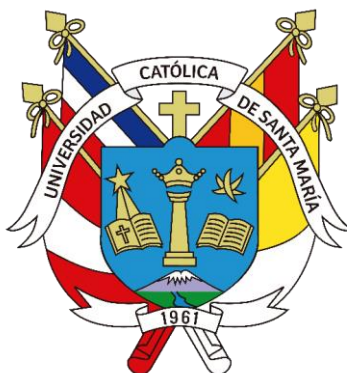


Universidad Católica de Santa María
Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Optimización de mezclas asfálticas frías con rellenos cementantes ternarios para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Provincia Arequipa, año 2025.

Tesis presentada por las Bachilleres:

Luza Portilla, Renata Michelle

ORCID: 0009-0007-6535-4810

Torres Salinas, Shirly Beatriz

ORCID: 0009-0007-9110-4225

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Asesor:

Mg. Gamarra Tuco, Rubén Francisco

ORCID: 0000-0003-1748-5887

Arequipa – Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA CIVIL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 14 de Octubre del 2025

Dictamen: 011965-C-EPIC-2025

Visto el borrador del expediente 011965, presentado por:

2019834022 - LUZA PORTILLA RENATA MICHELLE

2019202582 - TORRES SALINAS SHIRLY BEATRIZ

Titulado:

**OPTIMIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS FRÍAS CON RELLENOS CEMENTANTES TERNARIOS
PARA MEJORAR LA RESISTENCIA Y DURABILIDAD EN PAVIMENTOS VIALES DE TRÁNSITO
LIGERO FRENTE A CONDICIONES HÚMEDAS, PROVINCIA AREQUIPA, AÑO 2025.**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO CIVIL

**29329377 - NEIRA ARENAS JULY LILIAM
DICTAMINADOR**



**29412437 - UGARTE CALDERON ENRIQUE ALFONSO
DICTAMINADOR**



**41587204 - GARCIA GODOS PEÑALOZA LUZ MATILDE
DICTAMINADOR**



Optimización de mezclas asfálticas frías con rellenos cementantes ternarios para mejorar la resistencia y durabilidad en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Provincia

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

6%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	2%
3	transparencia.mtc.gob.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	1%
5	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
6	www.mtc.gob.pe Fuente de Internet	1%
7	repositorio.puce.edu.ec Fuente de Internet	1%

DEDICATORIA

A mis padres, Renato Norel Luza Zegarra y Luz Elena Portilla Béjar, por ser mi fuerza, mi guía y mi refugio. Por cada sacrificio que hicieron en silencio, por cada lágrima escondida y por cada sonrisa que me regalaron incluso en sus propios momentos de cansancio. Todo lo que soy y todo lo que hoy consigo es reflejo de su amor infinito y de su perseverancia que la herede de ustedes. Este triunfo es tanto suyo como mío, porque sin ustedes jamás habría aprendido a volar.

A mi hermana, Mirna Gabriela Luza Portilla, quien con su cariño y compañía me enseñó que la hermandad es un lazo eterno que sostiene el alma incluso en los días más oscuros. Gracias por recordarme siempre que nunca estoy sola.

A mis abuelos y a mi tía, que ahora brillan como estrellas en el cielo: Renato Luza Reyli, Ernesto Portilla y Mónica Luza. Ustedes partieron de este mundo, pero jamás de mi corazón. Cada paso que doy lo siento acompañado por su luz y sus bendiciones. Esta tesis también les pertenece, porque la inspiración de su amor y su ejemplo sigue guiándome.

A mis queridas abuelas, Nilda Zegarra y Julia Béjar, que con su ternura y su sabiduría me enseñaron que la verdadera riqueza está en la bondad del corazón. Sus abrazos fueron mi refugio y sus palabras, semillas de esperanza que hoy florecen en este logro.

Y a ti, Shirly Torres, mi amiga leal en este recorrido, gracias por tu compañía sincera en este camino que ha hecho ser perseverantes y por demostrarme que la verdadera amistad también sostiene sueños.

Este trabajo no es solo una investigación, es un pedazo de mi vida, un tributo a quienes amo y un legado de gratitud eterna. Cada página lleva sus nombres, cada logro lleva su huella, y cada lágrima derramada para alcanzar esta meta es un testimonio del amor que me rodea.

Luza Portilla, Renata Michelle

A Dios, por sustentar y guiar mi vida, por su infinita misericordia y, sobre todo, por bendecirme con padres cuyo amor y ejemplo son mi mayor tesoro.

A la memoria de mi padre, José César Torres Ascuña, a quien siempre amare con toda el alma, recordando con profundo cariño su incansable lucha por salir adelante y su ejemplo de superación. Tu anhelo de verme convertida en profesional ha sido mi mayor inspiración; hoy este logro también es por ti.

A mi madre, Yiovanna Victoria Salinas Najar, por su amor incondicional y por haber dado todo por nuestra familia. Su apoyo y sacrificio son, junto a los de mi padre, el cimiento de mi perseverancia. Con este logro honro el esfuerzo y amor que siempre me brindaste madre mía.

A mi hermano, José Cesar Torres Salinas por ser mi compañero de aventuras. Siempre he visto en ti un gran potencial y estoy muy orgullosa de tenerte como mi hermano, te dedico este logro con todo mi cariño.

A mis mentores en Southern Perú, por su dedicada guía y por mostrarme, con su ejemplo, que el aprendizaje es un proceso constante y apasionante.

A mi querida Amiga, Renata Luza, con la que empecé esta hermosa historia, y hoy culminamos juntas un proyecto que inicio como un sueño y que marca el comienzo de nuestro camino profesional.

Sus nombres forman parte de mi historia

Torres Salinas, Shirly Beatriz

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a:

Ing. Rubén Francisco Gamarra Tuco

por su acompañamiento, apoyo y guía en el proceso.

A los profesionales participantes en la investigación, por su colaboración generosa y sus valiosas contribuciones, que enriquecieron significativamente esta investigación.

Con esta investigación, los autores esperan que sus hallazgos sobre mezclas frías con rellenos cementantes contribuyan a fortalecer la resistencia y durabilidad de los pavimentos, y que sus resultados puedan aplicarse en distintos contextos para generar soluciones sostenibles y efectivas.



RESUMEN

El estudio investiga la optimización de mezclas asfálticas frías de bajo tránsito utilizando rellenos cementantes ternarios (ceniza de lodo de papel (PSA) y el polvo de horno de cemento (CKD) para mejorar la estabilidad ante la humedad. La investigación tiene como objetivo ofrecer una alternativa más sostenible y duradera a las mezclas asfálticas convencionales, al incorporar materiales reciclados que puedan mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Se realizaron diversas mezclas experimentales con diferentes proporciones de PSA y CKD, que fueron sometidas a pruebas de resistencia a la compresión y durabilidad bajo ciclos de humedad y secado para evaluar su desempeño en comparación con las mezclas tradicionales.

Los resultados obtenidos demostraron que la incorporación de PSA y CKD en las MAF de bajo tránsito mejora significativamente las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión, en comparación con las mezclas convencionales. Además, las mezclas modificadas con estos rellenos cementantes mostraron una mayor durabilidad en condiciones de humedad, lo que las hace más resistentes. La investigación también evidenció que la combinación óptima de PSA y CKD se alcanzó con 6% PSA y 4% CKD, lo que resultó en un balance adecuado entre resistencia y durabilidad.

Se concluye que el uso de rellenos cementantes ternarios en las MAF representa una alternativa ecológica viable para mejorar la sostenibilidad de las pavimentaciones viales, contribuyendo a la economía circular y reduciendo la dependencia de mezclas asfálticas calientes. Se recomienda estudios adicionales a largo plazo para optimizar las proporciones de estos materiales y evaluar su comportamiento en condiciones reales de tráfico y clima.

Palabras clave: Mezclas asfálticas frías, Resistencia, Durabilidad.

ABSTRACT

This study investigates the optimization of low-traffic cold asphalt mixes using ternary cementitious fillers (paper sludge ash (PSA) and cement kiln dust (CKD)) to improve moisture stability. The research aims to offer a more sustainable and durable alternative to conventional asphalt mixes by incorporating recycled materials that can improve their mechanical and durability properties. Various experimental mixes were prepared with different proportions of PSA and CKD and subjected to compressive strength and durability tests under wet and dry cycles to evaluate their performance compared to traditional mixes. The results showed that incorporating PSA and CKD into low-traffic cold asphalt mixes significantly improves mechanical properties, such as compressive strength, compared to conventional mixes. Furthermore, the mixes modified with these cementitious fillers exhibited greater durability under wet conditions, making them more resistant. The research also showed that the optimal combination of PSA and CKD was achieved at 6% PSA and 4% CKD resulted in a suitable balance between strength and durability.

It is concluded that the use of ternary cementitious fillers in MAFs represents a viable ecological alternative for improving the sustainability of road pavements, contributing to the circular economy and reducing dependence on hot mix asphalt. Further long-term studies are recommended to optimize the proportions of these materials and evaluate their performance under real traffic and climate conditions.

Keywords: Cold mix asphalt, Strength, Durability.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Justificación de la investigación.....	7
1.2.1. Justificación Social.....	7
1.2.2. Justificación Ambiental.....	7
1.2.3. Justificación Económica.....	8
1.2.4. Justificación Tecnológica.....	8
1.2.5. Justificación Política/Institucional	9
1.2.6. Justificación Ética	9
1.3. Hipótesis	9
1.3.1. Hipótesis general	9
1.3.2. Hipótesis específicas	10
1.4. Objetivos de la investigación.....	10
1.4.1. Objetivo general	10
1.4.2. Objetivos específicos.....	10
1.5. Matriz de consistencia	12
1.6. Alcance	13
1.7. Limitaciones	13
CAPÍTULO II.....	15
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	16

2.1.	Estado del arte	16
2.2.	Marco legal	29
2.3.	Marco teórico.....	32
2.3.1.	Pavimento asfáltico	32
2.3.1.1.	Tipos de pavimentos	33
2.3.1.2.	Componentes estructurales de un pavimento.....	39
2.3.1.3.	Ciclo de vida de los pavimentos	41
2.3.2.	Mezcla asfáltica en frío	44
2.3.2.1.	Ventajas y desventajas	45
2.3.2.2.	Características	46
2.3.3.	Agregados ternarios.....	47
2.3.4.	Agregados pétreos	48
2.3.5.	Propiedades de los agregados pétreos	50
2.3.6.	Emulsión Asfáltica	59
CAPÍTULO III		63
3.	METODOLOGÍA PROPUESTA	64
3.1.	Tipo de investigación	64
3.2.	Métodos de investigación	67
3.3.	Área de estudio	67
3.3.1.	Delimitación espacial	67
3.3.2.	Delimitación temporal.....	67
3.3.3.	Delimitación temática	68
3.4.	Recolección de la información	68
3.5.	Población y muestra del estudio	68
3.6.	Normas de ensayo aplicadas.....	69
3.6.1.	Procedimiento de ensayo de las pruebas realizadas	70
CAPÍTULO IV		72

4. RESULTADOS	73
4.1. Resultados descriptivos.....	73
4.1.1. Diseño de mezcla método Marshall	73
4.1.2. Resistencia a la compresión.....	95
4.1.3. Pérdida de Resistencia a la compresión (%).....	98
4.2. Resultados inferenciales	100
4.2.1. Resistencia a la compresión.....	100
4.2.2. Pérdida de resistencia a la compresión (%).....	104
4.3. Costos unitarios.....	108
CAPÍTULO V	111
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
5.1. Conclusiones	112
5.2. Recomendaciones	113
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de consistencia	12
Tabla 2. Estado del arte	16
Tabla 3. Resumen de ensayos materiales pétreos.....	57
Tabla 4. Resumen de ensayos materiales pétreos.....	58
Tabla 5. Cuadro de variables	66
Tabla 6. Método de investigación.....	67
Tabla 7. Diseño del experimento.....	69
Tabla 8. Resumen de ensayos materiales pétreos.....	74
Tabla 9. Carga de gradación.....	75
Tabla 10. Gradación de las muestras de ensayo	75
Tabla 11. Resultados de resistencia a la degradación usando la máquina de Los Ángeles. 76	
Tabla 12. Gradación de las muestras de ensayo	77
Tabla 13. Resultados del análisis cuantitativo para la fracción gruesa de la 1era muestra . 77	
Tabla 14. Resultados del análisis cuantitativo para la fracción fina de la 1era muestra 78	
Tabla 15. Resultados del análisis cuantitativo para la fracción gruesa de la 2da muestra .. 78	
Tabla 16. Resultados del análisis cuantitativo para la fracción fina de la 2da muestra..... 78	
Tabla 17. Resultados del análisis cuantitativo para la fracción gruesa de la 3era muestra . 79	
Tabla 18. Resultados del análisis cuantitativo para la fracción fina de la tercera muestra . 79	
Tabla 19. Presentación del tamaño máximo nominal.....	80
Tabla 20. Presentación del peso mínimo nominal.....	80
Tabla 21. Resultados del análisis de partículas fracturadas mecánicamente.....	81
Tabla 22. Tamaño nominal del agregado	82
Tabla 23. Resultados del análisis de partículas chatas y alargadas	82
Tabla 24. Resultados de ensayos para el equivalente de arena	84

Tabla 25. Tabla de contenido de impurezas	85
Tabla 26. Resultados del contenido de impurezas orgánicas	86
Tabla 27. Características de Marshall Modificado	93
Tabla 28. Descripción del ensayo.....	94
Tabla 29. Ensayo de probetas de asfalto con mezcla en frio / Dosificación de agregado... 95	
Tabla 30. Resultados descriptivos para la Resistencia a la compresión (MPa).....	95
Tabla 31. Resultados descriptivos para la Pérdida de resistencia a la compresión (%)	98
Tabla 32. ANOVA para la Resistencia a la a la compresión (MPa)	100
Tabla 33. Prueba de Tukey para la Resistencia a la compresión (MPa)	102
Tabla 34. ANOVA para la Pérdida de resistencia a la compresión (%) al 5to ciclo.....	104
Tabla 35. Prueba de Tukey a la Pérdida de resistencia a la compresión (%) al 5to ciclo .	106
Tabla 36. Descripción de materiales utilizados	108

ÍNDICE DE FIGURAS

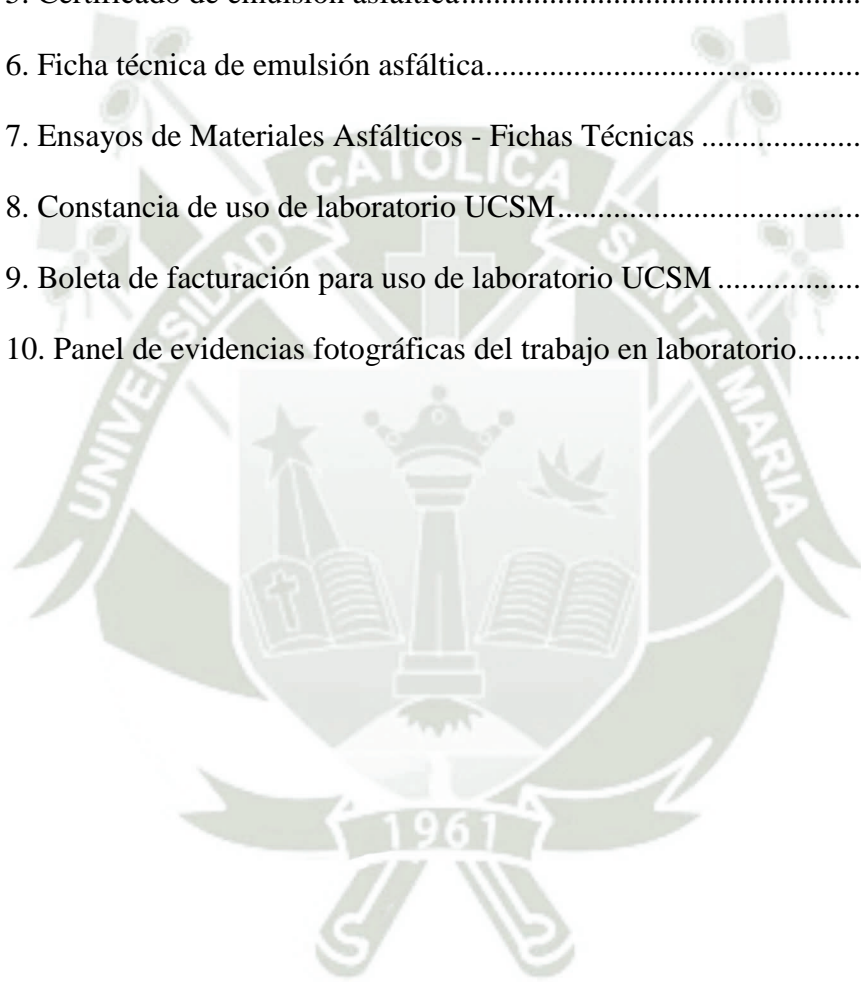
Figura 1 Estructura típica de un pavimento asfáltico (flexible)	34
Figura 2 Estructura típica de un pavimento rígido	36
Figura 3 Estructura típica de un pavimento semi-rígido	37
Figura 4 Estructura típica de un pavimento articulado.....	38
Figura 5 Esquema típico del componente estructural de un pavimento flexible.....	41
Figura 6 Esquema de deterioro de un pavimento a través del tiempo.....	43
Figura 7 Ciclo de vida de los pavimentos con mantenimiento y rehabilitación.....	44
Figura 8 Esquema de la estructura de una emulsión Catiónica	60
Figura 9 Proceso de rotura de una Emulsión Asfáltica sobre un Material Pétreo.....	62
Figura 10. Se procedió a cargar el agregado grueso en la máquina Los Ángeles	76
Figura 11. Se procedió a cargar el agregado grueso en la máquina Los Ángeles	76
Figura 12. Pesaje de agregado grueso luego de la absorción primera muestra	78
Figura 13. Pesaje de agregado grueso luego de la absorción segunda muestra.....	79
Figura 14. Pesaje de agregado grueso luego de la absorción	79
Figura 15. Partículas fracturadas (Bordes agudos, superficies alisadas).....	81
Figura 16. Se procedió a cargar el agregado grueso en la máquina cuarteador	81
Figura 17. Finalizado el ciclo de puerta la muestra de agregado grueso.....	81
Figura 18. Identificación mediante calibre	83
Figura 19. Identificación visual del material	83
Figura 20. Ensayo de sedimentación de agregado frío	85
Figura 21. Ensayo de sedimentación de agregado frío.....	86
Figura 22. Llenado de cilindro estándar	88
Figura 23. Llenado de cilindro estándar	88
Figura 24. Ensayo de la cuchara Casagrande	90

Figura 25. Procedimiento para limite plástico.....	91
Figura 26. Muestra base (Probeta 0%CKD +0% PSA).....	92
Figura 27. Determinación del optimo de la emulsión asfáltica	94
Figura 28. Resultados del promedio para la resistencia a la compresión (MPa).....	95
Figura 29. Resultados del promedio a la pérdida de resistencia a la compresión (%)	98



ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Base de datos	122
Anexo 2. Ficha técnica de agregado: Piedra ½”	123
Anexo 3. Ficha técnica de agregado: Arena gruesa.....	124
Anexo 4. Boleta de compra de emulsión asfáltica.....	125
Anexo 5. Certificado de emulsión asfáltica.....	126
Anexo 6. Ficha técnica de emulsión asfáltica.....	127
Anexo 7. Ensayos de Materiales Asfálticos - Fichas Técnicas	128
Anexo 8. Constancia de uso de laboratorio UCSM.....	129
Anexo 9. Boleta de facturación para uso de laboratorio UCSM	131
Anexo 10. Panel de evidencias fotográficas del trabajo en laboratorio.....	132



ÍNDICE DE ECUACIONES

Porcentaje de desgaste (E 1)	53
Índice de angularidad (E 2)	54
Resistencia a la Tracción Indirecta (E 3).....	56
Carga máxima (E 4).....	56
Resistencia (E 5).....	56



INTRODUCCIÓN

La pavimentación de carreteras es un componente esencial en la infraestructura de transporte, y de los materiales más manipulados en su construcción es el asfalto. Sin embargo, las mezclas asfálticas convencionales suelen enfrentar desafíos relacionados con la estabilidad ante condiciones climáticas adversas, particularmente la humedad. Esta inestabilidad afecta directamente la durabilidad y la eficiencia de las carreteras, lo que genera ascendentes costos de mantenimiento y deterioro de la infraestructura vial. Es por ello que se hace necesario investigar soluciones innovadoras que mejoren las propiedades del mezclado asfáltico, garantizando resistencia y estabilidad en presencia de agua.

El uso de las mezclas asfálticas frías (MAF) ha ganado una creciente relevancia en la ingeniería vial contemporánea, al consolidarse como una alternativa más económica y ecológica frente al mezclado asfáltico en caliente en vías de tránsito bajo. Su producción a temperaturas ambiente reduce significativamente el consumo energético y las emisiones de gases contaminantes, lo que contribuye a una menor huella de carbono en los proyectos de pavimentación (IMMAC, 2020). Además, su aplicación facilita intervenciones en zonas con acceso limitado a maquinaria pesada o en condiciones climáticas adversas, optimizando tiempos y costos sin comprometer la funcionalidad del pavimento. Las MAF son más fáciles de manipular, requieren menos energía para su producción y tienen un menor impacto ambiental (ASFALTOFARVIAS, 2024).

Sin embargo, uno de sus principales inconvenientes es su mayor susceptibilidad a los efectos de la humedad, lo que reduce su rendimiento en términos de durabilidad. Por tanto, es necesario encontrar métodos para mejorar la estabilidad de estas mezclas frente a la acción del agua, especialmente en condiciones de alta humedad.

Una estrategia prometedora para abordar este problema es la incorporación de rellenos cementantes ternarios en las MAF. Estos rellenos, compuestos por una combinación

de materiales como cemento, cal y cenizas volantes, pueden mejorar las particularidades mecánicas y de estabilidad de las mezclas. Los rellenos cementantes ternarios ofrecen ventajas significativas, como un aumento en la cohesión, una mejor resistencia a la humedad y una mayor durabilidad, lo que podría hacer que las MAF sean una opción más viable.

El objetivo es optimizar las MAF a través de la incorporación de rellenos cementantes ternarios, con el fin de mejorar su estabilidad ante la humedad. Para ello, se evaluarán diferentes proporciones de los componentes ternarios, analizando sus efectos sobre la resistencia a la humedad, la adherencia de materiales y la durabilidad de las mezclas. A través de esta investigación, se busca aportar soluciones prácticas y sostenibles para la industria de la pavimentación, que condesciendan ampliar la vida útil de las infraestructuras viales y minimizar costos asociados a reparaciones recurrentes debido al desgaste por humedad.

Este estudio se enmarca dentro de un contexto global en el que la búsqueda de alternativas ecológicas y eficientes es cada vez más urgente. En países en desarrollo, como en muchas regiones de América Latina, las infraestructuras viales están expuestas a condiciones climáticas extremas, lo que hace aún más importante la investigación de nuevas tecnologías de pavimentación que sean tanto eficaces como económicas. De este modo, los resultados pueden tener un impacto positivo en la mejora de la calidad y sostenibilidad de las carreteras, contribuyendo a una infraestructura más resistente y duradera.



CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

La construcción de pavimentos enfrenta desafíos significativos relacionados con la sostenibilidad y la eficiencia energética. Las mezclas asfálticas en caliente, son considerablemente manejadas, requiriendo cantidades de energía para calentar los agregados y el asfalto, contribuyendo a las emisiones de gases de efecto invernadero y al cambio climático. Además, la necesidad de mantener y reparar constantemente las infraestructuras viales impone una carga considerable en los recursos naturales y financieros. En respuesta a estos desafíos, se ha incrementado el interés en el uso de mezclas asfálticas en frío, que permiten una reducción significativa en el consumo de energía y en las emisiones de CO₂ durante su producción y aplicación (Espinoza & Guayaquil, 2023).

Las MAF han sido empleadas durante muchos años en diversos países, como Australia, España, Estados Unidos, Francia y el Reino Unido, etc. Su uso abarca aplicaciones como la pavimentación de capas de rodadura, el relleno de baches, el reciclaje de materiales y otras técnicas relacionadas con el mantenimiento de carreteras. Las MAF ofrecen una excelente alternativa para pavimentar calles y carreteras, brindando ventajas tanto económicas como ambientales. Gracias a su fácil producción, transporte, colocación y almacenamiento, estas mezclas se utilizan ampliamente en áreas rurales o de difícil acceso (IMMAC, 2020).

Sin embargo, las mezclas asfálticas en frío presentan problemas inherentes, como una baja resistencia inicial y una susceptibilidad elevada a la humedad, lo que limita su durabilidad y uso en aplicaciones de alto tráfico. Para mitigar las desventajas de la mezcla asfáltica en frío, se pueden incorporar aditivos específicos o mejorar los procesos de producción y aplicación (ASFALTOFARVIAS, 2024).

La optimización de estas mezclas mediante la incorporación de materiales reciclados y subproductos industriales, como la ceniza de lodo de papel (PSA) el polvo de horno de cemento (CKD) y el cemento tipo portland, dado que presentan una solución prometedora para mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad, la incorporación de aditivos permite reducir el tiempo de curado y potenciar las características mecánicas de las MAF (Phan y otros, 2024).

Los rellenos cementantes ternarios son mezclas de materiales en las que participan tres componentes principales: un relleno mineral (como el polvo fino de la roca), un agente cementante (como el cemento Portland) y otro agente cementante (que puede ser una caliza, un polvo de roca caliza, o un cemento suplementario como la ceniza volante), que juntos cumplen una función de cementación en la mezcla, ya sea para asfalto o para rellenos de excavaciones (González & Fernández, 2018).

En Perú, la infraestructura vial es crucial para el desarrollo de la nación, por tanto, la construcción y el mantenimiento de carreteras son esenciales para la conectividad entre regiones y para el transporte de bienes y personas. No obstante, el uso predominante de mezclas asfálticas en caliente implica un alto consumo de energía y la generación de emisiones contaminantes, aspectos que son cada vez más insostenibles en el contexto actual de cambio climático y escasez de recursos (López & Hernández, 2022).

El país también enfrenta desafíos específicos relacionados con la calidad y durabilidad de sus infraestructuras viales, especialmente en regiones con condiciones climáticas adversas. La humedad y las variaciones de temperatura pueden acelerar el deterioro de los pavimentos, lo que resalta la necesidad de desarrollar mezclas asfálticas que sean resistentes y sostenibles. Además, Perú genera una cantidad considerable de residuos industriales que podrían ser aprovechados en la construcción de infraestructuras, promoviendo así una economía circular y la reducción de desechos.

El problema central es la optimización de MAF mediante la incorporación de rellenos cementantes ternarios (PSA y CKD) para mejorar su estabilidad ante la compresión y pérdida de compresión de pavimentos viales de tránsito ligero. Las MAF actuales, aunque más sostenibles en términos de energía y emisiones, presentan una baja resistencia inicial y una durabilidad limitada, lo que restringe su uso en aplicaciones más demandantes.

Este estudio es de gran importancia tanto a nivel internacional como nacional. A nivel global, contribuye al desarrollo de tecnologías de pavimentación más sostenibles y eficientes, ayudando a reducir la huella de carbono de la industria de la construcción de infraestructuras. La optimización de MAF mediante el uso de PSA y CKD no solo mejora sus propiedades mecánicas y durabilidad, sino que también fomentará el uso de materiales reciclados, alineándose con los objetivos de economía circular y gestión sostenible de residuos.

Este estudio puede tener un impacto en la mejora de la calidad y sostenibilidad de las infraestructuras viales, por tanto, la adopción de MAF optimizadas puede reducir gastos de mantenimiento prolongando la vida útil de las carreteras, beneficiando a la economía y el ambiente. Además, el aprovechamiento de residuos industriales locales como PSA y CKD contribuirá a la reducción de desechos y a la creación de nuevas oportunidades para el uso de materiales reciclados en la construcción.

La optimización de MAF con rellenos cementantes ternarios representa una solución viable y sostenible para afrontar los desafíos de la industria de la pavimentación, promoviendo prácticas más ecológicas y eficientes en la construcción y mantenimiento de infraestructuras viales.

1.2. Justificación de la investigación

1.2.1. Justificación Social

La mezcla asfáltica es fundamental en la construcción de carreteras y calles en Perú, existiendo dos tipos: en frío y en caliente. La mezcla en frío ofrece ventajas como una mayor sostenibilidad y ahorro energético. Sin embargo, también presenta algunas desventajas, especialmente porque se utiliza en vías con bajo volumen de tránsito. Una de las principales limitaciones es que es menos duradera y resistente en comparación con la mezcla caliente (ASFALTOFARVIAS, 2024).

La optimización de MAF con rellenos cementantes ternarios tiene una fuerte justificación social, ya que busca mejorar la calidad de las infraestructuras viales de tránsito ligero, repercutiendo de manera directa en la calidad de vida de la población, por tanto, unas carreteras más duraderas y resistentes facilitan el transporte seguro y eficiente, tanto de personas como de mercancías, lo cual es esencial para el país. Además, al utilizar materiales reciclados como PSA y CKD, la investigación promueve una mayor concienciación y participación de la sociedad en prácticas de sostenibilidad y reciclaje, beneficiando a las comunidades locales.

1.2.2. Justificación Ambiental

La investigación tiene un impacto ambiental importante al fomentar el uso de materiales reciclados en la construcción de pavimentos. La MAF ofrece ventajas como una mayor sostenibilidad y un ahorro energético, aunque también presenta algunas desventajas. Una de las principales es que, en comparación con la mezcla caliente, es menos duradera y resistente (ASFALTOFARVIAS, 2024).

Al incorporar PSA y CKD en las mezclas asfálticas, se reduce la necesidad de extraer nuevos recursos minerales, disminuyendo así el impacto ambiental asociado a la minería y

procesamiento de materiales vírgenes. Además, la producción de MAF consume menos energía y emite menos CO₂ en comparación con las mezclas en caliente, contribuyendo a la mitigación del cambio climático. Este enfoque fomenta una economía circular, reduciendo la cantidad de residuos industriales y su impacto en el medio ambiente.

1.2.3. Justificación Económica

Desde una perspectiva económica, la optimización de MAF ofrece beneficios sustanciales al minimizar costos de producción y mantenimiento de infraestructuras viales. Las MAF requieren menos energía para su producción, conllevando a ahorros en costos de energía. Además, el uso de materiales reciclados, que son menos costosos que los materiales vírgenes, reduce los costos totales de los proyectos de pavimentación. La durabilidad mejorada de estas mezclas también significa menos intervenciones de mantenimiento y reparaciones a largo plazo, lo que genera ahorros adicionales para las administraciones públicas y privadas.

1.2.4. Justificación Tecnológica

La investigación contribuye al avance tecnológico de la ingeniería civil y la construcción de pavimentos, dado que, la optimización de MAF con rellenos cementantes ternarios implica el desarrollo y aplicación de técnicas novedosas y materiales que pueden mejorar elocuentemente las particularidades mecánicas y de durabilidad de los pavimentos. Este enfoque innovador puede servir como referencia para futuros estudios y desarrollos tecnológicos en la construcción, fomentando la adopción de tecnologías.

1.2.5. Justificación Política/Institucional

Desde una perspectiva política e institucional, la investigación apoya los objetivos y políticas gubernamentales relacionadas con la sostenibilidad, la gestión de residuos y la infraestructura. Al promover el uso de materiales reciclados y reducir las emisiones de CO₂, el estudio está alineado con los compromisos internacionales y nacionales de reducción de emisiones y protección ambiental. Además, esta investigación puede influir en la formulación de nuevas normativas y políticas que incentiven el uso de MAF y materiales reciclados en la construcción de infraestructuras, promoviendo prácticas de construcción más sostenibles y responsables.

1.2.6. Justificación Ética

La investigación tiene una justificación ética sólida al abordar problemas críticos como la sostenibilidad ambiental y la gestión responsable de recursos. Promover el uso de materiales reciclados y minimizar la huella de carbono de la construcción de pavimentos contribuye a la protección del ambiente y la conservación de recursos naturales para las futuras generaciones. Además, mejorar la calidad y durabilidad de las infraestructuras viales es un compromiso ético hacia la sociedad, garantizando infraestructuras seguras y eficientes mejorando la calidad de vida de los habitantes y promuevan un desarrollo sostenible y equitativo.

1.3. Hipótesis

1.3.1. Hipótesis general

La adición de rellenos cementantes ternarios PSA y CKD a las MAF mejorará significativamente la compresión y pérdida de compresión en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Provincia Arequipa, año 2025.

1.3.2. Hipótesis específicas

- Las MAF con la incorporación de PSA y CKD mejorará significativamente la resistencia a la compresión en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Provincia Arequipa, año 2025.
- Las MAF con la incorporación de PSA y CKD mejorará significativamente la pérdida de resistencia a la compresión en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Provincia Arequipa, año 2025
- Existe una combinación específica de PSA y CKD que maximiza la compresión y la pérdida de la compresión de las MAF en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Provincia Arequipa, año 2025

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Optimizar MAF utilizando rellenos cementantes ternarios PSA y CKD para mejorar la compresión y pérdida de compresión en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Provincia Arequipa, año 2025.

1.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar la resistencia a la compresión de las MAF con diversos porcentajes de PSA y CKD para mejorar los pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Provincia Arequipa, año 2025.
- Evaluar la pérdida de resistencia a la compresión de las MAF con diversos porcentajes de PSA y CKD para mejorar los pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Provincia Arequipa, año 2025.

- Analizar la combinación óptima de PSA y CKD que maximiza la compresión y la pérdida de la compresión de las MAF en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Provincia Arequipa, año 2025.



1.5. Matriz de consistencia

Tabla 1.

Matriz de consistencia

Problema general:	Objetivo general:	Hipótesis general:	Variables y dimensiones
¿Cómo optimizar las MAF utilizando rellenos cementantes ternarios PSA y CKD para mejorar la compresión y pérdida de compresión en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025?	Optimizar MAF utilizando rellenos cementantes ternarios PSA y CKD para mejorar la compresión y pérdida de compresión en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025.	La adición de rellenos cementantes ternarios PSA y CKD a las MAF mejorará significativamente la compresión y pérdida de compresión en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025.	<p>Variable independiente: MAF</p> <ul style="list-style-type: none"> • PSA (%) • CKD (%)
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	
¿Cuál es la resistencia a la compresión de las MAF con diversos porcentajes de PSA y CKD para mejorar los pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025?	Evaluar la resistencia a la compresión de las MAF con diversos porcentajes de PSA y CKD para mejorar los pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025.	Las MAF con la incorporación de PSA y CKD mejorará significativamente la resistencia a la compresión en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025.	
¿Cuál es la pérdida de resistencia a la compresión de las MAF con diversos porcentajes de PSA y CKD para mejorar los pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025?	Evaluar la pérdida de resistencia a la compresión de las MAF con diversos porcentajes de PSA y CKD para mejorar los pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025.	Las MAF con la incorporación de PSA y CKD mejorará significativamente la pérdida de resistencia a la compresión en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025.	<p>Variable dependiente: Estabilidad del pavimento</p> <ul style="list-style-type: none"> • Compresión • Pérdida de resistencia a la compresión
¿Cuál es la combinación óptima de PSA y CKD que maximiza la compresión y la pérdida de la compresión de las MAF en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025?	Analizar la combinación óptima de PSA y CKD que maximiza la compresión y la pérdida de la compresión de las MAF en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025.	Existe una combinación específica de PSA y CKD que maximiza la compresión y la pérdida de la compresión de las MAF en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas, Arequipa, año 2025.	

1.6. Alcance

La investigación se enfoca al desarrollo y optimización de MAF utilizando rellenos cementantes ternarios, específicamente ceniza de lodo de papel (PSA) y polvo de horno de cemento (CKD). El estudio evaluó las propiedades mecánicas y de durabilidad de estas mezclas, incluyendo la resistencia. Para lograr esto, se realizarán diversas pruebas de laboratorio diseñadas para medir estas propiedades y se analizarán los efectos de diferentes proporciones de PSA y CKD en las mezclas. Además, la investigación tiene como objetivo identificar las proporciones óptimas de PSA y CKD que maximicen la estabilidad y durabilidad de las MAF. Los resultados proporcionan una base sólida para la aplicación práctica de estas mezclas mejoradas en proyectos de pavimentación, con el potencial de ser implementadas en infraestructura vial real. Esto contribuirá a prácticas de construcción más sostenibles y eficientes, alineadas con objetivos de reducción de impacto ambiental y mejora de la durabilidad de los pavimentos.

1.7. Limitaciones

Una de las principales limitaciones es que las pruebas se realizaron en condiciones fiscalizadas de laboratorio. Aunque estas condiciones permiten una evaluación precisa y replicable de las propiedades de las mezclas, pueden no reflejar completamente las condiciones variables y dinámicas que se encuentran en el campo, como las fluctuaciones de temperatura y humedad, el tráfico y otros factores ambientales.

Dado que las pruebas se realizarán a nivel de laboratorio, los resultados pueden no ser directamente extrapolables a gran escala sin estudios adicionales. Las mezclas optimizadas necesitarán ser evaluadas en pruebas de campo a largo plazo para confirmar su rendimiento bajo condiciones reales de uso. Además, la disponibilidad y consistencia de los

materiales utilizados (PSA y CKD) pueden variar, lo que podría afectar la replicabilidad y generalización de los resultados en diferentes regiones o contextos de construcción.

Finalmente, la investigación también puede estar limitada por los recursos disponibles, incluyendo el equipo de laboratorio, el tiempo y el presupuesto, lo que puede restringir la cantidad y el alcance de las pruebas que se pueden realizar. Como por ejemplo no se pudo realizar la prueba de Prueba de Inmersión-Marshall para establecer la estabilidad ante la humedad, debido a los costos y laboratorio en la ciudad para desarrollar dicha prueba. A pesar de estas limitaciones, la investigación proporcionará una base importante para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la mejora de MAF.

Una de las principales limitaciones fue la imposibilidad de evaluar la resistencia a la tracción indirecta y la durabilidad de las MAF. Esto se debió a que el laboratorio de la universidad no cuenta con el equipo necesario para realizar estos ensayos. Además, en la ciudad de Arequipa no existen instalaciones adecuadas para llevar a cabo estos análisis específicos, y el costo de realizarlos en Lima superaba el presupuesto disponible. Esta restricción limitó el alcance de la investigación, impidiendo obtener datos más detallados de las mezclas estudiadas.



CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Estado del arte

Tabla 2.

Estado del arte

N°	Tipo	Autor (es)	Año	Título	Objetivo	Método
1	Internacional	Hernández, J., Hernández, J., Horta, J., Montoya, R., & López, T.	(2023)	“Diseño de mezcla asfáltica fría con rellenos cementantes ternarios para reducir la pérdida de estabilidad por humedad”	Desarrollar una mezcla asfáltica en frío con sustitución del relleno mineral por rellenos cementantes ternarios para mejorar la resistencia y reducir los efectos de la humedad a edad temprana, comparando el desempeño de diferentes activadores alcalinos.	El diseño experimental de la investigación comienza con la selección cuidadosa de los materiales: una MAF estándar, rellenos cementantes ternarios (EGAH y CV) y activadores alcalinos (CP y cal). Se prepararán diferentes formulaciones de mezclas, incluyendo una mezcla de referencia sin rellenos cementantes, mezclas con sustitución parcial y total de rellenos cementantes utilizando CP y cal. Las mezclas serán curadas a una temperatura constante de 25°C durante 3 días. Posteriormente, se evaluarán bajo tres condiciones de curado diferentes. Las pruebas de estabilidad medirán la resistencia de las muestras después del curado y la pérdida de estabilidad a edad temprana. El análisis de resultados implicará comparar la pérdida de estabilidad entre las mezclas de referencia y las que incluyen rellenos cementantes ternarios. Se buscará determinar la efectividad de los activadores alcalinos (CP y cal) en mejorar la resistencia y reducir la humedad en las mezclas. Se registrarán y analizarán los datos obtenidos para identificar la formulación que ofrezca el mejor desempeño en términos de resistencia y menor

2	Internacional	Ahumada Daza, N.	(2021)	“Evaluación de una mezcla asfáltica fría fabricada con altos contenidos de RAP mediante un tramo de prueba a escala real en la Ciudad de Bogotá”	Se evaluó el comportamiento de una MAF, fabricada con altos contenidos de RAP, junto con una mezcla densa en caliente y una mezcla con grano de caucho, mediante la evaluación de un tramo de prueba a escala real, construido en la UAERMV.	<p>pérdida de estabilidad debido a la humedad (Hernández y otros, 2023).</p> <p>Se adoptó un enfoque metodológico organizado en diversas etapas. En primer lugar, se realizó la caracterización de los insumos utilizados en la construcción de los tres tipos de mezcla asfáltica: MAF con altos contenidos de RAP, mezcla densa en caliente y mezcla con grano de caucho. Esta caracterización incluyó análisis detallados de las propiedades físicas y químicas de los materiales utilizados. Posteriormente, se diseñaron las mezclas asfálticas basadas en los resultados obtenidos de la caracterización. Cada mezcla fue formulada para cumplir con los estándares de desempeño requeridos para las condiciones específicas de tráfico y clima de la región. Con las mezclas diseñadas, se procedió a la construcción de un tramo de prueba a escala real dentro de las instalaciones de la UAERMV. El tramo de prueba fue sometido a condiciones controladas de tráfico y clima, equivalentes a las que enfrentarían en un entorno urbano real. Se cuantificó el flujo vehicular que circuló por el segmento durante el periodo de análisis, contabilizando específicamente los ejes equivalentes de 8.2 toneladas que pasaron sobre el tramo. Para la evaluación mecánica del desempeño de las mezclas asfálticas, se midieron los parámetros de macrotextura y microtextura de la superficie del tramo de prueba. Estas mediciones permitieron determinar la resistencia y durabilidad de cada tipo de mezcla bajo las condiciones de uso real. Finalmente, los resultados indicaron que la mezcla asfáltica fría 100% RAP es una alternativa factible para vías con bajos volúmenes de tráfico</p>
---	---------------	---------------------	--------	--	--	---

				en la ciudad de Bogotá. Esta mezcla soportó aproximadamente 500.000 ejes equivalentes de 8.2 toneladas, demostrando ser una solución económica, ambiental y técnicamente viable (Ahumada, 2021).
3	Internacional	Rivera, J., Battista, N., & Ferrero, I.	(2024)	<p>“Mezcla Asfáltica en Frío con Piedra-Polimérica para Vías de Bajo Volumen de Tránsito”.</p> <p>Evaluar la utilización de residuos domiciliarios de base polimérica en la capa de rodamiento de pavimentos flexibles, destinados a vías de tránsito bajo.</p> <p>El método seguido en esta investigación se estructura en varias etapas. En primer lugar, se procedió a la recolección y procesamiento de residuos domiciliarios de base polimérica. Estos residuos fueron mezclados en caliente con suelos para formar piezas de tamaño adecuado, las cuales luego se trituraron para obtener un agregado vial de fracción intermedia y gruesa. Posteriormente, se desarrolló un nuevo agregado vial a partir de los residuos procesados. Este agregado se encuentra en trámite de patentamiento, asegurando su originalidad y potencial de aplicación en la industria de la construcción vial. Con el agregado desarrollado, se diseñó una mezcla de concreto asfáltico en frío. Se prepararon muestras de esta mezcla para someterlas a diversas pruebas de laboratorio. Estas pruebas incluyeron la evaluación de parámetros físicos y mecánicos, tales como la resistencia, durabilidad y comportamiento bajo condiciones de tráfico y clima. Finalmente, se realizó un análisis de resultados comparando los datos obtenidos con los estándares requeridos para aplicaciones viales. Esto permitió identificar los campos de aplicación específicos para el agregado artificial desarrollado, basándose en los parámetros evaluados. Este método proporciona una visión detallada sobre la viabilidad de reutilizar residuos poliméricos domiciliarios en la construcción de pavimentos flexibles, ofreciendo una solución</p>

					económica y ambientalmente viable para vías de bajo volumen de tránsito (Rivera y otros, 2024).
4	Internacional	Espinoza, D., & Guayaquil, M.	(2023)	<p>“Diseño de una mezcla asfáltica en frío utilizando RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado) obtenido del Aeropuerto de Quito, adicionando 2%, 3% y 4% de polvo de llanta de avión”.</p> <p>El objetivo del presente estudio es desarrollar una mezcla asfáltica en frío utilizando RAP, polvo de llanta, arena y emulsión asfáltica. Esta mezcla tiene como finalidad ser aplicada en vías secundarias aledañas al aeropuerto de Quito, contribuyendo así a la reducción de residuos, al abaratamiento de costos y al cumplimiento del ODS 11: ciudades y comunidades sostenibles.</p>	<p>Para alcanzar este objetivo, se implementará un enfoque metodológico estructurado en varias etapas. En primer lugar, se procederá a la recolección y caracterización de los materiales necesarios. Esto incluirá el uso del RAP acumulado por la corporación Quiport, el cual suma 7000 m³ anuales, así como las 4.5 a 5 toneladas anuales de polvo de llanta generado por el fresado de la pista de aterrizaje. Además, se seleccionarán arena y emulsión asfáltica para complementar la mezcla. A continuación, se diseñará la mezcla asfáltica en frío. Se formularán diferentes proporciones de RAP, polvo de llanta, arena y emulsión asfáltica para determinar la combinación óptima. Las mezclas resultantes se prepararán y se someterán a una serie de pruebas de laboratorio para evaluar sus propiedades. En las pruebas de laboratorio, se realizarán evaluaciones de resistencia y durabilidad de las mezclas. Estas pruebas incluirán mediciones de resistencia a la compresión, tracción y flexión, así como evaluaciones de durabilidad en condiciones de tráfico y clima simulados. Además, se analizarán las propiedades de macrotextura y microtextura para asegurar que la mezcla cumpla con los requisitos de seguridad vial. Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio para identificar la mezcla asfáltica más adecuada. Esta mezcla se propondrá para su implementación en vías secundarias aledañas al aeropuerto de Quito. La reutilización de materiales reciclados no solo contribuirá a la reducción de residuos y a la protección del medio ambiente, sino</p>

				que también permitirá la reducción de costos y el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (Espinoza & Guayaquil, 2023).		
5	Internacional	Shanbara, H. K., Dulaimi, A., Al-Mansoori, T., Al-Busaltan, S., Herez, M., Sadique, M., & Abdel-Wahed, T.	(2021)	“The future of eco-friendly cold mix asphalt”.	El objetivo del presente estudio es revisar los diferentes tipos de mezcla asfáltica en frío (CMA) y los principales desarrollos en la tecnología de mezcla de emulsión bituminosa en frío (CBEM) que pueden utilizarse sin disminuir el rendimiento en servicio. Además, se busca proporcionar una guía práctica para la fabricación de emulsión bituminosa y el procedimiento de diseño de CBEM para la industria de pavimentos viales.	Para alcanzar este objetivo, se realizará una revisión exhaustiva de la literatura y de estudios previos sobre la mezcla asfáltica en frío (CMA) y la tecnología de mezcla de emulsión bituminosa en frío (CBEM). Este enfoque metodológico se estructurará en varias etapas. En primer lugar, se recopilarán y analizarán datos sobre los diferentes tipos de CMA, destacando sus características, ventajas y desventajas. Se prestará especial atención a los aspectos económicos y ecológicos, ya que la fabricación de CMA permite la producción de material para pavimentos flexibles a temperaturas ambiente, sin necesidad de calentar grandes cantidades de agregados y betún, lo que reduce las emisiones de CO2 y ahorra energía. A continuación, se revisarán los principales desarrollos en la tecnología CBEM, enfocándose en cómo estas innovaciones pueden aplicarse sin comprometer el rendimiento en servicio de los pavimentos. Esto incluirá el análisis de diferentes formulaciones y métodos de fabricación que han demostrado ser efectivos en condiciones reales de tráfico y medioambientales. El siguiente paso consistirá en proporcionar una guía práctica para la fabricación de emulsión bituminosa. Esto incluirá instrucciones detalladas sobre el equipo y los materiales necesarios, así como los pasos específicos para la mezcla y la aplicación de CBEM en proyectos de pavimentación. Además, se desarrollará un procedimiento de diseño para CBEM, que incluirá criterios de selección de

				<p>materiales, proporciones de mezcla y métodos de prueba para garantizar la calidad y durabilidad del pavimento resultante. Esta guía práctica estará dirigida a ingenieros y profesionales de la industria de pavimentos viales, proporcionando una referencia completa y accesible para la implementación de CBEM (Shanbara y otros, 2021).</p>
6	International	Phan, T., Kang, S., Vo, H., & Park, D.	(2024)	<p>“Evaluation on performances of cold asphalt mixture containing recycled waste glass and red mud.”</p> <p>Evaluar el desempeño de una mezcla asfáltica en frío mediante la incorporación de vidrio reciclado (por ejemplo, 20% y 30% en peso de la mezcla total) y lodo rojo, como sustitutos de los agregados convencionales.</p> <p>Analizar la influencia del vidrio reciclado en la mezcla asfáltica, evaluando el índice de energía de trabajabilidad, el índice de energía de compactación, la resistencia al agrietamiento, el ahuellamiento y la vulnerabilidad a la humedad. Además, se llevó a cabo una prueba de módulo dinámico para examinar la respuesta de la mezcla bajo carga dinámica y diferentes temperaturas. Posteriormente, se construyó una vía peatonal de 400 metros para evaluar la utilización práctica del vidrio reciclado en condiciones reales y comparar estos resultados con las pruebas de laboratorio. Los resultados mostraron que un mayor contenido de vidrio reciclado redujo la gravedad específica máxima teórica y aumentó la demanda de energía de compactación. La mezcla con un 30% de vidrio reciclado requirió más de un 22% más de energía de compactación en comparación con la mezcla de control. Mientras que la mezcla con un 20% de vidrio reciclado mostró características similares al asfalto convencional en términos de resistencia a la tracción indirecta y resistencia al ahuellamiento, la mezcla con un 30% presentó propiedades notablemente más débiles, con una resistencia a la tracción indirecta un 12% inferior y una resistencia al despojo tres veces menor. Los resultados del</p>

					<p>módulo dinámico indicaron que con un 30% de vidrio reciclado, el comportamiento elástico de la mezcla asfáltica se redujo significativamente. En general, el estudio recomendó que la utilización óptima de vidrio reciclado en mezclas asfálticas en frío que contienen asfalto reciclado y lodo rojo parece estar en el nivel del 20%, basándose en los resultados de laboratorio y pruebas prácticas (Phan y otros, 2024).</p>
7	Internacional	Dulaimi, A., Shanbara, H., & Al-Rifaie, A.	(2020)	<p>“The mechanical evaluation of cold asphalt emulsion mixtures using a new cementitious material comprising ground-granulated blast-furnace slag and a calcium carbide residue”.</p> <p>Desarrollar nuevas mezclas de emulsión asfáltica en frío (CAEM) utilizando un relleno binario mezclado (BBF) compuesto por escoria de alto horno granulada (GGBS) y residuo de carburo de calcio (CCR) como una alternativa al relleno tradicional de piedra caliza (LF) en estas mezclas. Se busca mejorar las propiedades de las CAEMs en términos de resistencia temprana y tiempo de curado, comparándolas con una mezcla que contiene LF y con una mezcla de</p>	<p>Para alcanzar este objetivo, se llevó a cabo un enfoque metodológico estructurado en varias etapas: Preparación de Mezclas: Se formularon mezclas de emulsión asfáltica en frío utilizando el relleno binario mezclado (BBF) compuesto por GGBS y CCR. Estas mezclas se compararon con una mezcla que contiene el relleno tradicional de piedra caliza (LF) y con una mezcla de asfalto caliente (HMA) como control. Pruebas de Laboratorio: Se realizaron pruebas para medir el módulo de rigidez a la tracción indirecta, con el fin de evaluar la resistencia temprana de las mezclas. Se llevó a cabo un análisis SEM para observar los cambios en la microestructura de los componentes de la mezcla durante el periodo de curado. Evaluación de Propiedades Mecánicas: La activación de GGBS por el CCR fue evaluada para determinar su impacto en la resistencia temprana y en la generación de productos cementantes como la ettringita, portlandita y el gel C-S-H. Los resultados del módulo de rigidez a la tracción indirecta (ITSM) mostraron una mejora significativa al utilizar el CCR como activador del GGBS. La resistencia temprana en términos de ITSM mejoró gracias a la activación del GGBS por</p>

				asfalto caliente (HMA) como control.	el CCR. El análisis SEM reveló que la adición de CCR al GGBS provocó cambios considerables en la microestructura de los componentes de la mezcla durante el periodo de curado, confirmando la generación de productos cementantes (Dulaimi y otros, 2020).	
8	International	Wang, N., Chen, F., Ma, T., Luan, Y., & Zhu, J.	(2022)	“Compaction performance of cold recycled asphalt mixture using SmartRock sensor”	Evaluar cuantitativamente las características de las mezclas de asfalto reciclado en frío en diferentes etapas de compactación mediante tres indicadores específicos, y desarrollar un método novedoso para determinar el punto de bloqueo de la mezcla. Este estudio busca mejorar la comprensión del mecanismo de interacción entre los agregados durante la compactación para abordar problemas de ingeniería como la compactación desigual y la sobre compactación	Se desarrollaron tres indicadores específicos para evaluar cuantitativamente las características de las mezclas de asfalto reciclado en frío en diferentes etapas de compactación. Estos indicadores incluyen la capacidad de compactación, la resistencia del esqueleto y la estabilidad de la mezcla. Se utilizaron sensores SmartRock para monitorear continuamente los cambios en el estrés, la rotación y la aceleración de los agregados bajo compactación giratoria. Estos sensores permitieron la recolección de datos dinámicos sobre las respuestas de compactación de la mezcla. Al analizar las respuestas dinámicas obtenidas de los sensores SmartRock, se evaluaron la capacidad de compactación, la resistencia del esqueleto y la estabilidad de la mezcla. Este análisis permitió una comprensión más profunda de los cambios microestructurales en la mezcla de asfalto durante la compactación. Se desarrolló un método novedoso para determinar el punto de bloqueo de la mezcla de asfalto. Este punto es crucial para identificar el momento óptimo en que la mezcla alcanza su máxima densidad y estabilidad sin riesgo de sobrecompactación. Los resultados mostraron que mediante el uso combinado de los sensores SmartRock y los nuevos indicadores de evaluación, se puede capturar y monitorear con precisión el estado de compactación de las mezclas

				de asfalto. Al observar más de cerca los cambios microestructurales de la mezcla, se logró una comprensión detallada de su comportamiento durante la compactación (Dulaimi y otros, 2020).	
9	Internacional	Dulaimi, A., Al-Busaltan, S., Kadhim, M., Al-Khafaji, R., Sadique, M., Al Nageim, H., & Mahdi, J.	(2022)	<p>“A sustainable cold mix asphalt mixture comprising paper sludge ash and cement kiln dust”.</p> <p>Estudiar la utilización potencial de materiales de desecho y subproductos como relleno en mezclas de emulsión fría, buscando que las propiedades mecánicas de estas mezclas sean comparables a las del asfalto caliente tradicional. Específicamente, se pretende mejorar la rigidez y evolución de la resistencia de las mezclas frías utilizando ceniza de lodo de papel (PSA) y polvo de horno de cemento (CKD) como sustitutos del relleno mineral convencional.</p>	<p>Se adoptó un enfoque metodológico estructurado. Primero, se prepararon mezclas de emulsión fría utilizando ceniza de lodo de papel (PSA) y polvo de horno de cemento (CKD) como sustitutos del relleno mineral convencional. Las proporciones de PSA y CKD variaron entre 0-6% y 0-4%, respectivamente, buscando identificar las combinaciones óptimas que ofrecieran mejoras significativas en las propiedades mecánicas de las mezclas. Posteriormente, se realizaron pruebas de laboratorio para evaluar la rigidez y la evolución de la resistencia de las mezclas preparadas. Estas pruebas incluyeron mediciones del módulo de rigidez y resistencia a la compresión, comparando los resultados con las mezclas de asfalto caliente tradicionales. Además, se analizó la reactividad cementante de la PSA y su capacidad para formar enlaces dentro de las mezclas, así como el efecto del CKD como aditivo para activar el proceso de hidratación de la PSA. Los resultados de las pruebas mostraron una mejora significativa en la rigidez y evolución de la resistencia de las mezclas que incorporaron PSA y CKD. La PSA contribuyó a la formación de enlaces cementantes dentro de las mezclas, mientras que el CKD aceleró el proceso de hidratación, permitiendo un desarrollo más rápido de la resistencia. Estos hallazgos indican que es posible reducir el tiempo necesario para alcanzar las condiciones de curado completo en las mezclas de emulsión fría (Dulaimi y otros, 2022).</p>

10 International	Kong, L., Lu, Z., He, Z., Shen, Z., Xu, H., Yang, K., & Yu, L.	(2022)	“Characterization of crack resistance mechanism of fiber modified emulsified asphalt cold recycling mixture based on acoustic emission parameters”.	Evaluar la resistencia temprana y a la fisuración de las mezclas recicladas en frío con asfalto emulsionado. Para ello, se estudió el mecanismo de mejora y fractura de la fibra en estas mezclas a diferentes escalas. Se evaluaron los efectos de diferentes tipos y dosis de fibra en las propiedades mecánicas macroscópicas de las mezclas, incluyendo la resistencia temprana y de moldeo, la prueba de relación de división seco-húmedo y el índice de energía de fractura de especímenes de flexión semicircular.	Para llevar a cabo este estudio, se siguió un enfoque metodológico que abarcó múltiples escalas de análisis. Primero, se prepararon mezclas recicladas en frío con asfalto emulsionado, incorporando diferentes tipos y dosis de fibra. Se realizaron pruebas de laboratorio para evaluar las propiedades mecánicas de estas mezclas, como la resistencia temprana y de moldeo, la relación de división seco-húmedo y el índice de energía de fractura en especímenes de flexión semicircular. Se seleccionaron los tipos y dosis óptimos de fibra para las mezclas recicladas en frío con asfalto emulsionado. Posteriormente, se estudió la relación entre la evolución de las fisuras y la actividad de los parámetros de emisión acústica en las mezclas con fibra, lo que reflejó el mecanismo de fallo microscópico del material. La microestructura y la morfología de las fibras en la mezcla se observaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Los resultados mostraron que ambas fibras mejoraron la resistencia y la resistencia a la fisuración de las mezclas recicladas en frío con asfalto emulsionado. La fibra de basalto, en particular, mostró un mejor efecto de adsorción y anclaje en el asfalto debido a su alto módulo y textura superficial rugosa. La dosis óptima de fibra fue del 0,3 % de la masa de la mezcla. Las características de fractura de las mezclas con fibra se reflejaron en los parámetros de emisión acústica. A la dosis óptima de fibra, los parámetros de emisión acústica mostraron que el tiempo desde la formación de microfisuras hasta las macrofisuras en la mezcla con fibra-emulsión fue un 122,22 % más largo que en el grupo de
------------------	--	--------	---	---	---

					control. La fibra de basalto desempeñó un papel crucial en reforzar la resistencia a la fisuración y el anclaje en la mezcla de asfalto emulsionado, retrasando la expansión de las microfisuras (Kong y otros, 2022).
11	Nacional	Conde, E., & Ñañez, D.	2025	“Efecto de la aplicación de nanopartículas de óxido de silicio como filler en las propiedades físicas y mecánicas de MAF Huancayo 2024”. Evaluar el impacto de la aplicación de nanopartículas de óxido de silicio como filler en las propiedades físicas y mecánicas de las MAF.	El estudio incluyó la realización de ensayos de laboratorio sobre un diseño de mezcla asfáltica fría elaborado bajo la metodología Illinois. Se modificaron los contenidos de filler con nanopartículas de óxido de silicio en proporciones del 1.0%, 2.0%, 3.0% y 4.0%, así como el porcentaje de agua óptimo en el diseño MAF (5.0%, 6.0%, 7.0% y 8.0%). A través de rigurosas pruebas, se analizó el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de estas mezclas en función de las variables mencionadas. El análisis tridimensional de la estabilidad, flujo, porcentaje de vacíos, peso específico e inmersión compresión permitió evaluar las variaciones en las propiedades de la mezcla asfáltica fría, logrando un equilibrio en la dosificación adecuada de filler. La conclusión principal de la investigación señaló que la dosificación óptima de nanopartículas de óxido de silicio se encuentra cerca del 2.2%. Esta concentración mostró los mejores resultados en estabilidad (850 kg) y resistencia a la inmersión compresión (65%), cumpliendo con las normativas nacionales y sugiriendo un notable potencial para mejorar el rendimiento de las MAF (Conde & Ñañez, 2025).
12	Nacional	Fernández, L.	2024	“Influencia del tiempo de colocación en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en Analizar en qué medida influye el tiempo de colocación en las	Se utilizó la metodología Marshall, respaldada por el manual de ensayo de materiales, especificaciones técnicas para la construcción y otras normativas internacionales que contribuyeron



				frio premezclado- Huancayo-2023”	propiedades mecánicas del asfalto en frío premezclado.	al avance del estudio. Los resultados obtenidos indicaron una disminución en la estabilidad al aumentar el tiempo de almacenamiento, cayendo de 1178 kg a 833,3 kg entre el día cero y los 75 días. La deformación también aumentó con el tiempo de almacenamiento, pasando de 3,33 mm en el día cero a 3,63 mm en el día 75. En cuanto a la resistencia a la tracción, esta osciló entre 48.6 kPa en el día cero y 38.1 kPa en los 75 días. Finalmente, la resistencia a la compresión también experimentó una disminución: el primer grupo pasó de 3,03 MPa en el día cero a 2,04 MPa en los 75 días, mientras que el segundo grupo pasó de 2,66 MPa a 1,59 MPa en el mismo período. La resistencia retenida de las mezclas asfálticas, luego de ser almacenadas durante 75 días, fue del 88,05%, alcanzando 78,16 MPa. Por lo tanto, se recomienda utilizar mezclas que puedan ser almacenadas hasta por 60 días para mantener un rendimiento óptimo (Fernández, 2024).
13	Nacional	Paitampoma, C.	2023	“Alteraciones del focalizador dioxido de titanio en las características mecánicas en las mezclas asfálticas tanto en frio como caliente en la Av. Javier Prado Lima”	Analizar y comparar los efectos del fotocatalizador dióxido de titanio en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente y frío.	se utilizó la metodología Marshall, respaldada por el manual de ensayo de materiales, especificaciones técnicas para la construcción y otras normativas internacionales que contribuyeron al avance del estudio. Los resultados obtenidos indicaron una disminución en la estabilidad al aumentar el tiempo de almacenamiento, cayendo de 1178 kg a 833,3 kg entre el día cero y los 75 días. La deformación también aumentó con el tiempo de almacenamiento, pasando de 3,33 mm en el día cero a 3,63 mm en el día 75. En cuanto a la resistencia a la tracción, esta osciló entre 48.6 kPa en el día cero y 38.1 kPa en los 75 días. Finalmente, la resistencia a la compresión también

experimentó una disminución: el primer grupo pasó de 3,03 MPa en el día cero a 2,04 MPa en los 75 días, mientras que el segundo grupo pasó de 2,66 MPa a 1,59 MPa en el mismo período. La resistencia retenida de las mezclas asfálticas, luego de ser almacenadas durante 75 días, fue del 88,05%, alcanzando 78,16 MPa. Por lo tanto, se recomienda utilizar mezclas que puedan ser almacenadas hasta por 60 días para mantener un rendimiento óptimo (Paitampoma, 2023).



2.2. Marco legal

Para llevar a cabo la investigación y garantizar el cumplimiento de los requisitos legales y normativos pertinentes, es crucial tener en cuenta diversas normativas y marcos legales a nivel nacional y local. A continuación, se presentan algunas de las normativas y documentos legales relevantes en el contexto peruano:

- **Ley General del Ambiente (Ley N° 28611)**

Descripción: Establece el marco legal para la protección del ambiente y la gestión sostenible de los recursos naturales en el Perú (Congreso de la República, 2005).

Relevancia: Promueve el uso de tecnologías limpias y prácticas sostenibles, esenciales para la investigación sobre mezclas asfálticas que incorporan materiales reciclados y cementantes ternarios (Congreso de la República, 2005).

- **Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (Ley N° 27314)**

Descripción: Regula la gestión y manejo de los residuos sólidos, promoviendo la minimización, reutilización y reciclaje de los mismos (Congreso de la República, 2000).

Relevancia: Apoya la utilización de residuos como componentes en mezclas asfálticas, alineándose con los objetivos de sostenibilidad de la investigación (Congreso de la República, 2000).

- **Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)**

Descripción: Contiene normas y especificaciones técnicas para la construcción y mantenimiento de infraestructuras en el Perú (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021).

Relevancia: Incluye disposiciones sobre pavimentos y mezclas asfálticas, asegurando la calidad y durabilidad de las infraestructuras viales (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2021).

- **Ley de Promoción de la Inversión en Infraestructura Pública y de Servicios Públicos (Ley N° 29230)**

Descripción: Fomenta la inversión en infraestructura pública y servicios públicos mediante asociaciones público-privadas (Congreso de la República, 2008).

Relevancia: Facilita la implementación de proyectos de investigación y desarrollo en infraestructuras viales, incluyendo la optimización de mezclas asfálticas con nuevos materiales (Congreso de la República, 2008).

- **Reglamento de Protección Ambiental para el Sector Transportes (D.S. N° 019-2009-MTC)**

Descripción: Establece las disposiciones para la protección ambiental en el sector transportes (MTC, 2009).

Relevancia: Regula las actividades relacionadas con la construcción y mantenimiento de infraestructuras viales, incluyendo el uso de materiales y tecnologías que reduzcan el impacto ambiental (MTC, 2009).

- **Normas de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)**

Descripción: Proporciona especificaciones técnicas para la construcción y mantenimiento de carreteras (MTC, 2013).

Relevancia: Incluye directrices sobre el uso de mezclas asfálticas y materiales cementantes, asegurando que los procedimientos de optimización cumplan con los estándares de calidad y seguridad (MTC, 2013).

- **Norma Técnica CE010 Pavimentos Urbanos**

Descripción: El objetivo de esta norma es establecer los requisitos para diseñar, construir, rehabilitar, mantener, rotura y reposición de pavimentos urbanos, considerando tanto la Mecánica de Suelos como la Ingeniería de Pavimentos. Su propósito es garantizar la

durabilidad, el uso eficiente de los recursos y el buen desempeño de aceras, pistas y estacionamientos de pavimentos urbanos durante toda su vida útil (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2010).

Relevancia: Establece los requisitos necesarios para el diseño, construcción, mantenimiento, rehabilitación, rotura y reposición de pavimentos urbanos, con el objetivo de garantizar la durabilidad y el rendimiento óptimo de pistas, aceras y estacionamientos durante toda su vida útil (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2010).

- **Manual de Carreteras: Diseño Geométrico (DG-2018)**

Descripción: Establece los criterios y parámetros para el diseño geométrico de las carreteras, incluyendo alineamientos horizontales y verticales, secciones transversales, visibilidad y otros aspectos relacionados con la seguridad y funcionalidad vial (MTC, 2018).

- **Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (SGGP-2014)**

Descripción: Proporciona lineamientos para el estudio de suelos, geología y geotecnia, así como criterios para el diseño de pavimentos, considerando las condiciones del terreno y el tránsito vehicular (MTC, 2018).

- **Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial (MCV-2014/2016)**

Descripción: Define las actividades y procedimientos para el mantenimiento rutinario y periódico de las vías, con el objetivo de preservar su funcionalidad y prolongar su vida útil (MTC, 2018).

- **Asphalt in pavement preservation and maintenance: Manual para Preservación y mantenimiento del asfalto en pavimentos.**

Descripción: Manual que proporciona una guía práctica en las actividades de mantenimiento y conservación de pavimentos de asfalto, para prolongar su vida útil (Asphalt Institute, 2009).

- **MS-14: Asphalt Cold-Mix Manual: Manual de mezclas asfálticas en Frio del instituto del Asfaltos.**

Descripción: Guía especializada sobre mezclas asfálticas en frío, que incluye diseño de mezcla usando los métodos Marshall o Hveem, recomendaciones para plantas centralizadas y aplicación en sitio, así como especificaciones para mezclas con emulsión asfáltica y asfaltos diluidos (Asphalt Institute, 2009).

Relevancia: Este manual sirve como referencia técnica para el diseño y control de calidad de las mezclas asfálticas en frío, especialmente al diseñar mezclas tipo Marshall modificado con emulsiones CSS-1h (Asphalt Institute, 2009).

2.3. Marco teórico

2.3.1. Pavimento asfáltico

El pavimento asfáltico está compuesto por una estructura que incluye una carpeta asfáltica que se asienta sobre dos capas: la base y la subbase. Este tipo de pavimento se clasifica como flexible. Según el MEF (2015), puede definirse de diversas maneras, abarcando conceptos como mortero asfáltico, tratamiento superficial bicapa, micro pavimentos, macadam asfáltico, mezclas asfálticas en frío y mezclas asfálticas en caliente.

Es un sistema compuesto por diversas capas, cuyas propiedades, espesores y disposición varían según los materiales utilizados. Estas capas se colocan sobre una base llamada "subrasante" con el propósito de recibir directamente las cargas de tránsito y distribuir las de manera homogénea y disipada hacia los niveles inferiores. Además, las capas proporcionan la superficie de rodamiento, permitiendo la circulación de vehículos durante un período determinado, asegurando condiciones óptimas de comodidad y seguridad, adaptándose a las diferentes condiciones ambientales que puedan presentarse (Tapia, 2015).

El pavimento está compuesto por una serie de estratos superpuestos horizontalmente, diseñados y contruidos de manera técnica con materiales adecuados y con espesores óptimos. Esta estructura en capas descansa sobre la subrasante, formada por el suelo que soporta los esfuerzos generados por las cargas repetidas del tránsito a lo largo del tiempo. La subrasante es crucial para la transferencia de estas cargas, ya que fue diseñada para soportar los esfuerzos a los que se ve sometida la estructura del pavimento (Monsalve et al., 2012).

2.3.1.1. Tipos de pavimentos

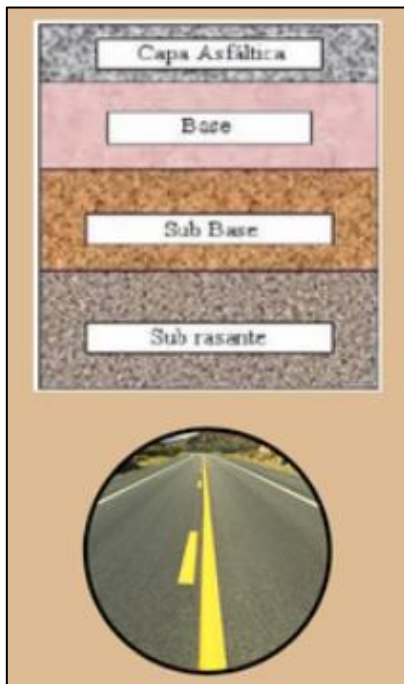
Se clasifican en flexible, rígido, semi-rígido y articulado, según las capas y la estructura que los conforman, por tanto, cada tipo de pavimento presenta características distintivas en cuanto a la distribución de las capas y los materiales utilizados, lo que determina su comportamiento frente a las cargas de tránsito y las condiciones ambientales (Tapia, 2015).

- **Pavimentos flexibles**

Los pavimentos flexibles consisten en un estrato de rodamiento formado por mezcla asfáltica, también conocidos como pavimentos asfálticos, por lo cual, son una opción más económica en las primeras etapas de construcción, pero su desventaja radica en la necesidad de un mantenimiento constante para prolongar su vida útil (Tapia, 2015).

Figura 1

Estructura de un pavimento asfáltico (flexible)



Nota. Manual de Carreteras (SGGP-2014)

Los pavimentos flexibles están formados por capas bituminosas que descansan sobre dos capas no rígidas: la base y la sub-base. No obstante, en algunos casos, es posible prescindir de esta estructura dependiente, adaptándose a las necesidades específicas de cada proyecto de construcción (Monsalve et al., 2012).

Los pavimentos asfálticos están formados por agregados minerales específicos que se unen mediante ligantes bituminosos. El asfalto tiene una amplia variedad de aplicaciones en pavimentos, ya sea en tratamientos superficiales delgados o en capas gruesas de concreto asfáltico (Arias & Sarmiento, 2015).

- **Tipos de pavimentos flexibles**

Son estructuras viales que se componen principalmente de capas de materiales granulares y mezclas asfálticas, diseñadas para distribuir las cargas vehiculares hacia las capas inferiores del suelo. Una de las clasificaciones fundamentales dentro de este tipo de

pavimentos es según el tipo de mezcla asfáltica utilizada: mezclas asfálticas en caliente (MAC) y en frío (MAF) (ASFALTOFARVIAS, 2024).

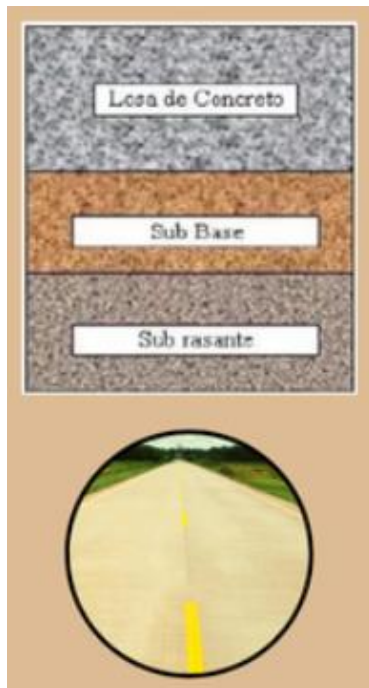
Las MAF son aquellas que se elaboran y aplican a temperatura ambiente, utilizando emulsiones asfálticas o asfaltos fluidificados, lo cual elimina la necesidad de calentar los agregados y el ligante asfáltico. Este tipo de mezcla es especialmente útil para trabajos de mantenimiento, rehabilitación de vías en zonas rurales, y contextos donde no se dispone de infraestructura para producción en caliente (IMMAC, 2020).

Entre las ventajas de las MAF destacan su menor consumo energético, lo que reduce significativamente las emisiones contaminantes, así como la posibilidad de ser aplicadas con equipos sencillos y en condiciones climáticas adversas. Además, permiten el uso de materiales reciclados, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental y a la economía circular en la infraestructura vial (IMMAC, 2020).

Sin embargo, también presentan desventajas frente a las MAC, tales como una menor resistencia inicial al corte y a la deformación, mayor tiempo de curado, y una menor vida útil en comparación con las mezclas en caliente, especialmente bajo cargas pesadas o climas extremos. Por otro lado, las mezclas asfálticas en caliente (MAC) son elaboradas a temperaturas entre 140°C y 160°C, lo que mejora la cohesión de los materiales y proporciona mayor durabilidad y resistencia mecánica, aunque requieren mayor consumo de energía, equipos especializados y generan una mayor huella de carbono (ASFALTOFARVIAS, 2024).

- **Pavimentos rígidos**

La superficie de rodamiento está compuesta por losas de concreto hidráulico, que en algunos casos están reforzadas con acero. Gracias a su rigidez, estas losas son capaces de distribuir la carga de los vehículos hacia las capas inferiores, a través tanto de las losas de la superficie como de las losas adyacentes (Tapia, 2015).

Figura 2*Estructura de un pavimento rígido*

Nota. Manual de Carreteras (SGGP-2014)

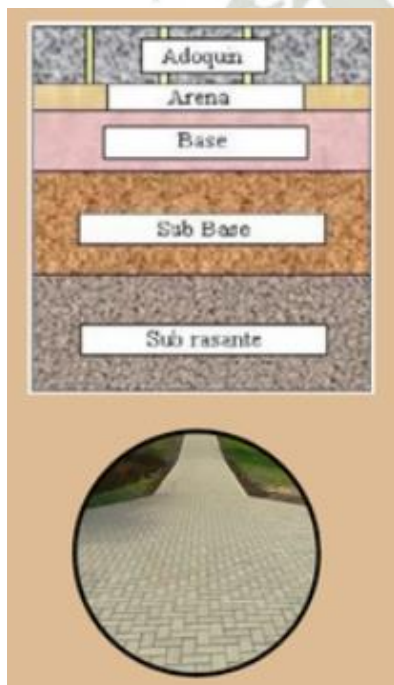
Los pavimentos rígidos están principalmente compuestos por una losa de concreto hidráulico, que descansa sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado conocida como sub-base del pavimento rígido. El concreto hidráulico, gracias a su alta rigidez y su elevado coeficiente de elasticidad, distribuye los esfuerzos de manera extensa sobre una gran área. Esto le permite soportar ciertos niveles de tensión sin comprometer su rendimiento. Debido a estas características, un pavimento rígido muestra un desempeño notablemente bueno, incluso cuando existen áreas débiles en la subrasante, manteniendo su funcionalidad y resistencia. La capacidad estructural de este tipo de pavimento depende de la resistencia de las losas, lo que hace que el apoyo de las capas subyacentes tenga poca influencia en el diseño del espesor del pavimento (Monsalve et al., 2012).

- **Pavimentos semi-rígidos**

Estos tienen una estructura similar a la de los pavimentos flexibles, pero con la diferencia de que una de sus capas se rigidiza artificialmente mediante el uso de aditivos como asfalto, cal, cemento, emulsión o productos químicos, lo que aumenta la capacidad portante del suelo. Dentro de este tipo de pavimento se incluyen los pavimentos compuestos, que combinan características de los pavimentos flexibles y rígidos, siendo común que la capa rígida se coloque en la parte inferior y la capa flexible en la superior (Medina & De La Cruz, 2015).

Figura 3

Estructura de un pavimento semirrígido



Nota. Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (SGGP-2014)

El uso de aditivos tiene como objetivo principal corregir o modificar las propiedades mecánicas de los materiales locales que no son adecuados para la construcción de las capas del pavimento. Esto se hace teniendo en cuenta que los materiales adecuados suelen estar

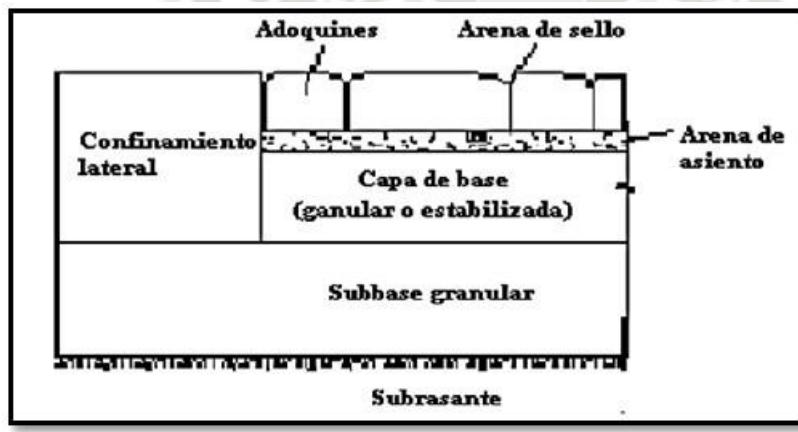
ubicados a distancias considerables, lo que incrementaría significativamente los costos de construcción (Monsalve et al., 2012).

- **Pavimentos articulados**

Los pavimentos articulados consisten en una capa de rodadura formada por bloques de concreto prefabricado, conocidos como adoquines, que tienen un espesor uniforme y son idénticos entre sí (Monsalve et al., 2012).

Figura 4

Estructura de un pavimento articulado



Nota. Monsalve et al., (2012)

Esta capa de rodadura puede colocarse sobre una capa delgada de arena, la cual, a su vez, se apoya sobre una capa de base granular o directamente sobre la subrasante. La elección de la ubicación dependerá de la calidad de la subrasante y de la magnitud y frecuencia de las cargas que el pavimento deberá soportar (Monsalve et al., 2012).

2.3.1.2. Componentes estructurales de un pavimento

Generalmente, los pavimentos se encuentran compuestos por cuatro capas, también conocidas como componentes estructurales. A continuación, describiremos cada una de ellas, ya que el enfoque principal de este tema gira en torno a este tipo de pavimento (Monsalve et al., 2012).

1. **Sub rasante:** Es la capa más profunda de toda la estructura y constituye la base del pavimento. Su espesor se considera prácticamente infinito, con pocas excepciones. Los suelos que forman la subrasante deben ser adecuados y estables, con un índice CBR (California Bearing Ratio) igual o superior al 6%. En casos donde el CBR sea inferior (lo que indica una subrasante pobre o inadecuada), será necesario estabilizar los suelos. Para ello, se deben analizar diversas alternativas de solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo de suelo, la estabilización química o el uso de geosintéticos, seleccionando la opción más adecuada desde el punto de vista técnico y económico (Arias & Sarmiento, 2015).

El CBR, es un indicador manejado para evaluar la capacidad de soporte de explanadas, bases y sub-bases de firmes. En este ensayo se emplean probetas compactadas, y generalmente es realizado bajo circunstancias controladas de humedad y densidad. El procedimiento consiste en hacer penetrar un pistón en la muestra y medir la carga necesaria para alcanzar determinadas profundidades de penetración (LCweb, 2002).

2. **Sub base:** Es una capa de material especificado con un espesor de diseño determinado, que sirve de soporte para la base y la carpeta del pavimento. Además, cumple la función de capa de drenaje y control de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta

capa puede ser prescindible. Esta capa puede estar formada por material granular (con un $\text{CBR} \geq 40\%$) o ser tratada con asfalto, cal o cemento (Arias & Sarmiento, 2015).

- 3. Base granular:** Es la capa que se ubica directamente debajo de la capa de rodadura y cumple la función principal de soportar, distribuir y transmitir las cargas generadas por el tránsito. Está compuesta por material granular con un $\text{CBR} \geq 80\%$ o puede ser tratada con asfalto, cal o cemento. Además, esta capa debe poseer una calidad superior y una granulometría más controlada que la de la subbase, garantizando así una adecuada capacidad estructural y durabilidad del pavimento (Arias & Sarmiento, 2015).
- 4. Carpeta asfáltica:** Es la capa superior del pavimento flexible y se coloca sobre la base granular con el propósito de recibir directamente las cargas del tránsito. Su función principal es proporcionar una superficie de rodadura uniforme, resistente y segura para la circulación vehicular, además de proteger las capas inferiores de los efectos del agua y las variaciones de temperatura.

Figura 5

Esquema del componente estructural de un pavimento flexible.



Nota. Granados (2018)

Esa capa, conocida como la carpeta de rodadura, es la de mejor calidad, ya que debe proporcionar características esenciales como fricción adecuada, suavidad en la circulación, control de ruido y un buen drenaje para evitar la acumulación de agua en la superficie. Estas propiedades son cruciales para garantizar la seguridad y el confort del tránsito, así como para prolongar la vida útil del pavimento (Arias & Sarmiento, 2015).

2.3.1.3. Ciclo de vida de los pavimentos

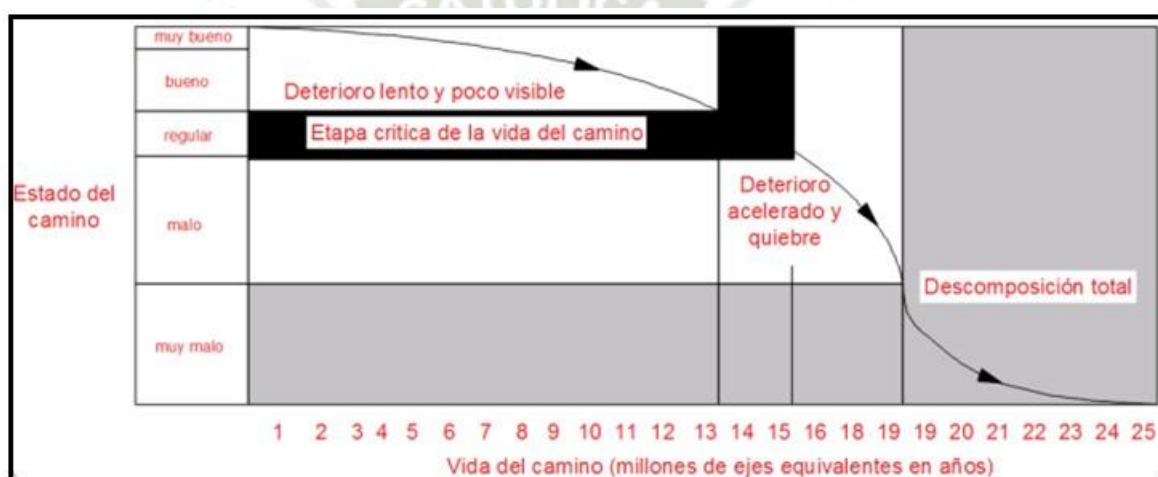
Medina y De la Cruz (2015) indican que, el ciclo de vida del pavimento, sin considerar mantenimiento y rehabilitación, se puede representar mediante una curva de comportamiento, la cual refleja históricamente la calidad del pavimento a lo largo del tiempo. Esta curva muestra cómo varía el estado del pavimento desde su construcción hasta el momento en que alcanza un deterioro significativo, ayudando a prever su desempeño y necesidad de intervenciones futuras. (pag. 14)

- **Construcción:** El estado del pavimento es excelente y cumple con los estándares de calidad requeridos para garantizar la satisfacción de los usuarios. El costo incurrido hasta esta etapa corresponde a la construcción del paquete estructural, que abarca las capas fundamentales del pavimento necesarias para asegurar su resistencia y durabilidad (Medina & De La Cruz, 2015).
- **Deterioro imperceptible:** El pavimento ha experimentado un desgaste progresivo a lo largo del tiempo. Aunque el deterioro ya está presente en esta etapa, es poco visible y no es perceptible para los usuarios. Generalmente, el mayor daño se concentra en la superficie de rodadura debido al tránsito constante y las condiciones climáticas. Para mitigar este deterioro y prevenir un mayor desgaste, es crucial aplicar medidas de mantenimiento y conservación. Si estas acciones no se realizan, la vida útil del pavimento se verá reducida de manera significativa (Medina & De La Cruz, 2015).
- **Deterioro acelerado:** Después de varios años, los componentes del pavimento se encuentran cada vez más deteriorados, lo que reduce su resistencia al tránsito. La estructura básica del pavimento está dañada, lo cual se puede observar a través de las fallas visibles en la superficie de rodadura. Esta etapa es breve, ya que el proceso de destrucción se acelera considerablemente. El estado del pavimento varía desde regular hasta muy pobre, lo que indica que la capacidad de carga y seguridad del camino se ve gravemente comprometida (Medina & De La Cruz, 2015).
- **Deterioro total:** Esta etapa puede extenderse por varios años y representa el desgaste total del pavimento. La transitabilidad se ve gravemente afectada, y los vehículos comienzan a sufrir daños en sus neumáticos, ejes, entre otros componentes. Como resultado, los costos de operación de los vehículos aumentan, y la vía se vuelve intransitable, impidiendo el paso de los vehículos de manera segura (Medina & De La Cruz, 2015).

El propósito de los pavimentos es ofrecer un servicio al tránsito de manera segura, confortable y eficiente. Por esta razón, es fundamental realizar labores de conservación adecuadas y oportunas. El concepto de conservación de pavimentos implica asegurar que su servicio se mantenga durante el tiempo requerido, lo que conlleva un esfuerzo constante por parte de los responsables y un importante desembolso de recursos por parte de la agencia encargada (Martínez, 2015).

Figura 6

Esquema de deterioro de un pavimento a través del tiempo

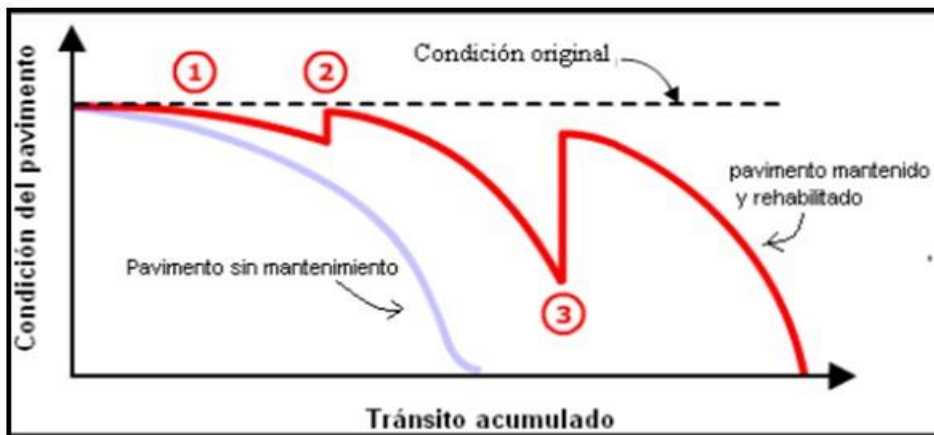


Nota. Martínez (2015)

Se presenta un gráfico que ilustra la forma general en que se deterioran los pavimentos. En el gráfico se puede observar que, durante los primeros años, el deterioro es gradual y lento. Sin embargo, llega un punto de inflexión en el que el deterioro se acelera considerablemente, lo que lleva rápidamente al final de la vida útil del pavimento (Martínez, 2015).

Figura 7

Ciclo de vida de los pavimentos con mantenimiento y rehabilitación



Nota. Medina & De La Cruz Puma (2015)

En la figura anterior, se observa que la línea gris simboliza el comportamiento del pavimento cuando no se realiza ninguna intervención, mientras que la línea roja muestra cómo se comporta cuando se aplican medidas de mantenimiento y rehabilitación. En la línea roja se pueden identificar tres puntos clave: en el primero, el pavimento comienza a deteriorarse rápidamente debido al constante mantenimiento; en el segundo, se observa una restauración del pavimento como resultado de los trabajos de rehabilitación; y finalmente, en el tercer punto, se aplica un plan de restauración y rehabilitación para devolver al pavimento su condición inicial (Medina & De La Cruz, 2015).

2.3.2. Mezcla asfáltica en frío

Es un tipo de material de pavimentación que se prepara y se aplica a temperaturas ambiente, en lugar de ser calentado a altas temperaturas como en el caso de las mezclas asfálticas calientes. Este tipo de mezcla utiliza emulsiones bituminosas (o asfalto emulsionado) que combinan el asfalto con agua y otros aditivos para mantener el asfalto en una forma líquida a temperatura ambiente (Dulaimi y otros, 2022).

Son materiales de pavimentación preparados y aplicados a temperatura ambiente, utilizando emulsiones bituminosas en lugar de asfalto caliente. La emulsión bituminosa es una mezcla de asfalto, agua y agentes emulsificantes que mantienen el asfalto en estado líquido a temperatura ambiente. Los principales componentes de las mezclas asfálticas en frío son (Espinoza & Guayaquil, 2023):

- Emulsión Bituminosa: Actúa como el aglutinante, proporcionando cohesión entre los agregados.
- Agregados: Materiales como grava, arena y piedra triturada que forman la estructura principal de la mezcla.
- Aditivos: Incluyen fibras, rellenos cementantes y otros materiales que mejoran las propiedades de la mezcla.

2.3.2.1. Ventajas y desventajas

Entre las ventajas se encuentran:

- Reducción de Energía: No requiere el calentamiento de agregados y asfalto, lo que disminuye el consumo de energía y las emisiones de CO₂.
- Seguridad: La preparación y aplicación a temperatura ambiente reducen los riesgos asociados con el manejo de materiales a altas temperaturas.
- Flexibilidad: Pueden ser almacenadas y transportadas fácilmente, lo que las hace convenientes para aplicaciones en lugares remotos o con acceso limitado a plantas de asfalto.
- Costo: Generalmente, las mezclas en frío son más económicas en términos de producción y aplicación debido a la reducción en el consumo de energía y la posibilidad de usar materiales reciclados.

Entre las desventajas se encuentran:

- Resistencia Temprana: Tienen una menor resistencia inicial comparada con las mezclas asfálticas en caliente, requiriendo más tiempo para alcanzar su máxima resistencia.
- Durabilidad: Pueden tener una durabilidad menor, especialmente bajo condiciones de tráfico pesado y climas extremos. Sin embargo, la adición de ciertos aditivos puede mejorar esta característica.

2.3.2.2. Características

- Temperatura de Aplicación: Las mezclas asfálticas en frío se pueden preparar y aplicar a temperatura ambiente, eliminando la necesidad de calentar los agregados y el asfalto.
- Componentes: Emulsión Bituminosa: Es el componente principal que actúa como aglutinante. La emulsión se compone de asfalto, agua y agentes emulsificantes.
- Agregados: Pueden ser materiales como grava, arena y piedra triturada, que proporcionan la estructura de la mezcla.
- Aditivos: Se pueden agregar fibras, rellenos cementantes (como ceniza de lodo de papel y polvo de horno de cemento) y otros aditivos para mejorar las propiedades de la mezcla.
- Proceso de Mezclado: Los agregados se mezclan con la emulsión bituminosa a temperatura ambiente, lo cual facilita el manejo y reduce el consumo de energía.
- Uso y Aplicación: Es ideal para reparaciones de baches, capas de rodadura en vías secundarias y caminos rurales, y otras aplicaciones donde la mezcla caliente no es práctica.

- Puede ser almacenada y transportada fácilmente, lo que la hace conveniente para aplicaciones en lugares remotos o con acceso limitado a plantas de asfalto.

2.3.3. *Agregados ternarios*

En el ámbito de la ingeniería de pavimentos, el concepto de agregado ternario hace referencia a una combinación de tres materiales minerales o cementantes que se integran como relleno activo en una mezcla asfáltica o cementicia. Estos materiales pueden ser de origen natural o industrial (como residuos o subproductos), y se incorporan para mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de la mezcla (Hernández y otros, 2023).

En el caso particular de MAF, los agregados ternarios suelen incluir combinaciones de ceniza de lodo de papel (PSA), polvo de horno de cemento (CKD) y, en algunos casos, cemento Portland, funcionando como modificadores estructurales y agentes de estabilización (Dulaimi y otros, 2022).

La importancia del agregado ternario está en su capacidad para optimizar las prestaciones técnicas de mezclas que, por naturaleza, presentan ciertas limitaciones frente a condiciones ambientales agresivas, como las mezclas asfálticas en frío. Estas últimas, aunque más sostenibles, presentan menor resistencia inicial y mayor susceptibilidad a la humedad. En ese contexto, el agregado ternario actúa como una solución técnica que no solo mejora la cohesión y la resistencia mecánica del material, sino que también aporta reactividad química para promover una mejor adherencia de agregados y el ligante asfáltico (Espinoza & Guayaquil, 2023).

Entre los principales beneficios del uso de agregados ternarios se encuentra su aporte a la sostenibilidad ambiental, ya que permiten la valorización de residuos industriales como el PSA o el CKD, reduciendo así la necesidad de materias primas vírgenes. Además, contribuyen a reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂, ya que son compatibles

con tecnologías de producción a temperatura ambiente, propias de las MAF (Ahumada, 2021). Desde el punto de vista económico, estos materiales suelen ser de menor costo que los aditivos tradicionales, lo que los convierte en una opción viable para proyectos de pavimentación con recursos limitados (González & Fernández, 2018).

Asimismo, el sistema ternario tiene un impacto en la durabilidad y vida útil del pavimento, especialmente en contextos de exposición a humedad y cambios térmicos frecuentes. El CKD, por ejemplo, contiene óxidos de calcio que al reaccionar con la humedad pueden generar productos cementantes, mientras que la PSA aporta sílice amorfa que puede reaccionar en procesos puzolánicos, mejorando la matriz interna de la mezcla (Torres & Castillo, 2020). Esta interacción química da lugar a una estructura más densa y estable, resistente a la desintegración por efecto del agua, lo cual es crítico en regiones con climas variables o alta precipitación (Wang y otros, 2022).

La incorporación de agregados ternarios en MAF representa una estrategia innovadora y eficiente para enfrentar los desafíos técnicos y ambientales en la ingeniería vial. Su aplicación no solo responde a criterios de calidad estructural, sino que también se alinea con los objetivos de economía circular y sostenibilidad ambiental (Dulaimi y otros, 2020). El uso de agregados ternarios puede marcar una diferencia en la calidad, costo y desempeño de las soluciones de pavimentación urbana y rural (González & Fernández, 2018).

2.3.4. Agregados pétreos

Los agregados pétreos constituyen el componente principal, representando casi la totalidad del volumen de la mezcla. Se trata de materiales sólidos, inertes y granulares, que pueden provenir de fuentes naturales o procesos de trituración, y cuya granulometría debe ser cuidadosamente seleccionada para garantizar la compactación y estabilidad. La

interacción de los agregados con el ligante asfáltico, comúnmente en forma de emulsión, depende de la forma de las partículas, su textura superficial y su capacidad de absorción. Estas propiedades influyen directamente en la cohesión interna de la mezcla, su resistencia frente a la humedad y su comportamiento ante las cargas del tránsito. Por ello, la calidad y el tipo de agregado utilizado son determinantes en el desempeño estructural del pavimento construido con esta tecnología (Ducat y otros, 2022).

1. Clasificación de los agregados pétreos

De acuerdo con Ramos y Muñiz (2013), en las MAF, la ruptura de la emulsión está directamente relacionada con la reacción química que ocurre entre esta y la superficie del agregado pétreo. Por esta razón, es fundamental identificar correctamente el tipo de agregado que se emplea, ya que esto permitirá seleccionar la emulsión más adecuada y garantizar una mezcla eficiente y estable.

Resulta necesario contar con un sistema de clasificación de agregados que permita agruparlos según propiedades físicas y comportamiento similar. Esta organización facilita al especialista prever su desempeño dentro de una mezcla y optimizar el diseño final del material asfáltico (Guevara et al., 2010).

De acuerdo a su origen geológico:

- **Agregados Ígneos y Metamórficos:** Se originan a partir de procesos de enfriamiento del magma (ígneos) o por transformación de rocas preexistentes debido a altas presiones y temperaturas (metamórficos). Suelen presentar una estructura densa, gran dureza, alta resistencia al desgaste y buena durabilidad, lo que los convierte en materiales idóneos para pavimentos sometidos a cargas pesadas o tránsito intenso. Entre ellos se encuentran el granito, el basalto y el esquisto (Vélez & Ruiz, 2022).

- Agregados Calizos: Proviene de rocas sedimentarias compuestas principalmente por carbonato de calcio. Estos materiales, como la caliza y la dolomita, presentan una textura menos abrasiva y mayor porosidad. Aunque su resistencia mecánica puede ser menor en comparación con los ígneos, su buena adherencia con ligantes asfálticos los hace útiles en aplicaciones donde se prioriza la trabajabilidad (Vélez & Ruiz, 2022).
- Agregados Silicios: Derivados de rocas ricas en sílice, como la arenisca y el cuarzo. Se caracterizan por su alta resistencia química y baja reactividad con ligantes cementantes o asfálticos. Son especialmente útiles en zonas expuestas a ambientes agresivos, ya que mantienen su integridad frente a agentes climáticos y contaminantes (Vélez & Ruiz, 2022).

2.3.5. Propiedades de los agregados pétreos

Constituyen el componente de mayor volumen en las MAF, y sus propiedades físicas y mecánicas influyen directamente en la estabilidad, trabajabilidad y durabilidad de la mezcla. Características como la angularidad, la textura superficial, la absorción, la resistencia al desgaste y la gradación granulométrica condicionan la capacidad de entrelazamiento entre partículas, así como la adhesión con el ligante asfáltico modificado o emulsión. En el diseño de mezclas frías, la selección de agregados con buena forma y superficie rugosa es crucial para garantizar un comportamiento mecánico adecuado, especialmente en condiciones de tráfico medio y humedad, donde la cohesión interna y la resistencia a la desintegración adquieren relevancia técnica (López y otros, 2021).

1. Ensayo de Granulometría de Agregados (MTC E-202)

Objetivo:

Determinar la distribución porcentual del tamaño de las partículas de un agregado (fino o grueso), clasificándolas según el tamaño de mallas normalizadas.

Equipos y materiales:

- Balanza con sensibilidad mínima de 0.1 g.
- Juego de tamices con abertura normalizada (por ejemplo: 3", 2", 1 ½", ¾", ½", 3/8", No. 4, No. 10, No. 40, No. 200).
- Agitador mecánico o manual.
- Horno para secado (a 110 ± 5 °C).
- Cepillo suave y bandejas.

Procedimiento:

- Secado de muestra: Secar la muestra representativa de agregado hasta masa constante en horno a 110 ± 5 °C.
- Pesado inicial: Pesar la muestra seca y anotar el peso total (W).
- Tamizado: Colocar la muestra sobre el conjunto de tamices ordenados de mayor a menor abertura, y agitar mecánicamente durante al menos 10 minutos (o manualmente si no hay equipo disponible).
- Pesado por tamiz: Pesar el material retenido en cada tamiz y anotar el peso por fracción.
- Cálculo: Calcular el porcentaje retenido y acumulado en cada tamiz, así como el porcentaje que pasa.

Resultados esperados:

- Curva granulométrica (gráfico semilogarítmico con tamaño de malla en el eje X y % que pasa en Y).

- Clasificación del agregado como bien graduado, mal graduado, etc., según especificaciones.

Norma técnica aplicable:

- MTC E-202: "Determinación de la distribución granulométrica de los agregados".
- Equivalente internacional: ASTM C136.

2. Ensayo de Desgaste de Los Ángeles**Objetivo:**

Determinar la resistencia al desgaste y abrasión de los agregados gruesos, mediante la simulación de condiciones de fricción y choque, para evaluar su durabilidad frente a cargas repetitivas.

Norma técnica aplicada:

- MTC E-211: Método de ensayo para desgaste de agregados con la máquina de Los Ángeles (basado en ASTM C131/C131M para agregados menores a 37.5 mm).

Equipos y materiales:

- Máquina de Los Ángeles (tambor cilíndrico giratorio con tapa).
- Esferas de acero (pesos y cantidades según tamaño del agregado).
- Balanza con precisión de 0.1 g.
- Tamices: No. 12 (1.70 mm) y otros según el tamaño del agregado.
- Horno (110 ± 5 °C).
- Cepillos y bandejas.

Procedimiento:

- **Preparación de la muestra:**
 - Seleccionar el tamaño nominal del agregado (por ejemplo, 19–12.5 mm).

- Tomar una muestra representativa de peso estándar (e.g., 5,000 g para este tamaño).
- Secar la muestra a 110 ± 5 °C hasta masa constante.
- **Carga en la máquina:**
 - Colocar los agregados secos en el tambor.
 - Añadir el número correcto de esferas de acero (normalmente 12 para agregados de tamaño estándar).
- **Rotación del tambor:**
 - Girar el tambor 500 revoluciones a una velocidad de 30–33 rpm.
- **Tamizado y pesaje:**
 - Una vez completado el ciclo, se descargan los agregados.
 - Tamizar con tamiz No. 12 para separar el material desgastado.
 - Pesar el material que pasa por el tamiz.

Cálculo:

$$\text{Porcentaje de desgaste (P)} = \left(\frac{\text{Peso perdido}}{\text{Peso inicial}} \right) \times 100 \quad (\text{E 1})$$

Resultados esperados:

- El valor de desgaste de Los Ángeles debe ser $\leq 40\%$ para agregados usados en capas de rodadura, según el Manual de Carreteras - EG-2013.

3. Ensayo de Solidez con Sulfato de Magnesio**Objetivo:**

Determinar la resistencia del agregado grueso a la desintegración cuando es sometido a ciclos de inmersión en sulfato de magnesio y secado, simulando el efecto del clima y el tránsito.

Procedimiento resumido:

- Secar la muestra de agregado.
- Sumergir el agregado en una solución saturada de sulfato de magnesio por 16 a 18 horas.
- Secar en horno a 110 ± 5 °C por 4 horas (esto forma un ciclo).
- Repetir este proceso por 5 ciclos.
- Pesarse el material perdido por fragmentación y calcular el % de pérdida de masa respecto al peso original.

Norma técnica:

- MTC E-214 (equivalente a ASTM C88)

4. Ensayo de Angularidad de Agregado Fino**Objetivo:**

Evaluar la forma y textura del agregado fino (arenas), midiendo el grado de angulosidad, que afecta la adherencia con el ligante asfáltico.

Procedimiento resumido:

- Llenar un recipiente estándar con el agregado por vertido libre desde una altura determinada.
- Determinar el volumen aparente del material.
- Calcular el índice de angularidad:

$$IA = \left(\frac{V_{rocasuelta} - V_{arenaestandar}}{V_{arenaestandar}} \right) \times 100 \quad (E 2)$$

Un mayor valor indica mayor angularidad → mejor adherencia.

Norma técnica:

- MTC E-216 (equivalente a ASTM C1252)

5. Determinación de Partículas Chatas y Alargadas

Objetivo:

Identificar la proporción de partículas con formas no deseables (muy alargadas o chatas), que pueden afectar la compactación y durabilidad del pavimento.

Procedimiento resumido:

- Se pesan partículas seleccionadas (al menos 100).
- Se mide la relación entre el largo mayor y el espesor menor de cada partícula.
- Se considera “chata y alargada” si la relación $L/e \geq 3:1$ (o según criterio).
- Se calcula el % de partículas no deseadas.

Norma técnica:

- MTC E-223 (equivalente a ASTM D4791)

6. Resistencia a la Tracción Indirecta (ITS)

Objetivo:

Determinar la resistencia a la tracción diametral de una muestra cilíndrica de mezcla asfáltica, como indicativo de cohesión interna.

Procedimiento resumido:

- Preparar cilindros de mezcla compactados (diámetro ≈ 10 cm, altura ≈ 6.3 cm).
- Curar según protocolo (en seco o húmedo).
- Aplicar carga diametral a una velocidad de 50 mm/min hasta que la muestra falle.
- Calcular ITS (en MPa) usando la carga máxima obtenida.

$$ITS = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot t} \quad (\text{E 3})$$

$P =$ carga máxima (N), $D =$ diámetro (mm), $t =$ espesor (mm) (E 4)

Norma técnica:

- MTC E-754 (equivalente a ASTM D6931)

7. Resistencia a la Compresión

Objetivo:

Evaluar la resistencia de la mezcla asfáltica a cargas verticales, reflejando su capacidad para soportar tráfico.

Procedimiento resumido:

- Preparar probetas cilíndricas (normalmente del mismo tamaño que ITS).
- Curar por al menos 7 días.
- Colocar en prensa de compresión.
- Aplicar carga axial continua (1 mm/min) hasta el fallo.
- Calcular la resistencia como:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{E 5})$$

$P =$ carga máxima (N), $A =$ área transversal (mm^2)

Tabla 3.

Resumen de ensayos materiales pétreos

Ensayo		Requerimiento								
		Bajo Transito			Transito medio			Alto Transito		
		Agregado Grueso	Agregado Fino	Gradación Combinada	Agregado Grueso	Agregado Fino	Gradación Combinada	Agregado Grueso	Agregado Fino	Gradación Combinada
Granulometría		Según tabla 424-02			Según tabla 424-02			Según tabla 424-02		
Desgaste de Los Ángeles	MTC E 207	25% máx. (rodadura)	35% máx. (intermedio)		25% máx. (rodadura)	35% máx. (intermedio y base)		45% min. (rodadura)	40% min (intermedio)	35% (base)
Desgaste Micro-Deval	ASTM D 7428				25% máx. (rodadura)	35% máx. (intermedio y base)		25% máx. (rodadura)	35% máx. (intermedio y base)	
10% de finos (kN)	Seco							110 min (rodadura)	90 min (intermedia)	75 min (base)
	Relación Húmedo/Seco									75% min

Nota. Manual de Carreteras (EG-2013)

Tabla 4.

Resumen de ensayos materiales pétreos

Ensayo		Requerimiento								
		Bajo Transito			Transito medio			Alto Transito		
		Agregado Grueso	Agregado Fino	Gradacion Combinada	Agregado Grueso	Agregado Fino	Gradacion Combinada	Agregado Grueso	Agregado Fino	Gradacion Combinada
Pérdidas en ensayos de solidez	Sulfato de sodio	MTC E 209	12% máx.	12% máx.		12% máx.	12% máx.		12% máx.	12% máx.
	Sulfato de magnesio		18% máx.	18% máx.		18% máx.	18% máx.		18% máx.	18% máx.
Partículas fracturadas mecánicamente (agregado grueso) % mínimo 1 cara/2 caras		MTC E 210	75/- (rodadura)			75/60 (rodadura)			85/70 (rodadura)	
			60/- (intermedia)			75/- (intermedia)			75/- (intermedia)	
Angularidad (Agregado fino)	ASTM D 1252		40% mín. (rodadura)			45% mín. (rodadura)			45% mín. (rodadura)	
			35% mín. (intermedia)			40% máx. (intermedio)			40% mín (intermedio)	
Coficiente de pulimento acelerado	UNE 146130		0.45 min (rodadura)			0.45 min (rodadura)			0.45 min (rodadura)	
Partículas planas y alargadas	MTC E 221		10% máx.			10% máx.			10% máx.	
I.P	MTC E 111				N. P			N. P		N. P
Equivalente de arena	MTC E 114			50% min.				50% min.		50% min.
Contenido de impurezas (Agregado grueso)	UNE 14613		0.5% máx.			0.5% máx.			0.5% máx.	
Adhesividad Resistencia conservada inm-comp					75% min					75% min

Nota. Manual de Carreteras (EG-2013)

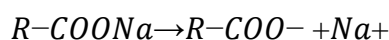
2.3.6. Emulsión Asfáltica

Son mezclas, que permiten que el asfalto, un material típicamente hidrofóbico, pueda dispersarse en agua en forma de pequeñas partículas. Estas emulsiones se utilizan ampliamente en pavimentación y mantenimiento vial debido a que pueden aplicarse en frío, lo cual reduce el consumo de energía y facilita su manipulación. Una vez aplicada, el agua se evapora o se separa, permitiendo que el asfalto recupere su estado original y se adhiera a los agregados o a la superficie tratada. Las emulsiones pueden clasificarse según la velocidad con la que se rompe la mezcla (rápida, media o lenta) y el tipo de carga iónica del agente emulsificante (catiónica o aniónica), siendo las catiónicas las más utilizadas en pavimentos debido a su mejor adherencia con los agregados minerales (Instituto del Asfalto, 2019).

1. Clasificación de las Emulsiones Asfálticas

Emulsiones Aniónicas:

Las partículas de asfalto adquieren una carga eléctrica negativa. Esto se logra mediante el uso de agentes emulsionantes de tipo aniónico, generalmente derivados de ácidos grasos y sales de sodio o potasio. Estas emulsiones fueron de uso tradicional en décadas pasadas, sin embargo, su adhesividad con ciertos tipos de agregados (especialmente silíceos) es limitada, ya que dichos agregados también tienden a tener carga negativa, lo que genera una repulsión electrostática (Instituto del Asfalto, 2019).



Emulsiones Catiónicas:

En estas emulsiones, las partículas de asfalto presentan una carga eléctrica positiva, lo que permite una mejor interacción con la mayoría de los agregados, que suelen tener carga superficial negativa. Esta característica promueve una mejor adhesividad y cohesión, especialmente en condiciones húmedas. Por ello, son ampliamente utilizadas en mezclas en

frío, tratamientos superficiales, riegos de liga, lechadas asfálticas y micro aglomerados (Instituto del Asfalto, 2019).

Las emulsiones catiónicas se designan según el sistema de nomenclatura ASTM o AASHTO, como, por ejemplo: CRS-1, CRS-2, CMS-2h, CSS-1h (Instituto del Asfalto, 2019).

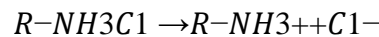
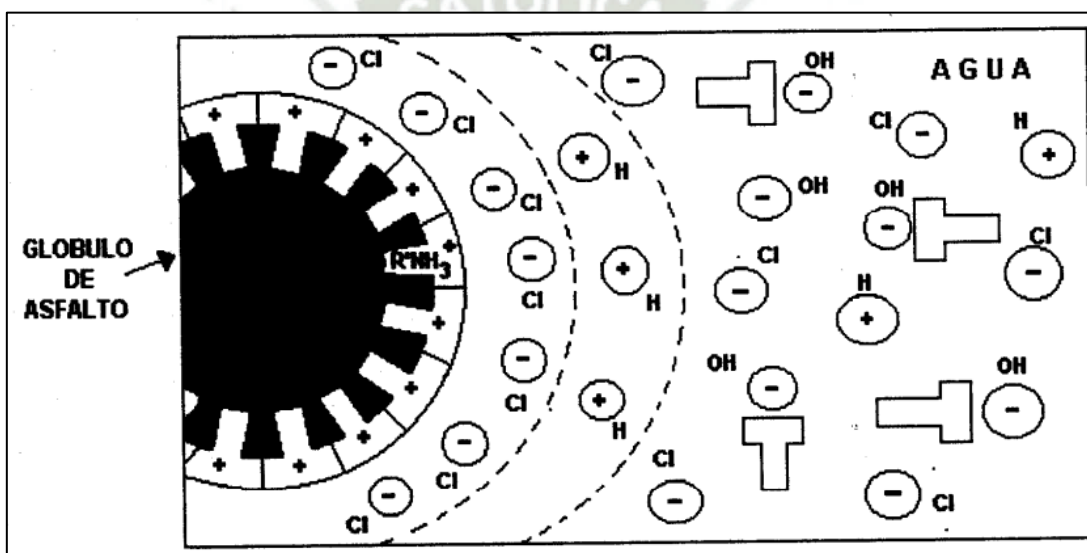


Figura 8

Esquema de la estructura de una emulsión Catiónica



Nota. Medina & De La Cruz Puma, 2015

2. Rompimiento de las emulsiones asfálticas

El rompimiento se refiere al proceso mediante el cual el asfalto se separa del agua con la que ha sido mezclado, permitiendo que el ligante bituminoso se adhiera a los agregados. Este fenómeno es fundamental para asegurar una correcta cohesión entre los materiales y garantizar el desempeño de la mezcla en el tiempo. El mecanismo de rompimiento depende de diversos factores como la carga superficial de los agregados, el tipo de emulsificante, la temperatura ambiente, la cantidad de agua libre, y el tipo de emulsión utilizada (Instituto del Asfalto, 2019).

Se clasifican según la velocidad con la que ocurre su rompimiento en el campo. Esta velocidad es clave para seleccionar la emulsión adecuada para una aplicación específica, especialmente en pavimentos (Instituto del Asfalto, 2019). Las principales clasificaciones son:

Emulsiones de Rotura Lenta (SS):

Las emulsiones de rotura lenta (siglas en inglés: SS – Slow Setting) están formuladas para permanecer estables durante un tiempo prolongado, permitiendo una mejor mezcla con agregados finos, minerales o polvo. No rompen por evaporación rápida del agua ni por contacto inmediato con los agregados, sino principalmente por evaporación del agua libre. Se utilizan comúnmente en tratamientos como sellos de niebla, estabilización de suelos, reciclado en frío, y lechadas asfálticas (Instituto del Asfalto, 2019).

Estas emulsiones permiten un adecuado recubrimiento de agregados con granulometría fina, debido a su estabilidad. La rotura ocurre de manera progresiva, lo que favorece un curado más uniforme. Normalmente se emplean en mezclas de mantenimiento donde el tiempo de trabajo prolongado es una ventaja (Instituto del Asfalto, 2019).

Emulsiones de Rotura Media (MS):

Las emulsiones de rotura media (MS – Medium Setting) están diseñadas para romper cuando se mezclan con agregados de tamaño mediano o grueso, especialmente si contienen cierto contenido de polvo. No rompen al estar en contacto con los agregados, permitiendo cierto tiempo de trabajo, pero lo hacen más rápido que las SS. Estas emulsiones se usan principalmente en mezclas en frío, tratamientos superficiales, y bases recicladas (Instituto del Asfalto, 2019).

Su formulación permite un equilibrio entre estabilidad durante la mezcla y una rotura relativamente rápida, lo que facilita su uso en obras donde se requiere mayor rendimiento y tiempos de habilitación más cortos (Instituto del Asfalto, 2019).

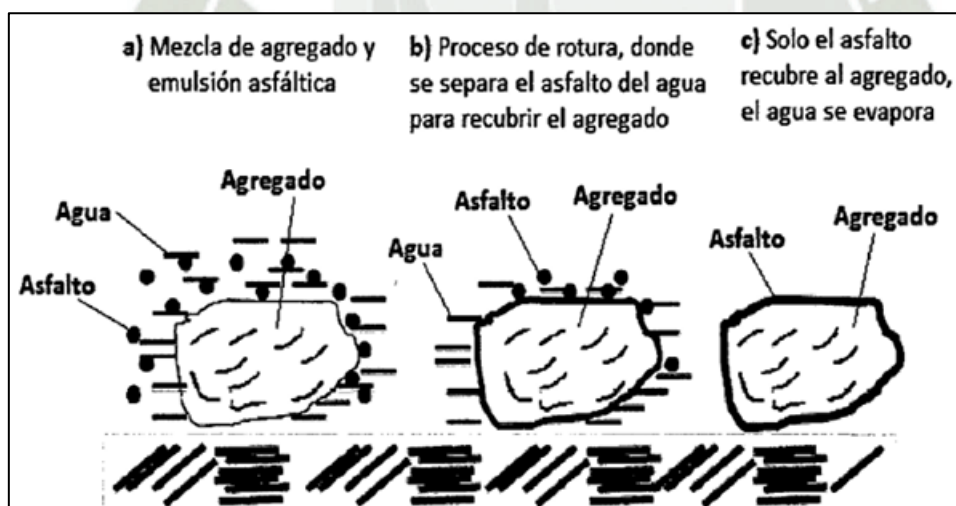
Emulsiones de Rotura Rápida (RS):

Las emulsiones de rotura rápida (RS – Rapid Setting) están diseñadas para romper casi de inmediato al entrar en contacto con los agregados, especialmente si estos son limpios y secos. Se emplean comúnmente en aplicaciones superficiales como riegos de liga, riegos de imprimación y tratamientos superficiales donde se necesita una rápida adhesión del asfalto (Instituto del Asfalto, 2019).

Este tipo de emulsión contiene tensioactivos formulados para que el agua se evapore rápidamente o para que el asfalto se adsorba en los agregados de manera instantánea. Por ello, es importante que los agregados usados con emulsiones RS no contengan humedad ni arcillas, ya que eso puede interferir con la adhesión del ligante (Instituto del Asfalto, 2019).

Figura 9

Rotura de una emulsión asfáltica sobre un material pétreo



Nota. Medina y De La Cruz (2015)



CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

3.1. Tipo de investigación

Esta investigación se clasifica como técnica explicativa debido a su enfoque en identificar y analizar las causas y efectos de un problema específico, con el fin de ofrecer una solución adecuada, este tipo de investigaciones buscan no solo describir fenómenos, sino también explicar las razones subyacentes que los originan, en este sentido, su propósito es profundizar en la comprensión de las relaciones entre variables y procesos, explicando cómo y por qué ocurre el problema estudiado (Arroyo, 2020).

La investigación descriptiva es un enfoque metodológico que tiene por objetivo la descripción de características, comportamientos o fenómenos específicos tal y como se presentan en la realidad. Este tipo de investigación se enfoca en detallar y registrar las propiedades o atributos de un determinado sujeto, grupo, comunidad, proceso o evento, sin modificar o influir en ellos. A través de la observación sistemática y el análisis de los datos recogidos, la investigación descriptiva busca comprender y explicar las condiciones o situaciones actuales, identificando patrones, tendencias, y relaciones entre variables, pero sin determinar causalidad (Arias, 2019).

Esta investigación sigue un diseño experimental de bloques con un enfoque cuasi experimental de corte longitudinal. Se caracteriza por presentar una situación controlada en la que la variable independiente fue manipulada de manera intencional, con el objetivo de analizar los resultados en relación con la variable dependiente. La información será recolectada en diferentes momentos a lo largo del tiempo para evaluar la evolución y los efectos de las variables en estudio (Pereyra, 2022).

Consistiendo principalmente en diseñar u optimizar una MAF utilizando rellenos cementantes ternarios para mejorar la estabilidad ante la humedad, utilizando el marco normativo del manual del Instituto del Asfalto para MAF, tal como se indica en la norma

EG 2013 MTC. Para evaluar el desempeño mecánico de mezclas asfálticas en frío modificadas con rellenos cementantes ternarios, se llevó a cabo un procedimiento experimental siguiendo de forma rigurosa las indicaciones del Apéndice F del Manual MS-14 del Instituto del Asfalto (2013). Este modo establece una metodología para determinar la estabilidad y flujo de MAF por medio del ensayo Marshall modificado, adaptado específicamente para este tipo de mezclas.

La metodología se inició con la preparación y caracterización de los materiales. Se emplearon agregados pétreos con granulometría MDF-2, seleccionados conforme a la normativa EG-2013. Los agregados fueron secados en estufa a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante. Se realizó la dosificación de los materiales considerando una relación óptima de ligante asfáltico emulsionado y el contenido de relleno cementante, el cual incluyó una combinación de filler mineral y cal hidratada en proporciones previamente definidas.

Para la elaboración de las probetas Marshall, se utilizó un molde cilíndrico estándar de 10,16 cm de diámetro y 6,35 cm de altura, y un peso específico por diseño de 514 cm³ de volumen por muestra, tal como establece la tabla F-1 del Apéndice F. Cada muestra fue compactada con 50 golpes por cara utilizando un martillo Marshall, siguiendo la recomendación para mezclas en frío. La compactación se realizó inmediatamente después de la mezcla de componentes para garantizar una adecuada distribución del ligante.

Las muestras compactadas fueron curadas a temperatura ambiente durante 72 horas para simular el proceso de endurecimiento natural de las mezclas en frío. Luego de este periodo, las probetas fueron sumergidas en agua a 25 °C durante 30 minutos, conforme a las condiciones del ensayo de estabilidad.

La estabilidad y el flujo de las probetas fueron evaluados mediante la máquina Marshall, registrando la carga máxima soportada por cada muestra (en kilogramos) y el

correspondiente desplazamiento (en milímetros). Estos valores se utilizaron para comparar el desempeño entre mezclas convencionales y mezclas modificadas con rellenos cementantes ternarios, tal como lo establece la tabla F-2 del Apéndice F, que permite verificar si los resultados se encuentran en el rango de correlación aceptable.

Cabe destacar que se realizaron réplicas por cada dosificación, a fin de aseverar la confiabilidad estadística de los hallazgos. Los datos obtenidos fueron procesados para determinar los parámetros medios de estabilidad, flujo, densidad y contenido. Asimismo, se evaluó el comportamiento bajo condiciones de humedad, simulando ambientes agresivos para analizar la durabilidad de las mezclas.

El ensayo descrito permitió validar la aplicabilidad del método establecido por el Instituto del Asfalto para mezclas en frío y brindó resultados clave para la propuesta de diseño optimizado, considerando no solo la resistencia mecánica sino también la adaptabilidad frente a las condiciones climáticas de uso.

Tabla 5.

Cuadro de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Instrumento de Medición
Variable independiente: MAF	Cantidad de PSA, CKD y cemento Portland utilizados como sustitutos del relleno mineral en la mezcla asfáltica.	Porcentaje en peso de PSA, CKD y cemento Portland en la mezcla asfáltica.	Proporción de PSA (%), Proporción de CKD (%) Porción de cemento Portland	Balanza de precisión, Protocolo de mezcla
Variable dependiente: Estabilidad del pavimento	Capacidad de la mezcla para resistir fuerzas de compresión.	Fuerza máxima soportada por la muestra antes de la fractura.	Compresión Pérdida de resistencia a la compresión	Prensa de ensayo de compresión

Nota. Elaboración propia

3.2. Métodos de investigación

La siguiente tabla presenta los procedimientos realizados en el estudio:

Tabla 6.

Método de investigación

Objetivo	Procedimiento
Determinar la resistencia a la compresión de las MAF con diversos porcentajes de PSA y CKD.	Preparar especímenes de mezcla asfáltica fría con diferentes porcentajes de PSA y CKD. Realizar pruebas de resistencia a la compresión en laboratorio. Analizar los resultados para identificar las combinaciones óptimas.
Identificar la combinación óptima de PSA y CKD que maximiza la compresión de las MAF con diversos porcentajes de PSA y CKD.	Comparar los resultados de las pruebas de resistencia a la tracción indirecta, compresión y durabilidad. Realizar análisis estadísticos (ANOVA) para determinar la significancia de las diferencias entre las mezclas. Seleccionar la combinación óptima basada en el rendimiento mecánico y la estabilidad.

Nota. Elaboración propia

3.3. Área de estudio

3.3.1. Delimitación espacial

Estudio desarrollado en Arequipa, realizando la experimentación y pruebas en el laboratorio de la UCSM.

3.3.2. Delimitación temporal

El estudio fue desarrollado iniciando en mayo del 2024 hasta agosto 2025.

3.3.3. Delimitación temática

La investigación está enfocada en la evaluación de MAF utilizando rellenos cementantes ternarios PSA y CKD para mejorar la compresión y pérdida de compresión en pavimentos viales de tránsito ligero frente a condiciones húmedas.

3.4. Recolección de la información

Se detalla el procedimiento de acuerdo a la siguiente descripción:

Paso 1. Preparación de MAF

- Determinación del % de emulsión bituminosa de acuerdo al Manual de diseño de MAF sin adición de ningún pétreo ternario.
- Mezclar agregados con emulsión bituminosa y diferentes proporciones de PSA y CKD.
- Proporciones específicas de PSA: 0%, 3%, 6%.
- Proporciones específicas de CKD: 0%, 2%, 4%.
- Realizar la mezcla a temperatura ambiente y preparar especímenes cilíndricos y prismáticos para pruebas.

3.5. Población y muestra del estudio

La población del estudio se encuentra caracterizada por la cantidad de experimentos a ser realizados, siendo la muestra por lo tanto censal, estableciéndose un total de 18 muestras caracterizadas por 3 muestras para la prueba control y 3 repeticiones para cada uno de los experimentos, a continuación se muestra diseño de experimento:

Tabla 7.*Diseño del experimento*

Grupo	Proporción de PSA	Proporción de CKD	Número de Muestras
Control	0%	0%	3
Experimental 1	3%	2%	3
Experimental 2	6%	4%	3
Experimental 3	6%	2%	3

Nota. Elaboración propia

Paso 2. Se utilizó una prensa de ensayo de compresión.

- Aplicación de la carga axial a los especímenes hasta la fractura.
- Registró de la fuerza máxima soportada y calcular la resistencia a la compresión.

Paso 3. Análisis de resultados y selección de combinaciones óptimas.

- Comparación de los resultados obtenidos de las pruebas.
- Realización del análisis estadístico (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre las mezclas.
- Determinación de la proporción de PSA y CKD que ofrece el mejor rendimiento de resistencia y durabilidad.

3.6. Normas de ensayo aplicadas

De acuerdo con el Manual de Carreteras (EG-2013), las siguientes normas de ensayo han sido aplicadas específicamente en el análisis de materiales para MAF:

- 1. Granulometría de agregados** – Ensayo realizado tanto para grava como para arena, siguiendo el procedimiento normado por el MTC para establecer la distribución por tamaño de partículas en los agregados utilizados.

2. **Ensayo de desgaste de Los Ángeles** – Para la evaluación de la resistencia al desgaste de los agregados gruesos. Este ensayo cumple con la norma del MTC para verificar la durabilidad del material frente al tráfico vehicular.
3. **Ensayo de solidez con sulfato de magnesio** – Evaluación de la pérdida de masa del agregado por acción de ciclos de humedad y secado, regulado por la norma MTC E-214.
4. **Ensayo de angularidad de agregado fino** – Realizado según la norma MTC E-216, permite determinar la forma angular de las partículas de agregado fino, factor clave en la adhesión con el ligante asfáltico.
5. **Determinación de partículas chatas y alargadas** – Conforme a la norma MTC E-223, para controlar la calidad geométrica de los agregados gruesos y su impacto en la compactación y estabilidad del pavimento.
6. **Resistencia a la compresión** – Se utilizó una prensa de compresión para determinar la resistencia máxima de la mezcla a cargas verticales, según los procedimientos establecidos en el EG-2013.

Estas pruebas fueron ejecutadas en conformidad con lo dispuesto por el Manual de Carreteras – EG-2013, asegurando que el diseño y la validación de las MAF con rellenos cementantes ternarios cumplan con los estándares técnicos nacionales.

3.6.1. Procedimiento de ensayo de las pruebas realizadas

Se presenta el procedimiento utilizado para cada prueba desarrollada:

1. Resistencia a la Compresión

Procedimiento:

- Se preparan probetas cilíndricas de mezcla asfáltica compactadas (altura/diámetro ≈ 1.5).

- Las muestras se curan durante un periodo definido (generalmente 7 días en condiciones controladas).
- Luego se colocan en una prensa de compresión universal.
- Se aplica una carga axial a una velocidad constante (normalmente 1 mm/min).
- Se registra la carga máxima antes del fallo y se calcula la resistencia a la compresión y el área transversal de la muestra.

En cuanto a la procedencia de los agregados, estos fueron adquiridos en Sodimac. Se revisaron las fichas técnicas de los agregados gruesos (Anexo 2) y de los agregados finos (Anexo 3) para su verificación y análisis.

En relación al bitumen utilizado fue adquirido en Asfaltos Kacscol, que está vinculado con la venta de bitumen (ver anexo 4) y su certificado se encuentra especificado en el anexo 5, así como la ficha técnica del mismo en el anexo 6.

Por último, se especifica que la ceniza de lodo de papel (PSA) utilizada fue adquirida mediante donación de una papelería industrial localizada en Lima y el polvo de horno de cemento (CKD) fue adquirido de igual manera mediante donación en Cementos Yura.



CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Resultados descriptivos

4.1.1. Diseño de mezcla método Marshall

1. Introducción

El ensayo es uno de los métodos más utilizados para determinar la resistencia de un pavimento asfáltico. Se llevó a cabo el diseño de un pavimento asfáltico, luego se realizó el ensayo de Marshall para determinar su resistencia. Este ensayo consiste en compactar una muestra de MAF en un molde cilíndrico para obtener un espécimen de tamaño estándar. Posteriormente, se somete este espécimen a una carga vertical que simula las cargas que soporta un pavimento en condiciones reales.

El ensayo de Marshall es un método fundamental para el diseño y control de calidad de pavimentos asfálticos. Finalmente, con ayuda de este ensayo se puede conocer la resistencia de la mezcla asfáltica diseñada y evaluar su capacidad para soportar cargas.

2. Objetivos

- ✓ Realizar los ensayos correspondientes para los materiales pétreos
- ✓ Diseñar una MAF por medio del ensayo Marshall para determinar la cantidad óptima de asfalto para que garantice un mejor rendimiento del pavimento.

Tabla 8.*Resumen de ensayos materiales pétreos*

	Ensayo	Requerimiento			Cantidad	
		Bajo Transito			Agregado Fino	Gradación Combinada
		Agregado Grueso	Agregado Fino	Gradación Combinada		
Granulometría		Según tabla 424-02			10	
Desgaste de Los Ángeles	MTC E 207	25% max. (rodadura) 35% max. (intermedio)			3	
Pérdidas en ensayos de solidez	Sulfato de sodio Sulfato de magnesio MTC E 209	18% máx.	18% máx.		3	3
Partículas fracturadas mecánicamente (agregado grueso) % mínimo 1 cara/2 caras	MTC E 210	75/- (rodadura) 60/- (intermedia)			3	
Angularidad (Agregado fino)	ASTM D 1252		40% min. (rodadura) 35% min. (intermedia)			3
Coefficiente de pulimento acelerado	UNE 146130	0.45 min (rodadura)			3	
Partículas planas y alargadas	MTC E 221	10% máx.			3	
I.P	MTC E 111			N. P		3
Equivalente de arena	MTC E 114			50% min.		3
Contenido de impurezas (Agregado grueso)	UNE 14613	0.5% máx.			3	
Adhesividad Resistencia conservada inm-comp				75% min		3

Nota. Elaboración propia

3. Ensayos materiales pétreos

A. Desgaste de los Ángeles (MTC E 207)

El resultado del ensayo se obtiene mediante la diferencia entre el peso original y el peso final del ensayo, expresado como un porcentaje del peso original. Este resultado, denominado porcentaje de desgaste, es conocido como el coeficiente de desgaste de Los Ángeles.

El propósito busca establecer el proceso para ensayar agregados gruesos de tamaños menores a 37,5 mm (1 ½") con el fin de determinar su resistencia a la degradación utilizando la máquina de Los Ángeles.

Tabla 9.

Carga de gradación

Gradación	Número de Esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Nota. La carga, dependiendo de la gradación de la muestra de ensayo como se describe

Tabla 10.

Gradación de las muestras de ensayo

Medida del tamiz (apertura cuadrada)		Gradación			
Que pasa	Retenido sobre	A	B	C	D
37,5 mm (1 ½")	25,0 mm (1")	1 250 ± 25	-	-	-
25,0 mm (1")	19,0 mm (¾")	1 250 ± 25	-	-	-
19,0 mm (¾")	12,5 mm (½")	1 250 ± 10	2 500 ± 10	2 500 ± 10	-
12,5 mm (½")	9,5 mm (3/8")	1 250 ± 10	2 500 ± 10	2 500 ± 10	-
9,5 mm (3/8")	6,3 mm (¼")	1 250 ± 10	2 500 ± 10	2 500 ± 10	-
6,3 mm (¼")	4,75 mm (N° 4)	-	2 500 ± 10	2 500 ± 10	-
4,75 mm (N° 4)	2,36 mm (N° 8)	-	5 000	5 000	5 000

Nota. Elaboración propia

Para agregados con un tamaño máximo nominal de 19 mm (¾"), los porcentajes de pérdida deben estar entre el 10% y el 45%. Los resultados de tres ensayos bien ejecutados deben estar dentro de este rango para ser considerados válidos, en el laboratorio de UCSM,

sobre muestras del mismo agregado grueso se obtuvo un resultado del 18.5% promediando los 3 valores.

Tabla 11.

Resistencia a la degradación utilizando la máquina de Los Ángeles.

Descripción	Muestra N° 1	Muestra N° 2	Muestra N° 3
Peso muestra antes del ensayo (g)	5000	5000	5000
Peso material retenido en el tamiz N° 12 (g)	4039.5	4139.5	4046.5
Peso material que pasa el tamiz N° 12(g)	960.5	860.5	953.5
Porcentaje de desgaste (%)	19.21	17.21	19.07

Nota. Elaboración propia

Figura 10.

Se procedió a cargar el agregado grueso en la máquina Los Ángeles



Nota. Elaboración propia

Figura 11.

Se procedió a cargar el agregado grueso en la máquina Los Ángeles



Nota. Elaboración propia

B. Pérdida de Solidez (Sulfato de magnesio) (MTC E 209)

El resultado del ensayo se obtiene después de sumergir la muestra de agregado en una solución durante 16 horas, seguida de su secado hasta alcanzar el número de ciclos requeridos. Es importante tener en cuenta que el volumen de la solución en la que se sumergen las muestras debe ser al menos cinco veces el volumen de la muestra sumergida en cada operación. El objetivo de este ensayo es establecer un método para determinar la resistencia de los agregados a la desintegración utilizando soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

Tabla 12.

Gradación de las muestras de ensayo

Nominal	Abertura serie fina	Abertura serie gruesa nominal
	Tamiz normalizado	Tamiz normalizado
Nº 100	150 µm	8,00 mm (5/16") 9,50 mm (3/8")
Nº 50	300 µm	12,5 mm (1/2") 16,0 mm (5/8")
Nº 30	600 µm	19,0 mm (3/4") 25,0 mm (1")
Nº 16	1,18 mm	31,5 mm (1 1/4") 37,5 mm (2")
Nº 8	2,36 mm	50,0 mm (2 1/2")
Nº 5	4,00 mm	63,0 mm (1")
Nº 4	4,75 mm	Tamaños mayores aumentan en 12,5 mm (1/2")

Nota. Elaboración propia

Tabla 13.

Análisis cuantitativo para la fracción gruesa de la primera muestra

Nro	Tamiz Mm	Gradación %		Masa de las fracciones		% Pérdida	% Pérdida ponderada
		Original	Corregida	Antes del ensayo	Después del ensayo		
3/4"	19	28.60	36.34	1000.00	950.00	5.00	1.82
1/2"	12.5						
3/8"	9.5	71.40	72.40	299.00	274.50	8.19	2.00
4	4.76						
Pérdida por Solidez Fracción Gruesa (%)							6.60

Nota. Elaboración propia

Tabla 14.

Análisis cuantitativo para la fracción fina de la primera muestra

Tamiz		Gradación %		Masa de las fracciones		% Perdida	%Perdida ponderada
Nro	Mm	Original	Corregida	Antes del ensayo	Después del ensayo		
3/8"	9.5	12.99	29.68	100.00	90.00	10.00	3.00
4	4.76	11.33	25.88	100.00	96.00	4.00	1.00
8	2.36	8.58	19.61	100.00	97.00	3.00	0.70
16	1.18	4.87	11.11	100.00	98.00	2.00	0.20
30	600	6.00	13.71	100.00	98.00	2.00	0.30
Perdida por Solidez Fracción Fina (%)							4.20

Nota. Elaboración propia

Figura 12.

Pesaje de agregado grueso luego de la absorción primera muestra



Nota. Elaboración propia

Tabla 15.

Análisis cuantitativo para la fracción gruesa de la segunda muestra

Tamiz		Gradación %		Masa de las fracciones		% Perdida	%Perdida ponderada
Nro	Mm	Original	Corregida	Antes del ensayo	Después del ensayo		
3/4"	19.05	20.12	35.34	1010.00	1050.00	3.67	8.40
1/2"	12.7						
3/8"	9.5	70.40	71.40	304.00	265.00	14.24	1.80
4	4.76						
Perdida por Solidez Fracción Gruesa (%)							8.96

Nota. Elaboración propia

Tabla 16.

Análisis cuantitativo para la fracción fina de la segunda muestra

Tamiz		Gradación %		Masa de las fracciones		% Perdida	%Perdida ponderada
Nro	Mm	Original	Corregida	Antes del ensayo	Después del ensayo		
3/8"	9.5	12.99	29.68	100.00	97.00	3.00	3.00
4	4.76	11.33	25.88	100.00	96.00	4.00	1.00
8	2.36	8.58	19.61	100.00	93.00	7.00	0.70
16	1.18	4.87	11.11	100.00	92.00	8.00	0.20
30	600	6.00	13.71	100.00	91.00	9.00	0.30
Perdida por Solidez Fracción Fina (%)							6.20

Nota. Elaboración propia

Figura 13.

Pesaje de agregado grueso luego de la absorción segunda muestra



Nota. Elaboración propia

Tabla 17.

Análisis cuantitativo para la fracción gruesa de la tercera muestra

Tamiz		Gradación %		Masa de las fracciones		% Perdida	%Perdida ponderada
Nro	Mm	Original	Corregida	Antes del ensayo	Después del ensayo		
3/4"	19.05	20.60	35.34	1000.00	925.50	7.45	9.50
1/2"	12.7						
3/8"	9.5	70.40	71.40	300.00	285.00	5.00	1.80
4	4.76						
Perdida por Solidez Fracción Gruesa (%)							7.49

Nota. Elaboración propia

Tabla 18.

Análisis cuantitativo para la fracción fina de la tercera muestra

Tamiz		Gradación %		Masa de las fracciones		% Perdida	%Perdida ponderada
Nro	Mm	Original	Corregida	Antes del ensayo	Después del ensayo		
3/8"	9.5	12.99	29.68	100.00	95.00	5.00	3.00
4	4.76	11.33	25.88	100.00	95.00	5.00	1.00
8	2.36	8.58	19.61	100.00	96.50	3.50	0.70
16	1.18	4.87	11.11	100.00	93.50	6.50	0.20
30	600	6.00	13.71	100.00	94.00	6.00	0.30
Perdida por Solidez Fracción Fina (%)							5.20

Nota. Elaboración propia

Figura 14.

Pesaje de agregado grueso luego de la absorción



Nota. Elaboración propia

C. Partículas fracturadas mecánicamente (MTC E 210)

El resultado a obtener en este ensayo es el porcentaje de partículas con una, dos o más caras fracturadas de una muestra de 1500 g. Este método de ensayo tiene como objetivo determinar el porcentaje, en masa o cantidad, de una muestra de agregado grueso que contiene partículas fracturadas que cumplen con los requisitos especificados.

Tabla 19.

Presentación del tamaño máximo nominal

Tamaño Máximo Nominal Muestra de ensayo mínima mm (pulg.)	Abertura Cuadrada, mm (pulg.) Masa, g (aprox. lb.)
9,5 (3/8)	200 (0,5)
12,5 (1/2)	500 (1)
19,0 (3/4)	1 500 (3,3)
25,0 (1)	3 000 (6,5)
37,5 (1 1/2")	7 500 (16,5)
50,0 (2)	15 000 (33)
63,0 (2 1/2)	30 000 (66)
75,0 (3)	60 000 (132)
90,0 (3 1/2)	90 000 (198)

Nota. Elaboración propia

Tabla 20.

Presentación del peso mínimo nominal

Tamaño máximo nominal malla cuadrada mm – (pulgada)	Peso mínimo de la muestra de ensayo kg – (lb)
9,5 – (3/8)	1 – (2)
12,5 – (1/2)	2 – (4)
19,0 – (3/4)	5 – (11)
25,0 – (1)	10 – (22)
37,5 – (1 1/2)	15 – (33)
50,0 – (2)	20 – (44)
63 – (2 1/2)	30 – (66)
75 – (3/2)	35 – (77)
90 – (3/2)	60 – (130)
100 – (4)	100 – (220)
112 – (4 1/2)	150 – (330)
125 – (5)	300 – (660)
150 – (6)	500 – (1100)

Nota. Elaboración propia

Figura 15.

Partículas fracturadas (Bordes agudos, superficies alisadas)



Nota. Elaboración propia

Tabla 21.

Resultados del análisis de partículas fracturadas mecánicamente

Descripción	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Peso de la muestra (gr)	1500.00	1500.00	1500.00
Partículas 1 cara fracturada (%)	4.97	5.05	4.92
Partículas 2 o más caras fracturadas (%)	95.03	94.95	95.08
Partículas 0 caras fracturadas (%)	-	-	-

Nota. Elaboración propia

Figura 16.

Se procedió a cargar el agregado grueso en la máquina cuarteador



Nota. Elaboración propia

Figura 17.

Finalizado el ciclo de puerta la muestra de agregado grueso



Nota. Elaboración propia

D. Partículas Chatas y Alargadas (MTC E 221)

Este ensayo determina el porcentaje de partículas aplanadas o alargadas en los agregados usados en carreteras. Se aplica a tamaños entre 6.3 mm y 63 mm. Evalúa la forma del agregado, ya que excesos pueden afectar el desempeño de la mezcla. Esta prueba describe el procedimiento a seguir para determinar los índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados que se utilizarán en la construcción de carreteras. Estos índices son cruciales para evaluar las características geométricas de los agregados y su idoneidad para ser empleados en la fabricación de pavimentos.

Tabla 22.

Tamaño nominal del agregado

Tamaño nominal del agregado (mm)	Tamaño nominal del agregado (pulg)	Peso mínimo del material para ensayo, tamaño del agregado entre 63,0 mm (2 ½") y 6,3 mm (¼") (kg)
50	(2)	35
40	(1 ½)	15
25	(1)	5
20	(¾)	2
12,5	(½)	1
10	(⅜)	0,5

Nota. Elaboración propia

Tabla 23.

Análisis de partículas chatas y alargadas

Descripción	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Partículas Chatas y Alargadas (%)	9.60	9.70	9.80

Nota. Elaboración propia

Se observa que los valores obtenidos se encuentran dentro del límite establecido por la norma, siendo menores al 10 %, por lo tanto, el material es apto para su uso en mezclas asfálticas.

Figura 18.*Identificación mediante calibre*

Nota. Elaboración propia

Figura 19.*Identificación visual del material*

Nota. Elaboración propia

E. Equivalente de arena (MTC E 114)

Los agregados gruesos deben estar libres de recubrimientos de polvo o arcilla, ya que estos materiales disminuyen la capacidad del asfalto para adherirse correctamente. Asimismo, el agregado fino no debe presentar presencia significativa de arcillas ni partículas demasiado finas, pues pueden comprometer la calidad de la mezcla. Para verificar esto, se aplica el ensayo de equivalente de arena, el cual resulta fundamental para asegurar un buen comportamiento de la mezcla asfáltica.

Este método de ensayo se propone como una prueba de correlación rápida de campo. Su propósito es determinar, bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de suelos arcillosos o finos plásticos y polvo en suelos granulares y agregados finos que pasan a través del tamiz N°4 (4,75 mm). El término "equivalente de arena" refleja la idea de que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezclas de partículas gruesas, arena y, generalmente, arcillas o finos plásticos y polvo, que son considerados indeseables en la construcción.

Algunos realizan la prueba sobre material con un tamaño máximo más pequeño que el tamiz N°4 (4,75 mm). Esto se hace con el fin de evitar que los finos arcillosos, plásticos y el polvo se atrapen en las partículas comprendidas entre los tamices N°4 a 8 (4,75 mm a 2,36 mm). Realizar el ensayo sobre materiales con un tamaño máximo más pequeño puede reducir los resultados numéricos de la prueba, ya que se elimina la influencia de estas partículas más finas en la medición.

Tabla 24.*Resultados de ensayos para el equivalente de arena*

Ensayos	N° 1	N° 2	N° 3
Temperatura de solución de trabajo (°C)	24.7 °C	24.7 °C	24.7 °C
Lectura de arcilla (cm)	24.5	25	24
Lectura de arena (cm)	12.5	12.5	12.4
Equivalente de Arena (%)	51.02	50	51.67

Nota. Elaboración propia

Figura 20.

Ensayo de sedimentación de agregado frío



Nota. Elaboración propia

F. Contenido de impurezas orgánicas (MTC E 213)

El contenido de impurezas orgánicas en los agregados finos es importante en mezclas asfálticas en frío, ya que la presencia de materiales como restos vegetales puede interferir con la adhesión entre la emulsión y el agregado, afectando la cohesión, durabilidad y desempeño de la mezcla. El objetivo de este método de ensayo es establecer los procedimientos para realizar una determinación aproximada de la presencia de impurezas orgánicas dañinas en el agregado fino que se utilizará en la fabricación de concretos o morteros de cemento hidráulico. Estas impurezas pueden afectar las propiedades del concreto o mortero, por lo que su identificación es esencial para garantizar la calidad del material.

Tabla 25.

Tabla de contenido de impurezas

Color Gardner standard N°	Placa orgánica n°
5	1
8	2
11	3
13	4
16	5

Nota. Elaboración propia

Tabla 26.

Resultados del contenido de impurezas orgánicas

Detalles	N° 1	N° 2	N° 3
Peso del suelo seco + Fuente, antes de ignición (g)	58.33	54.23	58.25
Peso del suelo seco + Fuente, después de ignición (g)	58.24	54.15	55.32
Peso de la materia orgánica (g)	0.09	0.08	0.09
Peso de la Fuente (g)	21.00	23.00	21.00
Peso del suelo seco neo (g)	37.24	31.15	37.24
Materia orgánica (%)	0.24	0.26	0.25

Nota. Elaboración propia

Figura 21.

Ensayo de sedimentación de agregado frío



Nota. Elaboración propia

G. Ensayo de angularidad (agregado fino)

Preparación de la muestra:

Selección y cantidad de muestra:

La muestra de agregado fino debe ser representativa del material que se va a analizar. Según la norma MTC E-216, la cantidad de muestra debe ser de 500 g de agregado seco, preferentemente en el rango de partículas que pasan por un tamiz de No. 4 (4.75 mm) y son retenidas en un tamiz de No. 8 (2.36 mm).

Tamizado:

Se tamiza la muestra para asegurarse de que las partículas estén dentro del rango adecuado. El agregado debe estar dentro de las especificaciones del tamizado para ser utilizado en el ensayo de angularidad.

Método de medición:**Selección de partículas:**

Se seleccionan las 100 partículas de mayor tamaño de la muestra que han pasado por el tamiz de No. 4 (4.75 mm) y han quedado retenidas en el tamiz de No. 8 (2.36 mm). Se debe escoger de manera aleatoria y representativa para asegurarse de que las partículas seleccionadas sean representativas de la muestra completa.

Observación de la forma:

Las partículas seleccionadas se observan de manera individual, utilizando una lupa o microscopio. Se analiza la forma y angularidad de cada partícula. La angularidad se evalúa en función de las aristas y vértices de las partículas. Las partículas más angulosas tendrán más aristas y vértices agudos, mientras que las partículas redondeadas tendrán una forma más suave.

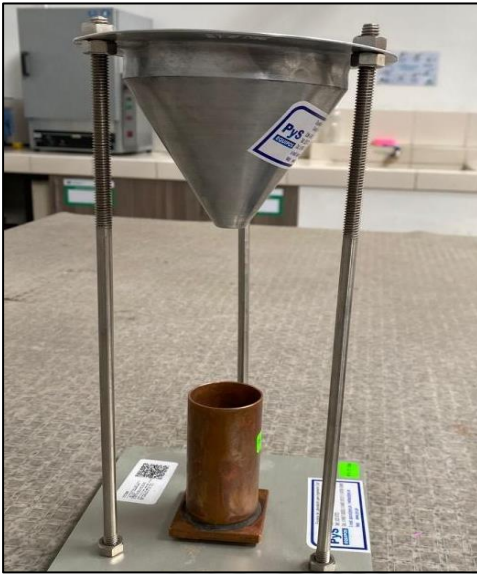
Clasificación de las partículas:

Cada partícula se clasifica en función de su angularidad en una de las siguientes categorías:

- Angular: Partículas que tienen bordes y vértices bien definidos, formando ángulos agudos.
- Sub-angular: Partículas que tienen bordes ligeramente redondeados, pero aún mantienen algunas características angulosas.
- Redondeado: Partículas con bordes y vértices redondeados, con pocas o ninguna arista aguda.

Figura 22.

Llenado de cilindro estándar



Nota. Elaboración propia

Figura 23.

Llenado de cilindro estándar



Nota. Elaboración propia

4. Límite Plástico (L.P.) de los suelos e Índice de Plasticidad (I.P.) (MTC E 111)

El ensayo de Límite Plástico (L.P.) y Límite Líquido (L.L.) se realizó de acuerdo con la Norma MTC E 111, con el propósito de determinar el rango de humedad en el cual el material presenta comportamiento plástico, permitiendo identificar su naturaleza y clasificación dentro de los suelos finos.

Procedimiento para el Límite Líquido (Ensayo de Casa Grande)

- Se tomó una muestra de la fracción que pasa el tamiz N° 40.
- Se mezcló la muestra con agua destilada hasta obtener una consistencia homogénea.
- Se colocó parte del material en la copa del aparato de Casa Grande, nivelando la superficie.
- Se realizó el surco estándar con la herramienta ranuradora.
- Se accionó el aparato a una velocidad aproximada de dos golpes por segundo.
- Se observó el cierre del surco, registrando el número de golpes y la humedad correspondiente.
- A pesar de incrementar gradualmente la humedad, no se logró el cierre del surco, evidenciando la ausencia total de plasticidad en el material.

Procedimiento para el Límite Plástico

- Se tomó una porción representativa del material que pasa el tamiz N° 40.
- Se humedeció ligeramente la muestra buscando una consistencia adecuada para el moldeo manual.
- Se intentó formar rollitos de aproximadamente 3 mm de diámetro sobre una superficie lisa.
- El material se desmoronó de inmediato, sin presentar cohesión ni deformación plástica observable.
- Por tanto, no fue posible determinar un valor de Límite Plástico (L.P.).

Durante la ejecución de ambos ensayos, se constató que el material no presentó cohesión ni plasticidad apreciable, aun cuando se incrementó la humedad progresivamente. Este comportamiento indicó que el suelo carece de fracción fina suficiente (como arcillas o limos plásticos) para desarrollar características plásticas.

En consecuencia, el material fue clasificado como No Plástico (N.P.), de acuerdo con los criterios de la norma MTC E 111. Este resultado es consistente con un material de naturaleza granular, probablemente constituido por arenas o gravas con bajo contenido de partículas finas.

La ausencia de límites de Atterberg verificables confirma que el ensayo no es aplicable a este tipo de material, ya que los límites de plasticidad solo tienen sentido en suelos cohesivos con una proporción significativa de partículas menores a 0.002 mm. Por tanto, la determinación del L.L. y L.P. no aporta información representativa sobre su comportamiento ingenieril.

Este resultado sustenta la caracterización del material como granular no cohesivo, lo que influye directamente en su comportamiento dentro de mezclas asfálticas en frío, limitando su capacidad de retener agua y desarrollar plasticidad o ductilidad.

Figura 24.

Ensayo de la cuchara Casagrande



Nota. Elaboración propia

Figura 25.

Procedimiento para limite plástico



Nota. Elaboración propia

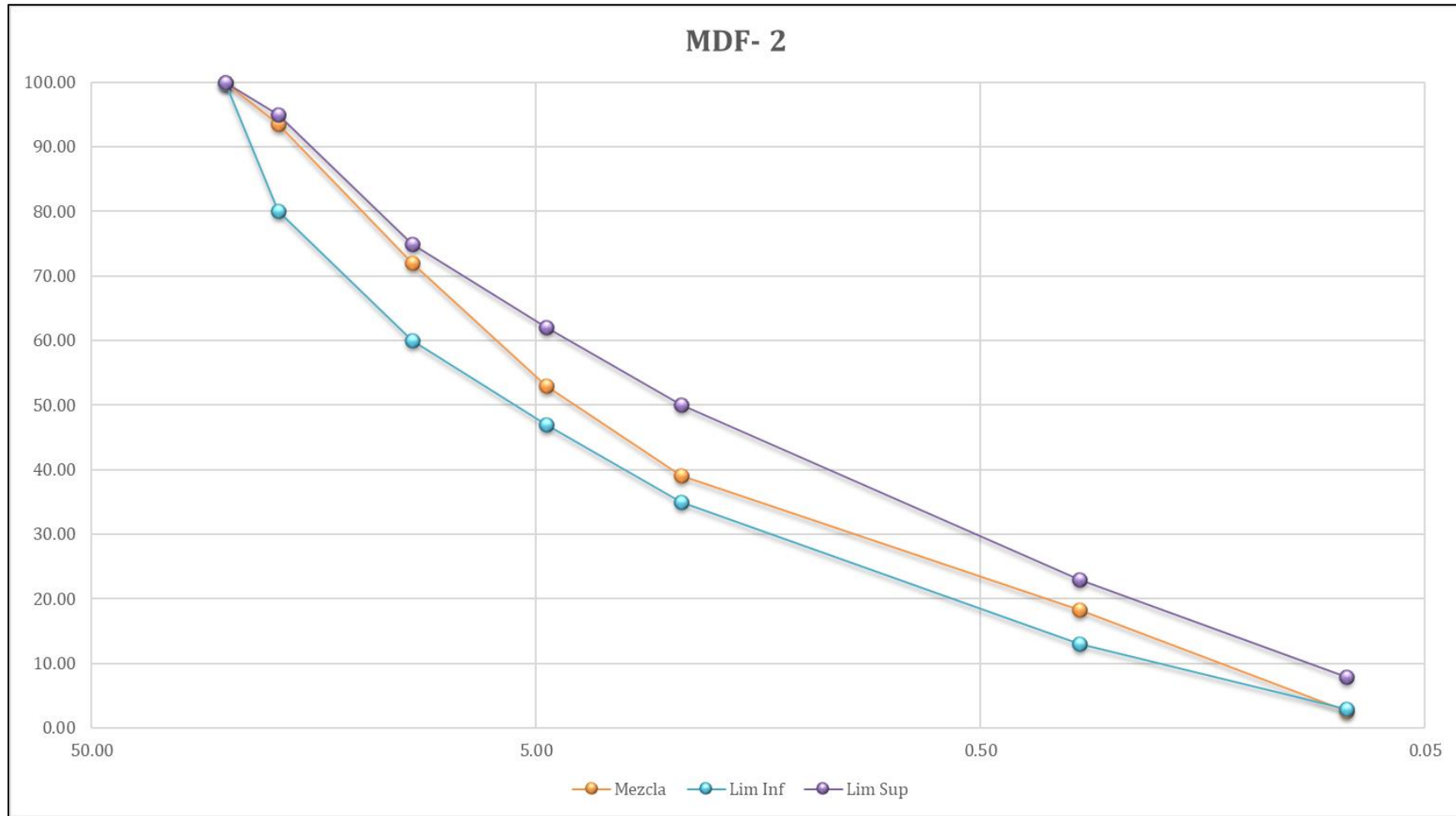
5. Determinación del % de Emulsión Asfáltica a emplear mediante Marshall según el Manual del Asfalo MS-14 apéndice F

Se debe contar con el material y equipo necesario para efectuar la práctica.

(APÉNDICE F/ MÉTODO ILLINOIS/ MARSHALL MODIFICADO)

Figura 26.

Muestra base (Probeta 0%CKD +0% PSA)



Nota. Elaboración propia

Probeta 0%CKD +0% PSA

Líquido Asfáltico

Tipo de asfalto CSS-1h

% Óptimo de emulsión asfáltica 5.5%

Características de Marshall Modificado

Tabla 27.

Características de Marshall Modificado

Parameros de diseño	Óptimo	Especificación EG-2013
Peso unitario	2.460	
Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada "Pa"	6.2	2%-8%
Vacíos en el agregado mineral de la mezcla compactada "VMA"		14
Vacíos llenos de asfalto de la mezcla compactada "VFA"		70-80
Estabilidad, N (lb) a 22.2° C (72°F)		2224 (500)
Mezclas para pavimentos		
Porcentaje de Pérdida de estabilidad		50 Max
Después de saturación de vacíos e inmersión		
Agregado para recubrimiento		50 min

Nota. MS-14 Manual del Asfalto

Determinación del óptimo de la emulsión asfáltica (Curvas de energía de compactación constante)

Figura 27.

Determinación del optimo de la emulsión asfáltica

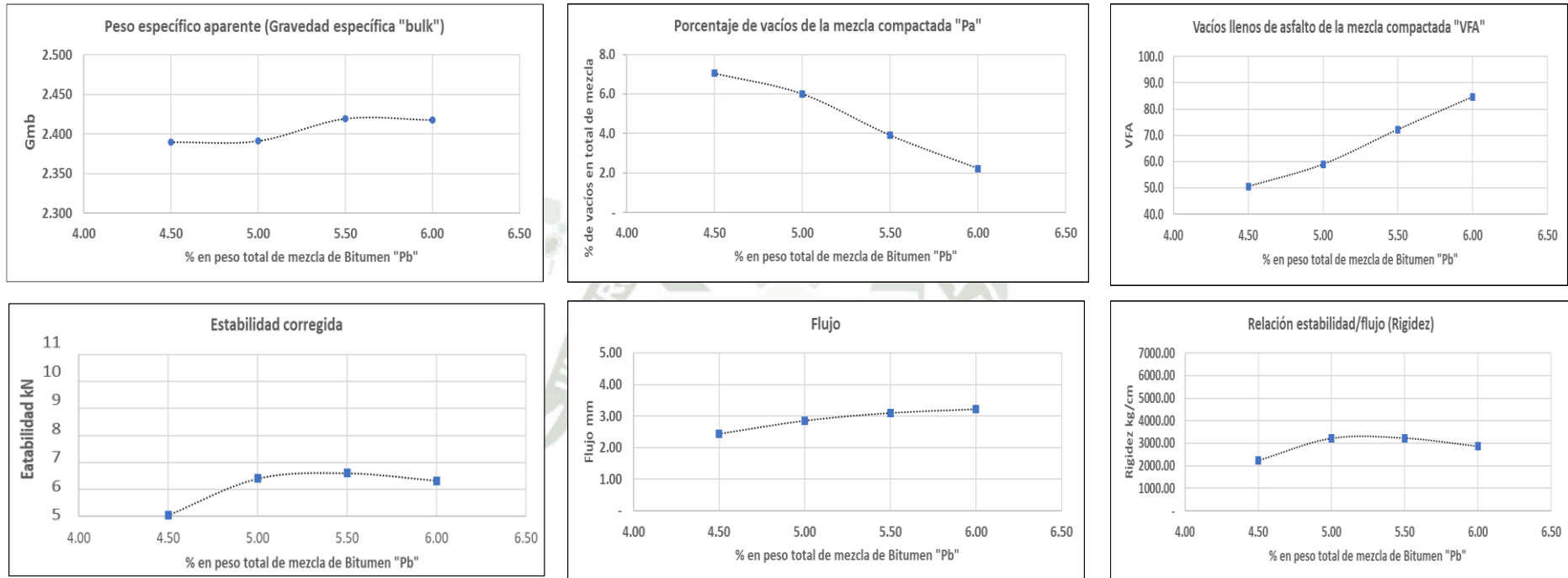


Tabla 28.

Descripción del ensayo

No.	Experimento	Porcentaje de Emulsión	Repetición	Estabilidad (kN)
1	Control 0% - 0%	4.5	1	5,0
2	Control 0% - 0%	5	2	6,4
3	Control 0% - 0%	5.5	3	6,5
4	Control 0% - 0%	6	4	6,3

H. Ensayo de probetas de asfalto con mezcla en frío / Dosificación de agregado

Para evaluar el desempeño de la mezcla asfáltica en frío, se realizaron ensayos Marshall según la norma BS EN 12697-34 y las directrices del PD 6691:2022. Se determinaron estabilidad, fluencia, vacíos y contenido óptimo de emulsión, considerando el curado como factor clave por tratarse de una mezcla en frío.

Además, se realizaron tres ensayos de deformación permanente según la norma BS EN 12697-22 con los diferentes porcentajes de los rellenos ternarios cementantes.

Tabla 29.

Ensayo de probetas de asfalto con mezcla en frío / Dosificación de agregado

No.	Experimento	Experimento	Repetición	Estabilidad (kN)
1	Control 0% - 0%	1	1	9,4
2	Control 0% - 0%	1	2	8,5
3	Control 0% - 0%	1	3	8,6
4	PSA 3% - CKD 2%	2	1	12,24
5	PSA 3% - CKD 2%	2	2	12,50
6	PSA 3% - CKD 2%	2	3	12,25
7	PSA 6% - CKD 4%	3	1	15,32
8	PSA 6% - CKD 4%	3	2	15,59
9	PSA 6% - CKD 4%	3	3	15,30
10	PSA 6% - CKD 2%	4	1	13,60
11	PSA 6% - CKD 2%	4	2	14,30
12	PSA 6% - CKD 2%	4	3	13,70

Nota. Tomado de SPSS v 26

4.1.2. Resistencia a la compresión

Tabla 30.

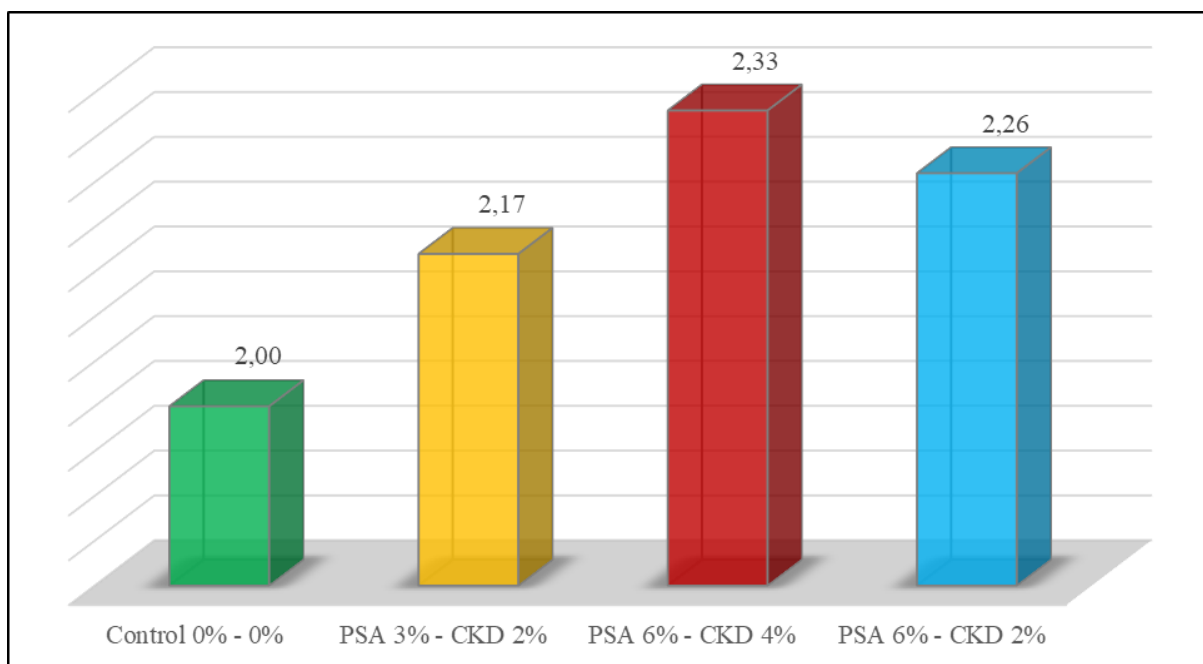
Resultados descriptivos para la Resistencia a la compresión (MPa)

Descripción	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
Control 0% - 0%	9	1.96	2.04	2.00	0.029
PSA 3% - CKD 2%	3	2.13	2.21	2.17	0.029
PSA 6% - CKD 4%	3	2.29	2.38	2.33	0.029
PSA 6% - CKD 2%	3	2.25	2.29	2.26	0.019

Nota. Tomado de SPSS v 26

Figura 28.

Resultados descriptivos del promedio para la resistencia a la compresión (MPa)



Nota. Tomado de SPSS v 26

La Tabla 28 y Figura 27 presentan los resultados descriptivos para la resistencia a la compresión (medida en megapascales, MPa) de varias MAF, utilizando rellenos cementantes ternarios, como la ceniza de lodo de papel (PSA) y el polvo de horno de cemento (CKD), en diferentes proporciones. Los valores muestran el comportamiento frente a la carga aplicada, lo que es esencial para evaluar su capacidad de soportar tensiones sin fallar.

El grupo de control, con un 0% de ceniza de lodo de papel y un 0% de polvo de horno de cemento, presenta una resistencia a la compresión promedio de 2.00 MPa. Este valor se encuentra dentro de un rango de resistencia moderada, lo que es típico para las MAF convencionales. La desviación estándar de 0.029 indica que las mediciones son consistentes, con una pequeña variabilidad en los resultados obtenidos para las muestras dentro de este grupo.

En el caso de la mezcla con un 3% de ceniza de lodo de papel y un 2% de polvo de horno de cemento, la resistencia a la compresión aumenta a un valor promedio de 2.17 MPa. Este incremento muestra que la incorporación de estos rellenos cementantes ternarios mejora

las propiedades mecánicas de la mezcla, proporcionando una mayor capacidad para resistir cargas compresivas. La variabilidad en este grupo es similar al grupo control, con una desviación estándar también de 0.029, lo que sugiere una homogeneidad en los resultados.

Al aumentar la proporción de ceniza de lodo de papel al 6% y polvo de horno de cemento al 4%, la mezcla muestra una notable mejora en su resistencia a la compresión, alcanzando un valor promedio de 2.33 MPa. Este resultado es consistente con estos componentes cementantes mejora considerablemente las propiedades mecánicas de las MAF. El aumento en la resistencia a la compresión en este grupo es significativo, indicando que una mayor proporción de rellenos cementantes ternarios fortalece la mezcla y la hace más resistente a las cargas, lo cual es crucial para la durabilidad y vida útil de las infraestructuras viales.

El grupo con un 6% de ceniza de lodo de papel y 2% de polvo de horno de cemento presenta una resistencia a la compresión promedio de 2.26 MPa, ligeramente inferior al grupo con 6% de ceniza de lodo de papel y 4% de polvo de horno de cemento, pero aún superior al grupo control. Este valor resalta que, aunque no se empleen altas proporciones de polvo de horno de cemento, la mezcla aún muestra un incremento notable en la resistencia a la compresión, lo que sugiere que incluso en proporciones más moderadas, los rellenos cementantes ternarios tienen un impacto positivo en las propiedades de la mezcla.

Los resultados reflejan que la incorporación de ceniza de lodo de papel y polvo de horno de cemento mejora la resistencia a la compresión de las MAF, lo cual es un factor clave para mejorar la durabilidad y la capacidad de carga de las infraestructuras viales. A medida que aumenta la proporción de estos materiales reciclados, se observa una mejora significativa en las propiedades mecánicas, lo que posiciona a estas mezclas como una opción más resistente y sostenible para la pavimentación. Este hallazgo es de gran importancia, ya que en regiones como Perú, donde las infraestructuras viales enfrentan condiciones climáticas extremas y un

tráfico pesado, las mezclas optimizadas con rellenos cementantes ternarios pueden prolongar la vida útil de las carreteras y reducir los costos de mantenimiento.

4.1.3. Pérdida de Resistencia a la compresión (%)

Tabla 31.

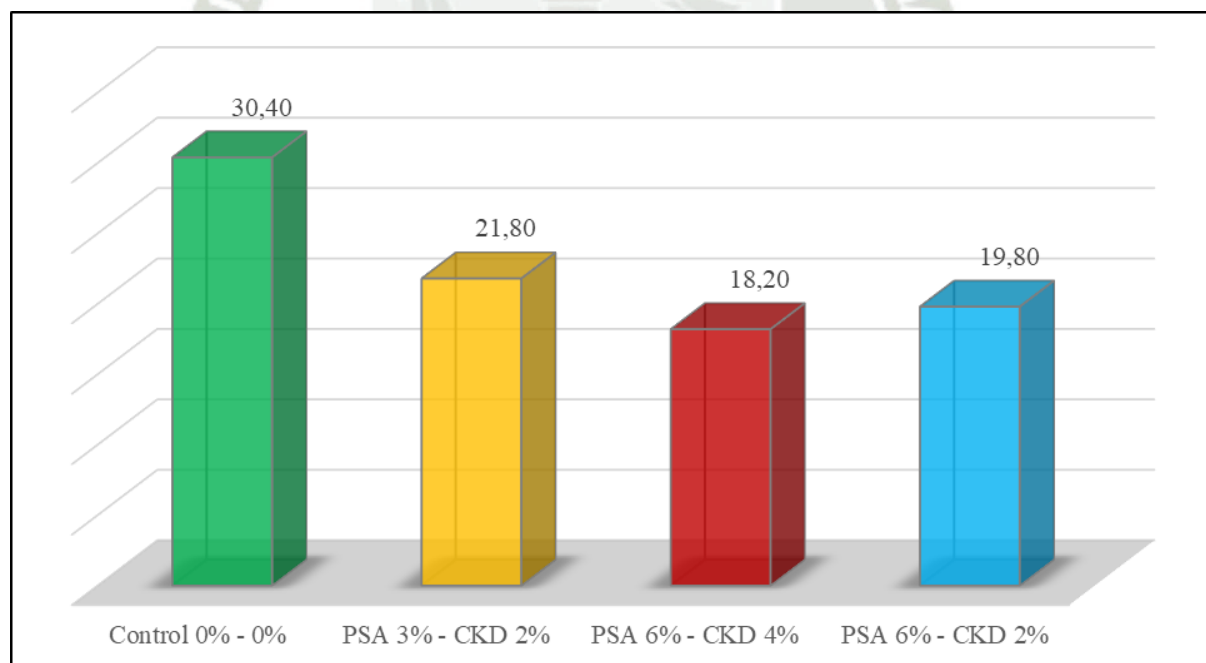
Resultados descriptivos para la Pérdida de resistencia a la compresión (%)

Descripción	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
Control 0% - 0%	9	29.00	32.00	30.40	1.140
PSA 3% - CKD 2%	3	21.00	23.00	21.80	0.837
PSA 6% - CKD 4%	3	17.00	19.00	18.20	0.837
PSA 6% - CKD 2%	3	19.00	21.00	19.80	0.837

Nota. Tomado de SPSS v 26

Figura 29.

Resultados descriptivos del promedio para la pérdida de resistencia a la compresión (%)



Nota. Tomado de SPSS v 26

La Tabla 29 y Figura 28 presentan los resultados descriptivos para la pérdida de resistencia a la compresión (%) al 5to ciclo de diversas MAF con la adición de rellenos cementantes ternarios, como la ceniza de lodo de papel (PSA) y el polvo de horno de cemento

(CKD), en diferentes proporciones. La pérdida de resistencia a la compresión es clave para la capacidad del material para resistir la fatiga y las cargas repetidas, factores críticos para la durabilidad de las infraestructuras viales.

El grupo de control, sin la adición de ceniza de lodo de papel ni polvo de horno de cemento, muestra una pérdida de resistencia a la compresión promedio de 30.40%, con una variabilidad reflejada en la desviación estándar de 1.140. Este valor indica que las MAF convencionales, aunque son una opción más ecológica en términos de producción, presentan una mayor pérdida de resistencia a la compresión con el tiempo, lo cual puede afectar su rendimiento en condiciones de tráfico constante y exposición a condiciones climáticas adversas.

Al incorporar un 3% de ceniza de lodo de papel y un 2% de polvo de horno de cemento, la mezcla muestra una notable reducción en la pérdida de resistencia a la compresión, alcanzando un valor promedio de 21.80%. Este descenso significativo en la pérdida de resistencia refleja cómo la adición de estos materiales reciclados mejora la estabilidad de la mezcla, lo que aumenta su durabilidad frente a los ciclos repetidos de carga. La desviación estándar de 0.837 muestra una homogeneidad similar a la observada en otros grupos, lo que sugiere una consistencia en los resultados obtenidos.

El grupo con un 6% de ceniza de lodo de papel y 4% de polvo de horno de cemento presenta una mejora aún más destacada, con una pérdida de resistencia a la compresión promedio de 18.20%. Este resultado subraya que una mayor cantidad de estos rellenos cementantes ternarios refuerza considerablemente la mezcla, lo que permite una mejor resistencia frente a la fatiga y a los ciclos de carga. Este comportamiento es altamente favorable, ya que sugiere que las mezclas con mayor proporción de rellenos cementantes no solo mantienen su resistencia inicial, sino que también mejoran su durabilidad a largo plazo.

Finalmente, la mezcla con un 6% de ceniza de lodo de papel y 2% de polvo de horno de cemento muestra una pérdida de resistencia a la compresión promedio de 19.80%. Aunque este valor es ligeramente superior al del grupo con el 6% de ceniza de lodo de papel y 4% de polvo de horno de cemento, aún es una mejora significativa en comparación con el grupo control. Esto destaca la efectividad de la incorporación de estos rellenos, incluso cuando no se utilizan en las proporciones más altas.

Los resultados evidencian que la adición de ceniza de lodo de papel y polvo de horno de cemento en las MAF reduce la pérdida de resistencia a la compresión, mejorando la capacidad del material para resistir cargas repetidas y condiciones de fatiga. Este comportamiento es crucial para la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de las infraestructuras viales, especialmente en climas y condiciones de tráfico severo. La optimización de estas mezclas no solo mejora la resistencia del material, sino que también contribuye a una pavimentación más sostenible y eficiente, alineándose con los objetivos.

4.2. Resultados inferenciales

4.2.1. Resistencia a la compresión

Tabla 32.

ANOVA para la Resistencia a la a la compresión (MPa)

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	,306	3	,102	138,975	,000
Dentro de grupos	,012	16	,001		
Total	,318	19			

Nota. Tomado de SPSS v 26

La Tabla 30 presenta los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia a la compresión (MPa) de las diferentes mezclas asfálticas con la incorporación de ceniza de lodo de papel (PSA) y polvo de horno de cemento (CKD). El propósito de este

análisis es determinar si las diferencias observadas en la resistencia a la compresión entre los grupos experimentales son estadísticamente significativas.

En primer lugar, la suma de cuadrados entre grupos es de 0,306, con 3 grados de libertad (gl). Esto refleja la variabilidad observada entre los diferentes grupos experimentales, indicando que las mezclas con distintas proporciones de PSA y CKD presentan variaciones significativas en sus propiedades de resistencia a la compresión. La media cuadrática entre grupos es de 0.594, lo que es un indicador de la magnitud de la variabilidad entre los grupos en comparación con la variabilidad dentro de los grupos.

La suma de cuadrados dentro de los grupos es de 0.012, con 16 grados de libertad. Esto representa la variabilidad dentro de cada uno de los grupos experimentales, es decir, la dispersión observada en la resistencia a la compresión dentro de cada tipo de mezcla. La media cuadrática dentro de los grupos es de 0.001, lo que sugiere que la variabilidad interna de cada grupo es pequeña en relación con la variabilidad entre los grupos.

El valor F calculado es 138.975, lo que indica que la variabilidad entre los grupos es mucho mayor que la variabilidad dentro de los grupos. Este valor de F es muy alto, lo que sugiere que las diferencias observadas entre las mezclas asfálticas son significativas, y que la variabilidad entre los grupos no es simplemente producto del azar.

El valor Sig. es 0.000, lo que es menor que el umbral de significancia comúnmente utilizado de 0.05. Esto indica que las diferencias observadas entre los grupos son estadísticamente significativas, lo que confirma que la adición de ceniza de lodo de papel y polvo de horno de cemento a las mezclas asfálticas tiene un efecto significativo sobre la resistencia a la compresión.

Los resultados del ANOVA en la Tabla 19 confirman que la incorporación de los rellenos cementantes ternarios mejora significativamente la resistencia a la compresión de las mezclas asfálticas. Esto sugiere que las mezclas con PSA y CKD son más resistentes que las

mezclas sin estos materiales, lo que tiene implicaciones positivas para la durabilidad y el desempeño de las infraestructuras viales. La diferencia significativa entre los grupos refuerza la hipótesis de que estos materiales pueden optimizar las propiedades mecánicas de las MAF, lo que contribuye a una pavimentación más resistente y sostenible.

Tabla 33.

Prueba de Tukey para la Resistencia a la compresión (MPa)

Variable dependiente: Resistencia a la compresión (MPa)

HSD Tukey

(I) Experimento	(J) Experimento	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Control - Proporción de 0%PSA - 0%CKD	Proporción de 3%PSA - 2%CKD	-,17000*	,01715	,000	-,2191	-,1209
	Proporción de 6%PSA - 4%CKD	-,33200*	,01715	,000	-,3811	-,2829
	Proporción de 6%PSA - 2%CKD	-,25800*	,01715	,000	-,3071	-,2089
Proporción de 3%PSA - 2%CKD	Control - Proporción de 0%PSA - 0%CKD	,17000*	,01715	,000	,1209	,2191
	Proporción de 6%PSA - 4%CKD	-,16200*	,01715	,000	-,2111	-,1129
	Proporción de 6%PSA - 2%CKD	-,08800*	,01715	,001	-,1371	-,0389
Proporción de 6%PSA - 4%CKD	Control - Proporción de 0%PSA - 0%CKD	,33200*	,01715	,000	,2829	,3811
	Proporción de 3%PSA - 2%CKD	,16200*	,01715	,000	,1129	,2111
	Proporción de 6%PSA - 2%CKD	,07400*	,01715	,003	,0249	,1231
Proporción de 6%PSA - 2%CKD	Control - Proporción de 0%PSA - 0%CKD	,25800*	,01715	,000	,2089	,3071
	Proporción de 3%PSA - 2%CKD	,08800*	,01715	,001	,0389	,1371
	Proporción de 6%PSA - 4%CKD	-,07400*	,01715	,003	-,1231	-,0249

*. La diferencia es significativa al 0.05.

Nota. Tomado de SPSS v 26

La Tabla 31 presenta los resultados de la prueba de Tukey aplicada a la resistencia a la compresión (MPa) de diferentes MAF con diversas proporciones de ceniza de lodo de papel (PSA) y polvo de horno de cemento (CKD). La prueba de Tukey permite realizar comparaciones múltiples entre los grupos experimentales y determinar cuáles diferencias son estadísticamente significativas.

En las comparaciones entre el grupo control (0% PSA y 0% CKD) y las mezclas con PSA y CKD, se observa que todas las diferencias son estadísticamente significativas con una significancia de 0.05. Por ejemplo, la diferencia de medias entre el grupo control y la mezcla con 3% PSA y 2% CKD es de -0.17000, con un intervalo de confianza entre -0.2191 y -0.1209, lo que indica que la mezcla con PSA y CKD presenta una resistencia a la compresión significativamente mayor que el grupo control. Similarmente, las mezclas con 6% PSA y 4% CKD y 6% PSA y 2% CKD también muestran diferencias significativas con el grupo control, con diferencias de -0.33200 y -0.25800, respectivamente.

Al comparar las mezclas entre sí, se destaca que la mezcla con 6% PSA y 4% CKD presenta una resistencia a la compresión significativamente mayor que las mezclas con 3% PSA y 2% CKD y 6% PSA y 2% CKD, con diferencias de 0.16200 y 0.07400, respectivamente. Estas diferencias también son estadísticamente significativas, lo que subraya la mejora en la resistencia a la compresión al aumentar la proporción de PSA y CKD en la mezcla.

En general, los resultados revelan que todas las mezclas con PSA y CKD presentan una mejora significativa en la resistencia a la compresión en comparación con el grupo control, lo que destaca la efectividad de estos materiales como aditivos para mejorar las propiedades mecánicas de las MAF. Además, las mezclas con mayores proporciones de PSA y CKD tienden a presentar una mayor resistencia, lo que refuerza la importancia de la proporción de estos materiales en el diseño de pavimentos más duraderos y resistentes.

4.2.2. Pérdida de resistencia a la compresión (%)

Tabla 34.

ANOVA para la Pérdida de resistencia a la compresión (%) al 5to ciclo

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	443,350	3	147,783	173,863	,000
Dentro de grupos	13,600	14	,850		
Total	456,950	17			

Nota. Tomado de SPSS v 26

La Tabla 32 presenta los resultados del análisis de varianza (ANOVA) aplicado a la pérdida de resistencia a la compresión (%) al 5to ciclo de las diferentes MAF con adición de ceniza de lodo de papel (PSA) y polvo de horno de cemento (CKD). El objetivo de este análisis es determinar si las diferencias observadas en la pérdida de resistencia a la compresión entre los grupos experimentales son estadísticamente significativas.

En primer lugar, la suma de cuadrados entre grupos es de 443.350, con 3 grados de libertad (gl). Este valor refleja la variabilidad entre los diferentes grupos experimentales, indicando que las mezclas con distintas proporciones de PSA y CKD presentan diferencias sustanciales en cuanto a la pérdida de resistencia a la compresión.

La media cuadrática entre grupos es de 147.783, lo que refleja la magnitud de la variabilidad entre los grupos comparado con la variabilidad dentro de cada grupo. Este valor es considerablemente más alto que la media cuadrática dentro de los grupos, lo que sugiere que las diferencias entre las mezclas son significativas y no son producto del azar.

La suma de cuadrados dentro de los grupos es de 13.600, con 16 grados de libertad, lo que refleja la variabilidad dentro de cada grupo de mezclas. La media cuadrática dentro de los grupos es de 0.850, lo que indica que la variabilidad interna de cada grupo es relativamente baja en comparación con la variabilidad entre los grupos.

El valor F es de 173.863, lo que es significativamente alto. Este valor de F indica que la variabilidad entre los grupos es mucho mayor que la variabilidad dentro de los grupos, lo que sugiere que las diferencias observadas en la pérdida de resistencia a la compresión no son aleatorias, sino que son el resultado de una diferencia real entre los efectos de las mezclas con distintas proporciones de PSA y CKD.

Finalmente, el valor Sig. es 0.000, lo que es mucho menor que el umbral comúnmente utilizado de 0.05. Esto confirma que las diferencias observadas entre los grupos son significativas, lo que indica que la adición de ceniza de lodo de papel y polvo de horno de cemento a las mezclas asfálticas tiene un efecto real y significativo sobre la pérdida de resistencia a la compresión.

Los resultados del ANOVA en la Tabla 15 evidencian que la adición de los rellenos cementantes ternarios mejora significativamente la resistencia a la compresión de las MAF. Esto sugiere que las mezclas con PSA y CKD no solo mantienen mejor su resistencia inicial, sino que también mejoran su durabilidad a lo largo del tiempo, lo que es crucial para la sostenibilidad y la eficiencia de las infraestructuras viales.

Tabla 35.

Prueba de Tukey para la Pérdida de resistencia a la compresión (%) al 5to ciclo

Variable dependiente: Pérdida de resistencia a la compresión (%)

HSD Tukey

(I) Experimento	(J) Experimento	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Control - Proporción de 0%PSA - 0%CKD	Proporción de 3%PSA - 2%CKD	8,60000*	,58310	,000	6,9318	10,2682
	Proporción de 6%PSA - 4%CKD	12,20000*	,58310	,000	10,5318	13,8682
	Proporción de 6%PSA - 2%CKD	10,60000*	,58310	,000	8,9318	12,2682
Proporción de 3%PSA - 2%CKD	Control - Proporción de 0%PSA - 0%CKD	-8,60000*	,58310	,000	-10,2682	-6,9318
	Proporción de 6%PSA - 4%CKD	3,60000*	,58310	,000	1,9318	5,2682
	Proporción de 6%PSA - 2%CKD	2,00000*	,58310	,016	,3318	3,6682
Proporción de 6%PSA - 4%CKD	Control - Proporción de 0%PSA - 0%CKD	-12,20000*	,58310	,000	-13,8682	-10,5318
	Proporción de 3%PSA - 2%CKD	-3,60000*	,58310	,000	-5,2682	-1,9318
	Proporción de 6%PSA - 2%CKD	-1,60000	,58310	,062	-3,2682	,0682
Proporción de 6%PSA - 2%CKD	Control - Proporción de 0%PSA - 0%CKD	-10,60000*	,58310	,000	-12,2682	-8,9318
	Proporción de 3%PSA - 2%CKD	-2,00000*	,58310	,016	-3,6682	-,3318
	Proporción de 6%PSA - 4%CKD	1,60000	,58310	,062	-,0682	3,2682

*. La diferencia es significativa al 0.05.

Nota. Tomado de SPSS v 26

La Tabla 33 presenta la prueba de Tukey aplicada a la pérdida de resistencia a la compresión (%) al 5to ciclo, permitiendo comparar las diferencias significativas entre las MAF con distintas proporciones de ceniza de lodo de papel (PSA) y polvo de horno de cemento (CKD). Esta prueba permite identificar las combinaciones que presentan diferencias notables en cuanto a la pérdida de resistencia a la compresión tras varios ciclos de carga.

En primer lugar, la diferencia de medias entre el grupo control (0% PSA y 0% CKD) y el grupo con 3% PSA y 2% CKD es de 8.60000, con un intervalo de confianza que varía entre 6.9318 y 10.2682. Este valor refleja una mejora en la resistencia a la compresión para la mezcla con PSA y CKD en comparación con el grupo control. De manera similar, la diferencia de medias entre el grupo control y el grupo con 6% PSA y 4% CKD es 12.20000, con un intervalo

de confianza entre 10.5318 y 13.8682, lo que indica una mejora considerable en la resistencia a la compresión con la adición de mayores proporciones de estos materiales reciclados.

Cuando se compara el grupo control con el grupo con 6% PSA y 2% CKD, la diferencia de medias es 10.60000, con un intervalo de confianza de 8.9318 a 12.2682, lo que también muestra una mejora significativa. Esto confirma que la adición de PSA y CKD mejora la capacidad de la mezcla para resistir la compresión incluso con una menor cantidad de polvo de horno de cemento en la mezcla.

Por otro lado, al comparar el grupo con 3% PSA y 2% CKD con el grupo control, se observa una diferencia de medias negativa de -8.60000, lo que indica una mejora en la mezcla con PSA y CKD respecto al grupo control. Además, se muestran mejoras notables también cuando se compara este grupo con el grupo con 6% PSA y 4% CKD (diferencia de medias de 3.60000, intervalo de confianza entre 1.9318 y 5.2682) y el grupo con 6% PSA y 2% CKD (diferencia de medias de 2.00000, intervalo de confianza entre 0.3318 y 3.6682).

En cuanto a la comparación entre el grupo con 6% PSA y 4% CKD y el grupo control, la diferencia de medias es -12.20000, con un intervalo de confianza de -13.8682 a -10.5318, lo que refuerza la idea de que las mezclas con mayores proporciones de PSA y CKD tienen una resistencia a la compresión significativamente mejor en comparación con el grupo control. Sin embargo, al comparar este grupo con el grupo con 6% PSA y 2% CKD, la diferencia de medias es -1.60000, lo que no es estadísticamente significativo ($p > 0.05$), sugiriendo que la diferencia en la resistencia a la compresión entre estas dos mezclas no es tan pronunciada.

Finalmente, entre el grupo con 6% PSA y 2% CKD y el grupo control, la diferencia de medias es -10.60000, con un intervalo de confianza entre -12.2682 y -8.9318, lo que muestra una mejora significativa en la resistencia a la compresión. Mientras tanto, la diferencia con el grupo con 6% PSA y 4% CKD es 1.60000, aunque este valor no es completamente significativo

($p > 0.05$), sugiriendo que la mejora entre estos dos grupos no es tan alta en comparación con las demás mezclas.

Los resultados indican que la incorporación de PSA y CKD en las mezclas asfálticas mejora la resistencia a la compresión en comparación con el grupo control. Las MAF con mayores proporciones de estos materiales presentan una reducción más significativa en la pérdida de resistencia a la compresión, lo que sugiere que estas mezclas son más duraderas y capaces de resistir los efectos del desgaste por carga repetida. Estos resultados resaltan la importancia de utilizar materiales reciclados, como PSA y CKD, en la mejora de las propiedades de las MAF para pavimentación más resistentes y sostenibles.

4.3. Costos unitarios

Los costos involucrados para la realización de la propuesta se detallan a continuación.

Tabla 36.

Descripción de materiales utilizados

PAVIMENTO ASFALTICO EN FRIO E=2.5" INCLUYE ARENADO					
m2/DIA	1,000.0000	Costo unitario directo por : m2		44.33	
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S./	Parcial U\$
Mano de Obra					
Capataz	hh	1.0000	0.0080	39.20	0.31
Oficial	hh	4.0000	0.0320	23.17	0.74
Peon	hh	8.0000	0.0640	20.90	1.34
Operador de Equipo Pesado	hh	5.0000	0.0400	20.90	0.84
					2.39
Materiales					
Mezcla asfáltica con emulsión asfáltica	m3		0.0920	300.00	27.60
Relleno cementante (Donado)	m3		0.0400	0.00	0.00
Transporte a laboratorio	Vje		0.0483	75.50	3.65
Descarga y acopio	Und		0.0260	20.00	0.52
Logística / gestión de recepción	Vje		0.0200	11.70	0.23
Herramientas menores / protección	Vje		0.0310	12.80	0.40
					32.40

Equipos

Herramientas manuales	%Mo		2.0000	2.39	0.05
Tractor cat	hm	1.0000	0.0080	95.00	0.76
Rodillo 3 ruedas	hm	1.0500	0.0084	173.00	1.45
Rodillo tandem	hm	1.0000	0.0080	220.00	1.76
Volquees de 8m3	hm	3.0000	0.0800	69.00	5.52
					9.54

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 36 se presenta el desglose de los materiales empleados en la experimentación de MAF con rellenos cementantes ternarios, los costos unitarios se determinaron considerando los precios de mercado vigentes en la provincia de Arequipa durante el año 2025.

El material pétreo representa un costo unitario de S/ 10,00 por bolsa de 40 kg, siendo necesario un total de veintiún bolsas, lo que genera un gasto total de S/ 210,00. Este insumo constituye uno de los componentes principales. El relleno cementante ternario fue parte de una donación; sin embargo, su obtención generó una inversión de S/ 100,00, debido a que el material se encontraba en la ciudad de Lima. Por su parte, el bitumen —empleado como ligante asfáltico— presenta un costo unitario de S/ 33,33 por unidad, alcanzando un monto total de S/ 100,00, lo cual refleja una proporción moderada dentro del presupuesto general de materiales.

El uso del laboratorio, valorado en S/ 948,00 por unidad, concentra el mayor costo dentro del análisis, debido a la necesidad de equipos especializados para la preparación, compactación y ensayo de las muestras, bajo condiciones controladas de humedad y temperatura.

El costo total de los materiales y servicios asciende a S/ 1.516,00, monto que refleja una inversión eficiente considerando la naturaleza experimental de la investigación. Este análisis permite observar que la mayor proporción del costo corresponde al uso del laboratorio (67%), seguido del material pétreo (21%), relleno cementante (5%) y el bitumen (7%),

evidenciando que el componente técnico-operativo tiene una incidencia determinante en el presupuesto total.

En síntesis, los costos unitarios analizados confirman que la optimización de las MAF no solo depende de la selección de materiales adecuados, sino también de una gestión eficiente de los recursos técnicos y económicos durante el proceso experimental.





CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Primera: La optimización de las MAF mediante la incorporación de rellenos cementantes ternarios, tales como la ceniza de lodo de papel (PSA) y el polvo de horno de cemento (CKD), ha demostrado un impacto positivo significativo en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los pavimentos destinados a tránsito ligero. En particular, se observó un notable incremento en la resistencia a la compresión y una mejora en la estabilidad frente a condiciones de humedad. Los datos experimentales corroboran que las mezclas que incluyen PSA y CKD presentan una mayor capacidad para soportar cargas estáticas y mantienen su rendimiento a lo largo del tiempo, incluso bajo ciclos repetidos de humedad y secado. Estos resultados indican que la adición de rellenos cementantes ternarios no solo potencia las propiedades iniciales de las MAF, sino que también mejora su sostenibilidad y durabilidad en condiciones ambientales adversas. Asimismo, el uso de materiales reciclados contribuye a una pavimentación más ecológica y económicamente viable.

Segunda: La resistencia a la compresión de las MAF optimizadas con PSA y CKD mostró un aumento significativo. En particular, la mezcla que contenía un 6% de PSA y un 4% de CKD alcanzó una resistencia promedio de 2.33 MPa, lo que representa un acrecentamiento frente a la mezcla control (2.00 MPa). Este aumento en la resistencia a la compresión evidencia que la incorporación de PSA y CKD refuerza la capacidad de la mezcla para soportar cargas estáticas, lo cual es esencial para la durabilidad y la vida útil de los pavimentos viales, especialmente en vías de tránsito ligero y en condiciones climáticas desfavorables.

Tercera: El análisis de la pérdida de resistencia a la compresión después de varios ciclos de humedad y secado mostró que las mezclas con PSA y CKD presentan una menor

pérdida de resistencia en comparación con las mezclas convencionales. Por ejemplo, las mezclas con un 6% de PSA y un 4% de CKD mostraron una pérdida promedio de 18.20%, lo cual es considerablemente inferior a la pérdida observada en el grupo control, que fue de 30.40%. Este comportamiento sugiere que las mezclas optimizadas no solo mantienen su resistencia a la compresión, sino que también presentan una mayor resistencia a los efectos de la humedad, lo cual resulta crucial para la durabilidad de las infraestructuras viales expuestas a condiciones climáticas extremas.

Cuarta: La combinación más efectiva para maximizar tanto la resistencia a la compresión como la durabilidad frente a la humedad fue la mezcla que contenía un 6% de PSA y un 4% de CKD. Esta proporción mostró una resistencia significativamente mayor en comparación con las mezclas que contenían menores cantidades de PSA o CKD, además de presentar una menor pérdida de resistencia en los ciclos de humedad y secado. Estos resultados sugieren que una mayor proporción de estos materiales reciclados no solo mejora las propiedades mecánicas de las MAF, sino que también optimiza su rendimiento a largo plazo bajo condiciones ambientales cambiantes.

5.2. Recomendaciones

Primera: Se recomienda la implementación de rellenos cementantes ternarios, como la ceniza de lodo de papel (PSA) y el polvo de horno de cemento (CKD), en la producción de MAF, con el fin de mejorar su estabilidad frente a la humedad y sus propiedades mecánicas. Esta optimización no solo contribuiría a la sostenibilidad, al reducir la huella de carbono, sino que también aumentaría la durabilidad de las infraestructuras viales, lo que a su vez reduciría los costos de mantenimiento. Además, se sugiere continuar con la investigación de otras combinaciones de materiales reciclados que puedan potenciar aún más estas propiedades y generar soluciones innovadoras en el ámbito de la pavimentación.

Segunda: Se recomienda utilizar MAF que contengan altas proporciones de PSA y CKD, como las formulaciones con un 6% de PSA y un 4% de CKD, en aplicaciones que exijan una mayor resistencia a la compresión. Estas mezclas ofrecen un desempeño superior en comparación con las mezclas tradicionales, lo que puede resultar beneficioso en infraestructuras viales sometidas a cargas estáticas elevadas. Además, es aconsejable considerar la variabilidad de los materiales disponibles en cada región, optimizando las mezclas en función de la accesibilidad y los costos de los componentes locales.

Tercera: Emplear la combinación de 6% de PSA y 4% de CKD como la mezcla asfáltica óptima para maximizar la estabilidad y durabilidad de las pavimentaciones. Esta proporción ha mostrado los mejores resultados de resistencia a la tracción, compresión y durabilidad frente a ciclos de humedad y secado. Se sugiere continuar evaluando esta mezcla en diversas condiciones de tráfico y clima para confirmar su efectividad a largo plazo, así como explorar la posibilidad de ajustar las proporciones de los componentes según los requisitos específicos de las infraestructuras viales en distintas regiones.

Cuarta: Aunque los resultados obtenidos en condiciones de laboratorio son prometedores, se recomienda llevar a cabo estudios adicionales a largo plazo y bajo condiciones para evaluar el comportamiento de estas mezclas optimizadas bajo el tráfico real y las variaciones climáticas. Las pruebas en campo permitirán validar los resultados obtenidos en laboratorio y proporcionarán una base más sólida para la implementación de estas mezclas en proyectos de pavimentación de gran escala.

Quinta: Es fundamental promover el uso de materiales reciclados, como la ceniza de lodo de papel (PSA) y el polvo de horno de cemento (CKD), en la industria de pavimentación. Esto no solo contribuye a una economía circular, sino que también reduce los costos de los materiales y la huella de carbono asociada con la producción de asfalto convencional. Se recomienda explorar otras combinaciones de materiales reciclados que

puedan mejorar aún más las propiedades de las MAF, con el objetivo de incorporarlas en proyectos de pavimentación sostenible y contribuir al desarrollo de infraestructuras viales más ecológicas y económicamente viables.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahumada, N. (2021). *Evaluación de una mezcla asfáltica fría fabricada con altos contenidos de RAP mediante un tramo de prueba a escala real en la Ciudad de Bogotá*. Bogota: [Doctoral dissertation, Universidad Santo Tomás]. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/35652>
- Arias, F. (2019). *Cómo hacer Tesis Doctorales y Trabajos de Grado: Investigación Científica y Tecnológica*. (1st ed.): Editorial Episteme.
- Arias, T., & Sarmiento, J. (2015b). Análisis y diseño vial de la avenida Mártir Olaya ubicada en el distrito de Lurín del departamento de Lima [Tesis de Pregrado. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/528141>
- Arroyo, A. (2020). *Metodología de la investigación en las ciencias empresariales*. . Universidad Nacional de San Antonio Abad Del Cusco.
- ASFALTOFARVIAS. (2024). *Mezcla asfáltica en frío o caliente ¿Cuál es mejor para tu proyecto?* Obtenido de <https://asfaltofarvias.com/>: <https://asfaltofarvias.com/mezcla-asfaltica-en-frio-o-caliente-cual-es-mejor-para-tu-proyecto/>
- Asphalt Institute. (2009). *Asphalt in pavement preservation and maintenance* (4th ed.). Asphalt Institute.
- Congreso de la República. (2000). *Ley N° 27314 - Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. SENACE.
- Congreso de la República. (2005). *Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente*. MINAMB.
- Congreso de la República. (2008). *Ley N° 29230 - Ley de Promoción de la Inversión en Infraestructura Pública y de Servicios Públicos*. Congreso de la República.

- Ducat, M., Quiñónez, K., & López, D. (2022). Responsabilidad Ambiental de una mina de agregados pétreos. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 10(2), 78-92.
<https://doi.org/10.17081/invinno.10.2.5704>
- Dulaimi, A., Al-Busaltan, S., Kadhim, M. A., Al-Khafaji, R., & Sadique, M. (2022). A sustainable cold mix asphalt mixture comprising paper sludge ash and cement kiln dust. *Sustainability*, 14(16), 10253.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su141610253>
- Dulaimi, A., Shanbara, H. K., & Al-Rifaie, A. (2020). The mechanical evaluation of cold asphalt emulsion mixtures using a new cementitious material comprising ground-granulated blast-furnace slag and a calcium carbide residue. *Construction and Building Materials*, 250, 118808.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118808>
- Espinoza, D., & Guayaquil, M. (2023). *Diseño de una mezcla asfáltica en frío utilizando RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado) obtenido del Aeropuerto de Quito, adicionando 2%, 3% y 4% de polvo de llanta de avión*. [Doctoral dissertation, PUCE-Quito]. Obtenido de <https://repositorio.puce.edu.ec/items/ea04c646-0b7e-44ab-afa9-dd3d049fd949>
- González, M., & Fernández, L. (2018). *Reciclaje de materiales: enfoques para el vidrio y plástico*. . Editorial Universitaria.
- Guerrero, G., & Guerrero, C. (2020). *Metodología de la investigación*. . Grupo Editorial Patria.
- Granadosa, J. (2018). Inventario de condición del pavimento flexible, carretera Casma - Huaraz del km 132+000 al km. 137+000 para el mantenimiento o conservación vial usando el manual del MTC - año 2016 [Tesis de Pregrado. Universidad Nacional

Santiago Antúñez de Mayolo].

<http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2769>

Hernández, J., Hernández, J., Horta, J., Montoya, R., & López, T. (2023). Diseño de mezcla asfáltica fría con rellenos cementantes ternarios para reducir la pérdida de estabilidad por humedad. *Infraestructura Vial*, 25(44), 18-27.
<https://doi.org/10.15517/iv.v25i44.55797>

IMMAC. (2020). *Mezclas Densas en Frio (INV. 440-13). Incorporando Material Reciclado de Pavimentos RAP*. Bogotá: IMMAC. Obtenido de <https://www.immac.co/wp-content/uploads/2020/09/MEZCLAS-ASFA%CC%81LTICAS-EN-FRIO-1.pdf>

Kong, L., Lu, Z., He, Z., Shen, Z., Xu, H., Yang, K., & Yu, L. (2022). Characterization of crack resistance mechanism of fiber modified emulsified asphalt cold recycling mixture based on acoustic emission parameters. *Construction and Building Materials*, 327, 126939.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126939>

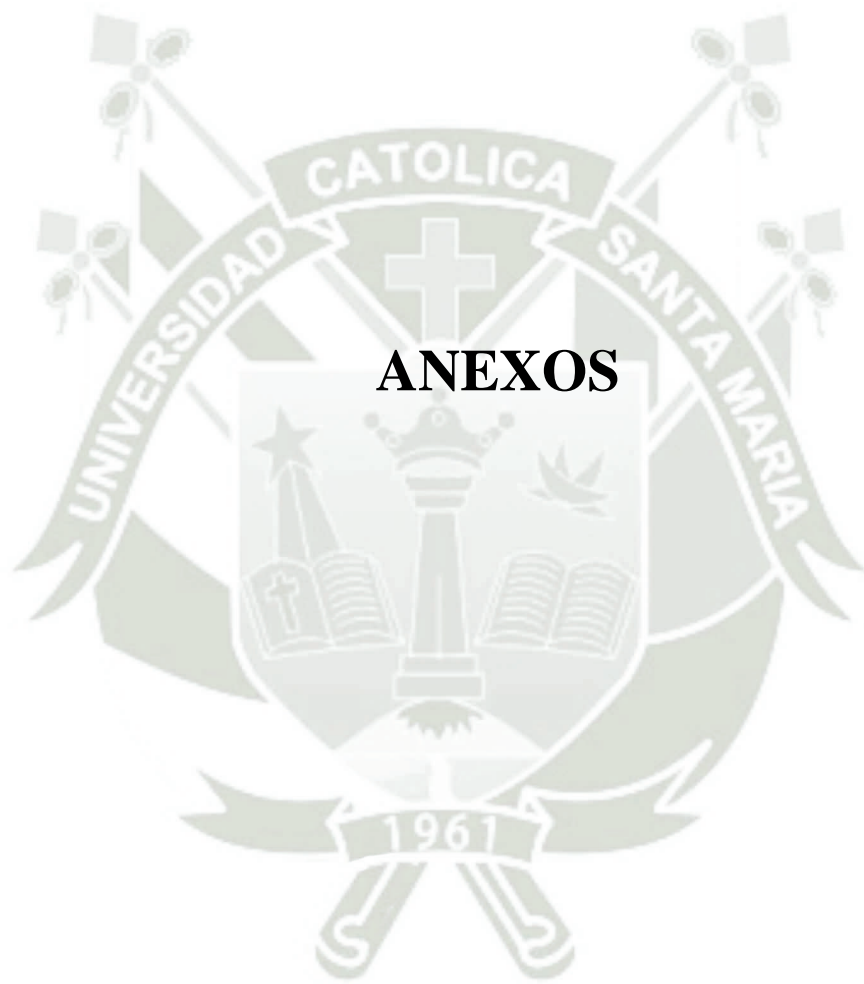
López, D., Bermúdez, A., & Mozo, Y. (2021). Auditoría ambiental de una empresa minera que explota agregados pétreos. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 9(1), 196-205. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8075520>

López, S., & Hernández, F. (2022). Impacto ambiental del reciclaje de neumáticos en la producción de nuevos materiales de construcción. *Journal of Environmental Management and Sustainability*, 6(4), 204-219.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jems.2022.03.004>

Martínez, C. (2015). Análisis del ciclo de vida de los pavimentos asfálticos. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*.
<https://doi.org/10.30798/makuiibf.323102>

- Martínez, P., & García, R. (2021). Uso de caucho reciclado en pavimentos asfálticos: Una revisión sistemática. . *Revista Latinoamericana de Ingeniería*, 57(2), 112-130.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/123456789.2021.1456789>
- Medina, A., & De La Cruz, M. (2015). Evaluación superficial del pavimento flexible del Jr. José Gálvez del distrito de Lince aplicando el método del PCI [Tesis de Pregrado. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas].
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/581505>
- MEF. (2015). *Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras*. Perú: Ministerio de Economía y Finanzas.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2010). *Norma Técnica CE 010 Pavimentos Urbanos*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2021). *Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Monsalve, L., Giraldo, L., & Maya, J. (2012). Diseño de pavimento flexible y rígido.
- MTC. (2009). *D.S. N° 019-2009-MTC - Reglamento de Protección Ambiental para el Sector Transportes*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC. (2013). *Normas de Especificaciones Técnicas Generales para Construcción (EG-2013)*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC. (2014). *Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos (SGGP-2014)*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC. (2018). *Manual de Carreteras: Diseño Geométrico (DG-2018)*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- MTC. (2018). *Manual de Carreteras: Mantenimiento o Conservación Vial (MCV-2014/2016)*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones .

- Pereyra, L. E. (2022). *Metodología de la investigación*. Klik.
- Phan, T. M., Kang, S. P., Vo, H. V., & Park, D. W. (2024). Evaluation on performances of cold asphalt mixture containing recycled waste glass and red mud. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03194>
- Rivera, J., Battista, N., & Ferrero, I. (2024). Mezcla Asfáltica en Frío con Piedra-Polimérica para Vías de Bajo Volumen de Tránsito. . *Revista Ingeniería De Obras Civiles*, 12(1), 1-8.
- Shanbara, H. K., Dulaimi, A., Al-Mansoori, T., Al-Busaltan, S., Herez, M., Sadique, M., & Abdel-Wahed, T. (2021). The future of eco-friendly cold mix asphalt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111318>
- Tapia, M. (2015). Pavimentos. *Revista Pavimentos*, 1(1).
- Torres, A., & Castillo, J. (2020). Innovaciones en el uso de plásticos y caucho reciclado para mejorar la infraestructura vial. . *Revista de Innovación en Materiales de Construcción*, 9(1), 45-60. <https://doi.org/https://doi.org/10.2917/rimc.2020.0105>
- Vélez, B., & Ruiz, W. (2022). Estudio de los agregados pétreos de las canteras de Manabí y la dosificación del hormigón en la construcción de viviendas de interés social. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 7(7), 1506-1522. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9042980>
- Wang, N., Chen, F., Ma, T., Luan, Y., & Zhu, J. (2022). Compaction performance of cold recycled asphalt mixture using SmartRock sensor. *Automation in Construction*, 140, 104377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104377>



Anexo 1. Base de datos

No.	Experimento	Experimento	Repetición	RC (MPa)	PRC (%)
1	Control 0% - 0%	1	1	2,00	30
2	Control 0% - 0%	1	2	1,96	31
3	Control 0% - 0%	1	3	2,04	29
4	Control 0% - 0%	1	4	2,00	30
5	Control 0% - 0%	1	5	2,00	32
6	PSA 3% - CKD 2%	2	1	2,17	22
7	PSA 3% - CKD 2%	2	2	2,21	23
8	PSA 3% - CKD 2%	2	3	2,17	21
9	PSA 3% - CKD 2%	2	4	2,13	22
10	PSA 3% - CKD 2%	2	5	2,17	21
11	PSA 6% - CKD 4%	3	1	2,33	18
12	PSA 6% - CKD 4%	3	2	2,38	19
13	PSA 6% - CKD 4%	3	3	2,33	17
14	PSA 6% - CKD 4%	3	4	2,29	18
15	PSA 6% - CKD 4%	3	5	2,33	19
16	PSA 6% - CKD 2%	4	1	2,25	20
17	PSA 6% - CKD 2%	4	2	2,29	21
18	PSA 6% - CKD 2%	4	3	2,25	19
19	PSA 6% - CKD 2%	4	4	2,25	20
20	PSA 6% - CKD 2%	4	5	2,25	19

Anexo 2. Ficha técnica de agregado: Piedra 1/2”


FICHA TÉCNICA AGREGADOS: PIEDRA 1/2 (HUSO 7)

PIEDRA 1/2 (HUSO 7) (AGREGADOS EMBOLSADOS)

Los materiales granulares, el cual puede ser arenas, piedras natural zarandeada o chancada. Adicional a ello, se emplea con un medio cementante para formar concreto o morteros. Dependiendo del diámetro medio de sus partículas se clasifican en agregados finos y gruesos.



APLICACIÓN Y USOS

El agregado de alta calidad de HDS es utilizado para la elaboración de todo tipo de productos prefabricados y pre moldeados de hormigón, sometidos a estrictos controles de calidad, así mismo son utilizados en la elaboración de concreto premezclado de alta calidad.

VENTAJAS

En las plantas de explotación de agregados de HDS se realizan procesos con los más altos estándares de calidad y control de calidad, manteniendo de esta manera una calidad permanente en toda la gama de agregados que son utilizados en la fabricación de productos de concreto y concretos premezclados.

CARACTERÍSTICAS

Los agregados de HDS son limpios y están exentos de exceso de arcillas, limo, mica, materia orgánica, sales químicas. Se ofrecen agregados con diversas granulometrías estandarizadas, según ASTM C33. Tanto para Arenas y Piedras según su Husos granulométricos.(Huso 67, Huso 7)


CONTROL DE CALIDAD

Los agregados de HDS son limpios y están exentos de exceso de arcillas, limo, mica, materia orgánica, sales químicas. Se ofrecen agregados con diversas granulometrías estandarizadas, según ASTM C33. Tanto para Arenas y Piedras según su Husos granulométricos.(Huso 67, Huso 7)

INFORMACIÓN TÉCNICA

TAMIZ	DIMENSIÓN	% QUE PASA
3/4"	19 mm	100
1/2"	12.5 mm	90 - 100
3/8"	9.5 mm	40 - 70
1/4"	6.35 mm	-
N° 4	4.75 mm	0 - 15
N° 8	2.36 mm	0 - 5

Descarga la ficha técnica escaneando este código QR



991 545 411
 ventas@hormigonerasdelsur.com

Calle Contralmirante Villar 342
Miraflores - Lima - Perú
 /HormigonerasDelSur

Anexo 3. Ficha técnica de agregado: Arena gruesa



FICHA TÉCNICA AGREGADOS: ARENA GRUESA

ARENA GRUESA

(AGREGADOS EMBOLSADOS)

Los materiales granulares, el cual puede ser arenas, piedras natural zarandeada o chancada. Adicional a ello, se emplea con un medio cementante para formar concreto o morteros. Dependiendo del diámetro medio de sus partículas se clasifican en agregados finos y gruesos.



APLICACIÓN Y USOS

El agregado de alta calidad de HDS es utilizado para la elaboración de todo tipo de productos prefabricados y pre moldeados de hormigón, sometidos a estrictos controles de calidad, así mismo son utilizados en la elaboración de concreto premezclado de alta calidad.

VENTAJAS

En las plantas de explotación de agregados de HDS se realizan procesos con los más altos estándares de calidad y control de calidad, manteniendo de esta manera una calidad permanente en toda la gama de agregados que son utilizados en la fabricación de productos de concreto y concretos premezclados.

CARACTERÍSTICAS

Los agregados de HDS son limpios y están exentos de exceso de arcillas, limo, mica, materia orgánica, sales químicas. Se ofrecen agregados con diversas granulometrías estandarizadas, según ASTM C33. Tanto para Arenas y Piedras según su Husos granulométricos.(Huso 67, Huso 7)

CONTROL DE CALIDAD

Los agregados de HDS son limpios y están exentos de exceso de arcillas, limo, mica, materia orgánica, sales químicas. Se ofrecen agregados con diversas granulometrías estandarizadas, según ASTM C33. Tanto para Arenas y Piedras según su Husos granulométricos.(Huso 67, Huso 7)

INFORMACIÓN TÉCNICA

TAMIZ	DIMENSIÓN	% QUE PASA
3/8"	9.5 mm	100
N° 4	4.75 mm	95 - 100
N° 8	2.36 mm	80 - 100
N° 16	1.18 mm	50 - 85
N° 30	600 um	25 - 60
N° 50	300 um	05 - 30
N° 100	150 um	0 - 10

Descarga la ficha técnica
escaneando este código QR




991 545 411


ventas@hormigonerasdelsur.com



Calle Contralmirante Villar 342
Miraflores - Lima - Perú



/HormigonerasDelSur

Anexo 4. Boleta de compra de emulsión asfáltica

ASFALTOS KACSOL CACSIRE OSORIO KATHERINE LIZBETH CAL. CARACAS 133 URB. EL PARRAL CRUCE AV MEXICO CON UNIVERSITARIA COMAS - LIMA - LIMA		BOLETA DE VENTA ELECTRONICA RUC: 10472380490 EB01-49				
Fecha de Vencimiento : 14/01/2025 Fecha de Emisión : 14/01/2025 Señor(es) : RENATA MICHELLE LUZA PORTILLA DNI : 73023934 Tipo de Moneda : SOLES Observación :						
Cantidad	Unidad Medida	Descripción	Valor Unitario(*)	Descuento(*)	Importe de Venta(**)	ICBPER
3.00	UNIDAD	GLNS DE BITUMEN	28.2485876	0.00	100.000000104	0.00
						Otros Cargos : S/ 0.00 Otros Tributos : S/0.00 ICBPER : S/ 0.00 Importe Total : S/100.00
						SON: CIENTO Y 00/100 SOLES
(*) Sin impuestos. (**) Incluye impuestos, de ser Op. Gravada.		Op. Gravada : S/ 84.75 Op. Exonerada : S/ 0.00 Op. Inafecta : S/ 0.00 ISC : S/ 0.00 IGV : S/ 15.25 ICBPER : S/ 0.00 Otros Cargos : S/ 0.00 Otros Tributos : S/ 0.00 Monto de Redondeo : S/ 0.00 Importe Total : S/ 100.00				
Esta es una representación impresa de la Boleta de Venta Electrónica, generada en el Sistema de la SUNAT. El Emisor Electrónico puede verificarla utilizando su clave SOL, el Adquirente o Usuario puede consultar su validez en SUNAT Virtual: www.sunat.gob.pe , en Opciones sin Clave SOL/ Consulta de Validez del CPE.						



Anexo 5. Certificado de emulsión asfáltica

50 AÑOS DE EXPERIENCIA
ESPECIALISTAS EN PAVIMENTACIÓN, ASFALTOS EMULSIONADOS, MODIFICADOS CON POLÍMEROS Y OBRAS EN GENERAL

EMULSIÓN CATIONICA DE RUPTURA LENTA
CSS – 1H

INFORME DE ENSAYO N° 266 - 2021 – CAH LABCALIDAD

DATOS GENERALES					
CLIENTE :	CONSORCIO PUCARA	FECHA DE PRODUCCION :	15/09/2021		
		FECHA DE ENSAYO :	16/09/2021		
		LOTE N° :	EM115-09-2021		

ENSAYOS SOBRE LA EMULSION	METODO ASTM	UNIDADES	ESPECIFICACIONES		RESULTADO
			MINIMO	MAXIMO	
VISCOSIDAD SAYBOLT FUROL 25°	D 7496	ssf	20	100	24
ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO, 24 horas	D 6930	%	---	1	0.3
DESTILACION	D 6997	---			
- CONTENIDO DE ASFALTO RESIDUAL		%	57	---	60.8
- CONTENIDO DE DISOLVENTE	D 6997	%	---	---	0.0
PRUEBA DEL TAMIZ N° 20	D 6933	%	---	0.1	0.01
CARGA DE PARTICULA	D 7402	---	POSITIVO		POSITIVO


ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO DE LA EMULSION					
PENETRACION, 25° 100 g, 5 s					
DUCTILIDAD, 25°C, 5 cm/min					
SOLUBILIDAD DE TRICLOROETILENO					

* El producto cumple con las especificaciones ASTM d 2397-17

OBSERVACIONES:

- * Para largos periodos de almacenamiento se recomienda recircular la emulsión por lo menos una vez por semana
- * Almacenar la emulsión de acuerdo a lo indicado por el Manual básico de emulsiones asfálticas **MS-19**.
- * PE : 1.00

Original: cliente
Copia 1: área despacho
Copia 2: área laboratorio




CAH CONTRATISTAS GENERALES S.A.
Miguel Goña Durand
Tecnico de Laboratorio

Fecha de Emisión: Lima, 17 de septiembre del 2021

Edición: Febrero 2019, Versión 02
El presente documento concierne única y exclusivamente a la muestra sometida a ensayo y al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones, queda terminantemente prohibido a la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización expresa por escrito por CAH Contratistas Generales S.A, asimismo la empresa no se responsabiliza por los daños o pérdidas ocasionadas por el uso inadecuado del producto.

Planta de Emulsiones Asfálticas y Asfaltos Modificados con Polímeros
Callao: calle 4-5, Urb. Grimaneza Mz C, Lt 5 --- Telfs: 5722457 – 717-7388 Anexo Lab. 108-106 Nextel: 994016905


Anexo 6. Ficha técnica de emulsión asfáltica

	FICHA TECNICA Emulsión Asfáltica Catiónica Tipo Superestable CSS-1H	Código : BP-CSS-1H Revisión : Mayo 2013 Rvdo. por : Lab. Central Página : 1 de 1																									
	<p>Emulsión Catiónica de Rotura Lenta CSS-1H, que tiene muy buena habilidad para mezclar con un agregado, es decir el asfalto demora un buen tiempo en sufrir coalescencia. Esta emulsión esta dentro de la clasificación de las LENTAS. permitiendo alcanzar una buena trabajabilidad. Estas emulsiones están diseñadas para reaccionar lentamente con el agregado y revertir del estado de emulsión al de asfalto.</p> <p>Aplicaciones</p> <p>Slurry Seal, mezclas densas, estabilizaciones, riegos de liga, etc.(previa recomendación del proveedor)</p> <p>CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS</p> <table> <tr> <td>Composición</td> <td>:</td> <td>Asfalto y agua</td> </tr> <tr> <td>Color</td> <td>:</td> <td>Marrón oscuro</td> </tr> <tr> <td>Aspecto</td> <td>:</td> <td>Líquido viscoso</td> </tr> <tr> <td>Gravedad específica a 20 °C</td> <td>:</td> <td>0.95</td> </tr> </table> <p>ESPECIFICACIONES ASTM D 2397</p> <table> <tr> <td>Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C, s</td> <td>20 – 100</td> </tr> <tr> <td>Sedimentación, 5 días, %</td> <td>5.0 % máx.</td> </tr> <tr> <td>Estabilidad almacenamiento 24 hrs., %</td> <td>1.0 % máx.</td> </tr> <tr> <td>Tamizado, %</td> <td>0.1 % máx.</td> </tr> <tr> <td>Residuo asfáltico, %</td> <td>57 % mín.</td> </tr> </table> <p>Prueba sobre el residuo de ensayo de destilación:</p> <table> <tr> <td>Penetración, 25 °C, 100 mg, 5 s (1)</td> <td>40 - 90</td> </tr> <tr> <td>Ductilidad, 25 °C, 5 cm./min., cm.</td> <td>40 mín.</td> </tr> </table> <p>(1) La penetración cambia al variar el tipo de PEN</p> <p>ALMACENAMIENTO</p> <p>Se almacena en cisternas o cilindros metálicos a una temperatura de 10 °C a 60 °C</p>		Composición	:	Asfalto y agua	Color	:	Marrón oscuro	Aspecto	:	Líquido viscoso	Gravedad específica a 20 °C	:	0.95	Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C, s	20 – 100	Sedimentación, 5 días, %	5.0 % máx.	Estabilidad almacenamiento 24 hrs., %	1.0 % máx.	Tamizado, %	0.1 % máx.	Residuo asfáltico, %	57 % mín.	Penetración, 25 °C, 100 mg, 5 s (1)	40 - 90	Ductilidad, 25 °C, 5 cm./min., cm.
Composición	:	Asfalto y agua																									
Color	:	Marrón oscuro																									
Aspecto	:	Líquido viscoso																									
Gravedad específica a 20 °C	:	0.95																									
Viscosidad Saybolt Furol a 25 °C, s	20 – 100																										
Sedimentación, 5 días, %	5.0 % máx.																										
Estabilidad almacenamiento 24 hrs., %	1.0 % máx.																										
Tamizado, %	0.1 % máx.																										
Residuo asfáltico, %	57 % mín.																										
Penetración, 25 °C, 100 mg, 5 s (1)	40 - 90																										
Ductilidad, 25 °C, 5 cm./min., cm.	40 mín.																										

Anexo 7. Ensayos de Materiales Asfálticos - Fichas Técnicas

N°	Ensayo	Norma técnica aplicada	Objetivo del ensayo	Descripción del procedimiento
1	Solidez con sulfato de magnesio	MTC E-214 / ASTM C88	Evaluar la resistencia del agregado al desintegramiento tras ciclos de inmersión en sulfato y secado.	Sumergir agregados en solución de sulfato de magnesio por 16–18 h, secar, repetir por 5 ciclos, y calcular pérdida de masa.
2	Angularidad de agregado fino	MTC E-216 / ASTM C1252	Medir el grado de angulosidad de los agregados finos que influye en la adherencia con el ligante.	Verter agregado en recipiente, medir volumen aparente y comparar con estándar para calcular índice de angularidad.
3	Determinación de partículas chatas y alargadas	MTC E-223 / ASTM D4791	Identificar partículas con forma chata o alargada que pueden afectar la compactación y resistencia.	Medir largo y espesor de partículas, clasificar como chatas/alargadas si $L/e \geq 3:1$, calcular porcentaje.
4	Resistencia a la tracción indirecta (ITS)	MTC E-754 / ASTM D6931	Determinar la resistencia diametral de la mezcla asfáltica a esfuerzos de tracción.	Aplicar carga diametral a muestra cilíndrica hasta falla, calcular ITS con fórmula estándar.
5	Resistencia a la compresión	ASTM D1074 (adaptación MTC)	Evaluar la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir cargas verticales de compresión.	Aplicar carga axial a muestra cilíndrica compactada hasta el fallo, y calcular resistencia con carga y área.

Anexo 8. Constancia de uso de laboratorio UCSM



**Universidad Católica
de Santa María**

(51 54) 382038 <http://www.ucsm.edu.pe> facebook.com/ucsm.edu.pe/

CONSTANCIA
ID-011965

El que suscribe, **Mgter. Ing. RUBEN FRANCISCO GAMARRA TUCO**, Coordinador de los Laboratorios FAICA, de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa.

HACE CONSTAR
Que el (los) Señor(es) Bachiller(es) en Ingeniería Civil:

RENATA MICHELLE LUZA PORTILLA	(DNI - 73023934)
SHIRLY BEATRIZ TORRES SALINAS	(DNI - 72265422)

Han realizado los ensayos en los Laboratorios de Ingeniería Civil, correspondientes a su trabajo de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, con la tesis denominada:

“OPTIMIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS FRÍAS CON RELLENOS CEMENTANTES TERNARIOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD ANTE LA HUMEDAD”


Los ensayos efectuados en el laboratorio se detallan en el Anexo 1 del presente, se llevaron a cabo del 04/12/2024 al 31/01/2025 y ampliación del 15/04/2025 al 30/04/2025.

El total resultante según el tarifario 2024 como DERECHO USO LABORATORIO POR TESIS, se categoriza con descuento en la **opción “2”**, de acuerdo a la autorización de la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil se dispone:

USO DE EQUIPOS TESIS		TOTAL A PAGAR POR TESIS S/	COMPROBANTE DE PAGO
TOTAL RESULTANTE S/	OPCIÓN “2” COSTO DE ENSAYOS POR TESIS ENTRE S/ 500.00 A S/ 1500,00 SE COBRA	500.00	B017-00003323
948.00	S/ 500.00		

Se expide la presente constancia para los fines convenientes.

Arequipa, 05 de junio del 2025.



Mtro. Rubén Francisco Gamarra Tuco
Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil y del Ambiente
Urb. San José s/n Uthacollo, Arequipa - Perú
[WWW.UCSM.EDU.PE](http://www.ucsm.edu.pe)



Universidad Católica
de Santa María

AREQUIPA-PERÚ

(51 54) 362036 <http://www.ucsm.edu.pe> [facebook.com/ucsm.edu.pe/](https://www.facebook.com/ucsm.edu.pe/)

ANEXO 1


ITEM	ENSAYO	CANT.	C.U. al 25%	PARCIAL S/
ENSAYOS EN AGREGADOS				
1	Abrasión Los Ángeles (L.A.) al Desgaste de los Agregados de Tamaños Menores a 1 1/2"	3	28.00	84.00
2	Análisis Granulométrico de Agregados Finos - Incluye Módulo de Fineza	10	10.00	100.00
3	Análisis Granulométrico de agregado grueso	6	10.00	60.00
4	Angularidad del Agregado Fino	3	13.00	39.00
5	Contenido de Impurezas Orgánicas	3	12.00	36.00
6	Durabilidad al Sulfato de Magnesio en Agregado Fino	3	63.00	189.00
7	Caras Facturadas	3	30.00	90.00
8	Partículas Chatas y Alargadas	3	20.00	60.00
9	Valor Equivalente de Arena en Agregado Fino	3	30.00	90.00
ENSAYOS EN MEZCLAS ASFÁLTICAS				
10	Ensayo en equipo Marshall, carga diametral y deformación en probeta cilíndrica	4	35.00	140.00
11	Moldeado de mezcla asfáltica	4	15.00	60.00
			TOTAL	948.00



Mtro. Rubén Francisco Gamarra Tuco
Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil y del Ambiente
Urb. San José s/n Umaccillo, Arequipa - Perú
www.ucsm.edu.pe



Anexo 9. Boleta de facturación para uso de laboratorio UCSM



**Universidad Católica de
Santa María**
RUC 20141637941


Centro de Servicios Generales Ing. Civil
Calle Cayetano Arenas N° 152 Parque Ind.
Arequipa - Arequipa - Arequipa

BOLETA DE VENTA ELECTRONICA
Número B017 - 00003323
Fecha 2025/06/05 15:00:19

Cant.	Descripción	P.Total
1.00	USO EQUIPOS: TESIS DE INVESTIGACION	500.00
SON: QUINIENTOS CON 00/100SOLES		500.00

Cliente : LUZA PORTILLA, RENATA SHIRLEY
DNI : 73023934
Dirección : CALLE GRAU N°5 - CHARACATO -
AREQUIPA

Condiciones : CONTADO
Forma pago : EFECTIVO



vF3qTQu16PcwNxaBrBi1xBszlXg=

Punto:PIND2 Operador:29638314

Somos Agentes de Retención RS. 228-2012 SUNAT
Cta.Cte. S/ 215-0075832-0-95 BCP
Cta.Interbancaria S/ 002-215-000075832095-26
Cta.Detracciones S/ 00-101-067009 B.NACION

Esta es una representación impresa de la BOLETA DE VENTA ELECTRONICA generada desde el sistema facturador SUNAT. Puede verificarla utilizando su clave SOL

Anexo 10. Panel de evidencias fotográficas del trabajo en laboratorio

Probetas testigo con diferentes porcentajes de rellenos cementicios ternarios:



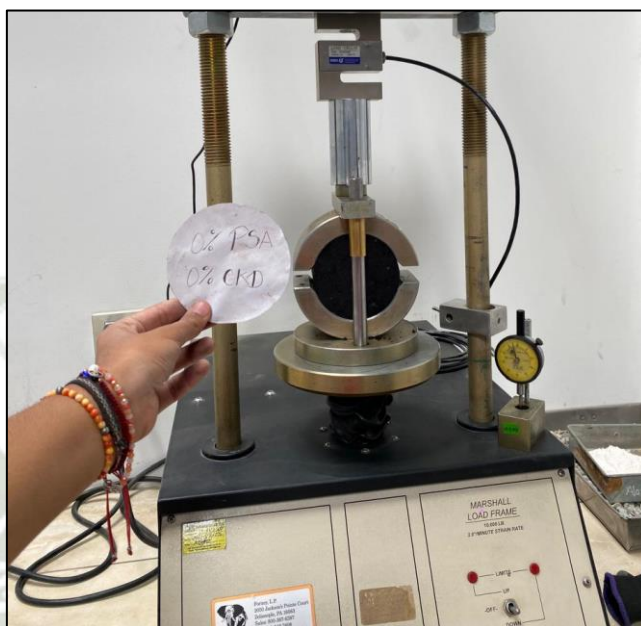
Elaboración de probetas:



Compactado de muestra:



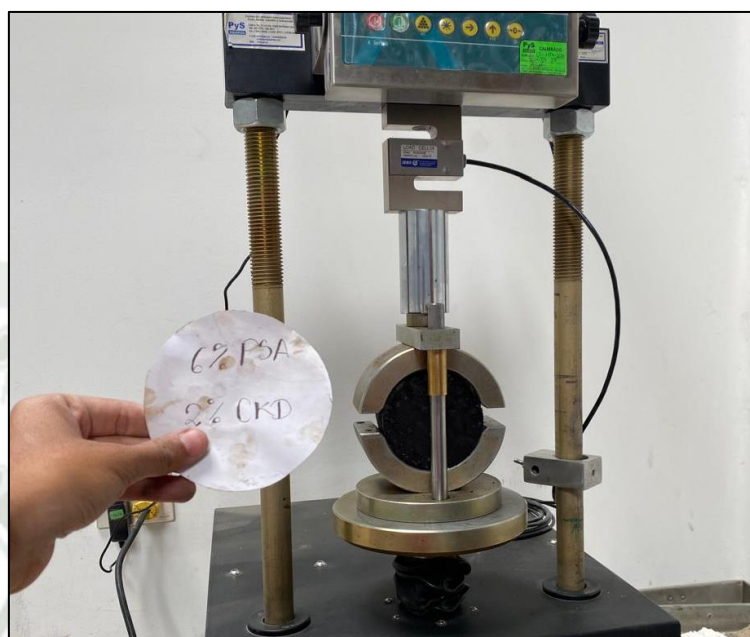
Prueba de compresión para una muestra 0% PSA – 0% CKD:



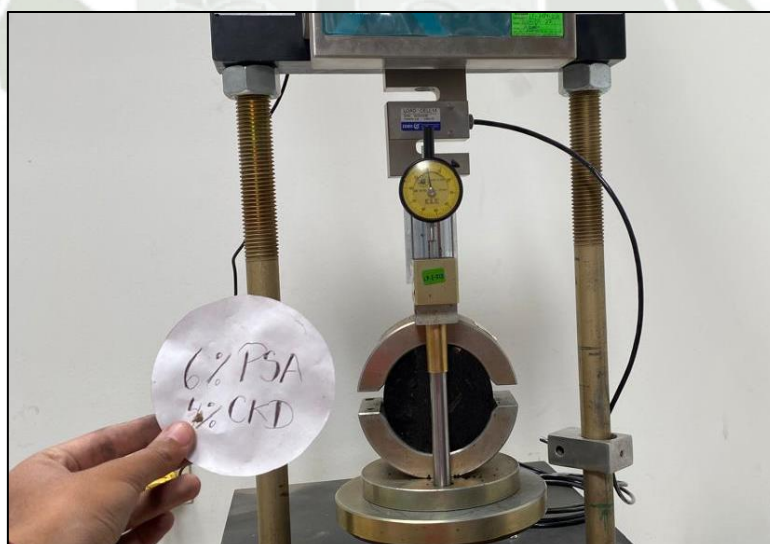
Prueba de compresión para una muestra 3% PSA – 2% CKD:



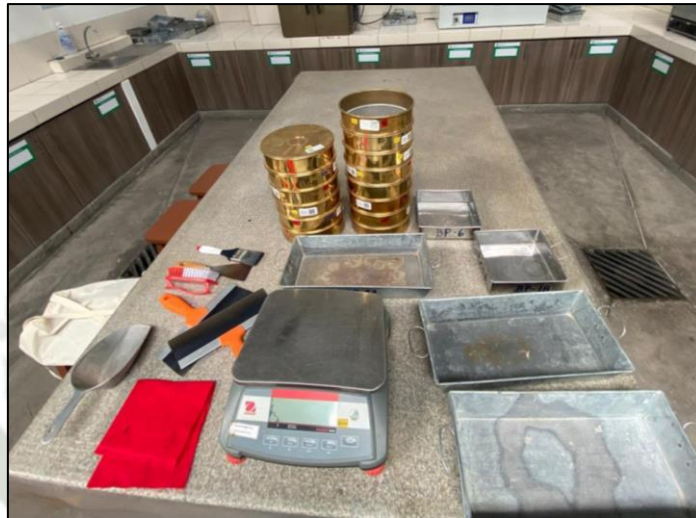
Prueba de compresión para una muestra 6% PSA – 2% CKD:



Prueba de compresión para una muestra 6% PSA – 4% CKD:



Ensayos de los agregados pétreos:
Granulometría de los pétreos:



Preparamos la alícuota de una nuestra muestra representativa



Tamices dispuestos en pila, de mayor a menor tamaño de malla



Proceso de vibrado de partículas:



Pesaje de muestras retenidas por tamiz:



Desgaste de los ángeles



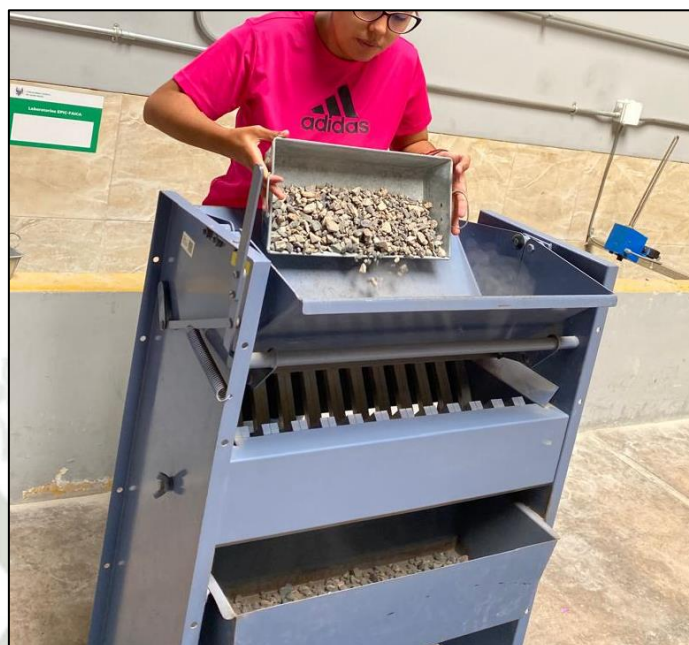
Rotación del tambor:



Muestreo del material sometido al desgaste del tambor:



Cuarteo mecánico:



Identificación de partículas chatas/ Alargadas:



Prueba en agregado grueso:



Ensayo de sedimentación de agregado fino:



Prueba de absorción para agregado grueso:



Pesaje de agregado grueso luego de absorción:



Tamizado y pesaje de agregados finos:



Pasante de la malla 200:



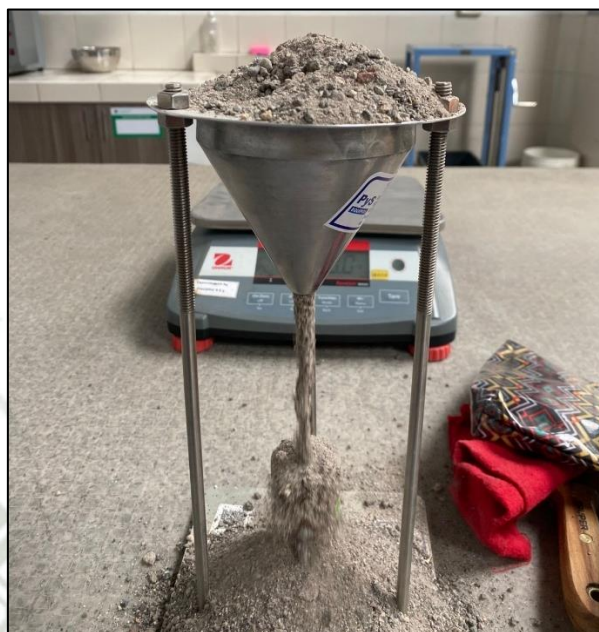
Tamizado y pesaje de agregados finos:



Ensayo de fluidez del agregado fino:



Ensayo de fluidez del agregado fino:



Pesaje del material:

