando la microestructura mediante técnicas de imagen como ESEM y espectroscopía infrarroja de microscopía de fuerza atómica (AFM-IR) donde se aumentó del tiempo de acondicionamiento mejorando significativamente. También se identificaron cambios en la morfología y la interacción entre el caucho y el betún a nivel microscópico.

A nivel nacional,

[26] en su tesis asumieron como objetivo evaluar el impacto del caucho reciclado en mezclas asfálticas, donde emplearon diferentes porcentajes variando entre 0.5%-1.5%. Como resultado,

se concluyó que un contenido óptimo de caucho del 1.0% en combinación con ciertos porcentajes de agregados y asfalto condujo a mejoras significativas en las propiedades de las mezclas asfálticas, respaldando sus beneficios ambientales al reutilizar estos materiales.

Según, [27] en su tesis plasmó como objetivo mejorar las propiedades de caucho incorporando entre 0-3% dando como resultado un 3% garantizando un aumento significativo en su recuperación elástica por torsión, lo que hizo un 37% más recuperable que la mezcla patrón. En su metodología incluyó la caracterización de las propiedades usando el método Marshall. Concluyó que resulta beneficioso y económico en rendimiento de la construcción.

De acuerdo con [28] en su investigación, considero utilizar polvo de caucho para minimizar la generación de fisuras en el pavimento. Los porcentajes estudiados fueron 0.25%, 0.50%, 0.75% y 1.00%. Tras analizar los resultados de los ensayos, se observó que el porcentaje de 0.5% de adición de caucho mostró valores más altos de resistencia axial en comparación con los otros porcentajes evaluados. Concluyó que en su variación los porcentajes de polvo de CR permitió identificar el impacto de este material en las características de la mezcla

Además, [29] En su investigación, emplearon CR de llantas de neumáticos para obtener resultados se ensayaron porcentajes de caucho entre 0.5% y 1% basándose en normativas como AASTHO y el método Marshall, permitiendo determinar los parámetros necesarios para el diseño del pavimento flexible con caucho reciclado. A través de ensayos y análisis comparativos, se concluyó que el uso de un 0.5% de caucho reciclado en la mezcla asfáltica proporcionaba los beneficios deseados en términos de durabilidad. Se concluyó que, a pesar de ser ligeramente más costoso inicialmente, el pavimento flexible con CR demostró ser una opción más sostenible a largo plazo, alargando la vida útil de la vía y reduciendo los costos de mantenimiento.

Por otro lado, [30] mediante su tesis determina cómo influye la incorporación de CR en el diseño de HRAM en una comparación de la resistencia de un asfalto convencional con un asfalto modificado de 10%, 15%, 20%, 25% y 30% que incluye caucho reciclado, se busca demostrar la durabilidad, flexibilidad y propiedades mejoradas que ofrece el asfalto modificado, dando un porcentaje óptimo del 10%, demostrando ofrecer mejoras en su resistencia y durabilidad permitiendo evaluar la variación de los tamaños de partículas. Concluyó que en los porcentajes de CR en la mezcla permitió identificar el equilibrio óptimo entre la cantidad de material reciclado y las características deseadas en la MAM, contribuyendo resultados significativos en términos de resistencia, flexibilidad y vida útil del pavimento.

Considerando a [31] en su tesis valuó desempeño de una HMA en caliente con distintos porcentajes de pavimento asfáltico reciclado de 20%, 30% y 40% de RAP como aditivos rejuvenecedor el SBS PG 70-80, incorporando rejuvenecedores de asfalto para restaurar las propiedades del ligante envejecido y mejorar el rendimiento de la mezcla. Como resultado se obtuvo un 40% en porcentaje óptimo de RAP y el polímero demostrando un desempeño satisfactorio.

De acuerdo con [32] en su tesis tuvo como propósito diseñar una mezcla asfáltica para mejorar el comportamiento mecánico del pavimento en un tramo de la carretera. Para lograr este propósito, se utilizó un 40% de material de RAP, se incrementó un 10% de piedra huso 67 y un 20% de piedra confitillo, junto con un aumento del 30% en agregado grueso, se verificó que al incrementar el porcentaje de cemento asfáltico en un 4.1%, alcanzando un total del 7.1%, se obtuvo una mejora en la estabilidad y resistencia. Los porcentajes ensayados y ajustados fueron fundamentales para lograr un diseño de mezcla asfáltica equilibrado y eficiente que cumpliera con los estándares de calidad y resistencia.

[33] en su estudio desarrollaron una propuesta técnica con el uso de RAP, llevándose a cabo diferentes porcentajes de 10%, 20%, 30% y 40%, determinándose que con 30% de RAP cumplió con todos los requisitos establecidos, mostrando valores similares a la carpeta patrón y representando un ahorro sustancial en el uso de materiales del 14% de agregados gruesos, un 16% de agregados finos y un ahorro significativo del 1.52% en contenido de asfalto, destacando la importancia de considerar el porcentaje óptimo de RAP en el diseño de carpeta asfáltica para obtener resultados satisfactorios y económicamente eficientes.

Bases teóricas

Propiedades físicas del CRMA

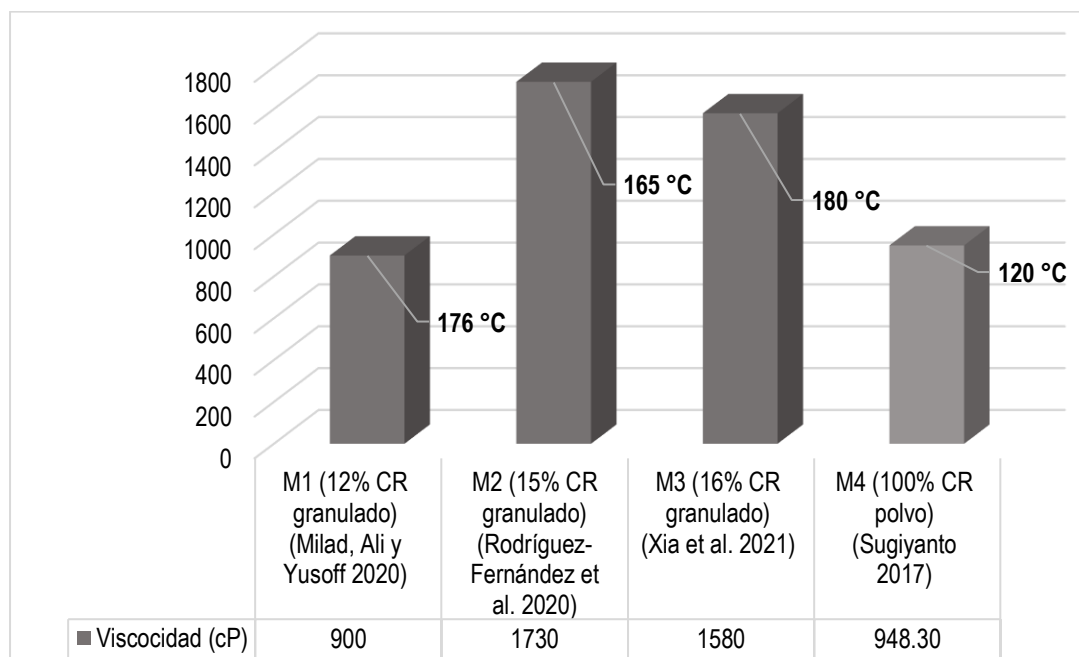
Anteriores investigaciones demostraron que la incorporación de caucho ayuda a reducir el envejecimiento, al mejorar la rigidez del asfalto [3]. Puede utilizarse como agregado para la mezcla asfáltica para la superficie de rodadura de las carreteras [9]. Las formas de adicionar caucho pueden ser en polvo o granulado considerando el comportamiento a altas temperaturas donde se adhieren sus componentes y se logra mejorar la ductilidad, el punto de ablandamiento y estabilidad [12]. Los hallazgos importantes se han identificado en base a los resultados de las principales investigaciones consultadas.

Se visualiza la relación entre el % de CR, la temperatura y el efecto sobre la ductilidad. La temperatura a la que se somete la mezcla en conjunto no debe excederse porque provocaría la degradación acelerada del caucho, es decir, el envejecimiento y no se consigue el mejoramiento de sus propiedades. El investigador [11] recomienda, como aglomerante, el cemento asfáltico de Basora combinado con 18 % de CR, se obtiene una ductilidad de 24 cm a 180°C. Caso contrario a lo que ocurre con [34] que utiliza un aglomerante Shell 70 + 16% CR donde su ductilidad resulto 13.5 cm a una temperatura de 220 °C y [35] determinó que usando asfalto simple PG 58-16 + 10% CR se obtiene 8.3 cm de ductilidad a una temperatura de 180 °C. La ductilidad depende del porcentaje de peso añadido, uso de aditivos o aglomerantes y de la temperatura en su proceso para obtener valores favorables.

La viscosidad de CRMA se evaluó en base a la temperatura y porcentaje de CR según el tipo (polvo o granulado), tal como se evidencia en la *Figura 1*.

Figura 1.

Prueba de viscosidad de CRMA



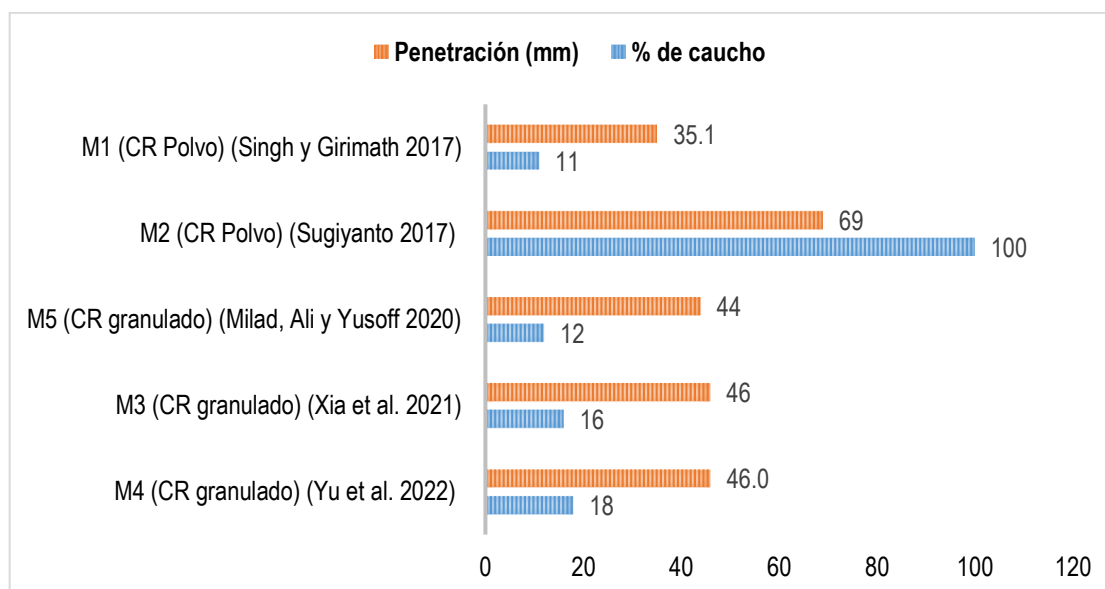
Fuente: Elaboración a partir de los resultados de los autores referidos.

Nota: El 100% de caucho reciclado ha sido pulverizado.

Las mediciones de viscosidad muestran variaciones debido al proceso y la fracción de material utilizado. [1] encontraron que la viscosidad en mezclas asfálticas con incorporación del 12 % de CR sin aditivo es de 900 cP a una temperatura de 176 °C; [25] concluye que aplicando aglutinante convencional la viscosidad se eleva a 1730 cP a una temperatura de 165

°C con 15 % de CR lo que contrasta el resultado del investigador anterior, pero sus resultados se asemejan a los de [34], en este caso con Shell 70 a una temperatura de 180 °C con incorporación de 16 % de CR resulta una viscosidad de 1580 cP. Por su parte [9] aplico Bentonita como aditivo a su mezcla asfáltica con 100% de polvo de caucho donde obtuvo una viscosidad de 948.30 cP a 120 °C. Podemos determinar que la viscosidad aumenta y mejora usando aglutinantes en mezclas de asfalto con incorporación de CR, permitiendo la reducción a la formación de surcos, agrietamiento y fatiga, a diferencia de la mezcla convencional de 12 %.

Figura 2.
Influencia del caucho en el ensayo de penetración a 25°C



Fuente: Elaboración a partir de los resultados de los autores referidos.

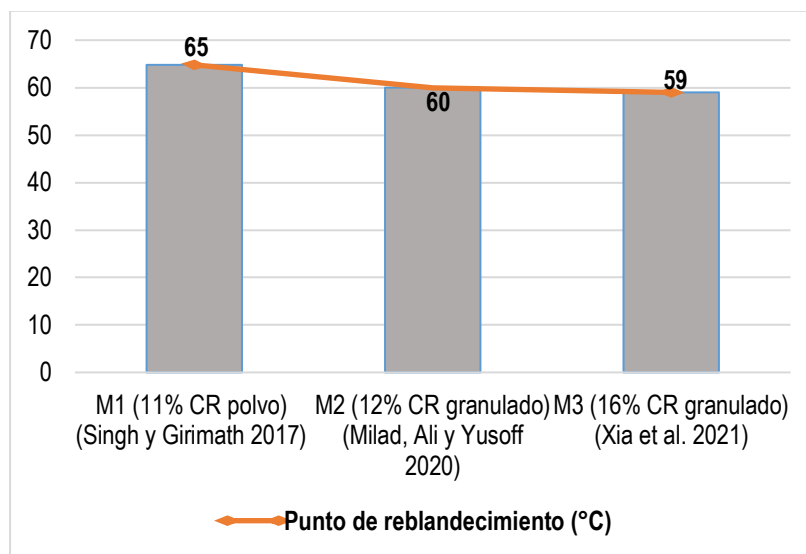
Para el ensayo de Penetración a 25 °C se utilizó polvo y granulado de caucho con diversos porcentajes de material. [36] determinaron que al usar 11 % de polvo de caucho se obtuvo 35.1 mm de penetración sin aglomerante, a diferencia de [9] en su ensayo alcanzo una penetración de 69 mm adicionando 100 % del mismo material + aglomerante bentonita. Por otra parte, al emplear 16 % de CR + aglomerante Shell-70 se obtiene 46 mm de penetración [34], sin embargo [37] demostró que adicionando 18 % de CR sin aglomerante se alcanza la misma penetración, del mismo modo [1] lograron determinar que con 12 % de CR sin aglomerante la penetración llega a 44 mm. Se puede evidenciar que en mezclas asfálticas con mayor incorporación de polvo de caucho + aglomerante genera un incremento en la

penetración; contrario a lo que ocurre con los porcentajes de CR, que, aunque se adicione aditivo no presentan variaciones significativas.

En la **Figura 3** se sintetiza los resultados obtenidos de muestras con diferentes contenidos de tipos de caucho donde el punto de ablandamiento tiende a variar a menudo que cambia el porcentaje de contenido. Al respecto [1] determinan que se obtuvo 60 °C de punto de ablandamiento usando 12 % de CR sin aglomerantes, de manera similar [34] obtuvo 59 °C de punto de ablandamiento utilizando Shell-70 como aglomerante + 16 % de CR. Por otra parte [37] emplearon 11% de polvo de caucho en su estudio sin aditivo, logrando conseguir 64.8 °C respecto al punto de ablandamiento. Se observa que existe una variación resaltante al usar polvo de caucho y CR, así mismo el uso de aditivo en mezclas con grano de caucho no varía considerablemente a comparación de una mezcla. Por ello se considera que el punto de ablandamiento en materiales bituminosos busca pretende determinar la temperatura a la que el material se ve afectado por la sensibilidad térmica.

Figura 3.

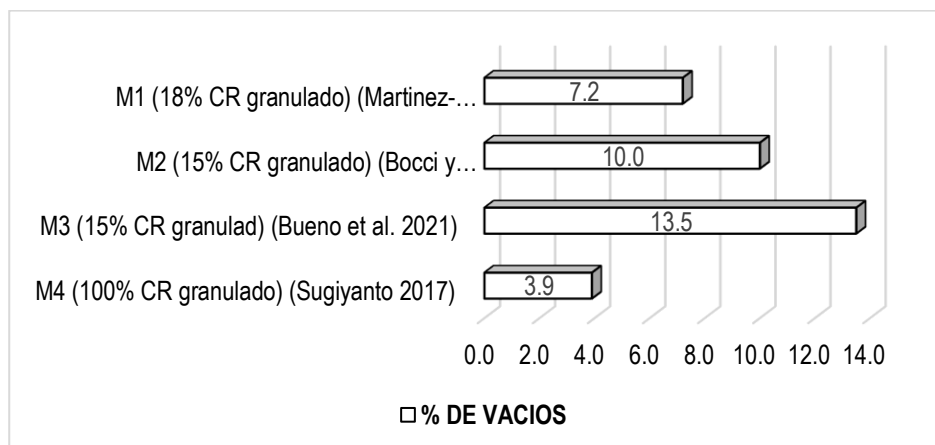
Punto de ablandamiento °C de CRMA



Fuente: Elaboración a partir de los resultados de los autores referidos.

Figura 4.

Porcentaje de vacíos en mezclas asfálticas modificadas con CR



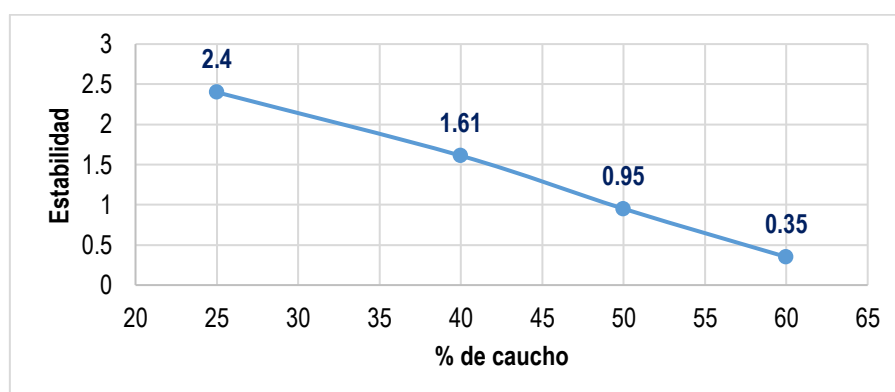
Fuente: Elaboración a partir de los resultados de los autores referidos.

Se determina una mezcla asfáltica con 100 % de caucho granulado en reemplazo de los agregados se alcanzó un porcentaje mínimo de vacíos [9], a diferencia de [38] quienes utilizaron fillers como material de relleno en su mezcla de CMRA 15% alcanzando 10 % de vacíos. Por otro lado, la mezcla de SDA mostraron un incremento de vacíos al añadirse 15.1% CR como aglomerante [39]. [40] también determinaron que el asfalto modificado con GCR por vía húmeda (VH) en sustitución de agregados se obtiene 7.2 % de vacíos. En la **Figura 4** se observa que existe cierta alteración de vacíos producto del incremento del peso de CR en la mezcla, lo cual demuestra que a mayor contenido de CR se obtiene menor porcentaje de vacíos, de ello depende lograr una adecuada compactación de la mezcla.

De la **Figura 5** se aprecia que disminuye la estabilidad a medida que la muestra de caucho aumenta, obteniendo un valor mínimo de 0.35 respecto a un 60 % de caucho adicionado. Si la estabilidad alcanza un valor cercano a 0 indica una estabilidad de almacenamiento rentable del ligante asfáltico [41]. En este sentido se considera que una estabilidad baja genera que el pavimento mantenga su forma física minimizando la formación de fisuras o ahuellamientos.

Figura 5.

Estabilidad en mezclas asfálticas modificadas con diversas tasas de CR



Fuente: Elaboración a partir de los resultados de los autores referidos.

Nota: [42].

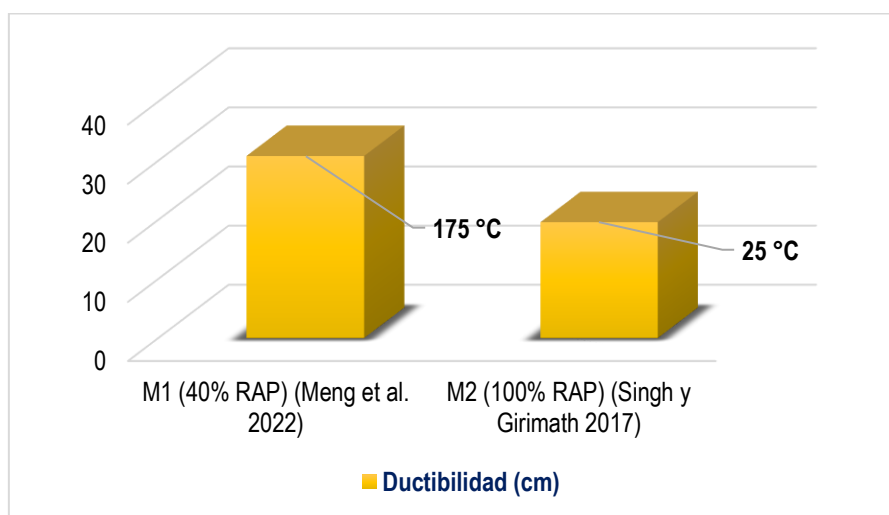
Propiedades físicas del RAP

Para implementar RAP en los pavimentos asfálticos se debe realizar un análisis detallado para determinar las características de sus propiedades ya sea con aglutinantes, betunes u otros materiales que ayuden en su estabilización [42], por ello es necesario realizar pruebas que demuestren la analogía existente en las propiedades de penetración, ductilidad, punto de ablandamiento, y viscosidad [6]. De tal manera, dicho material se considera una práctica sobresaliente que minimiza el uso de energía y materias primas, con llevando a la conservación y reducción de los espacios destinados para rellenos sanitarios [3].

En la **Figura 6** se evidencia que las mezclas asfálticas con integración de RAP + aditivo Kulun SBS alcanza una ductilidad máxima de 30.8 cm a una temperatura de 175 °C [43], mientras que [36] en su investigación alcanzo una ductilidad mínima de 19.6 cm a una temperatura de 25°C sin adicionar aditivo. Cabe resaltar que esta propiedad considera las temperaturas y procesos a emplearse en el ensayo y de evidenciarse una ductilidad baja en el asfalto podría ocasionar agrietamientos o disminución en su adherencia.

Figura 6.

Influencia de la temperatura en la ductilidad de mezclas asfálticas con RAP



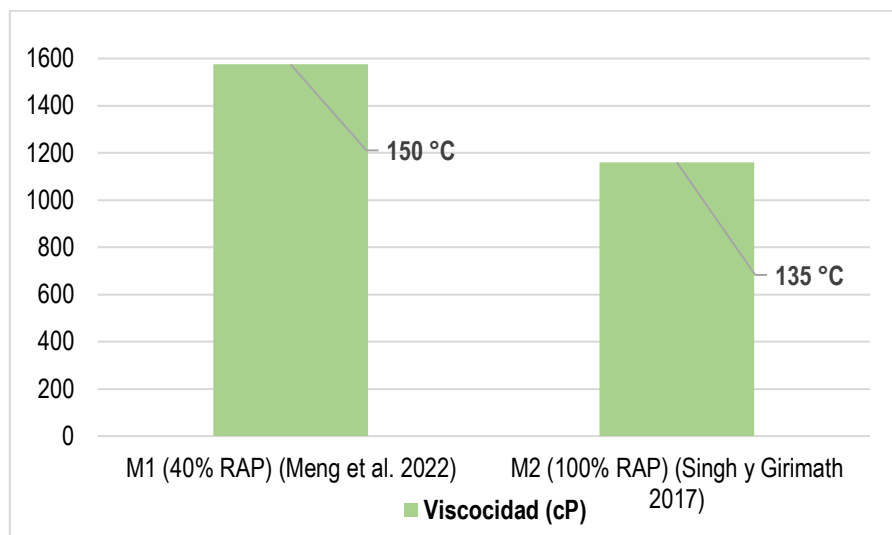
Fuente: Elaboración a partir de los resultados de los autores referidos.

Mediante la **Figura 7** sintetiza los resultados del ensayo de viscosidad en las mezclas con asfalto recuperado, hallando que a mayor temperatura la viscosidad tiende a disminuir [36], mientras que a menor temperatura la viscosidad aumenta con el uso del aditivo Kulun SBS [43].

Por tal motivo, las características de la viscosidad varían acorde al contenido de aditivos o los niveles de adición de RAP considerados, ya que influyen en la deformación de la mezcla del concreto asfáltico.

Figura 7.

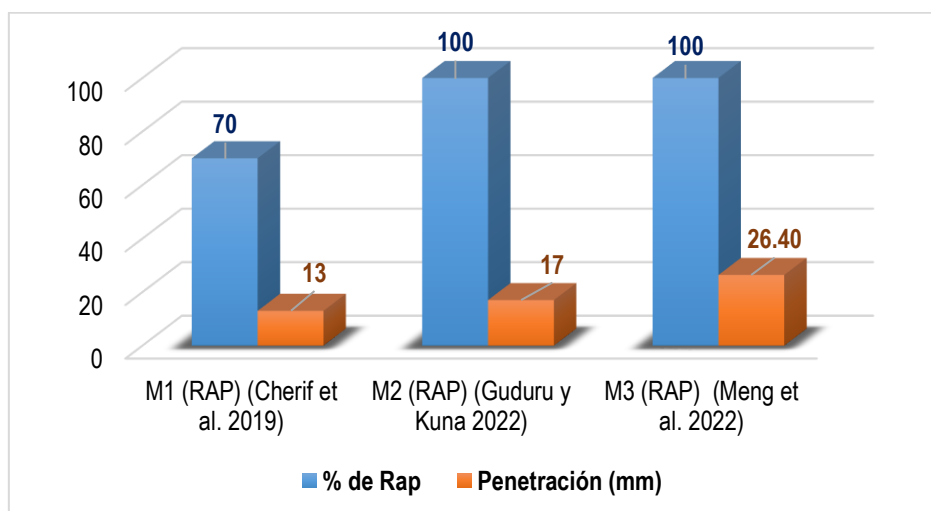
Viscosidad de las mezclas asfálticas con RAP



Fuente: Elaboración a partir de los resultados de los autores referidos

Figura 8.

Evaluación de incorporación de RAP en el ensayo de penetración a 25°C



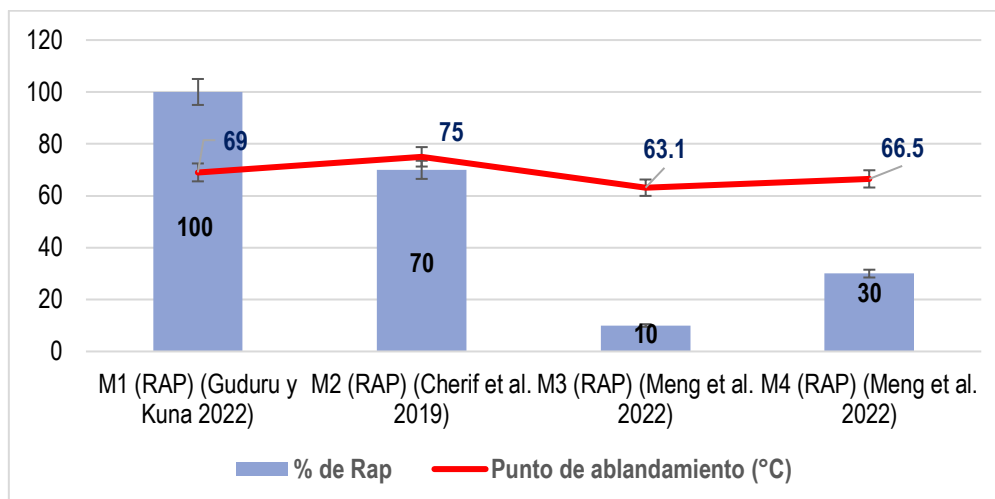
Fuente: Elaboración a partir de los resultados de los autores referidos.

Considerando la **Figura 8** del ensayo de Penetración a 25 °C [6] usaron 100% de contenido de RAP para su diseño obteniendo 17 mm de penetración, a diferencia [43] empleó el mismo contenido de RAP adicionando aditivo Kunlun SBS lo que le permitió aumentar la penetración a 26.40 mm. Por su parte, [4] aplicó 70% de RAP reflejando el resultado de 13 mm

de penetración. Esto indica que las muestras utilizadas presentan un alto grado de rigidez ya que sus penetraciones son bajas, con llevando a problemas de ruptura y grietas en el pavimento asfáltico.

Figura 9.

Punto de ablandamiento °C de RAP



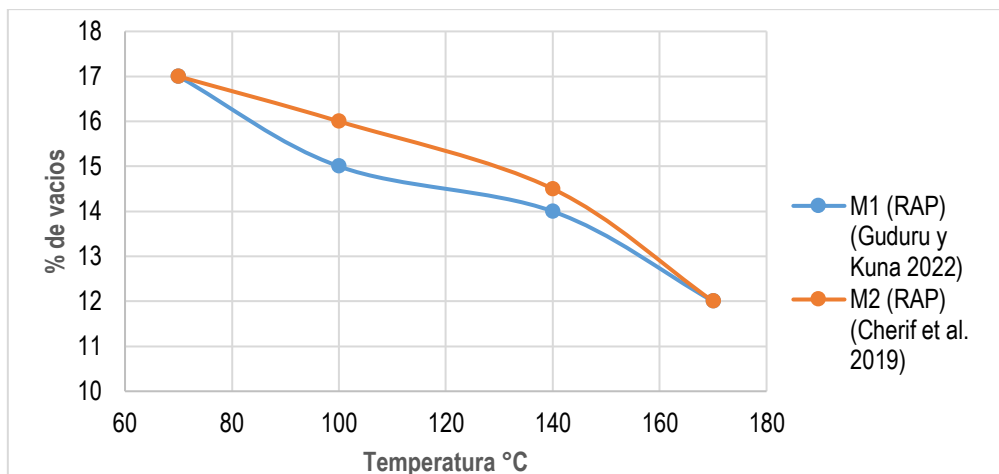
Fuente: Elaboración a partir de los resultados de los autores referidos.

A través de la **Figura 9** se evaluó 4 muestras en función del contenido de RAP para determinar el punto de ablandamiento. [6] utilizó 100% de RAP determinándolo a 69 °C, de manera similar [4] lo determinó a 75 °C con un 70% de RAP. Por su parte, [43] utilizó aditivo kunlun SBS en dos muestras que contenían 10% y 30 % de RAP obteniendo valores de 63.10 °C y 66.5°C. De los resultados estudiados se resalta que la variación de la incorporación de RAP no influye en determinar el punto de ablandamiento, debido que se relaciona con la temperatura a la que el asfalto alcanza el cambio gradual de la consistencia o estado de fluidez. Seguidamente, el porcentaje de vacíos se evaluó en relación con el contenido de RAP añadido. [4] añadió 70% de RAP evidenciando 3.2% de vacíos, mientras que [44] emplearon 25%, 45% y 100% de RAP + aditivo rejuvenecedor obtuvieron menor porcentaje de vacíos en relación a la muestra de mayor contenido de RAP. De manera similar, [45] realizaron 3 muestras con 30%, 40% y 50% de RAP donde el menor porcentaje de vacíos es 3.2 en relación al mayor porcentaje de adición. [46] realizó 2 muestras con 30% de RAP, pero a una le adicionó aditivo rejuvenecedor reflejándose que el menor porcentaje de vacíos 2.8% se obtuvo en la muestra con aditivo. Por otro lado, [47] utilizó 2 muestras con 45% de RAP + 0.3% y + 3.5% de rejuvenecedor, evidenciando que el menor valor de porcentaje de vacíos 1.2 % resultó de la menor adición de rejuvenecedor. Así mismo, la **Figura 10**, muestra el porcentaje de vacíos en

base a la temperatura, [6] y [4] en sus estudios evidenciaron que a mayor temperatura (170°C) menor porcentaje de vacíos obteniendo 12%. A medida que incrementa el RAP y se aumenta la temperatura en la mezcla, se observa una reducción en el porcentaje de espacios vacíos. Es importante destacar que el porcentaje de vacíos debe estabilizarse en un nivel óptimo, ya que esto determina la fluidez y capacidad del asfalto.

Figura 10.

Influencia de la temperatura en el porcentaje de vacíos en MAM con RAP

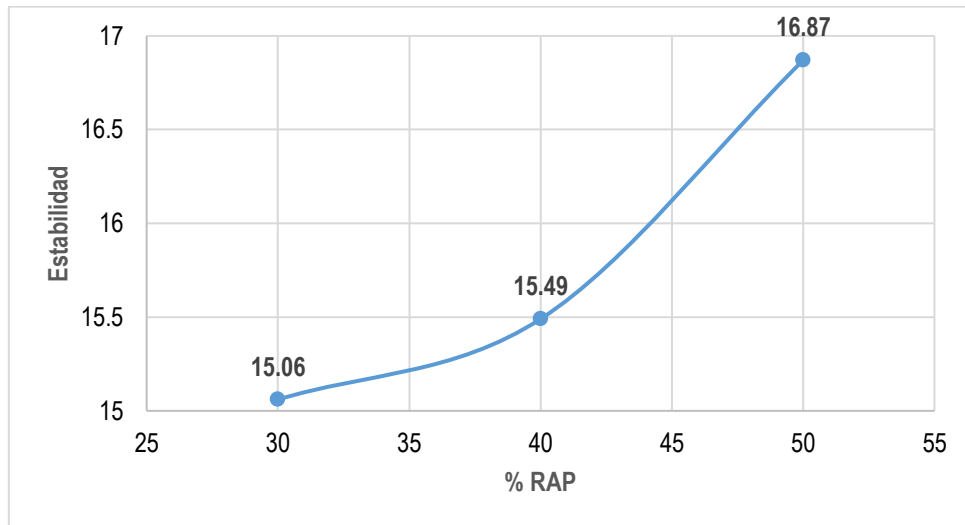


Fuente: Elaboración a partir de los resultados de los autores referidos.

Finalmente, [18] en la **Figura 11** analizo la estabilidad con porcentajes de 30 %, 40% y 50% de RAP adicionados a mezclas asfálticas, obteniendo mayor estabilidad de 16.87 en base al porcentaje más alto de adición. De ello se deduce que a mayor porcentaje de contenido de RAP, mayor estabilidad se alcanza, por lo tanto la mezcla adoptaría una alta resistencia ante deformaciones influyendo en el comportamiento del asfalto.

Figura 11.

Estabilidad en mezclas asfálticas modificadas con diversas partículas de RAP



Fuente: Elaboración a partir de los resultados de los autores referidos.

Nota: [18]

Propiedades físicas de mezclas asfálticas con CR + RAP

Mediante la **Tabla 1** se aprecia 3 tipos de mezclas con RAP, las cuales [48] analizó sus propiedades físicas usando RAP + 30% CMA + 8% de rejuvenecedor (Mezcla 1), RAP + 50% CMA + 8% de rejuvenecedor (Mezcla 2) y RAP + 70% CMA + 8% de rejuvenecedor (Mezcla 3). De esta manera, se obtuvo que la mezcla óptima se logró con mayor porcentaje de partículas de CR sumado al rejuvenecedor, es decir mezcla 3. Cabe resaltar, que las propiedades físicas del asfalto modificado tienden a mejorar, debido a las ventajas del agente rejuvenecedor y al contenido de caucho que permiten un eficiente rendimiento de la mezcla asfáltica.

Tabla 1.

Propiedades físicas en diferentes tipos de mezclas asfálticas con RAP y CMA

Propiedades	M1 (RAP+30 % CMA+8% rejuvenecedor)	M2 (RAP+50 % CMA+8% rejuvenecedor)	M3 (RAP+70 % CMA+8% rejuvenecedor)
Penetración (25°C)	62.2	57	57.5
Punto de ablandamiento (°C)	54.4	57.1	59.4
Ductilidad (5 °C)	7.9	8.4	11.4
Resiliencia (%)	43	63	71
Viscosidad a 60 °C (Pa-s)	1020	1650	5070

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Tabla construida en base a los resultados de [48]

Materiales y métodos

Tipo de investigación

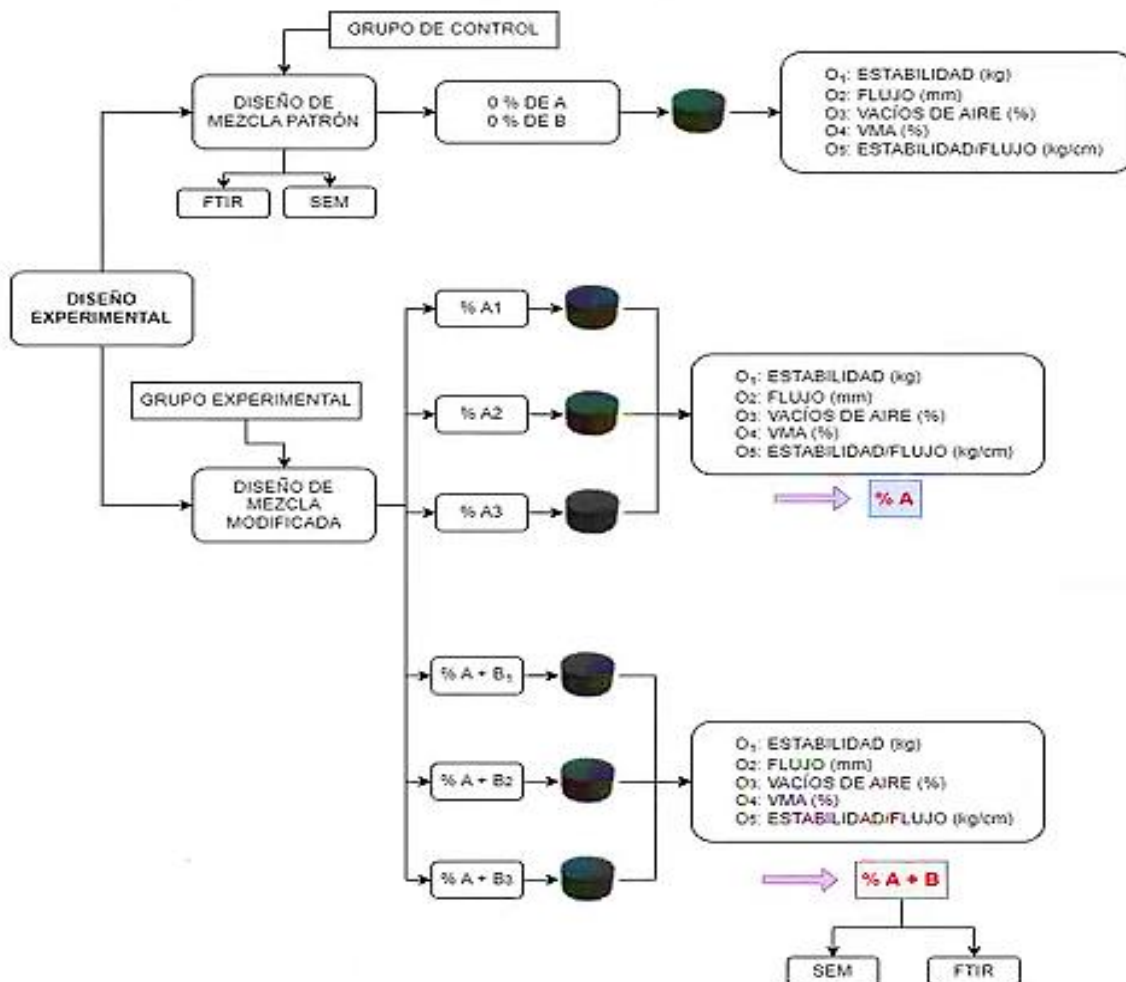
La investigación tiene un enfoque cuantitativo, es de tipo aplicada. La investigación plantea que en el contexto local se puede aplicar resultados científicos de investigadores a nivel internacional, delimitado geográfica y temporalmente.

Diseño de investigación

Se aplicó en la investigación un diseño experimental, de tipo cuasiexperimental con grupo de control. Se cumplió con la aplicación del siguiente esquema de diseño es:

Figura 12.

Diagrama detallado del diseño de la investigación.



Fuente: Elaboración propia.

Nota: "A" representa el caucho pulverizado en 1, 2 y 3% como experimentación inicial; "B" representa el RAP en 10, 15 y 20%; el "%A+B" representa la combinación final.

Variables y operacionalización

Variable independiente

Caucho pulverizado reciclado (PCR) y Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP)

Variable dependiente

Propiedades físico–mecánicas de la mezcla asfáltica modificada.

Población y muestra

Población

Representado por la mezcla asfáltica en caliente elaborado con cemento asfáltico PEN 60/70, agregados (grueso y fino) proveniente de cantera “Tres Tomas” y con la incorporación de caucho pulverizado como sustituto parcial del cemento asfáltico y RAP como sustituto parcial del agregado.

Muestra

La muestra se conformó por el ensayo de 110 briquetas que se organizan en la siguiente tabla:

Tabla 2.

Resumen de la cantidad de briquetas para cada mezcla de experimentación.

Diseño de mezclas asfálticas (asfalto 60/70)	
Mezcla asfáltica convencional – Grupo con agregados naturales	# de briquetas
Contenido óptimo de asfalto	15
Mezcla asfáltica modificada 1 – Grupo experimental	
% óptimo patrón + reemplazo 1% PCR	15
% óptimo patrón + reemplazo 2% PCR	15
% óptimo patrón + reemplazo 3% PCR	15
Mezcla asfáltica modificada 2 – Grupo experimental	
% óptimo patrón + % óptima PCR + reemplazo de 10 % RAP	15
% óptimo patrón + % óptima PCR + reemplazo de 15 % RAP	15
% óptimo patrón + % óptima PCR + reemplazo de 20 % RAP	15
Análisis microestructural – Grupo descriptivo (no experimental)	

Diseño patrón	1
% óptimo de PCR + RAP + % óptimo de asfalto	1
Σ BRIQUETAS	107

Fuente: Elaboración propia.

Nota 1*: El método Marshall determina la estabilidad y flujo (deformación). De dichos resultados se obtienen gráficas de estabilidad, fluencia, densidad, vacíos en los agregados minerales y huecos en la mezcla.

Nota 2*: el número de probetas cilíndricas o especímenes (3 briquetas por cada % de contenido de asfalto)

Nota 3*: especímenes de ϕ 101.6 mm, h=75 mm con el plato base y martillo de compactación de 4.5 kg

Criterios de Inclusión

1. Tipo de mezcla asfáltica:

- Mezcla asfáltica convencional con agregados naturales.
- Mezcla asfáltica modificada con PCR en reemplazos del 1%, 2%, y 3%.
- Mezcla asfáltica modificada con PCR y RAP en reemplazos del 10%, 15%, y 20%.

2. Número de briquetas:

- Deben estar conformadas por 15 briquetas para cada combinación de mezcla, excepto para el análisis microestructural descriptivo que incluye 1 briqueta por diseño: MAC patrón y MAM óptima.

3. Proporción de asfalto:

- Deben utilizar el contenido óptimo de asfalto 60/70 establecido en el diseño.

4. Análisis microestructural:

- Incluir las briquetas para el análisis microestructural descriptivo, específicamente las briquetas con el diseño patrón y las que contienen el % óptimo de PCR y RAP con el % óptimo de asfalto.

Criterios de Exclusión

1. Mezclas fuera del rango establecido:

- Cualquier mezcla que no cumpla con los porcentajes de reemplazo específicos de 1%, 2%, y 3% para PCR y 10%, 15%, y 20% para RAP.
- Mezclas asfálticas con contenidos de asfalto diferentes al óptimo de 60/70.

2. Briquetas con daños visibles o defectos:

- Briquetas que presenten fracturas, fisuras, o cualquier otro tipo de daño que pueda afectar los resultados del análisis.

3. Duplicados o muestras redundantes:

- Briquetas duplicadas que no aporten nueva información relevante para el estudio.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos para el desarrollo del proyecto se fundamenta en la técnica de observación directa, ya que se registra la información obtenida de los ensayos de laboratorio. También se aplicó la técnica de observación indirecta para los ensayos microestructurales y otros no desarrollados en el laboratorio de la universidad, donde el instrumento de recolección de datos es una ficha resumen de resultados.

A continuación, se tabula las técnicas e instrumentos que recolectaron la información según la normativa del [31].

Tabla 3

Técnicas e instrumentos aplicado en la investigación relacionado con la norma

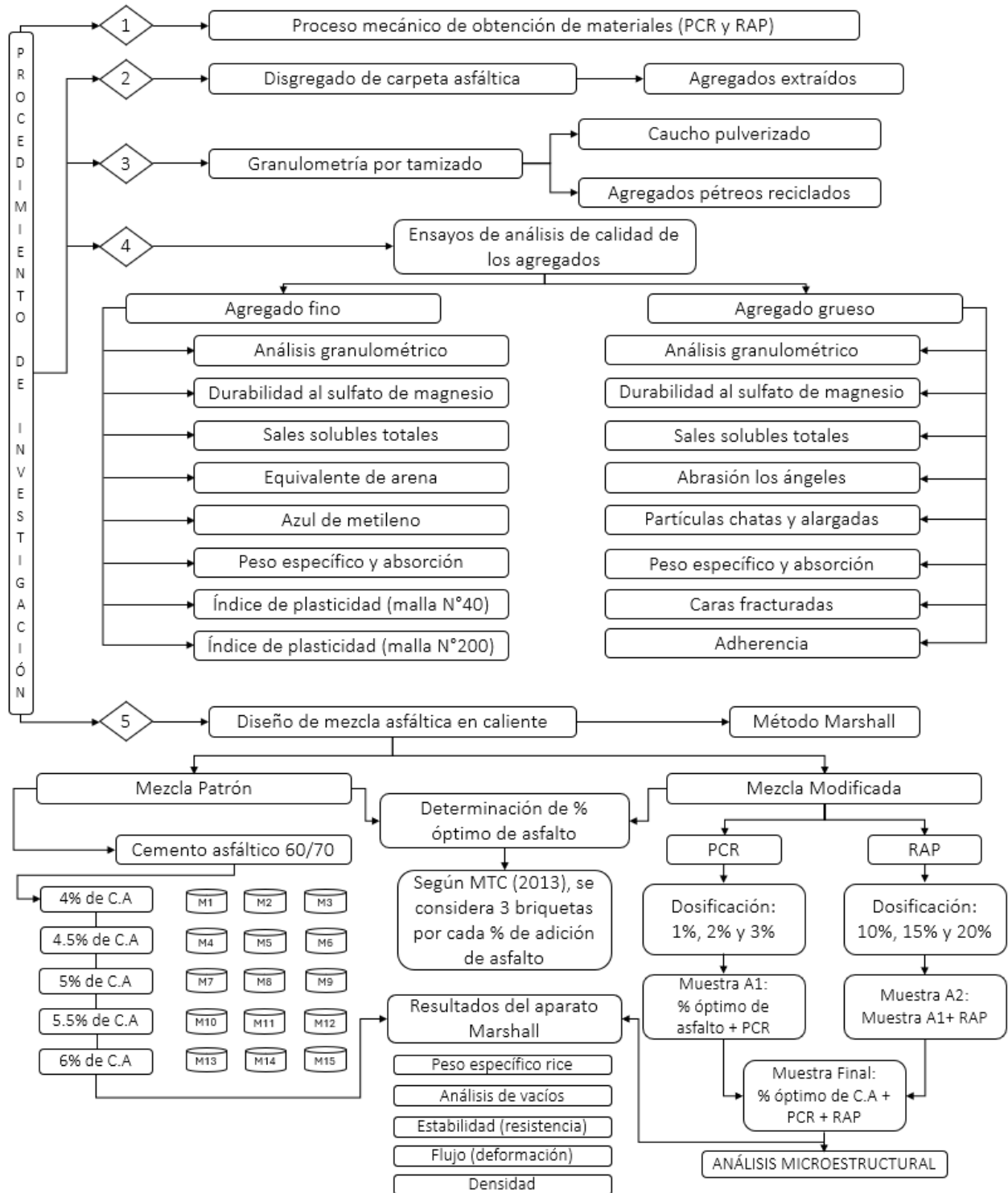
Recolección de datos de los ensayos	Normativa	Técnica/Instrumento
Agregado grueso		
Análisis Granulométrico por Tamizado	400.012:13	Tamices de tamaños diferentes
Durabilidad al Sulfato de Sodio y Sulfato de Magnesio	400.016:11	Solución de sulfato de sodio/magnesio, estufa
Abrasión con la Máquina de los Ángeles	400.019:14	Máquina de Los Ángeles
Partículas chatas y alargadas	400.040:99	Calibrador de partículas
Partículas fracturadas	ASTM D5821	Microscopio estereoscópico
Sales Solubles en grava	339.152:02	Equipo de destilación
Peso específico y absorción	400.021:13	Balanza, picnómetro

Agregado fino		
Análisis Granulométrico por Tamizado	400.012:13	Tamices de tamaños diferentes
Durabilidad al Sulfato de Sodio y de Magnesio	400.016:11	Solución de sulfato de sodio/magnesio, estufa
Equivalente de arena	339.146:2000	Cilindro graduado
Sales Solubles en arena	339.178:02	Equipo de destilación
Valor de azul de metileno	AASTHO-T57	Agitador mecánico
Peso específico y absorción	400.022:13	Balanza, picnómetro
Índice de limite líquido - malla N.º40	339.129:99	Dispositivo de Casagrande
Índice de plástico – malla N.º200		
Absorción en finos	400.022:13	Balanza, picnómetro
Ensayo de angularidad	MTC, E-222	Medidor de angularidad
Método RICE	ASTM D2726	Picnómetro, desecador
Diseño de mezclas - Método Marshall	ASTM D5581	Prensa Marshall, moldes Marshall
Estabilidad (kg)	ASTM D5581	Prensa Marshall
Flujo (mm)		Extensómetro
Porcentaje de vacíos de aire (%)		Medidor de vacío
Porcentaje de vacíos de los minerales (%)		
Porcentaje lleno de asfalto (%)		Balanza
Relación estabilidad / flujo		Extensómetro
Características microestructurales		
Análisis espectroscopia infrarroja (FTIR)		Espectrómetro infrarrojo
Microscopía electrónica de barrido (SEM)		Microscopio electrónico de barrido

Procedimientos

Se describe de forma gráfica en el croquis mostrado a continuación:

Figura 13
Proceso general del desarrollado en la investigación



Fuente: Elaboración propia.

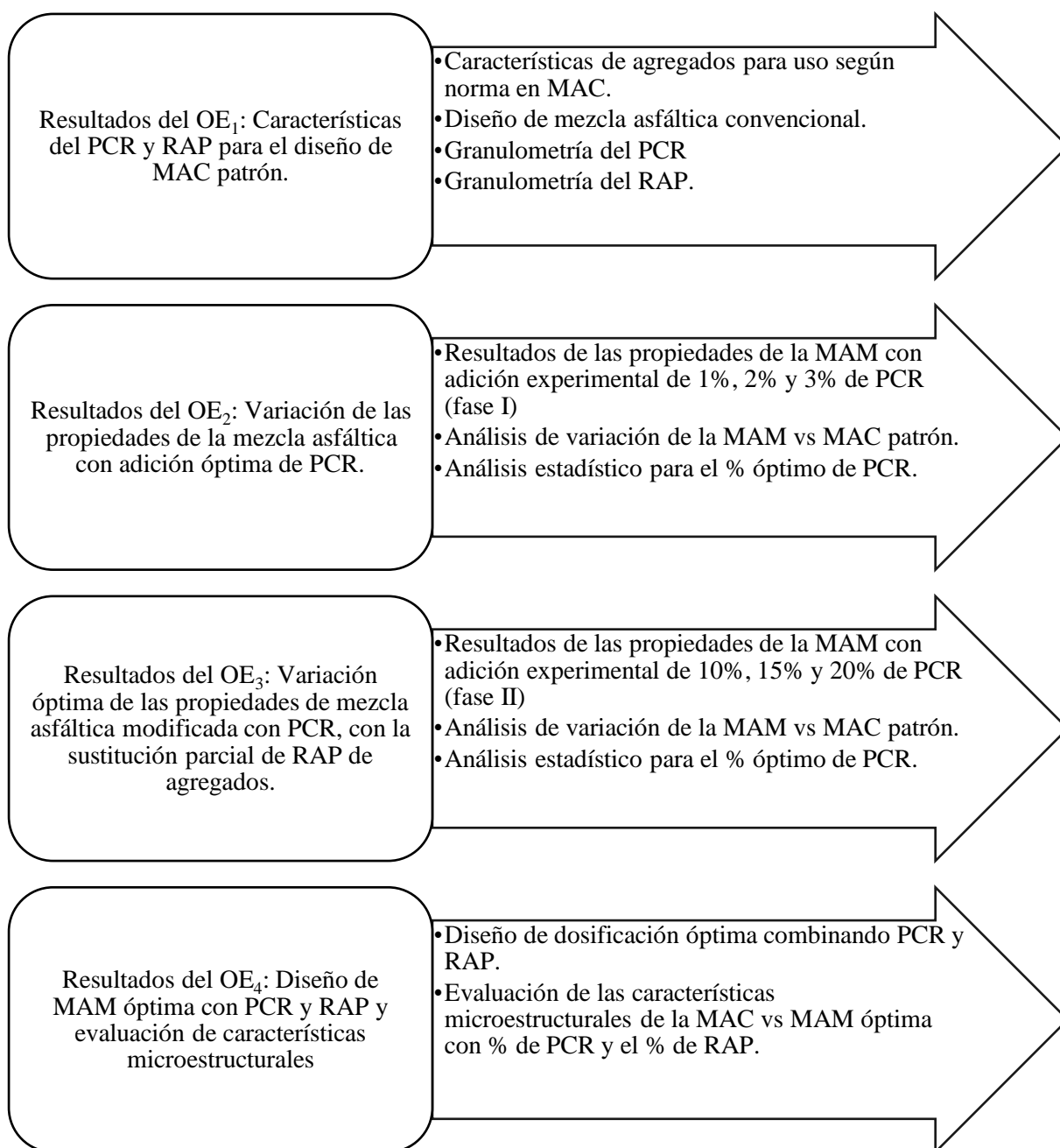
Resultados y discusión

Resultados

Se presenta a continuación las actividades que corresponde al cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos como parte de los resultados.

Figura 14

Proceso detallado de la generación de resultados en la investigación



Resultados del OE₁:**a) Características de agregados para uso según norma en MAC:**

Se presenta a continuación la tabulación de los resultados del estudio de agregados de acuerdo con las especificaciones de las normas técnicas peruana.

Tabla 4

Resultados de ensayos del agregado fino para la MAC en cumplimiento de la norma.

Indicador (agregado fino)	Resultado	Norma MTC-Perú
Equivalente de arena (%)	68	[>60%]
Angularidad (%)	20	[<30%]
Azul de metileno (ml)	2.73	[<8%]
Índice de plasticidad (#40)	NP	NP
Índice de plasticidad (#200) (%)	2.72	[<4%]
Índice de durabilidad (%)	13.3	[<35%]
Sales solubles (%)	0.16	[<0.5%]
Absorción (%)	0.40	[<0.5%]

Nota: La muestra se ha extraído de la cantera Tres Tomas, Ferreñafe, Lambayeque.

Tabla 5

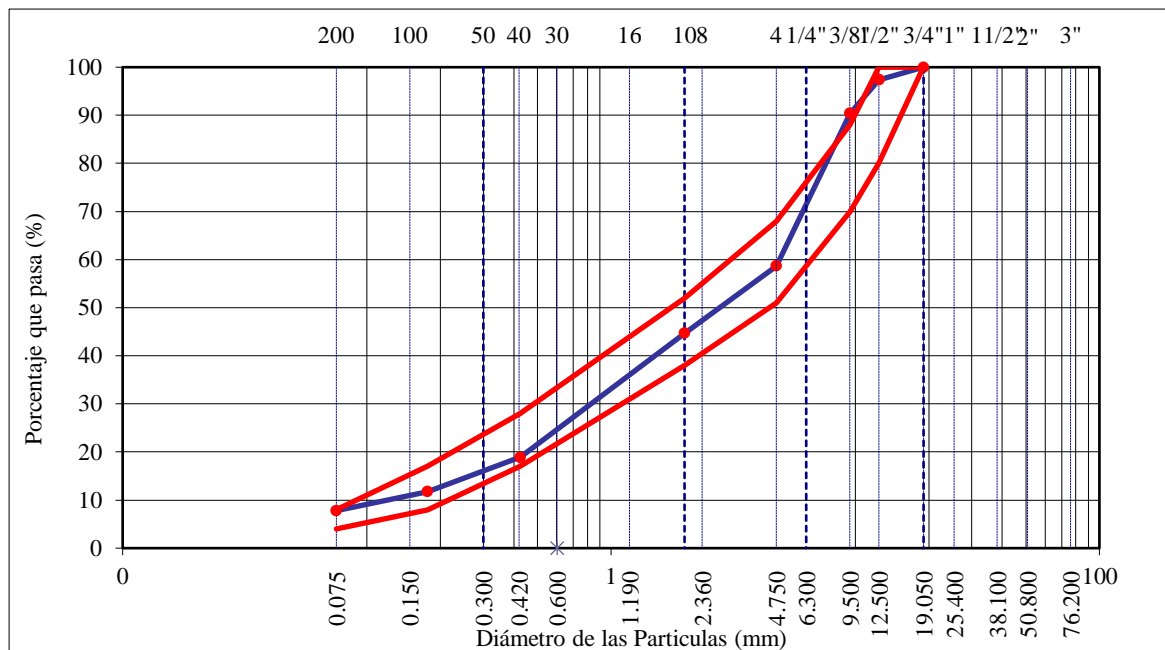
Resultados de ensayos del agregado grueso para la MAC en cumplimiento de la norma.

Indicador (agregado grueso)	Resultado	Norma MTC-Perú
Durabilidad (%)	13.30	[<18%]
Abrasión (%)	16.50	[<40%]
Partículas chatas y alargadas (%)	6.00	[<10%]
Caras fracturadas (--)	1.60	85/50
Sales solubles (%)	0.50	[<0.5%]
Absorción (%)	0.40	[<1.0%]

Nota: La muestra se ha extraído de la cantera Tres Tomas, Ferreñafe, Lambayeque

Figura 15

Curva granulométrica de agregados con límites establecidos en norma.



Nota: Gráfico elaborado a partir de los resultados de ensayo elaborado en LEM-USAT. Las curvas límites (líneas rojas) son establecidas por la norma MTC E204.

Los resultados demuestran que ambos tipos de agregados cumplen satisfactoriamente con los requisitos establecidos. Para los agregados finos, se observó que el equivalente de arena es del 68%, superior al mínimo requerido del 60%, lo que indica una buena calidad del material. La angularidad se encuentra dentro del rango permitido, siendo del 20% (menor al 30%). Los ensayos de azul de metileno y durabilidad muestran valores de 2.73 ml y 13.3% respectivamente, ambos dentro de los límites aceptables, mientras que los índices de plasticidad y las sales solubles también cumplen con los estándares. La absorción de agua es mínima, con un valor de 0.40%, lo que es favorable para la estabilidad de la mezcla.

En cuanto a los agregados gruesos, los resultados indican una durabilidad del 13.30%, y una abrasión del 16.50%, ambos por debajo de los límites máximos permitidos, reflejando una alta resistencia a la degradación mecánica. La proporción de partículas chatas y alargadas es del 6%, y las caras fracturadas tienen un valor de 1.60%, ambos dentro de los valores normativos. La solubilidad en sales y la absorción de agua son bajas, con valores de 0.50% y 0.40%, respectivamente, indicando una buena resistencia química y baja absorción de humedad. La curva granulométrica de los agregados también está en conformidad con los límites

establecidos, lo que asegura una distribución adecuada de tamaños de partículas para la mezcla asfáltica, contribuyendo a la estabilidad y durabilidad del pavimento.

b) Diseño de mezcla asfáltica convencional:

El diseño de la mezcla asfáltica en caliente considera el uso de los materiales: cemento asfáltico, agregado grueso y fino de la cantera natural Tres Tomas, Ferreñafe-Perú, el uso de cemento Portland Pacasmayo como filler con 2% del peso de la muestra. A partir de la experimentación de los porcentajes 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%; se estableció que el mejor % es el de 4.9%. La granulometría corresponde a un diseño MAC-2 y para determinar el porcentaje óptimo de PCR se realizó ensayos mediante el Método Marshall, con dosificaciones de 37% grava triturada, 63% arena triturada, 2% cemento portland y 4.9% de óptimo de cemento asfáltico (PEN 60/70) que fue sustituido parcialmente respecto al peso del cemento asfáltico en proporciones de 1%, 2% y 3%.

Tabla 6

Diseño de la mezcla asfáltica patrón

Óptimo Contenido C.A.	4.9
Vacíos del Agregado mineral (%)	20.00
Vacíos Llenados de C.A (%)	75.00
Peso Unitario (gr/cm ²)	2.240
Vacíos (%)	3.00
Flujo (mm)	6.20
Estabilidad (Kg)	2134
Relación Polvo Asfalto	0.63

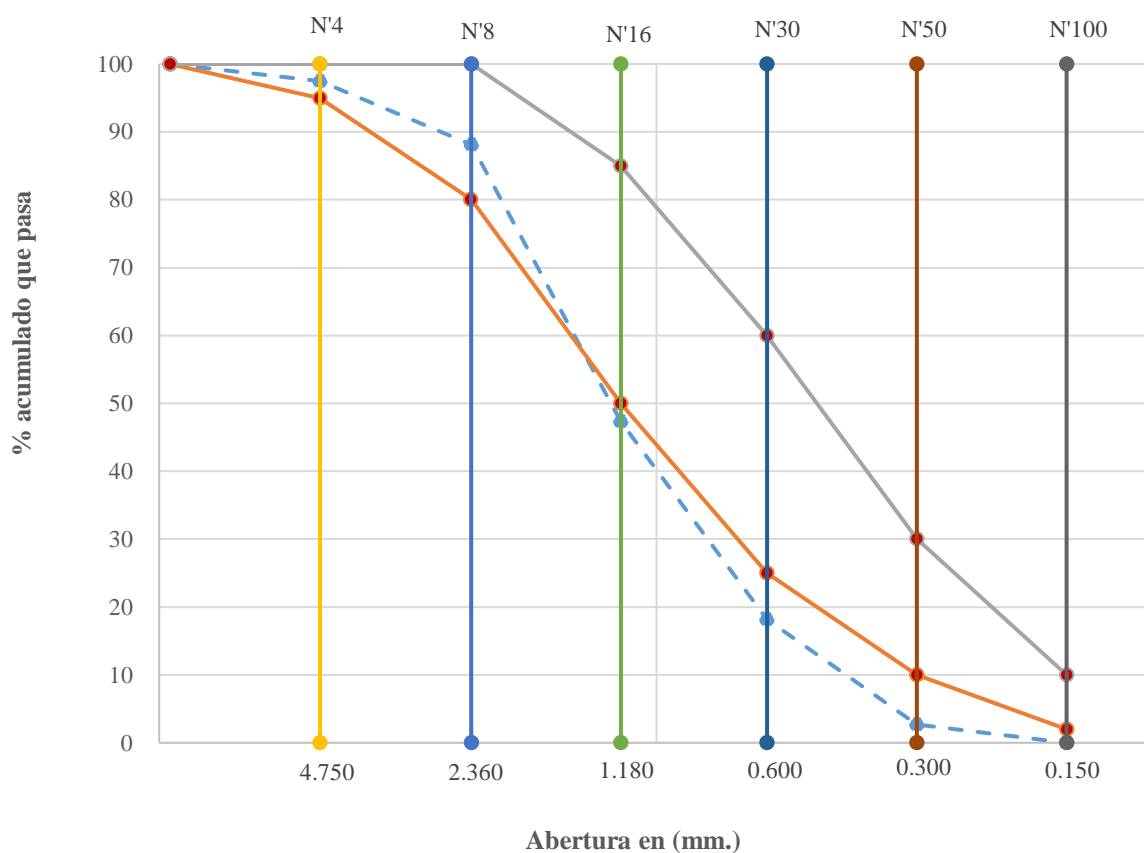
Nota: Resumen de resultados a partir de la experimentación de 4%, 4.5%, 5%, 5.5% y 6%.

La Tabla 6 presenta el diseño de la mezcla asfáltica patrón, indicando que el contenido óptimo de asfalto es del 4.9%. Los vacíos del agregado mineral se encuentran en 20.00%, mientras que los vacíos llenados de cemento asfáltico (C.A) alcanzan el 75.00%, lo que sugiere una adecuada penetración del asfalto en los vacíos del agregado, mejorando la cohesión y durabilidad de la mezcla. El peso unitario es de 2.240 gr/cm², indicando una buena compactación de la mezcla. Los vacíos totales de la mezcla son del 3.00%, lo que está dentro de los valores esperados para garantizar suficiente espacio para la expansión del asfalto sin comprometer la estabilidad estructural. El flujo de la mezcla es de 6.20 mm, indicando una buena capacidad de deformación bajo cargas, y la estabilidad, medida en 2134 Kg, refleja una

alta resistencia a las deformaciones permanentes. Finalmente, la relación polvo-asfalto es de 0.63, lo cual es indicativo de un balance adecuado entre la cantidad de finos y el contenido de asfalto, contribuyendo a una mezcla homogénea y duradera.

c) Granulometría del PCR.

Figura 16
Granulometría del PCR contrastada con la norma NFU (2013).



Nota: El caucho pulverizado cumple con estar entre los husos establecidos por la norma referida.

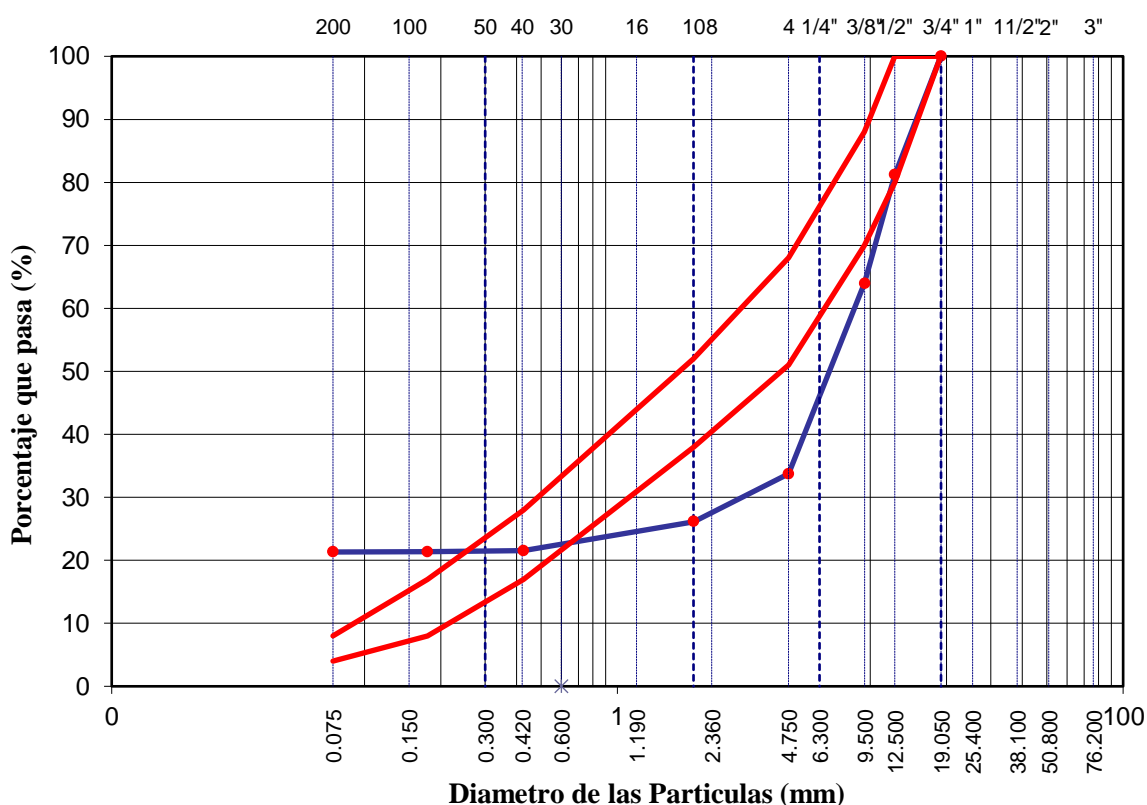
La *Figura 16* muestra que las curvas granulométricas de diferentes tamices, desde el N°4 (4.75 mm) hasta el N°100 (0.15 mm) cuyos resultados indican que el PCR utilizado cumple con los intervalos granulométricos establecidos por la norma, lo cual es esencial para su uso en mezclas asfálticas modificadas (MAM). La granulometría adecuada asegura que el PCR se distribuya homogéneamente en la mezcla asfáltica, mejorando las propiedades mecánicas y de durabilidad del pavimento. El cumplimiento de estos parámetros granulométricos es crucial para garantizar

que el PCR contribuya eficazmente a la resistencia y estabilidad de la mezcla, optimizando así su desempeño en condiciones de carga y clima variables. En resumen, el análisis granulométrico confirma que el PCR seleccionado es apto para su incorporación en MAM, cumpliendo con los estándares de calidad necesarios para aplicaciones viales.

d) Granulometría del RAP

Figura 17

Granulometría del RAP contrastado con la norma MTC E107.



La **Figura 17** muestra la granulometría del RAP comparada con la norma MTC E107. A pesar de que una parte de la curva granulométrica no se encuentra completamente dentro de los límites establecidos, es importante señalar que este resultado se debe al proceso de tratamiento de la muestra mediante el disgregado de la carpeta asfáltica, y no con una extracción cuantitativa. Este método de disgregado puede generar una distribución de tamaños de partículas ligeramente diferente a la obtenida por métodos más controlados. Sin embargo, esta desviación no afecta significativamente su uso en MAM. La granulometría obtenida sigue siendo adecuada para la incorporación en MAM, ya que proporciona una distribución de partículas que contribuye a la estabilidad y durabilidad del pavimento. El RAP, incluso con la variación observada, cumple con los requisitos funcionales necesarios y es capaz de mejorar las

propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, asegurando un buen desempeño en términos de resistencia y durabilidad. Aunque el proceso de tratamiento puede influir en la granulometría, el RAP sigue siendo un componente viable y efectivo para su uso en MAM.

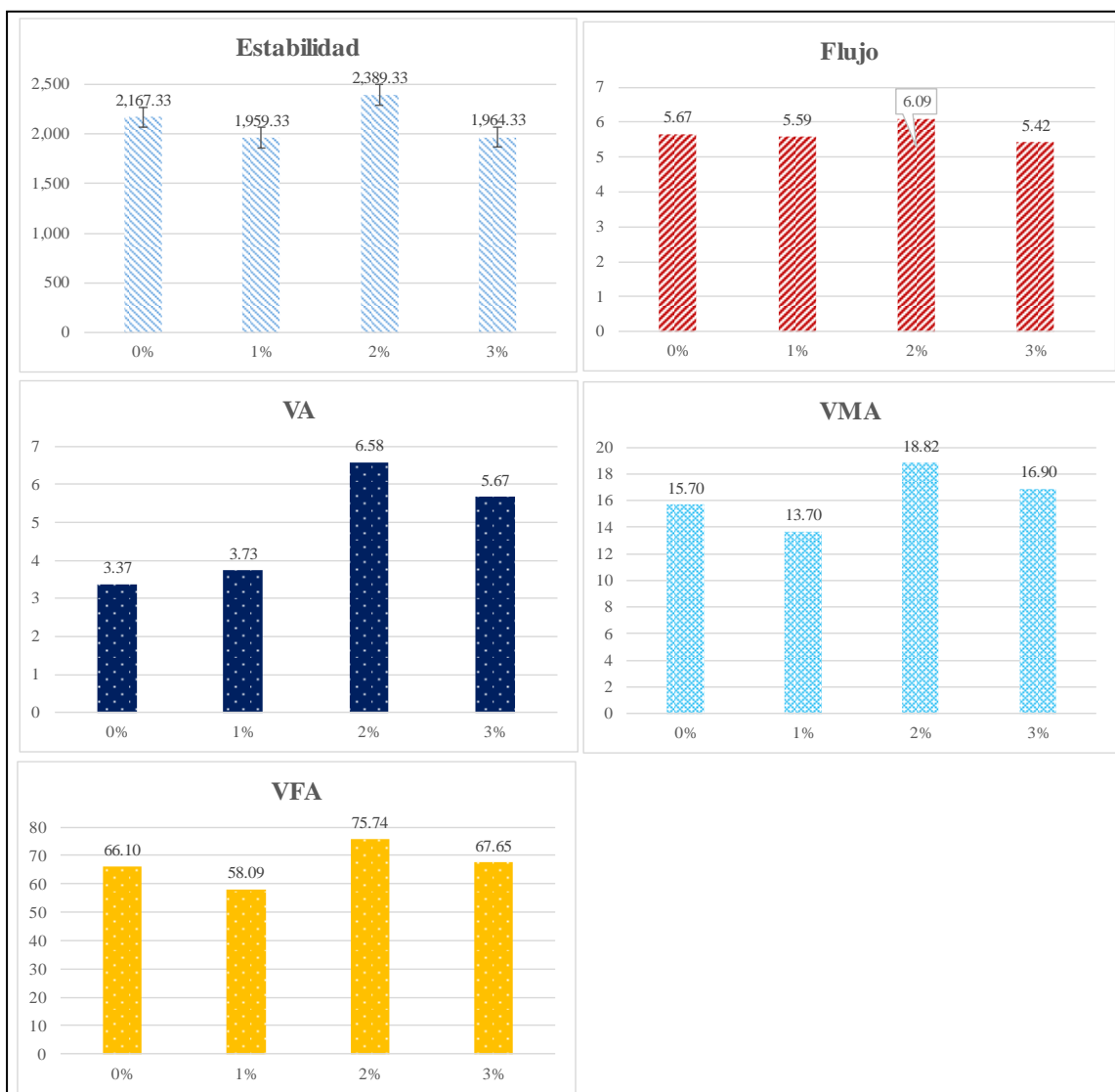
Resultados del OE₂:

a) Resultados de las propiedades de la MAM con adición experimental de 1%, 2% y 3% de PCR (fase I):

Se realizó una comparación mediante gráficos de cada una de las propiedades estudiadas para contraste con la muestra patrón.

Figura 18

Resultados de cada propiedad para cada % experimental de PCR.



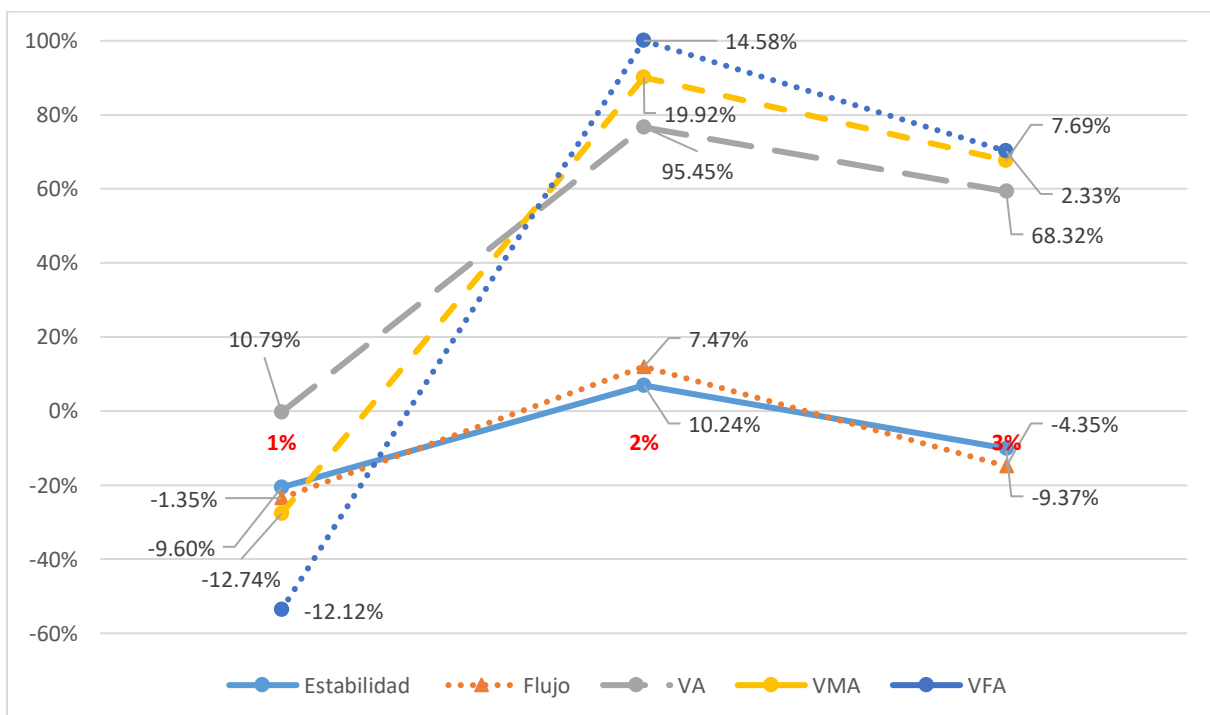
Nota: VA: % vacíos con aire, VMA: % vacíos del agregado mineral; VCA: % vacíos llenado de cemento asfáltico.

La adición de Caucho Reciclado (PCR) en la mezcla asfáltica tiene un impacto notable en sus propiedades mecánicas, como se muestra en la gráfica. Hasta un 2% de PCR, se observa una mejora en la estabilidad, alcanzando su valor máximo en 2,389.33, y en el flujo, con un incremento a 6.09, lo que indica una mezcla más flexible y resistente. Sin embargo, con un 3% de PCR, la estabilidad disminuye a 1,964.33 y el flujo baja a 5.42, sugiriendo que cantidades superiores a 2% pueden debilitar la mezcla. Los vacíos de aire (VA) aumentan significativamente con un 2% de PCR, lo que podría comprometer la durabilidad debido a una mayor porosidad. El volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA) también muestra un aumento considerable al 2%, lo que mejora la adhesión del asfalto al agregado. Los vacíos de compactación aparente (VCA) disminuyen inicialmente con 1% de PCR, pero aumentan con 2% y 3%, indicando variaciones en la densidad de la mezcla. En resumen, un contenido de hasta 2% de PCR optimiza varias propiedades mecánicas, pero adiciones mayores deben ser evaluadas cuidadosamente para evitar efectos adversos en la durabilidad y estabilidad de la mezcla.

b) Variación de los resultados del MAM respecto al MAC patrón:

Figura 19

Variación de las propiedades de la adición de PCR respecto al patrón.



La estabilidad disminuye ligeramente al 1% (-1.35%) y 3% (-4.35%), pero muestra una mejora significativa al 2% (14.58%). El flujo experimenta un aumento al 2% (7.47%) y luego disminuye al 3% (-9.37%), indicando una mayor flexibilidad con el 2% de PCR. Los vacíos (VA) incrementan considerablemente con la adición de PCR, alcanzando su pico al 2% (95.45%), lo que sugiere una mayor porosidad y posible disminución en durabilidad. El volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA) también aumenta, especialmente al 2% (19.92%), mejorando la adhesión del asfalto al agregado. Los vacíos de compactación aparente (VCA) muestran una tendencia a disminuir inicialmente al 1% (-12.74%) y 3% (68.32%) y luego aumentan notablemente al 2% (7.69%). En resumen, la adición de 2% de PCR optimiza varias propiedades mecánicas, mejorando la estabilidad y flexibilidad de la mezcla, aunque incrementa la porosidad. Adiciones superiores a 2% deben ser evaluadas con cautela debido a sus efectos negativos en la cohesión y durabilidad de la mezcla.

c) Análisis estadístico del porcentaje óptimo de la adición de PCR.

El análisis estadístico se realizó aplicando el diseño aleatorio complementario con el fin de evaluar su nivel de significancia estadística en cada una de las propiedades de las mezclas asfálticas realizadas. Para evaluar la significancia se deben cumplir supuestos tales como: (1) Normalidad, (2) Homocedasticidad.

Si en la prueba de Normalidad el valor $p < 0.05$, se rechaza la H_0 y se evalúa la significancia mediante la Prueba Post-Hoc de Kruskal Wallis, pero si el valor de p es mayor a 0.05 se acepta la H_0 y se verifica la homogeneidad de variación entre las muestras, donde si el valor de $p < 0.05$ se rechaza la H_0 y se mide la significancia usando el test Post-Hoc de Games-Howell prueba, pero $p > 0,05$, se acepta H_0 y la significancia se mide mediante ANOVA.

El análisis estadístico se realizó utilizando SPSS y se consideraron las últimas combinaciones de grupos experimentales de 1%, 2% y 3%, coincidiendo que el 2% es la mejor adición significativa para el uso del PCR en la mezcla asfáltica, lo cual se muestra mediante una captura representativa.

Figura 20

Resultado representativo de SPSS mostrando significancia del % en la VMA.

Variable dependiente: VMA

HSD Tukey

(I) PORCENTAJE_PCR	(J) PORCENTAJE_PCR	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.
0%	1%	2,0000	,87031	,178
	2%	-3,1267*	,87031	,029
	3%	-1,2067	,87031	,540

Resultados del OE3:

a) Resultados experimentales de adición de RAP en la MAM fase II:

Se realizó la MAM fase II con la adición de RAP como sustituto parcial de agregados:

Figura 21

Resultados comparativos de cada propiedad para cada %RAP en MAM fase II



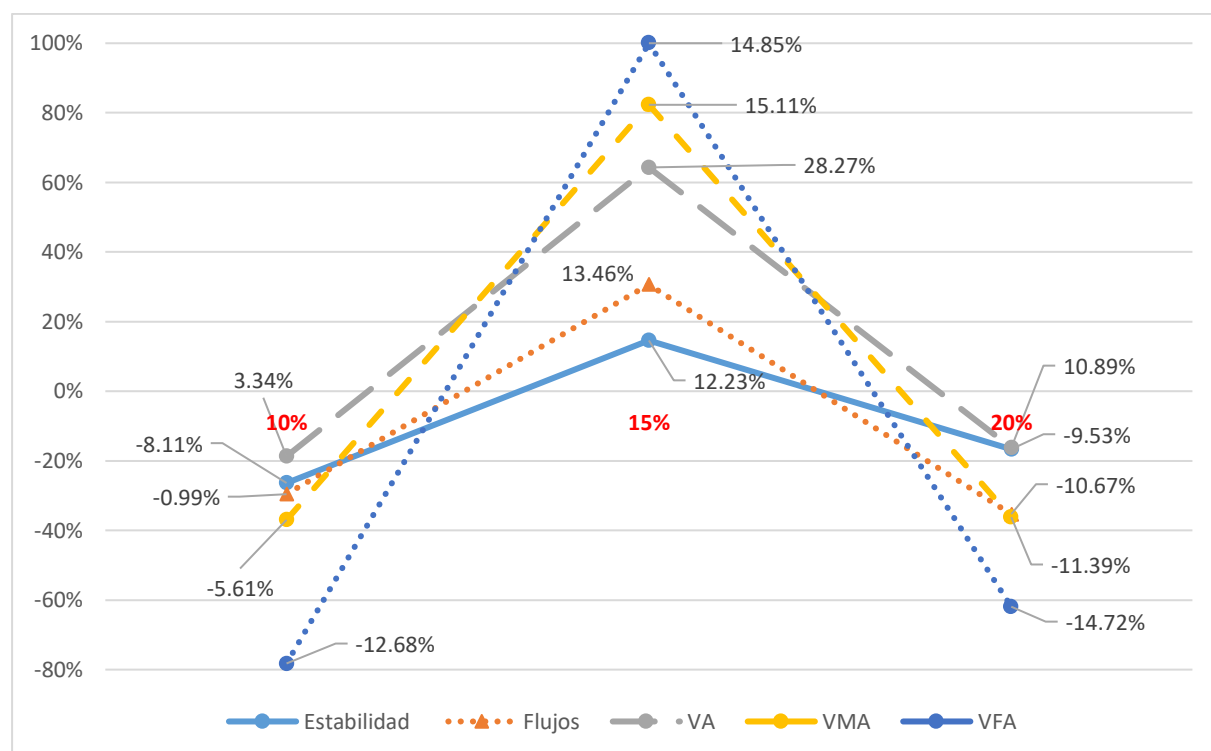
La estabilidad es más alta al 15% de PCR (2,500), pero disminuye notablemente al 10% y 20%, indicando que el 15% es el nivel óptimo para la estabilidad. El flujo aumenta significativamente al 15% de RAP (6.91), sugiriendo una mayor flexibilidad de la mezcla en este nivel. Los vacíos de aire (VA) también alcanzan su máximo al 15% (8.44), lo cual puede implicar una mayor porosidad. El volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA) incrementa notablemente al 15% (21.67), mejorando la adhesión del asfalto al agregado. Por otro lado, los vacíos de

compactación aparente (VCA) alcanzan su valor más alto al 15% (86.99), lo que sugiere un cambio en la densidad y compactación de la mezcla. En resumen, la adición de un 15% de RAP junto con RAP optimiza varias propiedades mecánicas, mejorando la estabilidad, flujo y adhesión del asfalto al agregado, aunque se debe tener cuidado con el aumento de la porosidad.

b) Variación de los resultados experimentales de adición de RAP:

Figura 22

Variación de las propiedades de la adición de RAP respecto a la MAM-2%PCR



Se muestra las variaciones porcentuales respecto al patrón en diferentes propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica con la adición de RAP. Se observa que la estabilidad presenta un aumento significativo con el 15% de RAP (12.23%), pero disminuye notablemente con el 20% (-19.12%), indicando que el 15% es el nivel óptimo para maximizar la estabilidad. El flujo sigue una tendencia similar, aumentando al 15% (13.46%) y disminuyendo al 20% (-11.39%), lo que sugiere una mayor flexibilidad en niveles intermedios de RAP. Los vacíos (VA) y el volumen de vacíos en el agregado mineral (VMA) alcanzan sus picos al 15% de RAP (28.27% y 15.11%, respectivamente), lo que mejora la adhesión del asfalto al agregado y sugiere una mayor porosidad. Los vacíos de compactación aparente (VCA) disminuyen inicialmente al 10% (-12.68%), pero aumentan al 15% (14.85%) y luego vuelven a disminuir al 20% (-19.12%). En resumen, la adición de un 15% de RAP optimiza varias propiedades mecánicas, mejorando la

estabilidad, flexibilidad y adhesión del asfalto al agregado, aunque es crucial controlar la porosidad para mantener la durabilidad de la mezcla. Adiciones superiores al 15% de RAP pueden tener efectos negativos significativos en la estabilidad y la cohesión de la mezcla.

c) Análisis estadístico del óptimo de la adición de RAP como sustituto de agregados.

El análisis estadístico se realizó aplicando el diseño aleatorio complementario con el fin de evaluar su nivel de significancia estadística en cada una de las propiedades de las mezclas asfálticas realizadas. Para evaluar la significancia se deben cumplir supuestos tales como: (1) Normalidad, (2) Homocedasticidad.

Si en la prueba de Normalidad el valor $p < 0.05$, se rechaza la H_0 y se evalúa la significancia mediante la prueba Post-Hoc de Kruskal Wallis, pero si el valor de p es mayor a 0.05 se acepta la H_0 y se realiza la prueba de Homocedasticidad, donde si el valor de $p < 0.05$ se rechaza la H_0 y se mide la significancia usando la prueba Post-Hoc de Games-Howell prueba, pero si se obtiene un valor de $P > 0,05$, se acepta H_0 y la significancia se mide mediante ANOVA.

El análisis estadístico se realizó utilizando SPSS y se consideraron las últimas combinaciones de grupos experimentales de 10%, 15% y 20%, demostrando que el 15% es la mejor adición significativa para el uso del RAP como sustituto del árido, en la mezcla asfáltica modificada previamente con el 2% de sustitución del CA con PCR.

Figura 23

Resultado representativo de SPSS sobre la significancia del 15% de RAP.

Variable dependiente: VCA
HSD Tukey

(I) PORCENTAJE_RAP	(J) PORCENTAJE_RAP	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.
0%	10%	9,6033*	2,76012	,034
	15%	-11,2467*	2,76012	,015
	20%	11,1467*	2,76012	,016

Resultados del OE4:

a) Diseño óptimo de mezcla asfáltica modificada:

En la siguiente tabla se resume la dosificación mejorada con la adición de PCR como sustituto parcial del cemento asfáltico y del RAP como sustituto parcial del agregado en la mezcla, esta dosificación se sustenta en la validación de dichas sustituciones en cada fase de adición a partir del análisis estadístico inferencial.

Tabla 7

Dosificación mejorada del diseño de mezcla asfáltica con PCR y RAP

Diseño		Dosificación de materiales en peso de mezcla (kg/m ³)				
Tipo	CA	AG	AF	Filler	PCR	RAP (AG/AF)
MAC-2	60	524.475	893.025	22.5	-	-
MAM-I	69	519.48	884.52	22.5	1.25	-
MAM-II	73.5	467.532	796.068	22.5	4.41	155.84/265.36

Fuente: Elaboración propia.

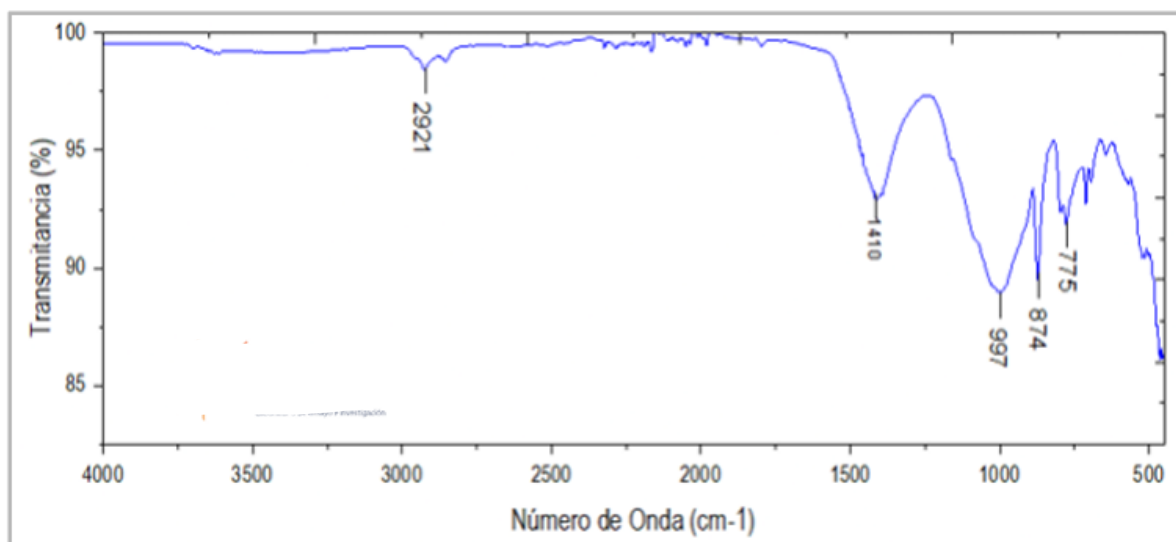
A partir de los resultados organizados en la Tabla 7 se visualiza que la modificación del diseño de la mezcla asfáltica convencional con la sustitución parcial del cemento asfáltico con PCR en la fase I, y del agregado por el PCR, en la fase II, obtiene una mezcla modificada, que demuestra cumplir con las propiedades mecánicas que se espera de la MAC en el tipo establecido por la norma, es decir, que si las especificaciones normativas con las que se contrasta los resultados son de otro nivel del diseño de MAC, posiblemente no se obtengan los resultados significativos,

b) Análisis de las características microestructurales

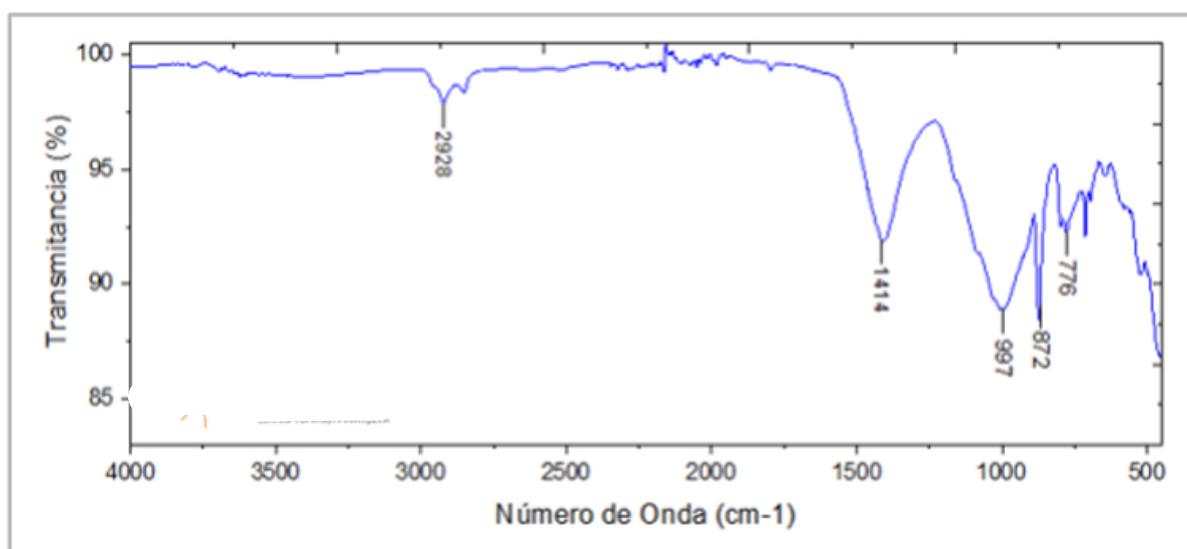
Las partículas de polvo de caucho reciclado (PCR) influyen en el nivel de mezcla durante el proceso de acondicionamiento, lo que representa un factor crucial para las propiedades físicas y mecánicas de las MAC. Este impacto se examinó minuciosamente utilizando análisis SEM y FTIR, en los que se evaluaron dos tipos de mezclas: una mezcla estándar y una mezcla modificada con un 2% de PCR (fase I) y reforzada con un 15% de RAP (fase II: MAC-2%PCR).

El proceso aplicado en esta investigación nos permite establecer correlaciones precisas entre la composición química de los asfaltos y las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Esta técnica constituye una herramienta crucial para la caracterización de materiales asfálticos. El estudio abarcó un rango de número de onda de 380 cm⁻¹ a 4000 cm⁻¹, lo que permitió identificar diversos picos y bandas de frecuencias. Estos resultados son fundamentales

para comprender cómo la adición de PCR y RAP puede mejorar las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas, contribuyendo así al desarrollo de pavimentos más duraderos y sostenibles.



(A)



(B)

Figura 24

Diagramas de barrido espectral FTIR de (A) muestra patrón; (B) muestra de diseño Fase II.

Aplicando la normativa ASTM E1252-98 (2013), el espectro FTIR de la mezcla patrón muestra picos característicos en 2921 cm⁻¹ y 1440 cm⁻¹, indicando la presencia de grupos funcionales como C-H en estiramiento y flexión, respectivamente, asociados típicamente con hidrocarburos. Otros picos notables incluyen los situados en 874 cm⁻¹ y 775 cm⁻¹, que pueden corresponder a la presencia de compuestos aromáticos o alifáticos.

En la Fase 2, se observan picos similares en posiciones ligeramente diferentes, con el estiramiento C-H a 2928 cm^{-1} y la flexión a 1444 cm^{-1} , sugiriendo una modificación en la interacción de los componentes químicos posiblemente debido a la incorporación de RAP. Además, los picos en 872 cm^{-1} y 775 cm^{-1} , cercanos a los observados en la Fase 1, indican una estructura química consistente, pero con variaciones que pueden ser atribuibles a la inclusión de materiales reciclados.

En resumen, los espectros FTIR de ambas fases indican que la incorporación de PCR y RAP no solo es compatible con el asfalto, sino que también podría mejorar sus propiedades físico-mecánicas al mantener la integridad estructural y química del material base. Esta información es fundamental para optimizar la formulación de mezclas asfálticas más sostenibles y duraderas.

Tabla 8

Identificación comparativa de los grupos funcionales de grupo de control y experimental.

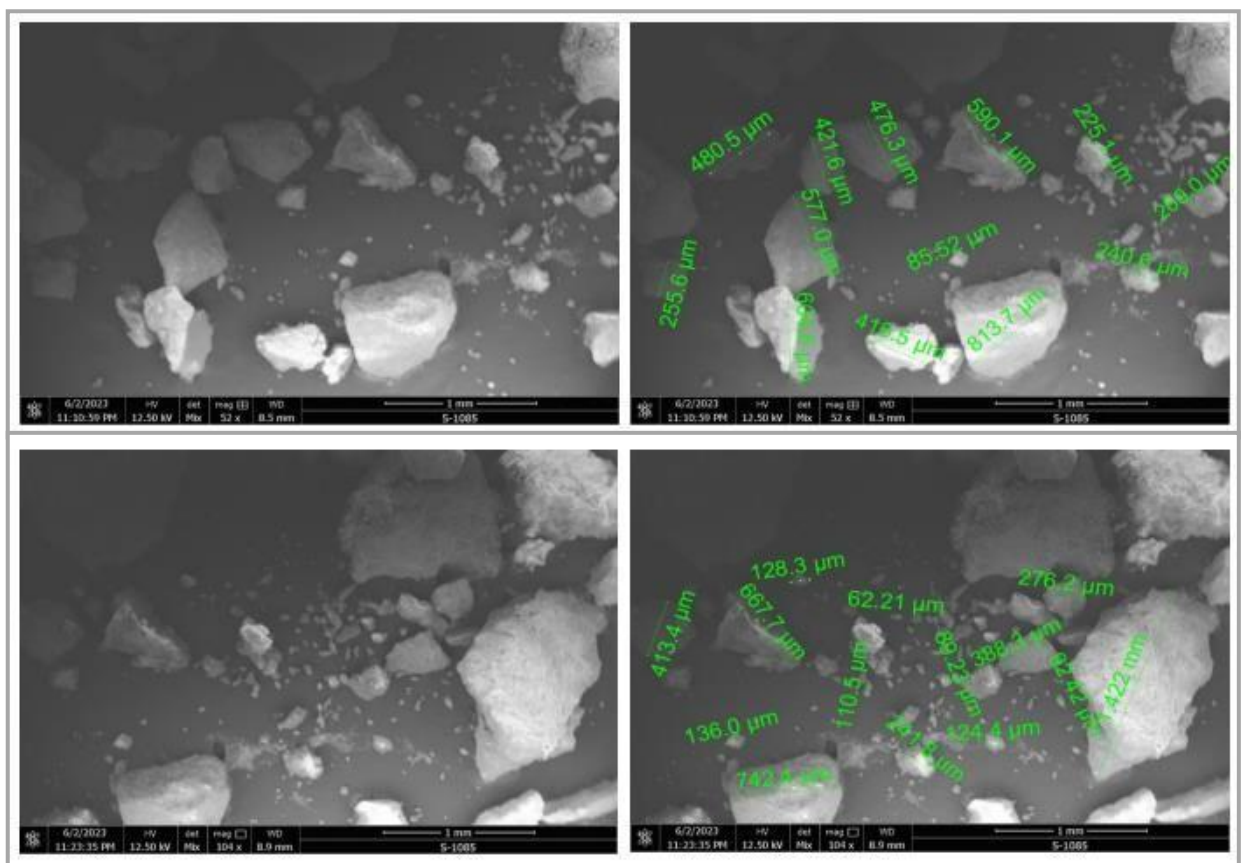
Tipo de vibración	Grupo funcional	Rango normativo	Resultado experimental (cm^{-1})	
			MAC	MAM-II
Estiramiento simétrico	"-C-H"	2940-2850	2921	2928
Vibración de deformación simétrica	"-C-H"	1440-1376	1410	1414
Banda de vibración de flexión	"-C=C-"	1020-950	997	997
Banda de flexión fuera del plano	"-C-H"	890-840	874	872
Banda de vibración	"-C-C-"	750-700	775	776

Fuente: Elaboración propia a partir de los informes IE2024-492-493, Laboratorio SLAB.

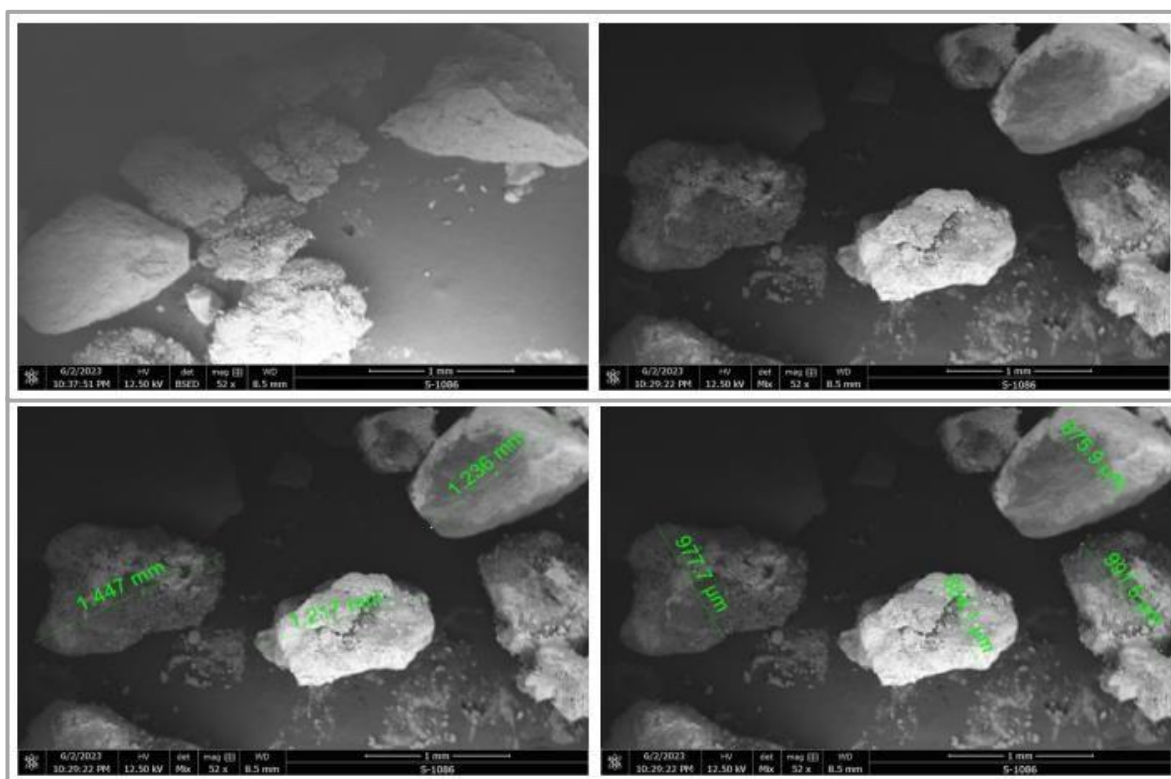
La vibración de deformación simétrica de -C-H se observa a 1410 cm^{-1} , dentro del rango de $1440-1376\text{ cm}^{-1}$. La banda de vibración de flexión de -C=C- aparece a 997 cm^{-1} , dentro del rango de $1020-950\text{ cm}^{-1}$. La banda de flexión fuera del plano de -C-H se detecta a 874 cm^{-1} , dentro del rango de $890-840\text{ cm}^{-1}$. Finalmente, la banda de vibración de -C-C- se encuentra a 775 cm^{-1} , dentro del rango normativo de $750-700\text{ cm}^{-1}$. El espectro FTIR de la Fase 2 presenta picos similares a los observados en la Fase 1, con ligeras variaciones. El estiramiento simétrico

de -C-H aparece a 2928 cm^{-1} . La vibración de deformación simétrica de -C-H se encuentra a 1414 cm^{-1} . La banda de vibración de flexión de -C=C- se observa también a 997 cm^{-1} . La banda de flexión fuera del plano de -C-H se detecta a 872 cm^{-1} . Finalmente, la banda de vibración de -C-C- aparece a 776 cm^{-1} .

Como parte del análisis microestructural, se realizó análisis de los resultados del ensayo de microscopía de barrido (SEM), se realizó el ensayo sobre la muestra patrón y la muestra experimental cuyo diseño de mezcla asfáltica comprende el 4.9%CA-2%PCR-15%RAP. La comparación de ambos resultados de los ensayos se realiza a partir de una interpretación de las imágenes representativas generadas para cada muestra. En este caso el análisis se realiza con el contraste observacional de ambas imágenes que se muestran a continuación.



(A)



(B)

Figura 25

Imágenes SEM de la muestra patrón (A) y de la MAM con PCR y RAP (B).

En la Figura 25-A, se presenta el análisis morfológico SEM de la mezcla asfáltica estándar, se observa que los agregados pétreos naturales tienen clastos de superficie angular con baja esfericidad y textura rugosa, además, se nota la adherencia del CA sobre las partículas, con una composición química de oxígeno (46.27%), carbono (36.77%), calcio (9.12%) y silicio (7.84%). Por otro lado, la Figura 25-B, se muestra el análisis morfológico SEM de la mezcla asfáltica óptima modificada con un 2% de PCR y un 15% de RAP. En este caso, los agregados reciclados exhiben clastos de superficie subangular con baja esfericidad y bordes subredondeados, presentando una textura rugosa. También se observa la adherencia del cemento asfáltico y la presencia de PCR adherido a las partículas, que se manifiesta en las apariencias oscuras. La composición química de esta mezcla incluye oxígeno (48.62%), carbono (39.36%), calcio (5.45%) y silicio (6.57%). Estos resultados permiten comparar las características morfológicas y químicas entre la mezcla estándar y la modificada, destacando las diferencias en la adherencia y composición de los materiales utilizados.

Discusión

El análisis granulométrico del PCR y RAP demuestra que ambos materiales cumplen con las especificaciones de la norma MTC E107, garantizando una adecuada distribución de tamaños de partículas esenciales para la cohesión y durabilidad de la mezcla asfáltica. Estudios previos, como el de [16], confirman que una correcta granulometría mejora significativamente las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas. Además, la incorporación de RAP, según [9], no solo optimiza el uso de recursos, sino que también mejora la estabilidad y resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica, alineándose con los hallazgos de este estudio.

Los resultados indican que la adición de PCR mejora la estabilidad y durabilidad de la mezcla asfáltica. La estabilidad aumenta notablemente con un 2% de PCR, alcanzando valores óptimos similares a los reportados por [22], quienes también encontraron que la adición de 1-2% de caucho mejora la densidad y resistencia de las mezclas asfálticas. Además, el flujo y la VMA (Vacíos en el agregado mineral) también muestran mejoras, lo que es consistente con el trabajo de [17], donde se observó que la adición de caucho reciclado optimiza la estructura interna de la mezcla.

La incorporación de RAP en combinación con PCR mostró que un 15% de RAP es el óptimo, mejorando significativamente la resistencia a la deformación y la estabilidad de la mezcla. Estos resultados coinciden con los de [31], quienes encontraron que el uso de 20-30% de RAP, junto con rejuvenecedores, optimiza las propiedades mecánicas y prolonga la vida útil del pavimento. Asimismo, [19] destacaron que las mezclas con altos porcentajes de RAP, al ser combinadas adecuadamente, muestran un comportamiento superior en términos de resistencia y durabilidad.

El análisis microestructural mediante FTIR y SEM revela una mejora en la homogeneidad y la adhesión entre los componentes de la mezcla modificada. Las imágenes SEM muestran una distribución más uniforme de los agregados y una mejor integración del PCR y RAP, lo cual es consistente con los hallazgos de [23], donde se observó que la incorporación de materiales reciclados mejora la microestructura y, por ende, las propiedades mecánicas de la mezcla. Además, [24] y [25] reportaron que el uso de caucho

triturado y RAP mejora la resistencia al envejecimiento y la durabilidad, lo que coincide con los resultados obtenidos en esta investigación.

Estos análisis demuestran que la adición de PCR y RAP no solo es viable, sino que también mejora significativamente las propiedades fisicomecánicas y microestructurales de las mezclas asfálticas, proporcionando una solución sostenible y duradera para la construcción de pavimentos.

Conclusiones

- CG: Se concluye que la adición del caucho pulverizado reciclado (PCR) como sustituto parcial del cemento asfáltico y del pavimento asfáltico reciclado (RAP) como sustituto parcial del agregado mejora las propiedades físico-mecánicas y modifica las características microestructurales de la mezcla asfáltica modificada, Lambayeque.
- Se concluye que el PCR y RAP con la granulometría especificada en la norma y de distribución similar a los agregados con valores cercanos a la distribución del diámetro de las partículas, respecto a la abertura de la malla que pasa, representa un material idóneo para ser usado en mezclas asfálticas modificadas con el uso de áridos extraídos de cantera natural Tres Tomas, Ferreñafe-Lambayeque.
- Se concluye, a partir del análisis estadístico inferencial de los datos observados para cada una de las propiedades investigadas que el 2% de PCR como sustituto del CA en un diseño de MAC (fase I), mejora en 10.24% la estabilidad, 7.47% el flujo, 95.45% los vacíos, 19.92% el VMA y 14.58% el VCA.
- Se concluye, a partir del análisis estadístico inferencial de los datos observados para cada una de las propiedades investigadas que el 15% de RAP como sustituto de áridos en un diseño de MAM (fase II), mejora en 12.23% la estabilidad, 13.46% el flujo, 28.27% los vacíos, 15.11% el VMA y 14.50% el VCA.
- Se concluye, al comparar la mezcla estándar con la mezcla óptima que incorpora un 2% de polvo de caucho reciclado (PCR) y un 15% de pavimento asfáltico reciclado (RAP), se observó que el polvo de caucho se adhiere eficazmente al agregado virgen y cubre las fisuras en el agregado reciclado. Esto mejora la morfología y textura de la mezcla, permitiendo una mejor concentración de elementos químicos como oxígeno (O), carbono (C), calcio (Ca) y silicio (Si). Estos elementos se integran en la matriz de enlaces hidrocarbonados (C y H), generando modos vibracionales que contribuyen a las propiedades mecánicas y físicas de la mezcla asfáltica.

Recomendaciones

- Se recomienda investigar la correlación de la adición del PCR y el RAP de forma independiente contrastado con estos resultados para definir si la combinación de ambas adiciones logra una sinergia sobre las propiedades de la MAC.
- Se recomienda que la obtención del PCR sea comercial y del RAP, sea obtenida a partir de la técnica de fresado como retiro del pavimento actual, para obtener muestras idóneas usadas en la modificación de mezclas asfálticas.
- Se recomienda adicionar PCR como sustituto parcial del cemento en % experimentales en un rango de 2%-5%.
- Se recomienda adicionar RAP como sustituto parcial de agregados en % experimentales en un rango de 10%-15% de forma independiente y combinada con el PCR.
- Se recomienda realizar el ensayo SEM en la muestra de la MAM con el % óptimo de PCR para compararlo con la muestra que combina PCR+RAP en la MAM (Fase II).

Referencias

- [1] A. A. Milad, A. S. B. Ali, y N. I. M. Yusoff, «A Review of the Utilisation of Recycled Waste Material as an Alternative Modifier in Asphalt Mixtures», *Civ. Eng. J.*, vol. 6, n.º Special Issue, pp. 42-60, oct. 2020, doi: 10.28991/cej-2020-SP(EMCE)-05.
- [2] Q. Pan y H. Pang, «Durability Capacity Change of Rubber Powder Composite BRA Modified Asphalt Mixture», *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2022, pp. 1-13, may 2022, doi: 10.1155/2022/5419057.
- [3] D. Li, Z. Leng, S. Zhang, J. Jiang, y H. Yu, «Blending efficiency of reclaimed asphalt rubber pavement mixture and its correlation with cracking resistance», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 185, n.º July, p. 106506, 2022, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106506.
- [4] R. Cherif, A. Eddhahak, T. Gabet, F. Hammoum, y J. Neji, «Effect of the processing conditions on the viscoelastic properties of a high-RAP recycled asphalt mixture: micromechanical and experimental approaches», *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 22, n.º 6, pp. 708-717, 2021, doi: 10.1080/10298436.2019.1640363.
- [5] A. Riekstins, V. Haritonovs, y V. Straupe, «Economic and environmental analysis of crumb rubber modified asphalt», *Constr. Build. Mater.*, vol. 335, n.º January, p. 127468, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127468.
- [6] G. Guduru y K. K. Kuna, «Classification of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) material using simple indicative tests», *Constr. Build. Mater.*, vol. 328, n.º July 2021, p. 127075, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127075.
- [7] G. Guduru, T. L. Tavva, y K. Kuna, «Estimation of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) characteristics using simple indicative tests», *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 23, n.º 4, pp. 822-848, 2022, doi: 10.1080/14680629.2020.1845785.
- [8] W. U. Filho, L. M. Gutiérrez Klinsky, R. Motta, y L. L. Bariani Bernucci, «Cold Recycled Asphalt Mixture using 100% RAP with Emulsified Asphalt-Recycling Agent as a New Pavement Base Course», *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2020, pp. 1-11, abr. 2020, doi: 10.1155/2020/5863458.
- [9] G. Sugiyanto, «Characterization of asphalt concrete produced from scrapped tire rubber», *Eng. J.*, vol. 21, n.º 4, pp. 193-206, 2017, doi: 10.4186/ej.2017.21.4.193.
- [10] A. Sha *et al.*, «Advances and development trends in eco-friendly pavements», *J. Road*

- Eng.*, vol. 1, n.º December, pp. 1-42, 2021, doi: 10.1016/j.jreng.2021.12.002.
- [11] F. Y. Aljaberi, «Machine Translated by Google Un estudio sobre la importancia de la clasificación del caucho granulado en el ensayo de ductilidad para ligantes asfálticos cauchutados Machine Translated by Google», 2019.
- [12] X. Wang, Z. Fan, L. Li, H. Wang, y M. Huang, «Durability Evaluation Study for Crumb Rubber–Asphalt Pavement», *Appl. Sci.*, vol. 9, n.º 16, p. 3434, ago. 2019, doi: 10.3390/app9163434.
- [13] S. Bressi, J. Santos, M. Orešković, y M. Losa, «A comparative environmental impact analysis of asphalt mixtures containing crumb rubber and reclaimed asphalt pavement using life cycle assessment», *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 22, n.º 4, pp. 524-538, 2021, doi: 10.1080/10298436.2019.1623404.
- [14] A. Graziani, A. Grilli, C. Mignini, y A. Balzi, «Assessing the Field Curing Behavior of Cold Recycled Asphalt Mixtures», *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2022, pp. 1-13, may 2022, doi: 10.1155/2022/4157090.
- [15] M. Muñoz *et al.*, «Environmental impact of rejuvenators in asphalt mixtures containing high reclaimed asphalt content», *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 23, n.º 6, pp. 1400-1414, 2022, doi: 10.1080/14680629.2021.1891129.
- [16] E. Quan, H. Xu, y Z. Sun, «Composition Optimization and Damping Performance Evaluation of Porous Asphalt Mixture Containing Recycled Crumb Rubber», *Sustainability*, vol. 14, n.º 5, p. 2696, feb. 2022, doi: 10.3390/su14052696.
- [17] H. V. Kumar y B. G. Rahul, «Performance And Cost Analysis Of Modified Bitumen Binder For Flexible Pavement», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 912, n.º 6, p. 062050, ago. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/912/6/062050.
- [18] X. Ai, J. Cao, D. Feng, L. Gao, W. Hu, y J. Yi, «Performance evaluation of recycled asphalt mixtures with various percentages of RAP from the rotary decomposition process», *Constr. Build. Mater.*, vol. 321, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126406.
- [19] X. Yi, H. Chen, H. Wang, C. Shi, y J. Yang, «The feasibility of using epoxy asphalt to recycle a mixture containing 100% reclaimed asphalt pavement (RAP)», *Constr. Build. Mater.*, vol. 319, n.º December 2021, p. 126122, 2022, doi:

- 10.1016/j.conbuildmat.2021.126122.
- [20] J. Zhu, T. Ma, J. Fan, Z. Fang, T. Chen, y Y. Zhou, «Experimental study of high modulus asphalt mixture containing reclaimed asphalt pavement», *J. Clean. Prod.*, vol. 263, p. 121447, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121447.
- [21] P. Yin y B. Pan, «Effect of RAP content on fatigue performance of hot-mixed recycled asphalt mixture», *Constr. Build. Mater.*, vol. 328, n.º 2, p. 127077, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127077.
- [22] E. H. Tan, E. M. M. Zahran, y S. J. Tan, «The optimal use of crumb rubber in hot-mix asphalt by dry process: a laboratory investigation using Marshall mix design», *Transp. Eng.*, p. 100145, 2022, doi: 10.1016/j.treng.2022.100145.
- [23] Hassan y Nahid, «Effect of aggregate type on moisture susceptibility of modified cold recycled mix asphalt: evaluation by mechanical tests and Surface Free Energy method», *Frat. ed Integrità Strutt.*, vol. 14, n.º 52, pp. 211-229, mar. 2020, doi: 10.3221/IGF-ESIS.52.17.
- [24] L. Wang, Y. Liu, y L. Zhang, «Micro/Nanoscale Study on the Effect of Aging on the Performance of Crumb Rubber Modified Asphalt», *Math. Probl. Eng.*, vol. 2020, pp. 1-10, oct. 2020, doi: 10.1155/2020/1924349.
- [25] I. Rodríguez-Fernández, F. Tarpoudi Baheri, M. C. Cavalli, L. D. Poulikakos, y M. Bueno, «Microstructure analysis and mechanical performance of crumb rubber modified asphalt concrete using the dry process», *Constr. Build. Mater.*, vol. 259, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119662.
- [26] E. Burgos y J. Rodríguez, «Influencia del caucho reciclado en las propiedades físicas – mecánicas en una mezcla asfáltica en caliente, Trujillo 2021», Universidad Privada del Norte, 2022.
- [27] W. Maguiña, «Caucho reciclado de llantas en la mezcla de Asfalto a Compresión para mejorar las Propiedades Mecánicas'», Universidad Ricardo Palma, 2019.
- [28] L. Ubidia, «Diseño De Pavimento Flexible Con La Utilización De Polvo De Caucho Reciclado Para Minimizar La Generación De Fisuras Del Jr. Jorge Chávez Cdra. 01-09 Ciudad De Tarapoto San Martín», Universidad César Vallejo, 2021.
- [29] S. Carrasco y K. Rosillo, «Diseño de Pavimento Flexible con Utilización de Caucho

- Reciclado en Avenida Venezuela, Cuadras 26 - 59, Distrito José Leonardo Ortiz, Lambayeque – 2021.», Universidad César Vallejo, 2021.
- [30] K. Capcha, «Diseño de mezcla asfáltica con incorporación del caucho reciclado, Tacna 2018», Universidad César Vallejo, 2018.
- [31] R. Huari, «Análisis y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica en caliente con RAP y una mezcla asfáltica modificada con polímero SBS PG 70-28.», Universidad Ricardo Palma, 2020.
- [32] R. Balbin y V. Chochon, «Diseño de mezcla asfáltica con material reciclado para la mejora del comportamiento mecánico del pavimento en el tramo km 90+000 al km 95+000 de la carretera Canta a Huayllay ubicado en el distrito y provincia de Canta en el departamento de Lima 2019», Universidad San Martín de Porres, 2019.
- [33] J. Rengifo y M. Vargas, «Análisis comparativo entre pavimento flexible convencional y pavimento flexible reciclado en las cuadras 1 - 29 de la avenida La Paz San Miguel – Lima», Universidad San Martín de Porres, 2017.
- [34] C. Xia, M. Chen, J. Geng, X. Liao, y Z. Chen, «Swelling and Degradation Characteristics of Crumb Rubber Modified Asphalt during Processing», *Math. Probl. Eng.*, vol. 2021, pp. 1-10, feb. 2021, doi: 10.1155/2021/6682905.
- [35] Q. Lv, W. Huang, M. Zheng, Y. Hu, C. Yan, y J. Wang, «Understanding the particle effects and interaction effects of crumb rubber modified asphalt regarding bonding properties», *Constr. Build. Mater.*, vol. 348, n.º August, p. 128716, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128716.
- [36] D. Singh y S. Girimath, «Toward Utilization of ground tire rubber and reclaimed pavement materials with asphalt Binder: Performance evaluation using essential work of fracture», *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 11, n.º 6, pp. 594-602, 2018, doi: 10.1016/j.ijprt.2017.12.008.
- [37] H. Yu, Y. Lin, J. Yu, N. Dong, J. Jin, y F. Guo, «Recycling potential of used crumb rubber for second-round asphalt modification», *J. Clean. Prod.*, vol. 365, n.º June, p. 132797, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132797.
- [38] E. Bocci y E. Prospero, «Recycling of reclaimed fibers from end-of-life tires in hot mix asphalt», *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, n.º xxx, 2020, doi:

10.1016/j.jtte.2019.09.006.

- [39] M. Bueno, R. Haag, N. Heeb, P. Mikhailenko, L. Boesiger, y L. D. Poulikakos, «Functional and environmental performance of plant-produced crumb rubber asphalt mixtures using the dry process», *Mater. Struct. Constr.*, vol. 54, n.º 5, 2021, doi: 10.1617/s11527-021-01790-y.
- [40] G. Martínez-Arguelles, B. Caicedo, D. González, L. Celis, L. Fuentes, y V. Torres, «Trece años de continuo desarrollo con mezclas asfálticas modificadas con Grano de Caucho Reciclado en Bogotá: Logrando sostenibilidad en pavimentos», *Rev. Ing. construcción*, vol. 33, n.º 1, pp. 41-50, abr. 2018, doi: 10.4067/S0718-50732018000100041.
- [41] Q. Liu, J. Liu, B. Yu, J. Zhang, y J. Pei, «Evaluation and optimization of asphalt binder and mixture modified with high activated crumb rubber content», *Constr. Build. Mater.*, vol. 314, n.º PA, p. 125676, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125676.
- [42] A. Zariņš, «Case Study on the Effect of Recycled Asphalt Layer Parameters on the Bearing Capacity of the Pavement», *Balt. J. Road Bridg. Eng.*, vol. 15, n.º 5, pp. 45-58, dic. 2020, doi: 10.7250/bjrbe.2020-15.506.
- [43] Y. Meng, C. Gou, Q. Zhao, Y. Qin, W. Kong, y L. Fan, «Study on multiple Damage-Healing properties and mechanism of laboratory simulated recycled asphalt binders», *Constr. Build. Mater.*, vol. 346, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128468.
- [44] M. S. Oliveira, M. M. de Farias, y J. P. S. Silva, «Fatigue analysis of hot recycled asphalt mixtures with RAP incorporation», *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, pp. 1-14, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01132.
- [45] Y. Pi, Z. Li, Y. Pi, Z. Huang, y G. Li, «Performance evaluation of recycled asphalt pavement materials and cold recycling mixtures designed with vibratory compaction method», *Appl. Sci.*, vol. 9, n.º 15, 2019, doi: 10.3390/app9153167.
- [46] S. Eskandarsefat, C. Sangiorgi, G. Dondi, y R. Lamperti, «Recycling asphalt pavement and tire rubber: A full laboratory and field scale study», *Constr. Build. Mater.*, vol. 176, pp. 283-294, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.031.
- [47] F. Meroni, G. W. Flintsch, J. Habbouche, B. K. Diefenderfer, y F. Giustozzi, «Three-level performance evaluation of high RAP asphalt surface mixes», *Constr. Build. Mater.*,

vol. 309, pp. 0-2, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125164.

- [48] W. Zhang *et al.*, «Performance Characterization of Recycled-Asphalt Pavement with Stabilized Rubber–Modified Asphalt Using Balanced Mix Design Method», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 32, n.º 12, 2020, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003486.
- [49] Manual MTC, *MANUAL DE ENSAYOS DE MATERIALES*. 2016.

Anexos

Matriz de búsqueda

MATRIZ DE BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE DOCUMENTOS INCLUIDOS																	
N°	BASE DE DATOS	SERIE/O REPOSICIÓN	ENLACE URL	DOI	RISN	TÍTULO DEL RESUMEN	UNIVERSIDAD	AUTOR (ES)	VOL. N°	PÁG.	AÑO	TIPO DE DOCUMENTO	PAÍS	Idioma	ECUACIÓN DE BÚSQUEDA (PALABRAS CLAVE, OPERADOR LÓGICO, ETC)	Checkeado	DESCARDE Y DECISIÓN
1	Science Direct	Repository Universitat Jaume I	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926641017303300	10.1016/j.cemtec.2017.11.0.001	6229-6233	Characterization of Asphalt Concrete Produced from Recycled Tire Rubber	Universitat Jaume I	Sagueres, G. et al.	21 (4)	100-106	2017	AC	Industria	E	idm="tag:sciencedirect.com" type="text"/>	14	I
2	Science Direct	Procedia Engineering	https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.134	10.1016/j.proeng.2017.09.134	18777068	REINFORCED ASPHALT FOR CONCRETE REPAIRS	Universitat Jaume I	Indriyanto, M. A. et al.	189	860-864	2017	AB	India	E	idm="tag:sciencedirect.com" type="text"/>	7	I
3	Science Direct	Construction and Building Materials	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.088	10.1016/j.conbuildmat.2017.09.088	9100639	Use of Recycled Asphalt Pavement in Concrete Slabs for Mechanical Properties of Fiber Composite Concrete Pavement	Universitat de Tecnologia de Catalunya	Felipe, Manuel et al.	127	470-484	2017	AC	Spain	E	idm="tag:sciencedirect.com" type="text"/>	12	I
4	Science Direct	International Journal of Pavement Research and Technology	https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.12.008	10.1016/j.ijprt.2017.12.008	13873400	Use of Recycled Asphalt Pavement in Concrete Slabs for Mechanical Properties of Fiber Composite Concrete Pavement	Universitat de Tecnologia de Catalunya	Shah, Dharmendra et al.	11 (2)	104-112	2017	AC	India	E	idm="tag:sciencedirect.com" type="text"/>	8	I
5	Science Direct	Journal of Traffic and Transportation Engineering	https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.12.007	10.1016/j.jtte.2017.12.007	20877464	Characterization of asphalt pavement with recycled asphalt pavement	University of New Mexico	Hernandez, et al.	1 (1)	207-214	2018	AC	EE.UU.	E	idm="tag:sciencedirect.com" type="text"/>	12	I
6	Scopus	Engineering Journal	https://doi.org/10.1016/j.enj.2017.12.007	10.1016/j.enj.2017.12.007	12382821	Influence of particle size and content of dolomite on the properties of asphalt concrete	Chulalongkorn University	Chulalongkorn, et al.	27 (1)	181-191	2018	AC	Tailandia	E	idm="tag:sciencedirect.com" type="text"/>	2	I
7	Scopus	Advances in Civil Engineering	https://doi.org/10.1016/j.aice.2017.12.007	10.1016/j.aice.2017.12.007	13873400	Investigation of the Effect of Recycled Asphalt Pavement Material on the Properties of Recycled Concrete	Universitat de Catalunya	Sánchez, et al.	2018	1-6	2018	AC	Spain	E	idm="tag:sciencedirect.com" type="text"/>	12	I

Operacionalización de variables

VARIABLES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	VARIABILIDAD	MÉTODO DE MEDICIÓN
INDEPENDIENTE: Caucho pulverizado	Análisis granulométrico	%	1%, 2% y 3%	balanza
INDEPENDIENTE: RAP	Análisis granulométrico	%	10%, 15% y 20%	balanza

VARIABLES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO DE MEDICIÓN
DEPENDIENTE: Propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la mezcla asfáltica modificada	Análisis de espectroscopía infrarroja (FTIR)	μm %	Espectrómetro
	Microscopía electrónica de barrido (ESEM y XFR)	μm %	Scanning Electron Microscope
	Estabilidad	Kg	Método Marshall
	Flujo	mm	
	Vacíos de aire	%	
	Vacíos en agregado mineral	%	
	Rigidez	kg/cm ²	
Granulometría PCR Granulometría RAP	%	Ensayos adicionales sobre PCR y RAP	

VARIABLES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA	MÉTODO DE MEDICIÓN
INTERVINIENTE: Tipo de cemento asfáltico	Tipo de cemento asfáltico PEN 60/70	%	balanza

Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables
¿Cuál es la influencia del pavimento reciclado como sustituto parcial del agregado y el caucho pulverizado como sustituto parcial del cemento asfáltico en las propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la mezcla asfáltica modificada en caliente?	Objetivo general:	Hipótesis general:	Variable independiente:
	Evaluar la influencia del uso de RAP y caucho pulverizado como sustituto parcial del cemento asfáltico respectivamente en las propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la mezcla asfáltica modificada en caliente, Chiclayo.	El uso del pavimento reciclado como sustituto parcial del agregado y el caucho pulverizado como sustituto parcial del cemento asfáltico influye significativamente en las propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la mezcla asfáltica en caliente.	Incorporación de caucho pulverizado y RAP
	Objetivos específicos:	Hipótesis nula:	Variable dependiente:
	OE.1: Caracterizar las propiedades físico-mecánicas y microestructurales del RAP como sustituto parcial del agregado y el caucho pulverizado como sustituto parcial del cemento asfáltico en la mezcla asfáltica modificada elaborada en Chiclayo.	Las sustituciones de caucho pulverizado en el cemento asfáltico y el pavimento asfáltico reciclado como agregado no influyen significativamente en las propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la mezcla asfáltica modificada.	Propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la mezcla asfáltica modificada
	OE.2: Analizar las propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la mezcla asfáltica al sustituir parcialmente al cemento asfáltico por caucho pulverizado a 0%, 1%, 2%, 3% y el agregado por RAP al 0%, 10%, 15% y 20% elaboradas en Chiclayo.	Hipótesis alterna:	
	OE.3: Determinar la influencia del porcentaje óptimo del caucho pulverizado y pavimento asfáltico reciclado en las propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la mezcla asfáltica modificada elaborada en Chiclayo.	Ha1: La sustitución de caucho pulverizado influye significativamente en las propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la mezcla asfáltica.	
OE.4: Evaluar la variación de las propiedades microestructurales de la muestra asfáltica patrón con la muestra asfáltica con % óptimo modificada con la incorporación de RAP como sustituto parcial del agregado y el caucho pulverizado como sustituto parcial del cemento asfáltico, con agregados de Chiclayo.	Ha2: La sustitución de pavimento asfáltico reciclado influye significativamente en las propiedades físico-mecánicas y microestructurales de la mezcla asfáltica.		

Ensayos realizados en los agregados

a. Análisis granulométrico por tamizado:

El ensayo de análisis granulométrico de agregados por tamizado, descrito en el MTC E 107, tiene como objetivo determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de agregados. El procedimiento se realiza en seco y consiste en pasar una muestra a través de una serie de tamices de malla cuadrada, colocados en orden decreciente de tamaño de abertura, desde el tamiz superior hasta el tamiz de fondo.

Antes de realizar el ensayo, se debe preparar la muestra siguiendo el procedimiento descrito en el MTC E 106. Luego, se pesa una cantidad de muestra seca y se coloca en el tamiz superior. Se tapa el conjunto de tamices y se agita mecánicamente durante un tiempo determinado. Después, se pesa el material retenido en cada tamiz y se registra el peso acumulado.

A continuación, se calcula el porcentaje de suelo que pasa por cada tamiz y se grafica la curva granulométrica. También se determinan la abertura efectiva y el diámetro medio de las partículas, utilizando las ecuaciones y tablas proporcionadas en el MTC E 107.



b. Durabilidad al Sulfato de Magnesio y Sulfato de Sodio:

Antes de realizar el ensayo, se debe preparar la muestra de agregado siguiendo el procedimiento descrito en el MTC E 123. Luego, se sumerge la muestra en la solución saturada de sulfato de sodio o sulfato de magnesio durante un período de 16 a 18 horas. Después, se saca la muestra de la solución y se coloca en un horno para secar durante un período de tiempo determinado.

Este proceso de inmersión y secado se repite varias veces, dependiendo del número de ciclos requeridos para el ensayo. Después de cada ciclo, se pesa la muestra y se registra el peso perdido. Al final del ensayo, se calcula el porcentaje de pérdida de peso y se determina la clasificación del agregado según los criterios establecidos en el MTC E 209.



c. Abrasión Los Ángeles:

El ensayo de abrasión Los Ángeles (L.A.) al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 ½”), descrito en el MTC E 207, tiene como objetivo determinar la resistencia a la degradación de los agregados gruesos mediante la máquina de Los Ángeles. El procedimiento se realiza en seco y consiste en someter una muestra de agregado a un número determinado de ciclos de abrasión en la máquina de Los Ángeles.

Antes de realizar el ensayo, se debe preparar la muestra de agregado siguiendo el procedimiento descrito en el MTC E 123. Luego, se coloca la muestra en la máquina de Los Ángeles, junto con un número determinado de bolas de acero. La máquina se pone en marcha y se somete la muestra a un número determinado de ciclos de abrasión.

Después de cada ciclo, se pesa la muestra y se registra el peso perdido. Al final del ensayo, se calcula el porcentaje de pérdida de peso y se determina la clasificación del agregado según los criterios establecidos en el MTC E 207.

Medida de tamiz (abertura)		Peso de muestra
que pasa	retenido	Gradación
		B
19 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	2500±10
12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	2500±10
Total		5000±10

Fuente: [49]

		
<p><i>Muestra en máquina de los Ángeles</i></p>	<p><i>Lavado del agregado grueso expuesto a la abrasión</i></p>	<p><i>Material después del proceso de abrasión</i></p>

d. Partículas chatas y alargadas:

El ensayo de partículas chatas y alargadas en agregados, descrito en el MTC E 213, tiene como objetivo determinar la cantidad de partículas chatas y alargadas presentes en una muestra de agregado. El procedimiento se realiza en seco y consiste en pasar la muestra de agregado a través de una serie de tamices de malla cuadrada, colocados en orden decreciente de tamaño de abertura, desde el tamiz superior hasta el tamiz de fondo.

Antes de realizar el ensayo, se debe preparar la muestra de agregado siguiendo el procedimiento descrito en el MTC E 123. Luego, se pesa una cantidad de muestra seca y se coloca en el tamiz superior. Se tapa el conjunto de tamices y se agita mecánicamente durante un tiempo determinado. Después, se pesa el material retenido en cada tamiz y se registra el peso acumulado.

A continuación, se determina la cantidad de partículas chatas y alargadas presentes en la muestra, utilizando las ecuaciones y tablas proporcionadas en el MTC E 213. Se calcula el índice de forma de la muestra y se determina la clasificación del agregado según los criterios establecidos en el MTC E 213.

e. Partículas fracturadas:

El ensayo de determinación del porcentaje de partículas fracturadas en el agregado grueso, descrito en el MTC E 210, tiene como objetivo determinar el porcentaje de partículas fracturadas presentes en una muestra de agregado grueso. El procedimiento

se realiza en seco y consiste en pasar la muestra de agregado a través de una serie de tamices de malla cuadrada, colocados en orden decreciente de tamaño de abertura, desde el tamiz superior hasta el tamiz de fondo.

Antes de realizar el ensayo, se debe preparar la muestra de agregado siguiendo el procedimiento descrito en el MTC E 123. Luego, se pesa una cantidad de muestra seca y se coloca en el tamiz superior. Se tapa el conjunto de tamices y se agita mecánicamente durante un tiempo determinado. Después, se pesa el material retenido en cada tamiz y se registra el peso acumulado.


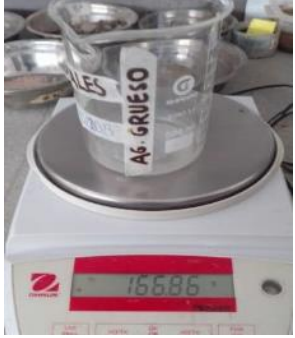
A continuación, se determina el porcentaje de partículas fracturadas presentes en la muestra, utilizando las ecuaciones y tablas proporcionadas en el MTC E 210. Se calcula el promedio pesado de partículas fracturadas y se determina la clasificación del agregado según los criterios establecidos en el MTC E 210.



f. Sales solubles en grava:

El ensayo de sales solubles en agregados para pavimentos flexibles, descrito en el MTC E 219. El procedimiento se realiza en seco y consiste en tomar una muestra de agregado y lavarla con agua destilada para eliminar las impurezas superficiales. Luego, se seca la muestra y se coloca en un recipiente con una solución de nitrato de plata. Se agita la solución y se deja reposar durante un tiempo determinado.

Después, se filtra la solución y se lava el precipitado con agua destilada. Se seca el precipitado y se pesa. A partir del peso del precipitado, se calcula el contenido de cloruros y sulfatos en la muestra de agregado, MTC E 219.

		
<p><i>Piedra chancada 1/2"-3/8" se procesó con agua destilada</i></p>	<p><i>Se usó papel filtro WHATMAN #42, posteriormente se realizó el destilado</i></p>	<p><i>Material con agua destilada pesado en un biker</i></p>

g. *Peso específico y absorción:*

El ensayo de peso específico y absorción de agregados gruesos, descrito en el MTC E 206, tiene como objetivo establecer un procedimiento para determinar el peso específico seco, el peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y la absorción (después de 24 horas) del agregado grueso.

El procedimiento se realiza en seco y consiste en tomar una muestra de agregado y secarla en un horno a una temperatura determinada. Luego, se pesa la muestra seca y se sumerge en agua durante 24 horas. Después de este tiempo, se retira la muestra del agua, se seca la superficie de las partículas y se pesa.

A partir de los pesos obtenidos, se calcula el peso específico seco, el peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y la absorción, utilizando las ecuaciones y tablas proporcionadas en el MTC E 206. Es importante tener en cuenta que el peso específico saturado con superficie seca y la absorción están basados en agregados remojados en agua después de 24 horas. Este modo operativo no es aplicable para agregados ligeros.

	
<p><i>Peso de la piedra durante el ensayo</i></p>	<p><i>Peso total de la piedra a usar para el ensayo</i></p>

Ensayos realizados para el agregado fino:

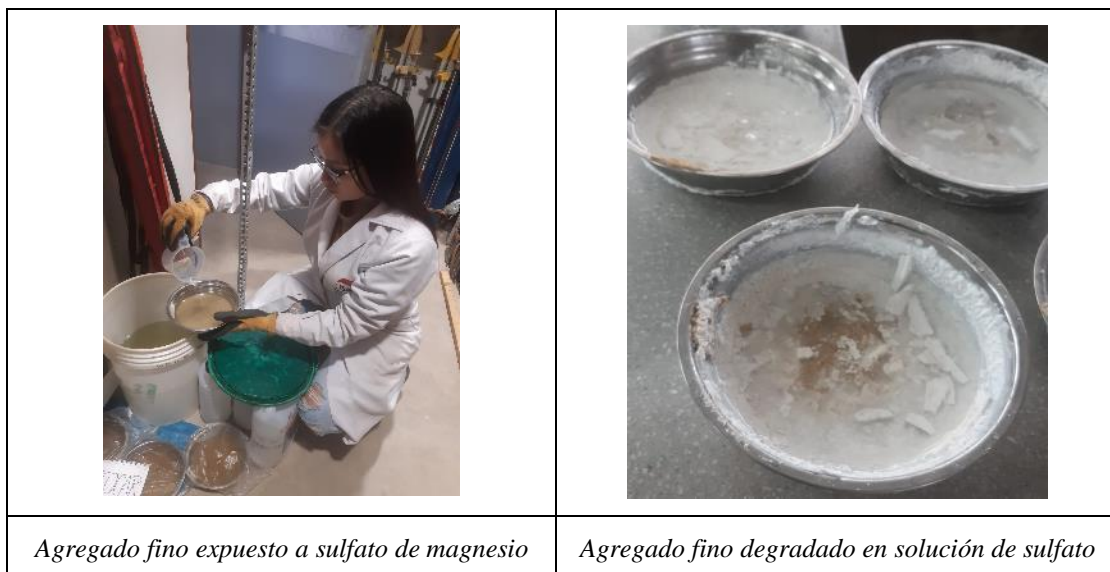
a. Análisis granulométrico por tamizado:

Es el mismo procedimiento descrito para el agregado grueso.

		
<p><i>Granulometría del agregado fino</i></p>	<p><i>Agregado fino retenido del tamiz #40</i></p>	<p><i>Agregado fino retenido del tamiz #200</i></p>

a. Durabilidad al Sulfato de Magnesio y Sulfato de Sodio:

Es el mismo procedimiento indicado para el agregado grueso.



b. Equivalente de arena:

El método de ensayo estándar para el valor equivalente de arena de suelos y agregado fino, descrito en el MTC E 114, tiene como objetivo indicar, bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de suelos arcillosos o finos plásticos y polvo en suelos granulares y agregados finos que pasan el tamiz N°4 (4,75mm).

El procedimiento se realiza en seco y consiste en tomar una muestra de suelo o agregado fino y lavarla con agua para eliminar las impurezas superficiales. Luego, se seca la muestra y se coloca en un recipiente con una solución de cloruro de calcio. Se agita la solución y se deja reposar durante un tiempo determinado.

Después, se filtra la solución y se lava el precipitado con agua destilada. Se seca el precipitado y se pesa. A partir del peso del precipitado, se calcula el valor equivalente de arena en la muestra de suelo o agregado fino, utilizando las ecuaciones y tablas proporcionadas en el MTC E 114.

$$\text{Equivalente de Arena (EA)} = \frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de arcilla}} \times 100$$

		
<p><i>Cuarteo para selección de material</i></p>	<p><i>Solución precipitada y agitada con agua destilada y solución stock</i></p>	<p><i>Lectura de material de equivalente de arena</i></p>


c. Sales solubles en arena:

El ensayo de sales solubles en agregados para pavimentos flexibles, descrito en el MTC E 219, tiene como objetivo establecer el procedimiento analítico de cristalización para determinar el contenido de cloruros y sulfatos, solubles en agua, de los agregados pétreos empleados en bases estabilizadas y mezclas asfálticas.

El procedimiento se realiza en seco y consiste en tomar una muestra de agregado y lavarla con agua destilada para eliminar las impurezas superficiales. Luego, se seca la muestra y se coloca en un recipiente con una solución de nitrato de plata. Se agita la solución y se deja reposar durante un tiempo determinado.



Después, se filtra la solución y se lava el precipitado con agua destilada. Se seca el precipitado y se pesa. A partir del peso del precipitado, se calcula el contenido de cloruros y sulfatos en la muestra de agregado, utilizando las ecuaciones y tablas proporcionadas en el MTC E 219.

$$\% \text{ Sales Solubles} = \frac{1}{\frac{Cx_A}{DxB}} \times 100$$

	
<p><i>Vaciado de agua destilada a recipiente</i></p>	<p><i>Sales para el agregado fino</i></p>

d. Valor azul de metileno:

El ensayo "Valor de Azul de Metileno en Agregados Finos y en Llenantes Minerales" describe un procedimiento para determinar la cantidad de material potencialmente dañino presente en la fracción fina de un agregado. El método implica la titulación de la solución de azul de metileno en pequeños incrementos en un recipiente que contiene agua destilada y la muestra de material menor de 75 μm . El valor de azul de metileno obtenido se compara con una tabla que indica el comportamiento esperado de la mezcla asfáltica en función del valor de azul de metileno. El ensayo requiere el uso de materiales y equipos específicos, y se debe tener en cuenta la responsabilidad del usuario de seguir prácticas seguras y considerar las limitaciones regulatorias antes de su uso.

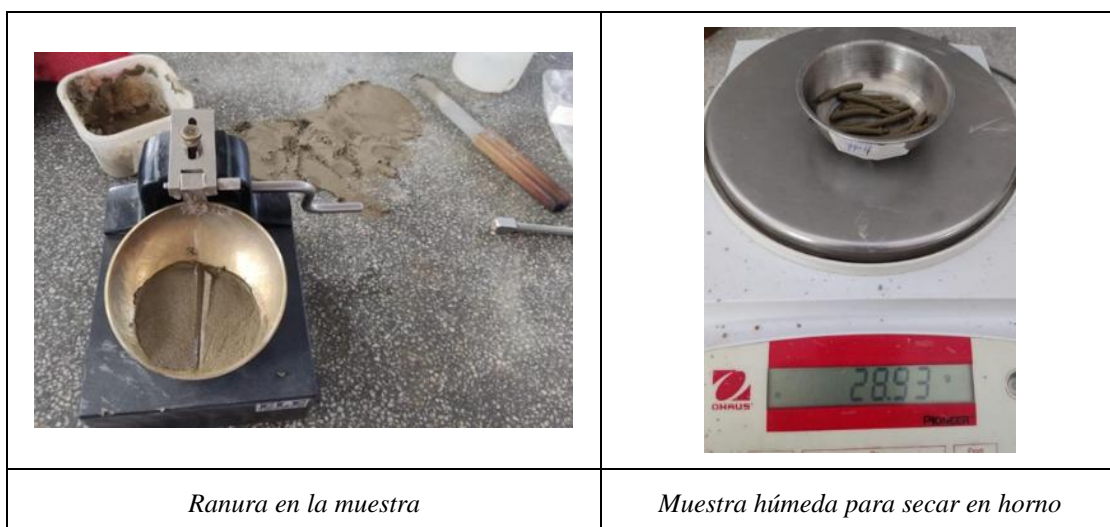
		
<p><i>Adicionando agua destilada a material pasante del tamiz #200</i></p>	<p><i>Dejando a caer gotas de lechada sobre el papel filtro</i></p>	<p><i>Muestra final con aureola azul</i></p>

e. Índice de límite líquido (malla N° 40):

El ensayo de determinación del límite líquido de los suelos, descrito en el MTC E 110, tiene como objetivo establecer el procedimiento para determinar el contenido de humedad, expresado en porcentaje, para el cual el suelo se halla en el límite entre los estados líquido y plástico.

El procedimiento se realiza en húmedo y consiste en tomar una muestra de suelo y colocarla en un recipiente especial llamado copa de Casagrande. Se hace una ranura en la muestra y se deja caer un dispositivo llamado martillo de caída libre desde una altura determinada.

Luego, se cierra la ranura y se levanta la copa de Casagrande mediante un mecanismo de levantamiento. Se mide la distancia que se levanta la copa y se registra. Se repite el procedimiento con diferentes contenidos de humedad, agregando agua a la muestra y mezclando bien, hasta que se obtienen al menos cinco valores de la distancia de penetración.



f. Índice de límite plástico (malla N° 200):

El ensayo de determinación del límite plástico del agregado fino e índice de plasticidad, descrito en el MTC E 111, tiene como objetivo establecer el procedimiento para determinar la humedad más baja con la que pueden formarse barritas de suelo de unos 3,2 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre la palma de la mano y una superficie lisa, sin que dichas barritas se desmoronen. Además, se calcula el índice de plasticidad de un suelo como la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico.

El procedimiento se realiza en húmedo y consiste en tomar una muestra de suelo y mezclarla con agua hasta obtener una pasta homogénea. Luego, se toma una porción de la pasta y se forma una barrita de unos 3,2 mm de diámetro. Se coloca la barrita sobre una superficie lisa y se la hace rodar con la palma de la mano, aplicando una presión constante.


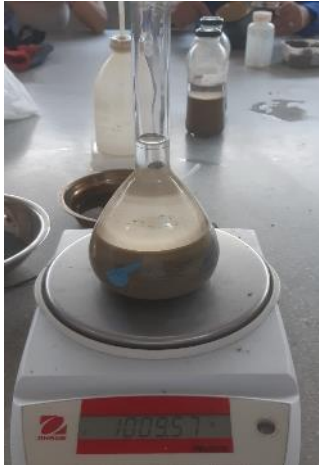


g. Absorción de finos:

El ensayo de gravedad específica y absorción de agregados finos, descrito en el MTC E 205, tiene como objetivo establecer el procedimiento para determinar el peso específico seco, peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y la absorción después de 24 horas de sumergido en agua el agregado fino.

El procedimiento se realiza en húmedo y consiste en tomar una muestra de agregado fino y secarla en un horno a una temperatura determinada. Luego, se sumerge la muestra en agua destilada durante 24 horas y se retira para eliminar el agua superficial con un paño.



Se pesa la muestra sumergida y se registra el peso. Luego, se sumerge la muestra en agua destilada y se la pesa nuevamente. A partir de los valores obtenidos, se calcula el peso específico seco, el peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y la absorción, utilizando las ecuaciones y tablas proporcionadas en el MTC E 205.

	
<p><i>Peso de matraz para elaboración de ensayo</i></p>	<p><i>Peso de matraz más agregado pasante de la malla N°4</i></p>

h. Análisis granulométrico del caucho pulverizado

	
<p><i>Peso de la muestra de caucho pulverizado</i></p>	<p><i>Proceso de tamizado mediante análisis granulométrico</i></p>

i. Análisis granulométrico del pavimento asfáltico reciclado

		
<p><i>Peso de la muestra a realizar 2877 gr.</i></p>	<p><i>Tamices usados para la granulometría: 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°80, N°200 y fondo.</i></p>	<p><i>Proceso de tamizado</i></p>

Evaluación comparativa del costo de la mezcla asfáltica patrón vs modificada

Materiales	C.U (S/)	Mezcla asfáltica Patrón (kg)	Precio parcial	Mezcla asfáltica óptimo+2%PCR+15%RAP (kg)	C.U (S/)	Precio Parcial
Cemento asfáltico	10	0.0735	0.735	0.072	10	0.72
Arena	5	0.884	4.42	0.796	5	3.98
Piedra	7	0.519	3.633	0.467	7	3.269
Cemento	0.8	0.0225	0.018	0.0225	0.8	0.018
2% PCR		-		0.001		
15% RAP		-		0.608		
Precio total (S/)			8.806			7.987

Nota. Se tabula los costos de los materiales a partir del diseño óptimo de la mezcla patrón comparado con el óptimo de la mezcla modificada, donde el PCR sustituye parcialmente al cemento asfáltico y el RAP al agregado.

A partir de la tabla adjunta, se puede observar que la mezcla asfáltica modificada con la adición de 2% de PCR y 15% de RAP resulta ser más económica en comparación con la mezcla asfáltica patrón. Específicamente, el costo total de la mezcla patrón es de 8.806 S/ por kg, mientras que el costo total de la mezcla modificada es de 7.987 S/ por metro cúbico. Esta reducción en el costo, que es aproximadamente del 9.3%, se logra a pesar de la inclusión de materiales adicionales (PCR y RAP), gracias a la disminución en las cantidades de cemento asfáltico, arena y piedra en la mezcla modificada. La incorporación de RAP y PCR, material reciclado, contribuye a una reducción significativa de costos, lo que además tiene un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental al reutilizar materiales. Por lo tanto, desde una perspectiva económica y ecológica, la mezcla modificada presenta una opción más ventajosa sin comprometer la calidad y el rendimiento esperado del material asfáltico.